

## oEA TÜRÜ BİR ÇİFT SİSTEM: BG PEG

Esin Soydugan<sup>1,2\*</sup>, Faruk Soydugan<sup>1,2</sup>, T. Şenyüz<sup>2</sup>, ve Filiz Kahraman<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Fizik Bölümü, Çanakkale

<sup>2</sup> Çanakkale Onsekiz Mart Üni., Astrofizik Araştırma Merkezi ve Gözlemevi

**Özet** Bu çalışmada  $\delta$  Scuti bileşenli klasik Algol BG Peg'in yeni fotometrik gözlemleri sunulmaktadır. B ve V filtrelerindeki ışık eğrilerinin çözümüyle, bileşenlerin geometrik ve fiziksel parametreleri bulundu ve her bir ışık eğrisine ilişkin kuramsal eğriler oluşturuldu. Çiftten kaynaklanan yakınlık etkileri (yansıma, basıklık, tutulma etkileri) hesaplanan kuramsal eğrilerden, farkların alınmasıyla ortadan kaldırıldı. Artık verilere, frekans analizi yapılarak, BG Peg'in sıcak bileşeninin 0.039 and 0.047 gün dönemli iki modla zonklama gösterdiği bulundu. Zonklayan bileşenin bulunan modlara göre, küresel harmonik derecesi ( $l=2$ ) olarak hesaplandı. Buna göre, BG Peg'in sıcak bileşeni çapsal olmayan (non-radial) zonklama göstermektedir. Toplam zonklama genliği  $0^m.045$ 'dir. Ayrıca sistemin, yörünge dönemi değişimi de incelendi. O-C analizi azalan bir parabolik değişim göstermektedir. Bu azalma miktarı oramı yüzyıl başına saniyede  $-5.5$ 'tir. Bu değişim soğuk bileşenin manyetik aktivitesinden kaynaklanabilir. Sinüs benzeri değişimlerin nedeni de, sistemin çevresinde bulunan ve görünmeyen bir bileşen nedeniyle olabilir.

### 1 Giriş

BG Peg (SVS 286), 1.952443 gün yörünge dönemli Algol türü bir çift sistemdir. Sistemin toplam parlaklığı V filtresinde,  $10^m.50$ 'dir (Samus et al., 2003). Brancewicz ve Dworak (1980), Svechnikov ve Kuznetsova ve Budding ve ark. (2004) yaklaşık olarak, bu sistemin salt parametrelerini ve sistemin baş bileşeninin tayf türünü A2 olarak vermişlerdir. Sistemin baş minimum derinliği,  $1^m.10$ 'dir (Malkov, 2006). Soydugan ve diğ. (2006) tarafından bu sistemin sıcak bileşeni zonklamaya aday sistemler arasında gösterilmiştir. 2009 yılında BG Peg'in sıcak bileşeninin zonklamadan kaynaklanan parlaklık değişimleri gösterdiği Soydugan ve diğ. (2009) tarafından literatürde duyurulmuştur. Dworak (2009), içerisinde BG Peg'in de bulunduğu dört tane Algol türü çift sistemin sıcak bileşeninde  $\delta$  Scuti türü değişim belirledi. Sistemin ilk fotometrik çalışması Soydugan ve ark. (2011) tarafından yapılmıştır.

Bu çalışmada, yapılan fotometrik gözlemler bölüm 2'de, sistemin yörünge dönemi değişimi bölüm 3'te, ışık eğrisi çözümü ve sıcak bileşenin frekans analizi sırasıyla bölüm 4 ve 5'te, bulunan sonuçlar ve yorumlanması ise, son bölümünde yer almaktadır.

\* esoydugan@comu.edu.tr

## 2 Fotometrik Gözlemler

BG Peg 2008 gözlem sezonunda Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Gözlemevi'nde 13 gece ve yaklaşık olarak 56 saat gözlemlendi. TYC 1698-1052 ( $V_T = 10^m.98$ ) and TYC 1698-1142 ( $V_T = 12^m.18$ ) gözlemlerde sırasıyla mukayese ve denet yıldızı olarak seçildi. Gözlemler süresince B ve V filtrelerinde sırasıyla 1476 ve 1518 gözlem noktası elde edildi. Gözlem duyarlılığı her iki filtre için  $\pm 0^m.01$ 'dir. Işık eğrisini evrelendirmek için, kullanılan  $T_0 = 24\ 54749.4466$  (bu çalışmada elde edilen minimum zamanı),  $P_b = 1.952441$  (Kreiner; 2004)'dir.

## 3 Yörünge Dönem Analizi

Yörünge dönem analizinde kullanılan veri, Kreiner ve ark. (2001)'dan alındı. BG Peg'in yapılan gözlemlerinden bir minimum zamanı elde edildi. Bu veri de dönem analizinde kullanıldı.

80 minimum zamanı (55 görsel, 6 fotogörsel, 4 fotoğrafik, 2 fotoelektrik ve 13 CCD) 1931-2009 zaman aralığını kapsamaktadır. Dönem analizinde, Şekil 1a'da elips içerisinde kalan 14 görsel minimum zamanı, hatalı olduğu için kullanılmamıştır. O-C artıklarını hesaplamak için kullanılan doğrusal ışık elemanları Kreiner ve ark. (2001) tarafından hazırlanan O-C Atlasından alındı:

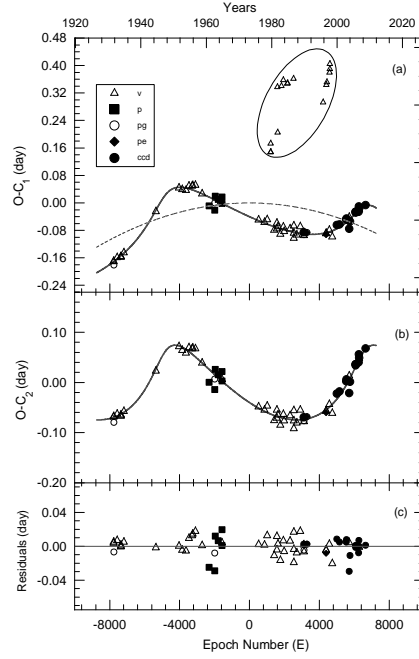
$$MinI(HJD) = 2441764.011 + 1.952444 \times E \quad (1)$$

**Tablo 1.** BG Peg'in O-C analizinden elde edilen parametre değerleri.

Parametre	Değer	Standart sapma
$T_0$ (HJD)	2441764.0205	0.0075
$P_{orb}$ (days)	1.952404	$1 \times 10^{-6}$
Q (days)	$-1.7 \times 10^{-9}$	$2 \times 10^{-10}$
$a_{12} \sin i'$ (AU)	14.0	0.3
$e'$	0.53	0.04
$\omega'$ (deg)	223	5
$T_3$ (HJD)	2443193	237
$P_3$ (year)	60.8	1.2

O-C analizinde görsel veri 1, fotogörsel veri 2, fotoğrafik veri 3, fotoelektrik veri 8 ve CCD verisi 10 ağırlıkta kullanıldı. BG Peg'in O-C artıkları Şekil 1a'dan görüldüğü gibi parabolik ve çevrimsel değişim göstermektedir. Çevrimsel değişimin nedeni sistemde görülmeyen olası bir üçüncü cismin varlığı olabilir. Buna göre O-C verisi üçüncü cisim denklemi parabolik terim kullanılarak analiz edildi (bkz. Soyduğan ve ark., 2011). Bulunan sonuçlar Tablo 1'de verilmektedir. Üçüncü cismin yörünge dönemi  $61 \pm 1$  yıl ve yörüngesinin yarı büyük eksen uzunluğu ise  $14.0 \pm 0.3$  AB olarak bulunmuştur. Görünmeyen bileşenin kütle

fonksiyonu ise  $f(m_3) = 0.740 \pm 0.054 M_\odot$  olarak hesaplandı. 90, 70 ve 50 derecelik farklı yörünge eğikliği için, olası üçüncü cismin kütlesi 0.77, 0.92 ve  $1.67 M_\odot$  olarak bulundu. BG Peg'in parabolik değişiminden kaynaklanan dönemdeki azalma miktarı ise  $dP/dt = -3.3 \times 10^{-7} \text{ yıl}^{-1}$  olarak hesaplandı (bkz. Soyduğan ve ark., 2011).



Şekil 1. BG Peg'in O-C değişimi ve teorik eğri fitleri a) Aşağı parabol üzerine binmiş sinüslü temsili b) Parabolden olan farklar c) En iyi kuramsal fitten kalan artıklar .

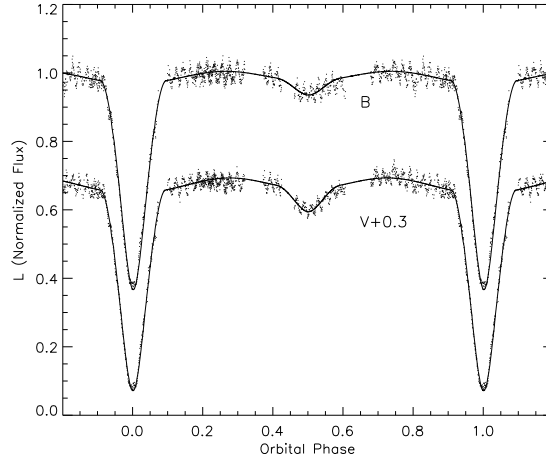
#### 4 Işık Eğrisi Çözümü

BG Peg'in baş bileşeninin zonklama özelliklerini ortaya koyabilmek için, tutulma ve yakınlık etkilerini (yansıma, basıklık) gözlemlerden çıkarmak üzere kuramsal ışık eğrileri oluşturuldu. Kuramsal ışık eğrileri, Wilson & Devinney (W-D) programının (Wilson & Devinney, 1971) 2003 sürümü (van Hamme & Wilson 2003) ile hesaplandı.

Bu çalışmada, sistemin ışık eğrisi çözümünde ayırık ve yarı-ayırık yaklaşım olmak üzere iki farklı çözüm denendi. Sistemin bileşenlerinin potansiyel değerlerine göre; literatürde de belirtildiği gibi, sistemin yarı-ayırık olduğuna karar verilerek, çözümlerde yarı-ayırık yaklaşım kullanıldı.

**Tablo 2.** BG Peg'in ışık eğrisi çözümünden elde edilen parametre değerleri.

Parametre	B	V	B&V
$i$ (deg)	83.2(2)	83.9(2)	83.2(1)
$T_1$ (K)	8770	8770	8770
$T_2$ (K)	5271(200)	5125(200)	5155(200)
$\Omega_1$	3.643(37)	3.557(29)	3.638(23)
$\Omega_2$	2.304	2.284	2.313
Phase shift	+0.0021(1)	+0.0012(1)	+0.0012(1)
$q$ ( $=M_2/M_1$ )	0.229(4)	0.219(4)	0.233(3)
$l_3$	0.0	0.0	0.0
$e$	0.0	0.0	0.0
$x_1$	0.761	0.660	0.761(B), 0.660(V)
$x_2$	0.852	0.800	0.852(B), 0.800(V)
$g_1$	1.0	1.0	1.0
$g_2$	0.32	0.32	0.32
$L_1 / (L_1 + L_2)$	0.956	0.931	0.962(B), 0.924(V)
$L_2 / (L_1 + L_2)$	0.044	0.069	0.038(B), 0.076(V)
$r_1$ (ort)	0.298(3)	0.303(3)	0.297(2)
$r_2$ (ort)	0.259(1)	0.256(1)	0.260(1)



**Şekil 2.** BG Peg'in B ve V filtrelerindeki ışık eğrilerinin kuramsal eğrilerle uyumu.

Çözüm sırasında bazı parametreler sabit bazıları da ayarlanabilir parametre olarak kabul edildi. Baş bileşenin sıcaklığı, A2 tayf türüne karşılık 8770 K olarak kabul edildi (Popper, 1980). Bolometrik albedolar ( $A_{1,2}$ ) radyatif atmosferler (baş bileşen) için 1.0 ve konvektif atmosferler (yoldaş bileşen) için 0.5 olarak

Rucinski (1969)'den seçildi. Kenar kararına katsayıları ( $g_{1,2}$ ) rad-yatıf atmosferler için 1.0 olarak von Zeipel (1924)'den ve konvektif atmosferler için 0.32 olarak Lucy (1967)'den alındı. Klasik Algoller'in evrim durumlarından beklendiği üzere, sistemin dairesel yörüngede ( $e=0$ ) olduğu varsayıldı. Baş ve yoldaş bileşenin eş zamanlı dönme gösterdiği kabul edilerek dönme parametreleri ( $F_h = F_c$ ) 1 olarak kabul edildi. Tablo 2'de hataları ile verilen parametreler çözüm sırasında serbest bırakılırken, diğer parametreler ise sabit olarak alındı (Soydugan ve ark., 2011).

Çözümdeki iterasyonlar, serbest parametrelere ilişkin düzeltme değerlerinin hata değerlerinden daha küçük olmasına kadar devam ettirildi. B ve V filtrelerindeki ışık eğrilerinin ayrı ayrı ve eş-zamanlı çözümünden elde edilen sistem ve bileşen parametreleri Tablo 2'de verilmektedir. Tablodaki çözüm parametreleri ile oluşturulan kuramsal eğrilerle, B ve V filtrelerinde elde edilmiş normalize ışık eğrileri Şekil 2'de gösterilmektedir.

## 5 Frekans Analizi

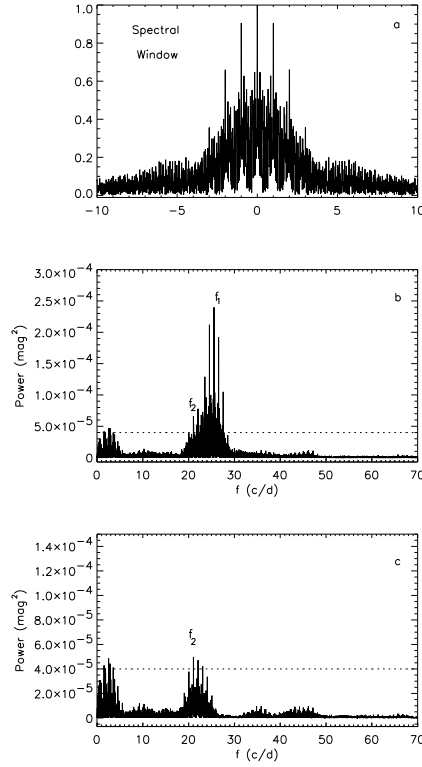
BG Peg'in örten çift olma özelliğinden yararlanılarak sistem ve bileşene ilişkin bazı parametreleri elde edilmiş ve çift özelliğinden kaynaklanan ışık değişimleri modellenmiştir. Frekans analizine başlamadan önce oluşturulan bu kuramsal eğrilerle gözlem noktalarının farkları alınarak çift olmadan kaynaklanan etkiler ortadan kaldırılmış ve sadece sıcak bileşenin zonklamasından kaynaklanan değişimler elde edilmiştir. B ve V filtreleri için oluşturulan bu fark değerleri, frekans analizi yapmak üzere; PERIOD04 (Lenz & Breger 2005) programında kullanıldı. Buna göre, BG Peg'in sıcak bileşeni V filtresinde iki modla zonklamaktadır. Frekans değerleri  $f = 25.54$  c/d and  $f = 21.05$  c/d'dir. B filtresinde de aynı frekans değerleri elde edilmiştir. Breger ve ark. (1993)'nin koyduğu ölçüte göre ( $S/N \geq 4$  olan tüm frekanslar anlamlıdır. B filtresinde, ikinci frekansın S/N oranı 3.89'dur. Bu nedenle anlamlı kabul edilmemiştir.

En yüksek pik 25.54 c/d (yaklaşık 56 dakika) ve bu frekans değerine karşılık zonklama genliği B ve V filtrelerinde sırasıyla  $0^m.036$  ve  $0^m.031$ 'dir. Baskın frekans arandırdıktan sonra, artıklara ikinci bir frekans analizi yapılmış, 21.05 c/d'lik (yaklaşık 68 dakika) bir frekans değeri elde edilmiştir. Bu frekans değeri duyarlılık sınırının üzerinde kaldığından anlamlı olarak kabul edilmiştir. İkinci frekans arandırdıktan sonra artıklara bir kez daha frekans analizi yapılmış bulunan 2.83 c/d'lük frekans değeri,  $\delta$  Scuti yıldızlarının frekans aralığında bulunduğu için anlamlı olarak kabul edilmemiştir.

Tablo 3, B ve V filtreleri için, frekans analizinden elde edilen parametre değerleri içermektedir. Toplam zonklama genliği V filtresinde  $0^m.45$ 'dir. Kuschnig ve ark. (1997)'na göre V filtresinde birinci ve ikinci frekanslar için, duyarlılık sınırı %99.9'dur. B filtresindeki ikinci frekans değeri için bu değer daha düşüktür. Frekans analizinden elde edilen sonuçlar kullanılarak V filtresi için tayfsal pencere (spectral window) ve güç tayfı (power spectrum) duyarlılık sınırı ve temel frekans arandırdıktan sonra artıklara çizilen güç tayfı ve duyarlılık sınırı sırasıyla Şekil 3a,b ve c'de gösterilmektedir.

**Tablo 3.** BG Peg'in baş bileşeninin zonklama özellikleri.

Filtre	Frekans (c/d) <sup>-1</sup>	Yarı Genlik (mag)	Evre (rad)
B	25.5438±0.0004	0.0180±0.0006	0.5398±0.0049
	21.0553±0.0009	0.0079±0.0006	0.3426±0.0107
V	25.5438±0.0004	0.0153±0.0005	0.5514±0.0050
	21.0553±0.0009	0.0072±0.0005	0.3187±0.0107



**Şekil 3.** a) Tayfsal pencere b)güç tayfı ve duyarlılık sınırı (yatay çizgi) c) baskın frekans arındırıldıktan sonra, güç tayfı ve duyarlılık sınırı (yatay çizgi).

Sıcak bileşene ilişkin zonklama sabiti, Petersen & Jørgensen (1972) tarafından verilen eşitliğe göre hesaplandı.

$$\log Q = -6.454 + \log P + 0.5 \log g + 0.1 M_{bol} + \log T_{eff} \quad (2)$$

Eşitlikte bulunan, zonklayan baş bileşenin bolometrik ışıma değeri Svechnikov ve Kuznetsova (1990)'dan 1<sup>m</sup>.35 ve etkin sıcaklık değeri Popper (1980)'dan 8770

K olarak alındı. Çekim ivmesi Straižys ve Kuriliene (1981) tarafından verilen eşitliğe göre hesaplandı.

$$\log g = \log M + 4 \log T_{eff} + 0.4 M_{bol} - 12.49 \quad (3)$$

Bu eşitlikte baş bileşenin kütlesi  $2.15 M_{\odot}$  değerinde Svechnikov & Kuznetsova (1990)'dan alındı. Bu değerleri kullanarak,  $\log g_1 = 4.24$  olarak hesaplandı. Zonklama sabiti,  $25.5438 \text{ c/d}$  ve  $21.0553 \text{ c/d}$ 'lik frekans değerleri için sırasıyla  $0.020 \mp 0.004$  ve  $0.024 \mp 0.005$  olarak bulundu. FAMIAS programı (Frequency Analysis and Mode Identification for Asteroseismology) (Zima, 2008) kullanılarak, küresel harmonik derece  $l = 2$  olarak belirlendi.

## 6 Tartışma ve Sonuçlar

BG Peg'in ilk defa yapılan yörünge dönem analizine göre, O-C dağılımı parabol üzerinde çevrimsel değişim göstermektedir. Çevrimsel değişimin nedeni, sistemde görülmeyen olası bir üçüncü cismin varlığından kaynaklanıyor olabilir. Analiz sonucunda üçüncü cismin yörünge dönemi  $61 \pm 1$  yıl ve yörüngesinin yarı büyük eksen uzunluğu ise  $14.0 \pm 0.3 \text{ AB}$  olarak bulunmuştur. Olası görünmeyen bileşenin minimum kütlesi  $0.77 M_{\odot}$  olarak bulundu. BG Peg'in parabolik değişiminden kaynaklanan dönemdeki azalma miktarı da  $dP/dt = -3.3 \times 10^{-7} \text{ yıl}^{-1}$ 'dir.

BG Peg'in B ve V filtrelerindeki eş zamanlı fotometrik çözümleri ilk defa yapılmış, çifte ilişkin sistem parametreleri ile, kuramsal ışık eğrileri hesaplanmıştır. Fotometrik çözümden, kütle oranı  $0.233$  olarak bulundu. Baş bileşenin kütlesi Svechnikov ve Kuznetsova (1990) tarafından verilen  $2.15 M_{\odot}$  değerinde kabul edilerek, fotometrik çözümden bulunan  $0.233$  kütle oranı değerine göre, yoldaş bileşenin kütlesi  $0.5 M_{\odot}$  olarak hesaplandı.

Baş bileşenin zonklama doğasını incelemek üzere, ışık eğrisinden yakınlık etkileri (yansıma, basıklık) arındırıldıktan sonra, tutulma etkileride çıkarılan veriye frekans analizi yapıldı. Buna göre, BG Peg'in baş bileşeni V filtresinde anlamlı iki frekans değeri vermektedir. Baskın frekans  $25.5438 \text{ c/d}$  ve ikinci frekans da  $21.0553 \text{ c/d}$  olup toplam genlik  $0^m.045$ 'dir. B filtresinde de aynı sonuçlar bulunmuş olup, veri daha az duyarlı olduğu için, ikinci frekans değeri duyarlılık sınırının altında kalmıştır. Zonklama sabiti,  $25.5438 \text{ c/d}$  ve  $21.0553 \text{ c/d}$ 'lik frekans değerlerine karşılık sırasıyla,  $0.020 \mp 0.004$  ve  $0.024 \mp 0.005$  gün olarak hesaplandı. Mod analizi sonucunda, zonklayan bileşenin küresel harmonik derecesi  $l = 2$  olarak belirlendi.

## 7 Teşekkür

Bu çalışma TÜBİTAK - 107T634 Nolu proje ile desteklenmiştir.

## Kaynaklar

Brancewicz, H. K. & Dworak, T. Z.: A catalogue of parameters for eclipsing binaries, *AcA*, **30**, (1980), 501-524

- Breger, M., Stich, J., Garrido, R., et al.: Nonradial Pulsation of the Delta-Scuti Star Bu-Cancri in the Praesepe Cluster, *A&A*, **271**, (1993), p.482
- Budding, E., Erdem, A., Çiçek, C., et al.: Catalogue of Algol type binary stars, *A&A*, **417**, (2004), 263-268
- Dvorak, S.: Survey of Candidate Pulsating Eclipsing Binaries - I, *Commun. Asteroseismol.*, **160**, (2009), p.64
- Kreiner, J.M., Kim, C.-H., Nha, I.-S.: An Atlas of O-C Diagrams of Eclipsing Binary Stars, Parts 1-6, Cracow: Pedagogical University Press. (2001)
- Kuschnig, R., Weiss, W.W., Gruber, R., et al.: Microvariability survey with the Hubble Space Telescope Fine Guidance Sensors. Exploring the instrumental properties, *A&A*, **328**, (1997), 544-550
- Lenz, P., & Breger, M.: Period04 User Guide, *Commun. Asteroseismol.*, **146**, (2005), p.53
- Lucy, L.B.: Gravity-Darkening for Stars with Convective Envelopes, *Z. Astrophys.*, **65**, (1967), p.89
- Malkov, O. Yu., Oblak, E., Snegireva, E. A., & Torra, J.: A catalogue of eclipsing variables, *A&A*, **446**, (2006), 785-789
- Petersen, J.O., & Jorgensen, H.E.: Pulsation of models in the lower part of the cepheid instability strip and properties of AI Velorum and delta Scuti stars, *A&A*, **17**, (1972), 367-377
- Popper, D. M.: Stellar masses, *ARA&A*, **18**, (1980), 115-164
- Rucinski, S. M.: The Proximity Effects in Close Binary Systems. II. The Bolometric Reflection Effect for Stars with Deep Convective Envelopes, *AcA*, **19**, (1969), p.245
- Samus, N. N., Goranskii, V. P., Durlevich, O. V. et al.: An Electronic Version of the Second Volume of the General Catalogue of Variable Stars with Improved Coordinates, *AstL*, **29**, (2003), 468
- Soydugan, E., Soydugan, F., Demircan, O., & İbanoğlu, C.: A catalogue of close binaries located in the  $\delta$  Scuti region of the Cepheid instability strip, *MNRAS*, **370**, (2006), 2013-2024
- Soydugan, E., Soydugan, F., Şenyüz, T., Püsküllü, Ç., Tüysüz, M., Bakış, V., Bilir, S., & Demircan, O.: Discovery of delta Scuti type oscillations in two Algol-type binaries: DY Aqr and BG Peg, *Inf. Bull. Variable Stars*, **5902**, (2009)
- Soydugan, E., Soydugan, F., Şenyüz, T., Püsküllü, Ç., Demircan, O.: A comprehensive photometric study of the Algol-type eclipsing binary: BG Pegasi, *NewA*, **16**, (2011), 72-78
- Straizys, V., & Kuriliene, G.: Fundamental stellar parameters derived from the evolutionary tracks, *ApS&S*, **80**, (1981), 353-368
- Svechnikov, M. A., & Kuznetsova, E. F.: Catalogue of Approximate Photometric and Absolute Elements of Eclipsing Variable Stars, A.M. Gorky University of the Urals, Sverdlovsk, (1990)
- van Hamme, W., Wilson, R. E.: Stellar Atmospheres in Eclipsing Binary Models, *ASP Conference Proceedings*, Edited by Ulisse Munari., **Vol. 298**, (2003), p.323
- von Zeipel, H.: The radiative equilibrium of a rotating system of gaseous masses, *MNRAS*, **84**, (1924), 665-164
- Wilson, R.E., & Devinney, R.J.: Realization of Accurate Close-Binary Light Curves: Application to MR Cygni, *ApJ*, **166**, (1971), p.605
- Zima, W.: FAMIAS - A userfriendly new software tool for the mode identification of photometric and spectroscopic times series, *Commun. Asteroseismol.*, **157**, (2008), p.387