T.C.
ANKARA ÜNİVERSİTESİ

BİLİMSEL ARAŞTIRMA PROJELERİ
KESİN RAPORU

Seçilmiş Bazı W UMa Türü Örten

Çift Yıldızların Işık Eğrilerinin Analizi

Proje Yürütücüsü: Doç.Dr. Selim O. SELAM

Proje no: 20040705090

Ankara

EK-8

T.C.
ANKARA ÜNİVERSİTESİ

BİLİMSEL ARAŞTIRMA PROJESİ
KESİN RAPORU

Seçilmiş Bazı W UMa Türü Örten Çift Yıldızların Işık Eğrilerinin Analizi

Proje Yürütücüsü: Doç.Dr. Selim O. SELAM

Proje no: 20040705090

Başlama Tarihi: 25.08.2004

Bitiş Tarihi: 25.08.2005

Rapor Tarihi: 17.10.2005

Ankara Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri
Ankara - 2005

I. Projenin Türkçe ve İngilizce Adı ve Özetleri

Seçilmiş Bazı W UMa Türü Örten Çift Yıldızların Işık Eğrilerinin Analizi

ÖZET: Örten çift yıldızların hem bileşen yıldızlarına hem de oluşturdukları kapalı dinamik sisteme ilişkin ışımsal parametrelerinin ve geometrik boyutlarının hesaplanması, büyük ölçüde onların fotometrik (ışıkölçüm) gözlemlerinden oluşturulan ve zamana bağlı olarak bir yörünge dönemi boyunca ışık değişimlerini ifade eden ışık eğrilerinin analizi ile mümkün olabilmektedir. Bu proje çalışmasının temel amacı doğrultusunda, hakkında çok az bilgiye sahip olduğumuz, henüz ışık eğrileri analiz edilmemiş ve büyük çoğunlukla *HIPPARCOS* astrometri uydusunun yakın zamanda keşfettiği bazı W UMa türü örten çift yıldız sistemlerinin yeni ışıkölçüm gözlemleri; Ankara Üniversitesi Gözlemevi'nin ve TÜBİTAK Ulusal Gözlemevi'nin mevcut teleskopları ile elde edilmiş ve bu gözlemlerden oluşturulan ışık eğrileri ilk kez analiz edilmiştir. Proje kapsamında irdelenen örten çift sistemler, literatürde dikine hız eğrisi çözümüne sahip ancak fotometrik yörünge analizi henüz yapılmamış sistemler arasından seçilmiştir. Dolayısıyla ışık eğrileri, dikine hız eğrileri ile eş zamanlı olarak çözülmüştür. Böylelikle, proje programına dahil edilen örten çift sistemlerin salt boyutları ilk kez elde edilmiş ve sistemlerin doğası detaylı bir şekilde ortaya konmuştur. Proje bulgularının ve sonuçlarının, ışınımsal ve geometrik parametreleri iyi bilinen ilgili türdeki örten çift yıldız sayısına katkıda bulunması ve onlar hakkında ortaya konan çeşitli istatistik genellemelere ve kalibrasyonlara veri üretmesi açısından büyük önem taşıyacağı inancındayız.

ANAHTAR SÖZCÜKLER: Örten çift yıldızlar, W UMa türü sistemler, fotometrik gözlemler, fotometrik yörünge analizi

Light Curve Analysis of Some Selected W UMa Type Eclipsing Binary Stars

ABSTRACT: The geometrical dimensions and radiative parameters of the component stars and the close dinamic system of eclipsing binary stars can be calculated, in general, from the analysis of their light curves, which are express their light variability in time through their orbital period and constructed from their photometric observations. According to the basic aim of this project, new photometric observations of some selected W UMa type eclipsing binary stars which are mostly discoveries of the *HIPPARCOS* astrometry satellite and have no further information and light curve analysis in the literature, were obtained with the current telescopes of the Ankara University Observatory and TÜBİTAK National Observatory. The light curves constructed from these observations were analyzed for the first time. The eclipsing binary systems which are considered in this project have been selected among those systems that radial velocity curve analyses are present in the literature but, not the photometric orbital analyses. Therefore, their light curves were solved simultanously with their radial velocity curves. In that way, the absolute dimensions of the eclipsing binary systems considered in this project were obtained for the first time and their detailed nature are revealed. Contributing to the number of relevant eclipsing binary stars with well known radiative and geometrical parameters and providing some applicational data to various statistical generalizations and calibrations on them, we believe that, the findings and results of this project would take an great importance.

KEYWORDS: Eclipsing binary stars, W UMa type systems, photometric observations, photometirc orbital analysis

II. Amaç ve Kapsam

Bu proje çalışmasının temel amacı, yeni keşfedilmiş ancak henüz yörünge analizleri yapılmadığı için detaylı karakteristikleri ortaya konamamış W UMa türü bir grup örten çift yıldızın, Johnson UBVR filtrelerinde çok renk ışık ölçümünü tamamlamak ve bu gözlemlerden oluşturulacak ışık eğrilerini analiz ederek fiziksel özelliklerini ilk kez detaylı olarak ortaya koymaktır. Yörünge çözümlerinin yanısıra, mutlak boyutlarının da belirlenmesi amaç edinildiğinden, literatürde dikine hız eğrileri bulunan sistemler tercih edilmiştir. Bu amaç doğrultusunda ışık ölçüm gözlemleri Ankara Üniversitesi Gözlemevi (AÜG)'nin 30 cm çaplı ve TÜBİTAK Ulusal Gözlemevi (TUG)'nin 40 cm teleskopları ile yapılmıştır. Gözlemler, bu teleskoplara bağlı SSP-5A zayıf ışın fotometreleriyle ve en az iki ayrı dalgaboyu aralığında (*BV*, *UBV* veya *BVR*) diferansiyel fotometri tekniği ile alınmıştır. Gözlemsel veriler Yer atmosferinin sönükleştirme etkisinden ve Yer'in yörünge hareketi etkisinden arındırılmıştır. Elde edilen ışık eğrileri çift yıldız sistemlerinin fiziksel özelliklerini ortaya koymak için en güvenilir yöntemlerle analiz edilmiştir. Proje teklifinde, gözlemsel verilerin elde edilmesinin, gece gökyüzünün açık ve bulutsuz olmasına bağlı olduğu, dolayısıyla gözlemleri yapılacak kaynak sayısında %10 oranında farklılık olabileceği belirtilmişti. Bu bağlamda, projemizin "1. Ara Rapor"unda belirtilen olumsuz hava koşullarından doğan durumlar, takip eden gözlem sezonlarında gözlemi tamamlanabilen yıldızlar ve alternatif olarak gözlenecek yıldızlar listesinde olan değişikliklere "III. Materyal ve Yöntem" başlığı altında yer verilmiştir. Bu anlamda, Tablo 1.'de görülen ve proje önerisinde yer alan gözlenecek sistemlerin sayısından ciddi bir ödün verilmemiştir.

Proje çalışmasına konu olan türden örten çift yıldız sistemleri hakkındaki istatistik genellemeler, kalibrasyonlar ve evrim modelleri; güvenirlilik derecelerinin artabilmesi için fiziksel özellikleri iyi bilinen örnek sistemlerin sayıca artışına şiddetle ihtiyaç duymaktadır. Dolayısıyla bu çalışma ile hedeflenen ikincil amaç, literatürde ihtiyaç duyulan bu veri gereksinimine belli oranda katkıda bulunmaktır.

Tablo 1. Işık eğrilerinin tamamlanması ve analiz edilmesi hedeflenen sistemler (Proje önerisinde verilen olası liste):

Çift Sistemin Adı	α (2000) (sağaçıklık)	δ (2000) (dikaçıklık)	T_o (HJD)	P (gün)	Parlaklık (max B)	Tür	Tayf türü
V776 Cas	$01^{sa}\ 53^{dk}\ 23^{s}$	$+70^{0}\ 02'\ 33''$	2451788.2184	0.440	$9^{m}.42$	EW-A	F2V
V2150 Cyg	$21^{sa}\ 18^{dk}\ 11^{s}$	$+30^{0}\ 35'\ 21''$	2451386.3434	0.592	$8^{m}.40$	EW-A	A6V
V842 Her	$16^{sa}\ 06^{dk}\ 02^{s}$	$+50^{0}\ 11'\ 12''$	2450177.4800	0.419	$9^{m}.30$	EW-W	F9V
SW Lac	$22^{sa}\ 53^{dk}\ 41^{s}$	$+37^{0}\ 56'\ 18''$	2445275.3477	0.321	$9^{m}.64$	EW-W	G8V
ET Leo	$10^{sa}\ 33^{dk}\ 25^{s}$	$+17^{0}\ 34'\ 27''$	2451990.9912	0.346	$10^{m}.18$	EW-W	G8V
V2377 Oph	$17^{sa}\ 33^{dk}\ 56^{s}$	$+08^{0}\ 09'\ 57''$	2451720.3294	0.425	$9^{m}.11$	EW-W	G0/G1V
V351 Peg	$23^{sa}\ 25^{dk}\ 25^{s}$	$+15^{0}\ 41'\ 19''$	2451418.3205	0.593	$8^{m}.31$	EW-W	A8V
II UMa	$12^{sa}\ 32^{dk}\ 54^{s}$	$+54^{0}\ 47'\ 42''$	2451221.6579	0.825	$8^{m}.67$	EW-A	F5III
HX UMa	$12^{sa}\ 01^{dk}\ 33^{s}$	$+43^{0}\ 02'\ 29''$	2451835.0458	0.379	$9^{m}.31$	EW-A	F4V

III. Materyal ve Yöntem

Tablo 1 ile verilen ve çoğunlukla *HIPPARCOS* astrometri uydusunun yakın zamanlı keşifleri olan W UMa türü örten çift yıldızların ışık elemanlarından (T_O, P) hareketle evre hesapları yapılarak hangi gözlem mevsiminde daha uygun gözlenebilecekleri saptanmış, hava koşullarının el verdiği ölçüde (bulutsuz gökyüzü) gözlemleri yapılarak ışık eğrileri tamamlanmaya çalışılmıştır. Hava koşullarına bağlı olarak, gözlemleri yapılacak kaynak sayısının %10 oranında farklılık gösterebileceği proje önerisinde ve "1. Ara Rapor"da belirtilmiştir. Buna göre Tablo 1'de, olası listede verilen yıldızlardan ışık eğrisi tamamlananlar ve hava koşulları nedeniyle yapılan değişiklikler şöyle özetlenebilir:

a) V776 Cas, V842 Her, SW Lac, ET Leo, V351 Peg, II UMa ve HX UMa sistemleri için amaçlanan ışık ölçüm gözlemleri tamamlanmıştır.
b) "1. Ara Rapor"da belirtildiği gibi, V2150 Cyg sisteminin ışık ölçüm gözlemlerini elde etmek üzere TUG'a, Ağustos 2003 döneminde verilen gözlem projemiz kabul edilmiştir. Ancak grubumuza tahsis edilen gözlem zamanı süresince olumsuz hava şartları bu yıldızı gözlememize engel olmuştur. Bu arada sistemin yeni gözlenmiş fotometrik ışık eğrilerinin detaylı analizlerini içeren bir çalışması (Kreiner vd. 2003) yayınlanmıştır. Bu nedenle V2150 Cyg sistemi projemiz kapsamından çıkarılmıştır.
c) Yine "1. Ara Rapor"da belirtildiği gibi, V2377 Oph sisteminin ışık ölçüm gözlemleri, 2 ve 3 Temmuz 2003 gecelerinde TUG'da, tamamlanmıştır. Ancak ilgili tarihlerdeki marjinal hava koşullarının etkisi, göreli olarak düşük ışık değişim genliğine ($\Delta m \sim 0^m.15$) sahip bu sistemin gözlenen ışık eğrilerine olumsuz yönde yansımıştır. Işık eğrilerinde izlenen yüksek düzeyli saçılma güvenilir bir ışık eğrisi analizi yapmamıza engeldir. Literatürde, Lu vd.'ne (2001) ait kaliteli dikine hız eğrisi gözlemleri ve çözümlemesinin var olmasının yanı sıra henüz kaliteli fotometrik gözlemlere dayalı bir yörünge çözümlemesinin yapılmamış olması, V2377 Oph'u hala ilgi çekici bir konumda tutmaktadır. Ancak bu yıldız için 2004 ve 2005 gözlem sezonlarındaki gözlem girişlerimiz de kötü hava koşulları nedeniyle başarısızlıkla sonuçlanmıştır. Bu nedenle, V2377 Oph sisteminin, projemiz kapsamında, ışık eğrisi analizi için umut kalmamıştır. Elimizdeki 2003 gözlemlerinden, kabul edilebilir duyarlılıkla belirlediğimiz tutulma minimumu zamanlarını, gözlemevimizin bir sonraki rutin minimim zamanları listesinde yayınlamakla (IBVS) yetineceğiz.
d) W UMa'ların W alt türüne ait olduğu bilinen BB Peg sistemi, ışık eğrisinde gösterdiği

hızlı değişimler ve asimetriler (O'Connell etkisi) ile tanınmaktadır (bkz. Leung vd. 1985 ve burada verilen kaynaklar) ve W UMa türü sistemlerin bileşen yıldızlarının uzun dönemli yüzey parlaklık dağılımlarını takip edebilmek için en ideal adaylardan biridir. Yakın tarihe kadar güvenilir bir dikine hız eğrisi çözümü bulunmayan bu sistem için Lu ve Rucinski (1999) yeni dikine hız eğrilerini elde etmiş ve çözmüşlerdir, ancak literatürde hala eş zamanlı bir ışık eğisi ve dikine hız eğrisi çözümü yoktur. Böylece alternatif bir sistem olarak projemize dahil edilen bu sistem için 2004 ve 2005 yılı gözlem dönemlerinde, iki sezona ait ışık eğrileri tamamlanmıştır.

Sonuç olarak, Tablo 1 ile proje önerisinde verilen olası listedeki toplam yıldız sayısı 9'dan 8'e inmiş durumdadır. 2 yıldız proje kapsamından çıkarılırken (V2150 Cyg ve V2377 Oph), 1 yıldız ilave edilmiştir (BB Peg). Proje kapsamında gözlemleri tamamlanan sistemlerin genel özellikleri ve elde edilen gözlemlere ilişkin bilgiler toplu olarak Tablo 2'de özetlenmiştir.

Tablo 2. Proje kapsamında gözlenen sistemlerin temel özellikleri ve gözlemlerine ilişkin bilgiler

Çift Sistemin Adı	α (2000) (sağaçıklık)	δ (2000) (dikaçıklık)	T_o (HJD)	P (gün)	Parlaklık (max B)	Tür	Tayf türü	Gözlemevi	Gözlem Tarihleri	Filtre
V776 Cas	$01^{sa}\ 53^{dk}\ 23^{s}$	$+70^{0}\ 02'\ 33''$	2451788.2184	0.440	$9^{m}.42$	EW-A	F2V	TUG	08.11.2002 09.11.2002	UBV UBV
V842 Her	$16^{sa}\ 06^{dk}\ 02^{s}$	$+50^{0}\ 11'\ 12''$	2450177.4857	0.41904	$9^{m}.30$	EW-W	F9V	TUG AÜG	03.07.2003 04.07.2003 24.07.2004 27.07.2004	UBV UBV BV BV
SW Lac	$22^{sa}\ 53^{dk}\ 41^{s}$	$+37^{0}\ 56'\ 18''$	2445275.3477	0.321	$9^{m}.64$	EW-W	G8V	AÜG	26 .08.2004 01.10.2004 11.10.2004 16.10.2004 19.10.2004 12.11.2004 08.09.2005 09.09.2005	BV BV UBV UBV UBV UBV BV BV
ET Leo	$10^{sa}\ 33^{dk}\ 25^{s}$	$+17^{0}\ 34'\ 27''$	2451990.9912	0.346	$10^{m}.18$	EW-W	G8V	TUG	26.03.2003 27.03.2003	BV BV
BB Peg	$22^{sa}\ 22^{dk}\ 57^{s}$	$+16^{0}\ 19'\ 28''$	2443764.3349	0.362	$11^{m}.80$	EW-W	F8V	TUG	14.08.2004 17.08.2004 18.08.2004 19.08.2004 20.08.2004 26.08.2005 27.08.2005 28.08.2005 29.08.2005 30.08.2005	BVR BVR BVR BVR BVR BVR BVR BVR BVR BVR
V351 Peg	$23^{sa}\ 25^{dk}\ 25^{s}$	$+15^{0}\ 41'\ 19''$	2451418.3205	0.593	$8^{m}.31$	EW-W	A8V	TUG	29.08.2003 30.08.2003 31.08.2003	BVR BVR BVR
II UMa	$12^{sa}\ 32^{dk}\ 54^{s}$	$+54^{0}\ 47'\ 42''$	2451221.6579	0.825	$8^{m}.67$	EW-A	F5III	TUG	04.04.2005 08.04.2005 15.06.2005 16.06.2005 17.06.2005 21.06.2005	BVR BVR BVR BVR BVR BVR
HX UMa	$12^{sa}\ 01^{dk}\ 33^{s}$	$+43^{0}\ 02'\ 29''$	2451835.0458	0.379	$9^{m}.31$	EW-A	F4V	TUG	06.04.2003 27.04.2003 28.04.2003	UBV UBV UBV

İncelenecek yıldızlar için gerekli literatür araştırması, A.Ü. Rektörlüğü, Bilgi-İşlem Dairesi Başkanlığı'nca sağlanan INTERNET erişimi yardımıyla, "SIMBAD Astronomical Database" ve "NASA-ADS – Astrophysics Data System" veri bankaları kanalı ile yapılmıştır. Program yıldızlarının, özellikle elektronik formatdaki dikine hız verilerine bu yolla ulaşılmıştır. Işık eğrisi analizi sırasında kullanılan bilgisayar programları "açık kaynak kodları"na sahiptir ve ilgili birimler tarafından serbest dağıtımı yapılan programlardır. Programlar, kaynak kodlarının dağıtımının yapıldığı FTP sitelerinden çekilmiş ve uygun oldukları işletim sistemleri altında derlenerek çalışır hale getirilmişlerdir.

Işık ölçüm gözlemleri, Ankara Üniversitesi Gözlemevi'nin 30 cm çaplı ve TÜBİTAK Ulusal Gözlemevi'nin 40 cm çaplı teleskopları ve bunlara bağlı SSP-5A zayıf ışın fotometreleriyle yapılmıştır. Gözlem yöntemi çok renk diferansiyel ışık ölçüm tekniğidir. Seçilen çift yıldızların zamana karşı parlaklıkları, parlaklık değişimi göstermediği iyi bilinen standart yıldızlara (mukayese ve denet yıldızları) göre ölçülmüştür. Farklı filtrelerde elde edilen gözlemler atmosferin sönükleştirme etkisinden (Hardie, 1962) ve Yer yörüngesinin ışık-zaman etkisinden, iyi bilinen yöntemlerle arındırılmıştır. Gözlemlerden, Kwee and Van Woerden (1956) yöntemi kullanılarak saptanan ve varsa literatürden elde edilen minimum zamanları kullanılarak her bir sistem için düzeltilmiş ışık elemanları (T_O, P) hesaplanmıştır. Elde edilen yeni ışık elemanları kullanılarak her sistemin, gözlenen farklı filtrelerde ışık eğrileri oluşturulmuş ve analize hazır hale getirilmiştir.

Oluşturulan ışık eğrileri, literatürde güvenirliğini ispatlamış Wilson-Devinney ışık eğrisi analiz yönteminin (Wilson ve Devinney, 1971) en son sürümü WD-2003 (Wilson ve Van Hamme, 2003) veya Djurasevic yöntemi (Djurasevic 1992, Djurasevic vd. 1998) ile analiz edilmiştir. Djurasevic yöntemi, kullandığı matematiksel model ve dikkate aldığı parametreler açısından Wilson-Devinney ışık eğrisi analiz yöntemi ile son derece benzerdir. Dolayısıyla analiz yöntemlerinin tarifi konusunda sadece Wilson-Devinney ışık eğrisi analiz yöntemi hakkında bilgi vermekle yetinilecektir. Analizler sırasında, proje yıldızlarının literatürde mevcut olan dikine hız eğrileri de girdi verisi olarak kullanılmış ve eş-zamanlı çözüm yapılmıştır. Böylelikle sistemlerin salt boyutları da elde edilmiştir. Wilson-Devinney ışık eğrisi analiz yönteminde, bileşen yıldızlar, "*Roche Geometrisi*"ine uygun olarak eşpotensiyelli yüzeylerden oluşmuş 4 eksenli dönel elipsoidler olarak ifade etmektedir. Bileşenler arası ışımasal ve çekimsel etkileşmeler dikkate alınmakta (kenar kararması, çekim kararması, yansıma etkisi, tedirginlik etkisi kökenli küresellikten sapmalar) ve sıcak/soğuk leke gibi yüzey parlaklık dağılımını tekdüzelikten saptıran olgular da modellenebilmektedir. Algoritmik anlamda, kuramsal olarak üretilen ışık eğrisi ile gözlemsel ışık eğrisi arasındaki farkların minimize edilmesi ile ulaşılan

model parametrelerinin gözlenen sisteme atfedildiği matematiksel bir yöntem olarak tarif edilebilir. Bu bağlamda WD-2003 yöntemi, temelde, gözlem noktası sayısı kadar denkleme ve ondan daha az sayıda bilinmeyene sahip lineer-olmayan denklem takımı çözüm algoritmasına sahiptir ve matematiksel yaklaşım olarak diferansiyel düzeltme (differential correction) yolu ile ardışık yaklaştırmalar mantığını kullanmaktadır. İlgili yöntemin pratikteki uygulama üstünlükleri ve güvenirliği Kallrath ve Milone (1999) tarafından, detaylarıya ve alternatif yöntemlerle karşılaştırmalı olarak tartışılmıştır.

Analizler sırasında, her iki ışık eğrisi analiz yönteminin, W UMa türü değen çift sistemlere uygun olan seçenekleri kullanılmıştır (Wilson-Devinney yönteminde MOD3, Djurasevic yönteminin değen çiftler için genelleştirilmiş 1998 sürümü). İlgili sistemlerin bilinen bazı fiziksel özelliklerine karşılık gelen parametreleri analizler boyunca sabit tutulmuştur. Sistemler için literatürde verilen bütünleşik tayf türleri, uygun kalibrasyonlar kullanılarak (Gray ve Corbally 1994 veya Popper 1980) etkin sıcaklık değerlerine dönüştürülmüş ve birinci bileşenlerinin yüzey sıcaklıkları (T_1) olarak dikkate alınmıştır. Gerekli hallerde değerlerinde ufak değişiklikler yapılmıştır ancak diferansiyel düzeltmelere sokulmamışlardır. Bileşenlerin yüzey sıcaklığına bağlı ve analizler için girdi parametresi olarak verilen kenar kararma katsayıları, van Hamme (1993) veya Claret'in (2000) doğrusal-olmayan kenar kararma tablolarından interpolasyon yolu ile elde edilmiştir. Ele alınan tüm sistemlerin bileşenlerinin geç tayf türü cüce yıldızlar olduğu dikkate alınarak, fiziksel yapılarına uygun şekilde yansıtma gücü (albedo A_1=A_2=0.5) ve çekim kararması sabitleri (g_1=g_2=0.32) ise sırasıyla Rucinski (1969) ve Lucy'nin (1967) önerdiği teorik değerlere sabitlenmiştir. Tüm analizler boyunca bileşen yıldızlar için eş-dönme olgusunun var olduğu (F_1=F_2=1.0) ve yörüngelerin çember olduğu (e=0) dikkate alınmıştır. Dikine hız eğrisi analizlerinden elde edilmiş kütle oranı (q=m_2/m_1) ve kütle merkezinin dikine hız (V_γ) değerleri girdi parametresi olarak kullanılmış ve analizler boyunca sabit tutulmuşlardır. Analizler boyunca yörünge eğim açısı (i), bileşenlerin yüzey potansiyelleri (Ω_1=Ω_2), ikinci bileşenin yüzey sıcaklığı (T_2) ve birinci bileşenin monokromatik ışınım gücü (L_1) değerleri serbest parametreler olarak diferansiyel düzeltmelere tabi tutulmuşlardır. İkinci bileşene ait monokromatik ışınım gücü (L_2) değeri ise her iterasyonda L_1 değerinden türetilmiştir. Bazı sistemlerin (V776 Cas, II UMa ve HX UMa) fotometrik gözlemleri, kullanılan fotometrik gözlem araçlarının teknik özellikleri gereği yakın görsel bileşenlerinin ışık katkısından etkilenmiştir. Bu durumda olan sistemler için 3. ışık katkısı, ilgili analiz metodlarının uygun parametreleri (L_3) yardımıyla dikkate alınmıştır. Bazı sistemlerin ışık eğrilerinin (V842 Her, ET Leo, BB Peg ve V351 Peg) maksimum seviyeleri eşit düzeyde değildir. Bu asimetrik yapılar O'Connell etkisi olarak bilinen ve bileşen yıldızların yüzey parlaklık dağılımlarının homojen

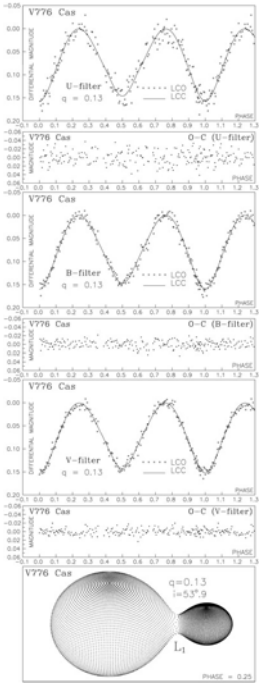
olmamasından kaynaklanan olgulardır. Bu olgular, bu çalışmada da izlendiği yolla, analiz metodlarının izin verdiği ölçüde, bileşen yıldızların yüzeyi üzerinde uygun konumlara soğuk/sıcak lekeler koyularak modellenebilmektedir. Lekelere ilişkin model parametreleri; leke boylamı λ[°], leke enlemi β[°], leke açısal çapı θ [°] ve sıcaklık faktörü $T_f = T_{spot} / T_{comp}$ değerleridir.

Analizler sonucunda sistemlerin ve bileşenlerinin fiziksel özelliklerini ortaya koyan; yörünge eğimi (i), bileşenlerin yüzey sıcaklıkları (T_1, T_2), bileşenler arası uzaklık (a) cinsinden bileşen yıldız yarıçapları (kesirsel yarıçaplar r_1, r_2), bileşen yıldızların kesirsel ışınım güçleri (L_1, L_2) ve doldurdukları eşpotansiyelli yüzeyler (Ω_1, Ω_2) belirlenmiş, dolayısıyla bileşen yıldızların biçimleri, büyüklükleri, çekim alanları ve kütleleri hakkında bilgi elde edilmiştir. Bu çalışma için seçilmiş sistemlerin literatürde yer alan dikine hız eğrileri ile eş zamanlı çözüm üretildiğinden, bileşen yıldızların salt boyutları olarak; kütleleri M_1, M_2 [$M_\odot$], yarıçapları R_1, R_2 [$R_\odot$], ışınım güçleri L_1, L_2 [$L_\odot$], yüzey çekim ivmeleri $\log g_1$, $\log g_2$ [cgs], mutlak bolometrik parlaklıkları $\mathcal{M}_{bol,1}$, $\mathcal{M}_{bol,2}$ [kadir] ve bileşenler arası uzaklık a [$R_\odot$] değerleri de ilk kez elde edilmiş durumdadır.

IV. Analiz ve Bulgular

Proje kapsamında yapılan analizler ve elde edilen bulgular, üzerinde çalışılan örten çift yıldızlar bazında aşağıda verilmiştir:

a) V776 Cas Sistemi:

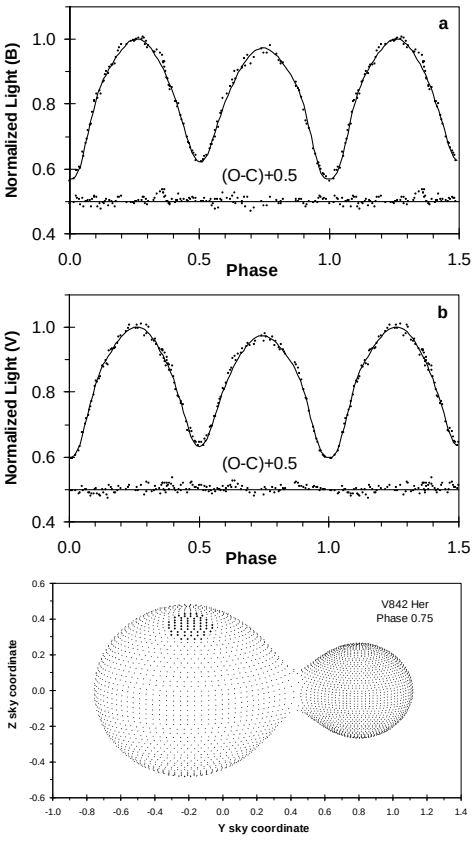


UBV bandlarında elde edilen ışık eğrileri Djurasevic yöntemi ile analiz edilmiştir. Analiz sırasında Rucinski vd.'nin (2001) dikine hız eğrisi çözümlemesinden elde ettikleri tayfsal kütle oranı ve kütle merkezinin dikine hız değeri sabit parametre olarak kullanılmıştır. Bir HIPPARCOS keşfi olan V776 Cas sistemi ADS1485 görsel çift sisteminin parlak bileşenidir ve ışık eğrilerinde sönük görsel bileşenin 3. ışık katkısı söz konusudur. V bandında %10 mertebesinde olan bu etki analiz sırasında hesaba katılmıştır. Analiz sonucunda V776 Cas'ın, q=0.13 değerinde göreli olarak düşük kütle oranına sahip, A-türü fazla değen (f ~ %55), evrimleşmiş bir W UMa sistemi olduğu ortaya konmuştur. Yandaki şekilde, elde edilen gözlemler ve analiz sonucu ulaşılan model grafik

formatta verilmiştir. Sistemin ön-analiz sonuçları Hırvatistan'ın Dubrovnik kentinde 20-24 Ekim 2003 tarihleri arasında düzenlenen "*Spectroscopically and Spatially Resolving the Components of Close Binary Stars*" başlıklı uluslararası bir toplantıda poster-tebliğ olarak sunulmuş, kesin analiz sonuçları ise SCI tarafından taranan New Astronomy dergisinde makale olarak yayınlanmış ve 14. Ulusal Astronomi Kongresi'nde (31 Ağustos – 4 Eylül 2004, Erciyes Üniversitesi, Kayseri) tebliğ olarak sunulmuştur. Gözlemlere ve analizlere ilişkin detaylar ekte sunulan bu yayınlarda yer almaktadır.

b) V842 Her Sistemi:

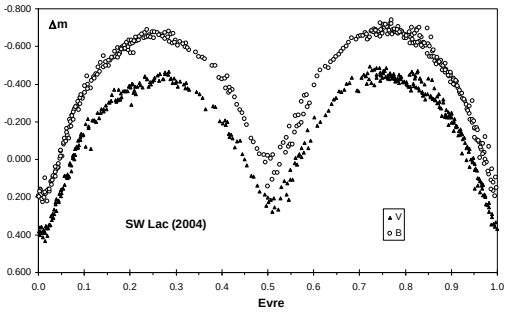
V842 Her, 1955 yılında ışık değişimine sahip olduğu ortaya konan ancak keşfinden bu yana üzerinde fazlaca çalışma yapılmadığı için literatürde güvenilir fiziksel parametreleri bulunmayan bir W UMa türü örten çift sistemdir. Bu proje kapsamında TUG'da elde edilen gözlemlerinden *U* bandı verileri çok fazla saçılma gösterdiğinden analizler sırasında dikkate alınmamıştır. *B* ve *V* bandı ışık eğrileri, Rucinski ve Lu'nun (1999) elde ettikleri dikine hız eğrileriyle beraber eş-zamanlı olarak Wilson-Devinney yöntemi ile analiz edilmiştir. Analiz sırasında, Rucinski ve Lu'nun dikine hız eğrisi çözümlemesinden elde ettikleri tayfsal kütle oranı ve kütle merkezinin dikine hız değeri sabit parametre olarak kullanılmıştır. Sistemin B ve V bandı ışık eğrilerinde izlenen O'Connell etkisi (0.25 yörünge evresi civarındaki birinci max. daha yüksek) büyük kütleli bileşen üzerinde yer alan ve çevresine göre daha soğuk olan bir leke ile başarılı bir şekilde modellenebilmiştir. Buna göre V842 Her'in marjinal değmeye sahip (*f* ~ %25) W-türü bir W UMa sistemi olduğu ortaya konmuştur. Yukarıdaki şekilde, elde edilen gözlemler ve analiz sonucu ulaşılan model grafik formatta verilmiştir. Sistemin ön-analiz sonuçları Hırvatistan'ın Dubrovnik kentinde 20-24 Ekim 2003 tarihleri arasında düzenlenen "*Spectroscopically and Spatially Resolving the Components of Close Binary Stars*" başlıklı uluslararası toplantıda poster-tebliğ olarak, 14. Ulusal Astronomi Kongresi'nde (31 Ağustos – 4 Eylül 2004, Erciyes Üniversitesi, Kayseri) ise tebliğ olarak sunulmuştur (bkz. Ekler). Sistemin dönem değişimi gösterdiğine ilişkin literatürde çelişkili açıklamalar bulunmaktadır. Bu nedenle yeni minimum zamanı elde etmek üzere sistem

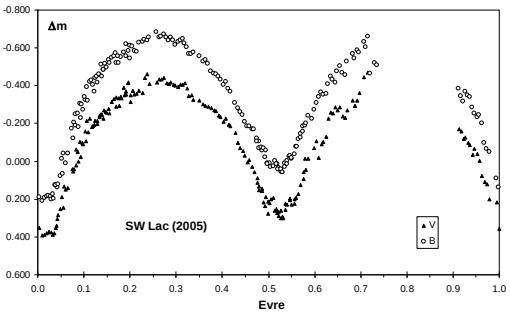


2004 yılı içerisinde Ankara Üniversitesi Gözlemevi'nde de gözlenmiş ve iki adet yeni minimum zamanı daha elde edilmiştir. Literatürdeki mevcut tüm minimum zamanları, yeni elde edilen bu minimum zamanları ile beraber sistemin *O-C* diyagramında değerlendirilmiş ve sistemin 12.4 yıl dönemli çevrimsel bir dönem değişimine sahip olduğu ilk kez ortaya çıkarılmıştır. Sistemin döneminde izlenen bu çevrimsel değişim, sisteme fiziksel olarak bağlı 3. bir bileşenin yarattığı ışık-zaman etkisi ve ana bileşenin çevrimsel yapılı manyetik alan değişimi açısından irdelenmiştir. Sistemin ışık eğrisi ve dönem analizini içeren kapsamlı bir makale SCI tarafından taranan Astronomische Nachrichten dergisinde yayınlanmıştır. Gözlemlere ve analizlere ilişkin tüm detaylar ekte verilen bu yayında yer almaktadır.

c) SW Lac Sistemi:

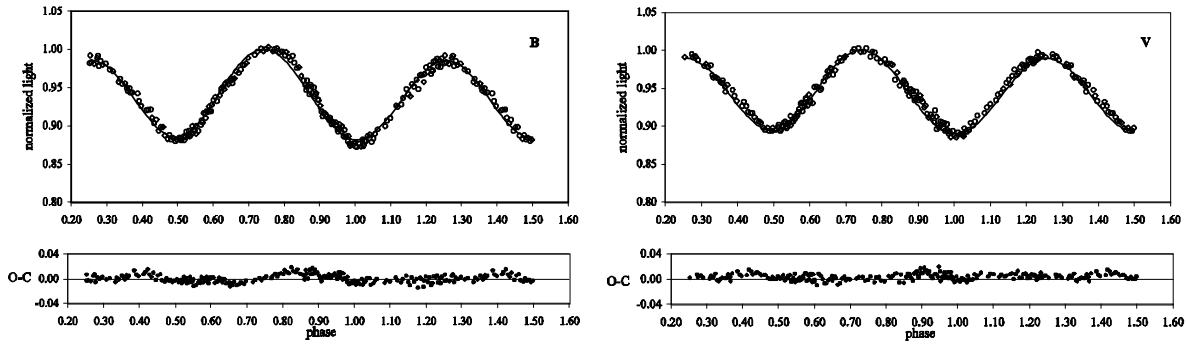
W UMa türü örten çift SW Lac sezonluk ışık eğrileri arasında izlenen hızlı asimetri değişimleriyle (değişken yapılı O'Connell etkisi) dikkat çeken bir sistemdir. Sistem, Ankara Üniversitesi Gözlemevi'nde grubumuz tarafından uzun süreli fotometrik takibe alınmıştır. Gözlemevimizde 2001-2003 yılları arasında elde edilen 3 sezonluk gözlemlere dayalı ışık eğrilerinin analizi sistemin bileşenlerinin yüzey parlaklık dağılımının göreli olarak hızlı bir değişim içerisinde olduğunu ortaya çıkarmıştır (bkz. Albayrak vd., 2004). Bileşenler üzerinde yer alan Güneş benzeri soğuk lekeler ve bunların zaman içerisinde gösterdikleri değişimlerle başarılı olarak modellenebilen bu olgu daha uzun zaman aralıklarına dağılmış gözlemlerle takip etmeye değer bir olaydır. Bu bağlamda sistemin 2004 ve 2005 gözlem sezonlarında da Ankara Üniversitesi Gözlemevi'nde *B* ve *V* bantlarında ışık eğrileri tamamlanmış ve hızlı değişim olgusunun devam ettiği görülmüştür. Grubumuz bu sistemin önümüzdeki birkaç gözlem sezonu boyunca fotometrik olarak takip edilmesi ve uzun soluklu bir çalışma sonucunda çevrimli manyetik alan olgusuna doğrudan bir delil bulma amacındadır. Bu nedenle bu proje süresince SW Lac sistemi için her gözlem sezonunda tam bir ışık eğrisi elde etmekten öte bir gayretimiz olmayacağı 1. ara raporda belirtilmişti. Bu anlamda projemiz kapsamında SW Lac için hedeflenen çalışma tamamlanmıştır. 2004 ve 2005 yıllarına ait elde edilen ışık eğrileri yandaki şekillerde yer almaktadır. 2005 yılı ışık eğrisinin II. Max evreleri kötü hava koşulları nedeniyle ne yazık ki tamamlanamamıştır.





d) ET Leo Sistemi:

Bir HIPPARCOS keşfi olan ET Leo'nun *B* ve *V* bandı ışık eğrileri, Rucinski vd.'nin (2002) elde ettikleri dikine hız eğrileriyle beraber eş-zamanlı olarak Wilson-Devinney yöntemi ile analiz edilmiştir. Analiz sırasında, Rucinski vd.'nin (2002) dikine hız eğrisi çözümlemesinden elde ettikleri tayfsal kütle oranı ve kütle merkezi dikine hız değeri sabit parametre olarak kullanılmıştır. Sistemin *B* ve *V* bandı ışık eğrilerinde izlenen O'Connell etkisi (0.75 yörünge evresi civarındaki ikinci max. daha yüksek) büyük kütleli bileşen üzerinde yer alan ve çevresine göre daha soğuk olan bir leke ile başarılı bir şekilde modellenebilmiştir. Buna göre ET Leo'nun marjinal değmeye sahip W-türü bir W UMa sistemi olduğu ortaya konmuştur. ET Leo, ışık değişim genliği göreli olarak oldukça düşük bir ışık eğrisine sahiptir. Analiz sonucu ortaya çıkan

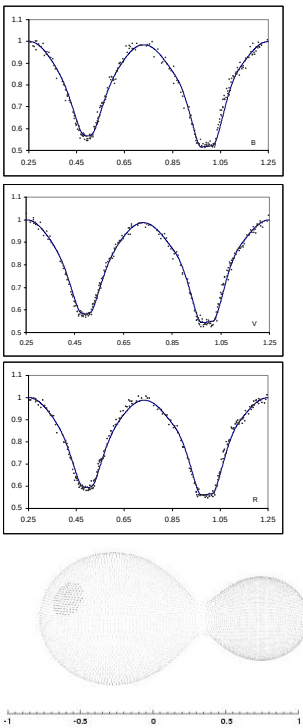


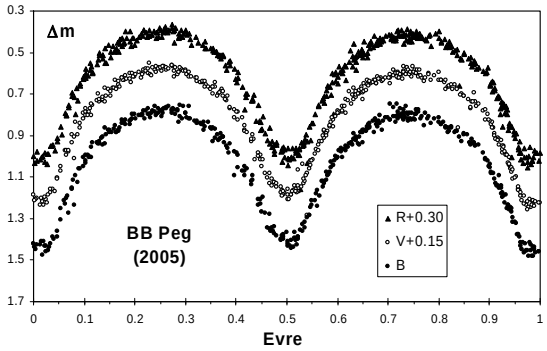
düşük yörünge eğim açısı ($i \sim 43°$) bu gözlemsel olguyu destekler nıtelıktedır ve sıstemın ışık değişimine temel katkının örtme/örtülme olaylarından ziyade yakınlık etkilerinden kaynaklandığı ortaya çıkmıştır. Yukarıdaki şekillerde, *B* ve *V* bandı ışık eğrileri, analiz sonucu bunlara yapılan model fitleri ve fitlerden olan artıklar grafik formatta verilmiştir. Sistemin analiz sonuçları Hırvatistan'ın Dubrovnik kentinde 20-24 Ekim 2003 tarihleri arasında düzenlenen "*Spectroscopically and Spatially Resolving the Components of Close Binary Stars*" başlıklı uluslararası toplantıda poster-tebliğ olarak sunulmuştur. Gözlemlere ve analizlere ilişkin detaylar bu sunuma ilişkin ilgili tebliğler kitabında basılan ve ekte de verilen poster metinde yer almaktadır.

e) BB Peg Sistemi:

BB Peg sisteminin 2004 yılında elde edilen *B*, *V* ve *R* bandı ışık eğrileri, Lu ve Rucinski'nin (1999) elde ettikleri dikine hız eğrileriyle beraber eş-zamanlı olarak Wilson-Devinney yöntemi ile analiz edilmiştir. Analiz sırasında, Lu ve Rucinski'nin (1999) dikine hız eğrisi çözümlemesinden elde ettikleri tayfsal kütle oranı ve kütle merkezi dikine hız değeri sabit parametre olarak kullanılmıştır. Sistemin *B, V* ve *R* bandı ışık eğrilerinde izlenen O'Connell etkisi (0.25 yörünge evresi civarındaki birinci max. daha yüksek) büyük kütleli bileşen üzerinde

yer alan ve çevresine göre daha soğuk olan bir leke ile başarılı bir şekilde modellenebilmiştir. Buna göre BB Peg'in marjinal değmeye sahip W-türü bir W UMa sistemi olduğu ortaya konmuştur. Yandaki şekilde, elde edilen 2004 yılı gözlemleri ve analiz sonucu ulaşılan model grafik formatta verilmiştir. Sistemin yörünge döneminin değişim gösterdiği literatürde yer alan bir kaç çalışmada ifade edilmiştir (Cerruti-Sola ve Scaltriti 1980, Awadalla 1988, Qian 2001). Bu nedenle elde edilen yeni minimum zamanları, literatürdeki mevcut tüm minimum zamanları ile beraber sistemin *O-C* diyagramında değerlendirilmiş ve sistemin yaklaşık 21 yıl dönemli çevrimsel bir dönem değişimine sahip olduğu ortaya konmuştur. Ancak diğer literatür çalışmalarında *O-C* diyagramında var olduğu önerilen parabolik değişimin yer almadığı görülmüştür. Sistemin döneminde izlenen bu çevrimsel değişim, sisteme fiziksel olarak bağlı 3. bir bileşenin yarattığı ışık-zaman etkisi açısından irdelenmiş ve ilave bileşene ilişkin fiziksel parametreler belirlenmiştir. Sistemin 2004 yılı verilerine dayalı ışık eğrisi ve dönem analizlerine ilişkin ön-analiz sonuçları 14. Ulusal Astronomi Kongresi'nde (31 Ağustos – 4 Eylül 2004, Erciyes Üniversitesi, Kayseri) poster olarak sunulmuştur. 2004 gözlemleri ve analizlerine ilişkin tüm detaylar ekte verilen ilgili poster metninde yer almaktadır. Sistemin gözlemlerine 2005 yılı içerisinde de devam edilmiş ve bu sezona ait ışık eğrileri henüz tamamlanmıştır. Aşağıdaki şekilde 2005 gözlemlerinden üretilen ışık eğrileri verilmiştir. 2005 yılı ışık eğrilerinin analizi ve sistemin geçmişe dönük ışık eğrileri ile beraber irdelenmesi, şu anda bölümümüz lisans üstü öğrencilerinden Cem Çetintaş'ın Yüksek Lisans Tezi kapsamında sürdürülmektedir ve 2005-2006 güz dönemi sonu itibariyle sonuçlandırılarak SCI kapsamında bir yayına dönüştürülecektir.

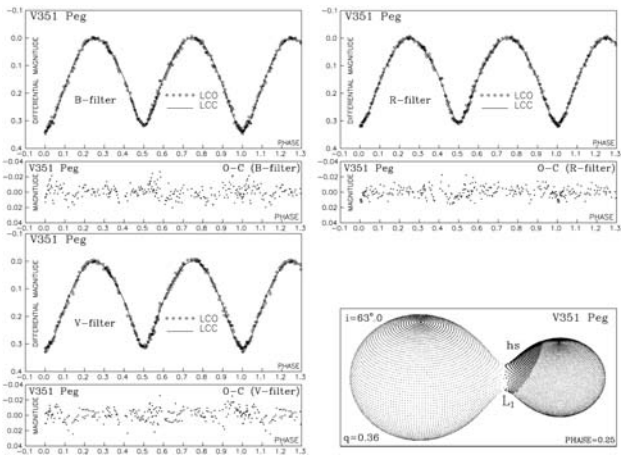




f) V351 Peg Sistemi:

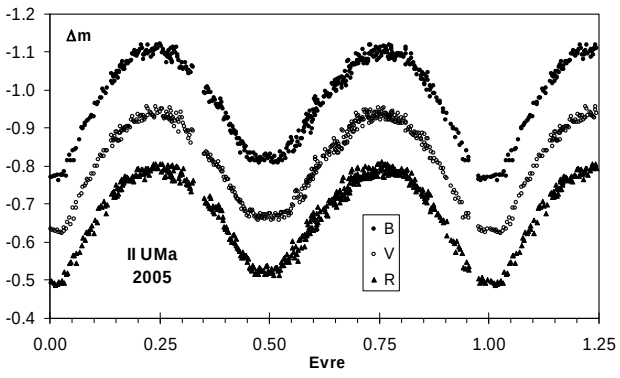
V351 Peg sisteminin Johnson BVR filtrelerinde, TUG'da elde edilen gözlemlerine ilişkin ışık eğrileri Djurasevic yöntemi ile analiz edilmiştir. Analiz sırasında, Rucinski vd.'nin (2001) dikine hız eğrisi çözümlemesinden elde ettikleri tayfsal kütle oranı ve kütle merkezinin dikine hız

değeri sabit parametre olarak kullanılmıştır. Analiz sonucunda, bir HIPPARCOS keşfi olan V351 Peg'in, tipik A-türü, ancak henüz fazla evrimleşmemiş (f ~ %21) W UMa türü bir sistem olduğu ortaya konmuştur. Yandaki şekilde, elde edilen gözlemler ve analiz sonucu ulaşılan model grafik formatta verilmiştir. Bileşenlerin kütleleri arasında oldukça yüksek bir fark olmasına karşın yüzey sıcaklıklarında izlenen düşük fark (ΔT ~ 21 K), sistemi saran ortak zarf boyunca ısının oldukça iyi bir şekilde dağıtıldığının (ısısal değme) bir göstergesidir. Bu ise bileşenler arası güçlü bir enerji transferinin varlığını gerektirmektedir. Işık eğrisinin kollarında izlenen hafif asimetrinin, ancak küçük kütleli bileşen yüzeyinde ve bileşenleri birbirine birleştiren boyun bölgesi civarında bir sıcak leke ile modellenebiliyor olması da bu fikri destekler niteliktedir. Sistemin ön-analiz sonuçları Çek Cumhuriyeti'nin Litomsyl kentinde 31 Mart-3 Nisan 2004 tarihleri arasında düzenlenen "*Zdenek Kopal's Binary Star Legacy*" başlıklı uluslararası toplantıda poster-tebliğ olarak sunulmuş ve bu toplantının tebliğlerinin basıldığı dergi gereği, SCI tarafından taranan bir dergide yayına dönüşmüştür. Kesin analiz sonuçları ise SCI tarafından taranan New Astronomy dergisinde makale olarak yayınlanmış ve 14. Ulusal Astronomi Kongresi'nde (31 Ağustos – 4 Eylül 2004, Erciyes Üniversitesi, Kayseri) tebliğ olarak sunulmuştur. Gözlemlere ve analizlere ilişkin tüm detaylar ekte verilen bu yayınlarda yer almaktadır.



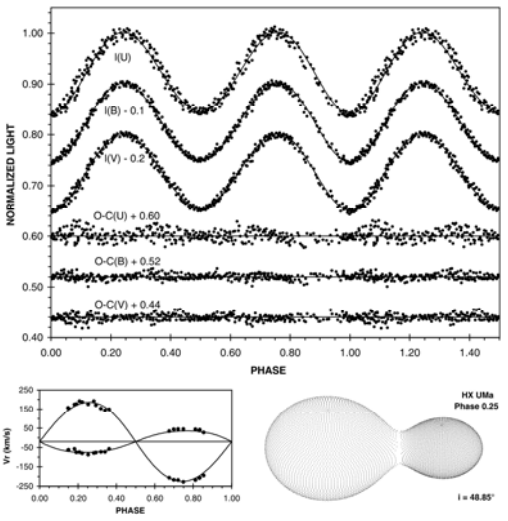
g) II UMa Sistemi:

Bir HIPPARCOS keşfi olan II UMa, projemiz için belirlediğimiz örten çiftler arasında en uzun yörünge dönemine sahip olan, ilgi çekici bir değen çift sistemdir ($P_{yör}$ = 0.825 gün). Nisan 2003 tarihinde TUG'da aldığımız gözlem zamanı içerisinde, yarısı civarında yörünge dönemine sahip HX UMa sistemi ile beraber gözlenmesi amaçlanmıştır. Ancak ilgili gözlem zamanımızda kısıtlı sayıdaki açık geceler bizi, II UMa yerine daha kısa yörünge dönemine sahip HX UMa'nın ışık eğrisini tamamlamaya yöneltmiştir. Dolayısıyla II UMa'nın gözlemleri 2003 yılı içinde



tamamlanamamıştır. 2004 yılında TUG'a verilen gözlem projesi kapsamında tahsis edilen gecelerde ise kötü hava koşulları nedeniyle gözlemi yapılamamıştır. Sistemin gözlemleri, ancak 2005 yılı Nisan-Haziran gözlem döneminde TUG tarafından projemize tahsis edilen gecelerde tamamlanabilmiştir. Yukarıdaki şekilde Johnson *B*, *V* ve *R* bandlarında elde edilen ışık eğrileri görülmektedir. Şu anda ışık eğrisi analiz işlemleri sürmektedir. Analiz için Wilson-Devinney yöntemi kullanılmaktadır. Analizler sırasında Rucinski vd.'nin (2002) dikine hız eğrisi çözümlemesinden elde ettikleri tayfsal kütle oranı ve kütle merkezinin dikine hız değeri sabit parametre olarak kullanılmaktadır. II UMa sistemi, ADS 8594 (CCDM J12329+5448) görsel çiftinin parlak bileşenidir ve görsel çiftler arası açısal uzaklık 0″.87 dir. Aralarındaki parlaklık farkı ise *V* bandında 1.92 kadirdir. Sistem için elde ettiğimiz ışık eğrileri, göreli olarak yakın olan görsel bileşeninin ışığından etkilenmiş durumdadır. Dolayısıyla analizler sırasında 3. ışık katkısı da göz önüne alınmaktadır. Yapılan ön-analizler sonucu sistemin A-türü, tam tutulma gösteren ve göreli olarak uzun yörünge dönemine sahip ilgi çekici bir W UMa yıldızı olduğu ortaya çıkmıştır. Bu tür ekstrem örnekler, ilgili yıldızlara ilişkin kalibrasyonların belirsiz kalan bölgelerine ışık tutmaları açısından çok önemlidir. Işık eğrisi analizleri sonuçlanmak üzeredir ve elde edilen bulgular SCI kapsamında bir dergide yayınlanacaktır.

h) HX UMa Sistemi:



Bir başka HIPPARCOS keşfi olan HX UMa'nın ışık eğrileri, Johnson *U*, *B* ve *V* bandlarında TUG'da elde edilen gözlemlerden tamamlanmıştır. HX UMa'nın sönük ve göreli olarak kendisine yakın bir görsel bileşene de sahip olduğu HIPPARCOS uydusu gözlemleri ile keşfedilmiştir. Sistemin elde edilen ışık eğrilerinde bu yakın bileşenin 3. ışık katkısı mevcuttur. Görsel bileşenin ikili sistemden olan parlaklık farkı, *V* bandında, Rucinski vd. (2003) tarafından belirlenmiştir. Bu değer kullanılarak *V* bandına elde edilen 3. ışık parametresi ile sistemin ilk yörünge çözüm işlemleri Wichmann tarafından geliştirilen Nightfall ışık eğrisi analiz programında (Wichmann 1998) gerçekleştirilmiş ve diğer fotometrik bandlardaki 3. ışık katkı oranları belirlenmiştir. Nightfall ışık eğrisi analiz programı üçüncü ışık parametresini çözümlenebilir bir parametre olarak dikkate almaktadır ancak sonuç parametrelerin belirleme hatalarını vermemektedir. Bu nedenle sonuca yönelik analizler Nightfall çözümünden elde edilen 3. ışık katkı oranları sabit kullanılarak, Wilson-Devinney ışık

eğrisi analiz programı ile yapılmıştır. Her iki yöntemle yapılan analizlerde Rucinski vd.'nin (2003) dikine hız eğrisi çözümlemesinden elde ettikleri tayfsal kütle oranı ile kütle merkezinin dikine hız değeri sabit parametre olarak kullanılmış ve dikine hız eğrileri ile eş-zamanlı çözüm yapılmıştır. Yukarıdaki şekilde, elde edilen gözlemler ve analiz sonucu ulaşılan model grafik formatta verilmiştir. Analiz sonuçları HX UMa sisteminin oldukça yüksek değme derecesine sahip (f ~ %59), A-türü bir değen çift olduğunu ortaya koymuştur. Sistemin analiz sonuçları Çek Cumhuriyeti'nin Litomsyl kentinde 31 Mart-3 Nisan 2004 tarihleri arasında düzenlenen "*Zdenek Kopal's Binary Star Legacy*" başlıklı uluslararası toplantıda poster-tebliğ olarak sunulmuş ve bu toplantının tebliğlerinin basıldığı dergi gereği, SCI tarafından taranan bir dergide yayına dönüşmüştür. Gözlemlere ve analizlere ilişkin tüm detaylar ekte sunulan bu yayında yer almaktadır.

V. Sonuç ve Öneriler

Projemizin amacına uygun olarak, yeni keşfedilmiş ancak henüz yörünge analizleri yapılmadığı için detaylı karakteristikleri ortaya konamamış yedi adet W UMa türü örten çift yıldızın, Johnson *UBVR* filtrelerinde çok renk ışık ölçüm gözlemleri tamamlanarak, bu gözlemlerden oluşturulan ışık eğrileri ileri tekniklerle analiz edilmiş ve sistemlerin fiziksel özellikleri ilk kez detaylı olarak ortaya konmuştur. Yörünge analizleri sırasında eş-zamanlı ışık ve dikine hız eğrisi çözümleri yapıldığından ele alınan sistemlerin mutlak boyutların da belirlenmiştir. Proje çalışmasına konu olan türden örten çift yıldız sistemleri hakkındaki istatistik genellemeler, kalibrasyonlar ve evrim modelleri; güvenirlilik derecelerinin artabilmesi için fiziksel özellikleri iyi bilinen örnek sistemlerin sayıca artışına şiddetle ihtiyaç duymaktadır. Dolayısıyla bu çalışma ile literatürde ihtiyaç duyulan bu veri gereksinimine de belli oranda katkıda bulunulmuştur. Proje kapsamında yer alan SW Lac sistemi ise uzun dönemli ışık değişimi takibine alınmış ve iki gözlem sezonuna ait ışık eğrileri tamamlanarak, proje süresince amaçlanan veri toplama işi tamamlanmıştır. Bu yıldız için önümüzdeki bir kaç gözlem sezonunda, yeni ışık eğrileri elde edilerek, manyetik etkinlik kökenli hızlı değişkenlik gösteren yüzey parlaklık dağılımı detaylı olarak incelenecektir. Işık eğrileri özdeş karakterler gösteren ve bu projeye konu olan BB Peg ve V842 Her sistemleri için de benzer uzun soluklu çalışmalara devam edilecektir. Bu çalışmalar W UMa türü sistemlerde fotosferik ve kromosferik aktivitenin özelliklerinin belirlenmesi açısından önemlidir ve yine gözlemsel olarak uzun zaman aralıklarında takip edilmiş örnek sayısının artmasına ihtiyaç duymaktadır. Projemiz kapsamında yütürülen çalışmalarda, tayfsal gözlemler ve bunlardan üretilen verilerin ne kadar önemli olduğu açıktır. Grubumuz bu anlamda kendi

gözlemsel verisini üretmek ve dışa bağımlılıktan kurtulmak üzere bir alt yapı çalışması başlatmıştır. Bu yapılanmanın, TUG'da kullanıma girmek üzere bulunan tayf çekerlerin gözlem projeleri için güncel ve yenilikçi konular üretmek ve bu alanda genç araştırmacı yetiştirmek açısından büyük önem taşıdığına inanıyoruz.

VI. Kaynaklar

Albayrak B., Djurasevic G., Erkapic S., Tanrıverdi T., 2004, *A&A* **420**, 1039.

Awadalla N.S., 1988, *Ap&SS* **140**, 137

Cerruti-Sola M, Scaltriti F., 1980, *A&AS* **40**, 85.

Claret A., 2000, *A&A* **363**, 1081.

Djurasevic G., 1992, *Ap&SS* **196**, 241.

Djurasevic G., Zakirov M., Hojaev A., Arzumanyants G., 1998, *A&AS* **131**, 17.

Gray R.O., Corbally C.J., 1994, *AJ* **107**, 742.

Hardie R., 1962, in "*Astronomical Techniques*", (ed. W.A.Hiltner), Chapter 8, Univ. Of Chicago Press, Illinois.

Kallrath J., Milone E., 1999, "*Eclipsing Binary Stars: Modelling and Analysis*", Springer-Verlag, New York.

Kreiner J.M., Rucinski S.M., Zola S., Niarchos P., Ogloza W., Stachowski G., Baran A., Gazeas K., Drozdz M., Zakrzewski B., Pokrzywka B., Kjurkchieva D., Marchev D., 2003, *A&A* **412**, 465.

Kwee K.K., van Woerden H., 1956, *BAN* **12**, 327.

Leung K.-C., Zhai D., Zhang Y., 1985, *AJ* **90**, 515.

Lu W., Rucinski S.M., 1999, *AJ* **118**, 515.

Lu W., Rucinski S.M., Ogloza W., 2001, *AJ* **122**, 402.

Popper D.M., 1980, *AnnRevA&A* **18**,115.

Qian S., 2001, *MNRAS* **328**, 635.

Rucinski S.M., Lu W., 1999, *AJ* **118**, 2451

Rucinski S.M., Lu W., Mochnacki S.W., Ogloza W., Stachowski G., 2001, *AJ* **122**, 1974

Rucinski S.M., Lu W., Capobianco C.C., Mochnacki S.W., Blake R.M., Thomson J.R., Ogloza W., Stachowski G., 2002, *AJ* **124**, 1738

Rucinski S.M., Capobianco C.C., Lu W., DeBond H., Thomson J.R., Mochnacki S.W., Blake R.M., Ogloza W., Stachowski G., Rogoziecki P., 2003, *AJ* **125**, 3258

van Hamme W., 1993, *AJ* **106**, 2096

Wichmann R., 1998, "*Nightfall User Manual*",
(http://www.lsw.uni-heidelberg.de/users/rwichman/Nightfall.html)

Wilson R.E., Devinney E.J., 1971, *ApJ* **166**, 605.

Wilson R.E., Van Hamme W., 2003, "*Computing Binary Star Observables*", (Reference manual to the Wilson-Devinney Programme), Dept. of Astronomy, Univ. of Florida, Gainesville, Florida, 2003 edition.

VII. Ekler

a) Mali Bilanço ve Açıklamaları:

Projeye tahsis edilen bütçe rakamı toplamda 4,048.00 YTL (4,048,000,000 TL.) dır. Bu kaynak kullanılarak, "*600 Makina ve Teçhizat*" faslından 1 adet Dente CL56-15 dizüstü bilgisayar, "*400 Tüketim Mal ve Malzemeleri*" faslından ise 100 adet yazılabilir CD, 4 adet HP C6615D siyah mürekkepli yazıcı kartuşu, 3 adet HP C3903A lazer yazıcı toner kartuşu ve 50 top A4 fotokopi kağıdı alınmıştır. Her iki fasıldan temin edilen teçhizat ve malzemeler proje önerisinde öne sürülen gerekçeleri doğrultusunda proje dahilindeki işlerde kullanılmıştır.

b) Makine ve Techizatın Konumu ve İlerideki Kullanımına Dair Açıklamalar:

Projeye tahsis edilen bütçe kapsamında "*600 Makina ve Teçhizat*" faslından alınan ve Ankara Üniversitesi Bilgi İşlem Dairesi Başkanlığı'nda A00007905B no ile kayıtlı bulunan dizüstü bilgisayar, projenin her aşamasında (ilgili gözlemevlerinde gözlemler sırasında, ulusal ve uluslararası toplantılarda sunumlar sırasında ve veri analizi - yayın aşamalarında) proje çalışanları tarafından etkin şekilde kullanılmış ve önemli kolaylıklar sağlamıştır. Sonuç ve öneriler bölümünde de ifade edildiği gibi çalışma grubumuz bu ve buna benzer çalışmaları sürdürmektedir ve sürdürecektir. Dolayısıyla bu tür çalışmaların ayrılmaz bir parçası haline gelen ilgili techizat etkin olarak kullanılmaya devam edilecektir.

c) Teknik ve Bilimsel Ayrıntılar:

–

d) Sunumlar:

1. "A Photometric Study of the Recently Discovered Eclipsing Binary V776 Cassiopeiae"
A. Elmaslı, T. Tanrıverdi, B. Albayrak, S.O. Selam, G. Djurasevic
2004, in "*Spectroscopically and Spatially Resolving the Components of Close Binary Stars*", (Eds. R.W. Hilditch, H. Hensberge & K. Pavlovski), ASP Conference Series, Vol: 318, p.192

2. "A Photometric Study of the Neglected Contact Binary V842 Herculis"
H.V. Şenavcı, A. Elmaslı, S.O. Selam, B. Albayrak
2004, in "*Spectroscopically and Spatially Resolving the Components of Close Binary Stars*", (Eds. R.W. Hilditch, H. Hensberge & K. Pavlovski), ASP Conference Series, Vol: 318, p.186

3. "A Photometric Study of the Recently Discovered Contact Binary ET Leonis"
T. Tanrıverdi, H.V. Şenavcı, S.O. Selam, B. Albayrak
2004, in "*Spectroscopically and Spatially Resolving the Components of Close Binary Stars*", (Eds. R.W. Hilditch, H. Hensberge & K. Pavlovski), ASP Conference Series, Vol: 318, p.189

4. "V776 Cas ve V842 Her Değen Çift Yıldızlarının Işık Eğrisi Analizi"
H.V. Şenavcı, M. Yılmaz, İ. Özavcı, O. Aksu, C. Çetintaş, A. Elmaslı, A. Kara, T. Tanrıvedi, B. Albayrak, S. Selam
2005, *XIV. Ulusal Astronomi Kongresi Tebliğleri*, (Editörler: İ. Küçük, F.F. Özeren, İ. Yusifov) (baskıda)

5. "NN Vir ve V351 Peg'in Fotometrik Analizi"
M. Yılmaz, T. Tanrıvedi, C. Çetintaş, H.V. Şenavcı, O. Aksu, A. Kara, A. Elmaslı, İ. Özavcı, B. Albayrak, S. O. Selam
2005, *XIV. Ulusal Astronomi Kongresi Tebliğleri*, (Editörler: İ. Küçük, F.F. Özeren, İ. Yusifov) (baskıda)

6. "BB Peg Sisteminin Dönem ve Işık Eğrisi Analizi"
C. Çetintaş, H.V. Şenavcı, A. Elmaslı, T. Tanrıverdi, T. Tunç, M. Yılmaz, İ. Özavcı, A. Kara, O. Aksu, B. Albayrak ve S.O. Selam
2005, *XIV. Ulusal Astronomi Kongresi Tebliğleri*, (Editörler: İ. Küçük, F.F. Özeren, İ. Yusifov) (baskıda)

e) Yayınlar (SCI kapsamındaki dergilerde):

1. "A Photometric Study of the Recently Discovered Eclipsing Binary V776 Cassiopei"
G. Djurasevic, B. Albayrak, S.O. Selam, S. Erkapic, H.V. Şenavcı
2004, *New Astronomy*, 9, 425

2. "A Photometric Study of the Eclipsing Binary V351 Pegasi"
B. Albayrak, G. Djurasevic, S.O. Selam, O. Atanackovic-Vukmanovic, M. Yılmaz
2005, *New Astronomy*, 10, 163

3. "Photometric Solution of the Eclipsing Binary V351 Pegasi"

B. Albayrak, G. Djurasevic, S. Selam, M. Yılmaz, S. Erkapic, O. Aksu, T. Tanrıverdi
2005, *Astrophysics & Space Science*, 296, 293

4. "The First Ground-based Photometry and Light Curve Analysis of the Recently Discovered Contact Binary HX UMa"
S. Selam, B. Albayrak, M. Yılmaz, H.V. Şenavcı, İ. Özavcı, C. Çetintaş
2005, *Astrophysics & Space Science*, 296, 305

5. "Light Curve Solution and Orbital Period Analysis of the Contact Binary V842 Herculis"
S. Selam, B. Albayrak, H.V. Şenavcı, O. Aksu
2005, *Astronomische Nachrichten*, 326, 746

Spectroscopically and Spatially Resolving the Components of Close Binary Stars
ASP Conference Series, Vol. 318, 2004
R. W. Hilditch, H. Hensberge, and K. Pavlovski (eds.)

A Photometric Study of the Recently Discovered Eclipsing Binary V776 Cassiopeiae

A. Elmaslı[1], T. Tanrıverdi[1], B. Albayrak[1], S. O. Selam[1], and G. Djurašević[2]

[1] *Ankara University, Faculty of Science, Dept. of Astronomy and Space Sciences, 06100 Tandoğan, Ankara, Turkey,* [2] *Astron. Obs., Belgrade, Serbia & Monte Negro and Isaac Newton Institute of Chile, Yug. branch*

Abstract. Photoelectric U, B, and V light curves of the recently discovered eclipsing binary V776 Cas were analyzed to determine the preliminary physical parameters of the system by using the Djurašević's (1992a) inverse-problem method. The light curves which have an amplitude of about $0\overset{\mathrm{m}}{.}15$ were obtained at the TÜBİTAK National Observatory (TUG) between 8 and 9 October 2002. The analysis yields an A-type contact binary as a high overcontact configuration. Due to the proximity of its visual companion the light curves were contaminated by the third-light effect which has a relatively small influence on the estimation of the system parameters.

1. Introduction

V776 Cas (HIP 8821) was discovered as an eclipsing binary by the Hipparcos Astrometry Satellite (ESA 1997). The system has a spectral type of F0 and an amplitude of $0\overset{\mathrm{m}}{.}147$ ranging from $8\overset{\mathrm{m}}{.}943$ to $9\overset{\mathrm{m}}{.}090$ in V band, and also almost equal depth of primary and secondary eclipses (ESA 1997). The first ground-based photometric light curve of the system was obtained by Gomez-Forrellad et al. (1999). The light curve shows that the primary minimum is the deeper one by an amount of $0\overset{\mathrm{m}}{.}19$ while the depth of secondary is $0\overset{\mathrm{m}}{.}137$. Rucinski, Lu, & Mochnacki (2001) presented spectroscopic observations and radial velocity curves yielding $q = 0.130(4)$. They pointed out that the spectral type of the system is F2 V and belongs to the A sub-class of W UMa configuration. V776 Cas is the brighter member of the visual binary ADS1485. The companion, at separation of $5\overset{''}{.}38$, is 2^{m} fainter than the contact binary. The photometric elements of the system have not been published yet. Thus, we observed and analyzed V776 Cas.

2. Observations and Light Curve Analysis

New observations of V776 Cas in U, B, and V filters were obtained at the TÜBİTAK National Observatory (TUG) on 8^{th} and 9^{th} of October 2002, by using a SSP-5 photometer attached to a 0.4m Cassegrain telescope. The comparison and check stars are BD+69°0118 and BD+69°0122, respectively. A total of 182 observations were secured during the observations in each filter.

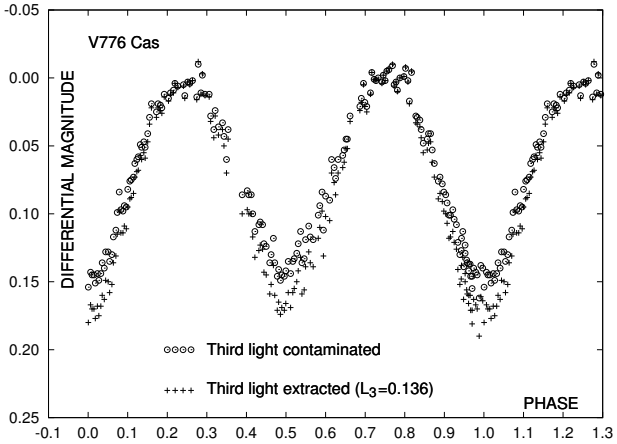


Figure 1. A comparison between the V light curves of V776 Cas with and without third light.

The probable error of a single observation point was estimated to be ±0.017, ±0.005, and ±0.007 in U, B, and V colours, respectively.

To estimate the parameters of V776 Cas, we used Djurašević's (1992b) programme generalised to the case of an overcontact configuration (Djurašević et al. 1998). The programme is based on the Roche model and the principles arising from the paper by Wilson & Devinney (1971). The light-curve analysis was made by applying the inverse-problem method (Djurašević 1992a). The observed and theoritical light curves are shown in Figure 1. The non-linear limb-darkening coefficients were taken from Claret's (2000) table. Due to its close proximity the visual companion could not be excluded in the diaphragm during the observations and therefore our photometric measurements were contaminated by the third light. Rucinski et al. (2001) were able to avoid this visual companion during the radial velocity observations of the system. Although they observed separately the radial velocity of the visual companion on two occasions they did not calculate the third light parameter L_3. We were able to calculate L_3 only in V band from the published magnitudes of the visual components from two different sources, as L_3=0.136 from Hipparcos Double and Multiple Stars Annex (ESA 1997) and as $L_3 = 0.091$ from the second edition of the CCDM Catalogue (Dommanget & Nys 2002). Separate light curve solutions have been obtained with these two L_3 values in the V band and they are listed together with the other solutions in Table 1.

3. Conclusion

The U, B, and V light curves of V776 Cas were analysed with the Djurašević's (1992a) code. The orbital inclination, temperature of the cooler component, fractional radii, and the filling factor for the critical Roche lobe of the component stars of the system were derived. The results describe the V776 Cas system as a high overcontact configuration with relatively small temperature differences between the components. The third light contribution (coming from the visual companion) to the total light of the system is relatively small. Therefore, it

Table 1. The preliminary photometric solution of V776 Cas.

Parameters	U band	B band	V band $L_3 = 0.000$	V band $L_3 = 0.091$	V band $L_3 = 0.136$
$q = m_c/m_h$	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13
i	53.9 ± 0.4	54.0 ± 0.2	53.6 ± 0.2	54.7 ± 0.2	55.8 ± 0.2
T_h (K)	6890	6890	6890	6890	6890
T_c (K	6654 ± 90	6544 ± 49	6610 ± 50	6616 ± 48	6620 ± 46
$\Omega_{(h,c)}$	2.0149	2.0111	2.0129	2.0013	1.9984
f_{over}[%]	38.81	43.29	41.18	54.96	58.39
$L_h/L_{(h,c,3)}$	0.875	0.881	0.872	0.790	0.748
$\Sigma(O-C)^2$	0.0457	0.0138	0.0093	0.0092	0.0093
$R_h(R_\odot)$	1.71 ± 0.02			1.73	1.73
$R_c(R_\odot)$	0.71 ± 0.02			0.73	0.74
$M_h(M_\odot)$	1.63 ± 0.02			1.63	1.63
$M_c(M_\odot)$	0.21 ± 0.02			0.21	0.21

has not a serious impact in the estimation of basic system parameters. The existence of the third light is reflected above all in the estimation of the degree of overcontact and in the orbit inclination of the system.

Acknowledgments. The authors would like to thank TÜBİTAK National Observatory (TUG) for the observing time. This research was supported by the Turkish Academy of Sciences in the framework of the Young Scientist Award Program (BA/TÜBA-GEBİP/2001-2-2).

References

Claret, A. 2000, A&A, 363, 1081

Djurašević, G. 1992a, Ap&SS, 197, 17

Djurašević, G. 1992b, Ap&SS, 196, 241

Djurašević, G., Zakirov, M., Hojaev, A., & Arzumanyants, G. 1998, A&AS, 131, 17

Dommanget, J., & Nys, O. 2002, Observations et Travaux, 54, 2

ESA 1997, The Hipparcos and Tycho Catalogs, SP-1200 (Nordwijk: ESA)

Gomez-Forrellad, J. M., Garcia-Melendo, E., Guarro-Flo, J., et al. 1999, IBVS, No. 4702

Rucinski, S. M., Lu, W., & Mochnacki, S. W. 2001, AJ, 122, 1974

Wilson, R. E., & Devinney, E. J. 1971, ApJ, 166, 605

Spectroscopically and Spatially Resolving the Components of Close Binary Stars
ASP Conference Series, Vol. 318, 2004
R. W. Hilditch, H. Hensberge, and K. Pavlovski (eds.)

A Photometric Study of the Neglected Contact Binary V842 Herculis

H.V. Şenavcı, A. Elmaslı, S. O. Selam, and B. Albayrak

Ankara University, Faculty of Science, Dept. of Astronomy and Space Sciences, 06100, Tandoğan, Ankara, Turkey

Abstract. Photoelectric B and V light curves of the neglected eclipsing binary V842 Her were studied to determine the physical parameters of the system. The observations of the binary system were made at the TÜBİTAK National Observatory (TUG) during the nights of 3rd and 4th July, 2003. The light curves exhibit the so-called O'Connell effect which the level of the primary maxima being higher than that of the secondary ones in both pass-bands. The new light curves and the radial velocity curves (Rucinski & Lu 1999) were analysed simultaneously using the WD-code. The analysis yields a W-type contact binary that the larger, more massive component being slightly cooler than the smaller, less massive one. The O'Connell effect in the light curves is explained in terms of a dark-spot located on the more massive component.

1. Introduction

The variability of V842 Her (BD+50°2255) was discovered by Geyer et al. (1955) on photographic plates. It was classified as RR Lyrae-type by Filatov (1960) but, later identified as W UMa-type by Vandenbroere (1993) and confirmed by other authors (Nomen-Torres & Garcia-Melendo 1996; Diethelm 1994). Vandenbroere (1993) indicated that V842 Her shows spot activity. Nomen-Torres & Garcia-Melendo (1996) computed a preliminary model of the system by using Binary Maker 2.0 and pointed out that the O'Connell effect and asymmetries in the light curve were due to a hot spot located on the secondary component. The first radial velocity curve was obtained by Rucinski & Lu (1999) and the mass ratio of the system was found to be 3.852. Csizimadia (2001) studied the period variation and stated that the period of the system has been constant over the last decade.

2. Observations

The new observations in B and V filters of V842 Her were obtained at the TÜBİTAK National Observatory on 3rd and 4th July, 2003 by using a SSP-5A photometer attached to a 0.4m Cassegrain telescope. GSC 03497-0031 and GSC 03497-0349 were chosen as comparison and check stars, respectively. The observations in B and V band are shown in Figure 1 .

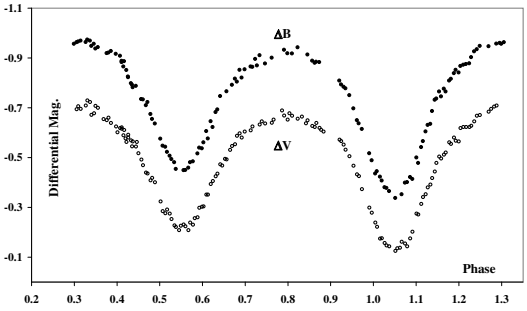


Figure 1. The new light curves of V842 Her in B and V band.

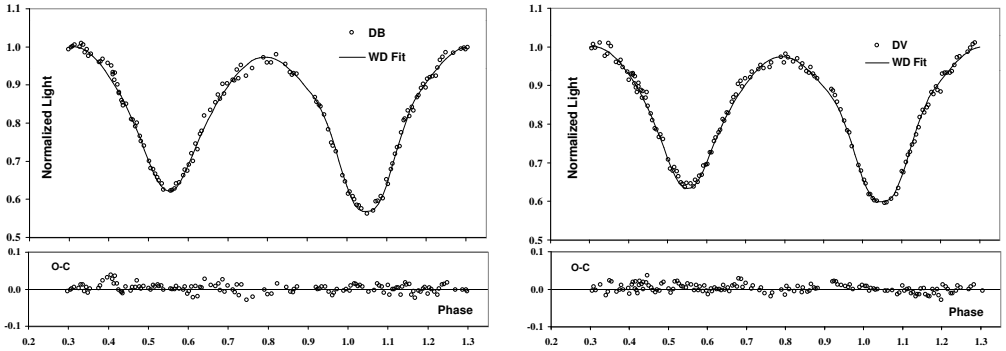


Figure 2. The normalized light curves with WD fit and the O-C residuals.

3. Light Curve Analysis

The light and the radial velocity curves were analyzed simultaneously by using the last version of WD-code (Wilson & Devinney 1971). The observed and the theoretical light curves are shown in Figure 2. The O-C differences between the observed and calculated points are also given in the figures.

The temperature of the primary star T_1, was adopted from Popper's (1980) effective temperature calibration table according to the spectral type (F9V) which was derived by Rucinski & Lu (1999). The solution used the adopted mass ratio from Rucinski & Lu (1999). The linear limb-darkening coefficients were interpolated from the work by Van Hamme (1993). The gravity darkening coefficients ($g_1 = g_2 = 0.32$) and the bolometric albedos ($A_1 = A_2 = 0.5$) were adopted for the stars with convective envelopes. The Binary Maker 2.0 program was used to obtain the preliminary parameters for the system. Once an approximate fit was obtained, the DC program was used to derive the final solution.

During the solution the adjusted parameters were the orbital inclination i, the mean temperature of the secondary star T_2, the potential of the components Ω_1 and Ω_2, and the monochromatic luminosity of the primary star L_1 (the Planck function is used to compute the luminosity). The results of the photometric solution are given in Table 1.

4. Conclusion

The V and B light curves of V842 Her were analyzed by the Wilson-Devinney code. The orbital inclination, temperature of the cooler component and fractional radii of the components of the system were derived. The analysis yields that the more massive component is about 340 K cooler than the less massive one due to a dark-spot located on the more massive component. The results indicate that V842 Her is a W-type W UMa binary where the primary eclipse is occultation and the secondary one is transit.

Table 1. The photometric solution of V842 Her.

Parameters	B band	error	V band	error
$q = m_2/m_1$	3.854		3.854	
i	77.739	± 0.74	77.739	± 0.74
T_1 (K)	5700		5700	
T_2 (K)	5362	± 20	5362	± 20
$\Omega_1 = \Omega_2$	7.566	± 0.02	7.566	± 0.02
$L_1/(L_1 + L_2)$	0.312	± 0.006	0.291	± 0.005
$L_2/(L_1 + L_2)$	0.688		0.709	
r_1(pole)	0.261		0.261	
r_1(side)	0.273		0.273	
r_1(back)	0.314		0.314	
r_2(pole)	0.476		0.476	
r_2(side)	0.517		0.517	
r_2(back)	0.544		0.544	
$\Sigma(O-C)^2$	0.2479			

Acknowledgments. The authors would like to thank TÜBİTAK National Observatory (TUG) for the observing time. This research was supported by the Turkish Academy of Sciences in the framework of the Young Scientist Award Program (BA/TÜBA-GEBİP/2001-2-2).

References

Csizmadia, Sz. 2001, IBVS, No. 5191

Diethelm, R. 1994, IBVS, No. 4011

Filatov, G. S. 1960, Astr. Circular, No. 215

Geyer, E., Kippenhahn, R., & Strohmeier, W. 1955, Kleine Veröffentlichungen der Remeis-Sternwarte Bamberg, No. 11

Popper, D. M. 1980, ARA&A, 18, 115

Rucinski, S. M., & Lu, W. 1999, AJ, 118, 2451

Nomen-Torres, J., & Garcia-Melendo, E. 1996, IBVS, No. 4365

Vandenbroere, J. 1993, IBVS, No. 3946

Van Hamme, W. 1993, AJ, 106, 2096

Wilson, R. E., & Devinney, E. J. 1971, ApJ, 166, 605

Spectroscopically and Spatially Resolving the Components of Close Binary Stars
ASP Conference Series, Vol. 318, 2004
R. W. Hilditch, H. Hensberge, and K. Pavlovski (eds.)

A Photometric Study of the Recently Discovered Contact Binary ET Leonis

T. Tanrıverdi, H. V. Şenavcı, S. O. Selam, and B. Albayrak

Ankara University, Faculty of Science, Dept. of Astronomy and Space Sciences, 06100, Tandoğan, Ankara, Turkey

Abstract. New photoelectric B and V band light curves of the contact binary ET Leonis were studied to determine the physical parameters of the system. The observations were obtained at TÜBİTAK National Observatory (TUG) on consecutive nights in March 2003. The light curves exhibit the so-called O'Connell effect with the level of the second maxima being higher than that of the first in both bands. The amplitudes of the light curves are very small, indicating a relatively low orbital inclination angle. The new light curves and the radial velocity curve were analysed simultaneously using the last version of the Wilson-Devinney Code (WD-2003). The analysis yields a W-type W UMa system viewed at a very low orbital inclination angle.

1. Introduction

ET Leonis (HIP 51677, HD 91386, BD+18°2374) was listed as an unknown type of variable with 0.1732510 days of period in Hipparcos Catalogue and its brightness vary $9\overset{\mathrm{m}}{.}5494$ to $9\overset{\mathrm{m}}{.}721$ in the V-band (ESA 1997). Then it was classified as an EW-type system in the 74^{th} Special Name-List of Variable Stars (Kazarovets et al. 1997). ET Leo was also mentioned by Duerbeck (1997) among the candidates of possible low-amplitude EW-type binaries. Rucinski et al. (2002) obtained the radial velocity curves of the both components and determined the spectroscopic mass ratio of the system as $q = 2.92$. They estimated the spectral type of the system as G8V, which appears to be late relative to the TYC2 colour index; $B - V = 0.61$. By using this color index and the M_V vs. $(B - V)$ calibration for contact binaries (Rucinski & Duerbeck 1997), they also estimated the calibrated absolute magnitude of the system as $M_V(\mathrm{cal})=4\overset{\mathrm{m}}{.}01$. This value is converted by using the M_V vs. (sp-type) calibration of Straizys & Kuriliene (1981) and the spectral type of the system is estimated as F8V. This value also confirms our final results.

2. Observations

ET Leo was observed in B and V pass-bands at TUG on two consecutive nights in March of 2003, by using a SSP5 photometer attached to the 0.4m Cassegrain telescope. HD 91149 and HD 91395 used as comparison and check stars, respectively. The observed B, V light curves of the system are plotted in Fig. 1. The depth of primary and secondary minima are almost equal and the level of max II at phase 0.75 is higher than that of max I at phase 0.25 in both pass-bands.

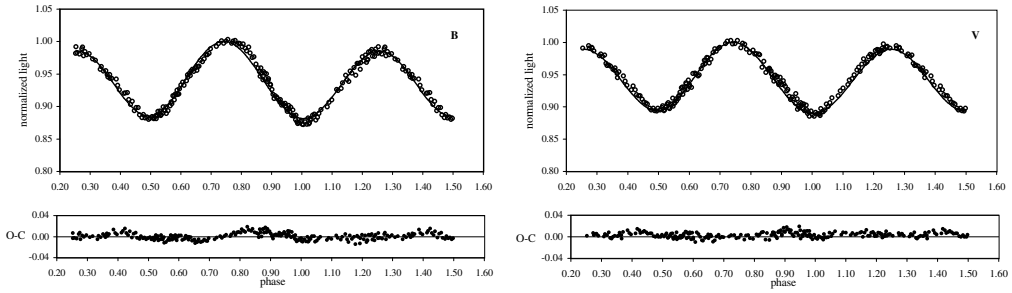


Figure 1. The normalized light curves, WD-fit and the O-C residuals.

3. Light Curve Analysis and Results

During the light curve analysis the last version of WD-code (WD-2003) was used. We fixed the primary component temperature to $T_1 = 6500$ K according to the spectral type of the system obtained from the M_V vs. Sp-type calibration by Straizys & Kuriliene (1981). Other fixed parameters were $q, A_1, A_2, x_1, x_2, g_1$, and g_2. The mass ratio q were fixed to the spectroscopially determined value by Rucinski et al. (2002) as $q = 2.92$. Bolometric albedos of the components were assumed as $A_1 = A_2 = 0.5$ and gravity darkening coefficients $g_1 = g_2 = 0.32$, for stars with convective envelopes. Limb darkening coefficients were taken from Van Hamme (1993). The adjustable parameters are the orbital inclination i, the mean temperature of the secondary star, T_2, the potential of the components $\Omega = \Omega_1 = \Omega_2$, and the monochromatic luminosity of the primary star, L_1 (the Planck function is used to compute the luminosity). After several runs we get the best fitting model in mode 3. Finally the converged solutions were found with a dark spot on the more massive component. The parameters of the best fit are given in Table 1.

The analysis of the light curves show that the temperatures difference between the components is about 400 K. This system appears to be a W-subtype of W UMa system. Most of the observed variation in the light curve resulted from the proximity effects such as: ellipsoidal variation, albedo effects, gravity darkening effects, limb darkening effects and spot effects. Because of the low inclination angle of the system ($i = 42.9°$) the geometric effects (i.e., eclipse) are almost negligible. The best photometric fit was reached by including a dark spot on the more massive component. The dark-spot is located at latitude 31.3° and longitude 62°. Its radius is about 32° and temperature factor is 0.98 which indicates that the spot is 2% cooler than its surrounding photosphere. This solution yields that ET Leo is a W-subtype W UMa-type contact binary which the slightly hotter and less massive component eclipsed at the primary minimum.

Acknowledgments. The authors would like to thank TÜBİTAK National Observatory TUG for the observing time. This research was supported by the Turkish Academy of Sciences in the framework of the Young Scientist Award Program (BA/TÜBA-GEBİP/2001-2-2).

Table 1. The photometric solution of ET Leo.

Parameters	B band	error	V band	error
$q = m_2/m_1$	2.920		2.920	
i	42.927	±0.098	42.927	±0.098
T_1(K)	6500		6500	
T_2(K)	6107	±86.62	6107	±86.62
$\Omega_1 = \Omega_2$	6.38024	±0.014	6.38024	±0.014
$L_1/(L_1 + L_2)$	0.357	±0.0016	0.336	±0.0017
$L_2/(L_1 + L_2)$	0.643		0.664	
x_1	0.637		0.523	
x_2	0.681		0.557	
$A_1 = \mathrm{A}_2$	0.5		0.5	
$g_1 = \mathrm{g}_2$	0.32		0.32	
r_1(pole)	0.280		0.280	
r_1(side)	0.293		0.293	
r_1(back)	0.333		0.333	
r_2(pole)	0.489		0.489	
r_2(side)	0.517		0.517	
r_2(back)	0.518		0.518	
$\Sigma(O-C)^2$	0.2146			

References

Duerbeck, H. W. 1997, IBVS, No. 4513
ESA 1997, The Hipparcos and Tycho Catalogues, ESA SP-1200
Kazarovets, E. V., Samus, N. N., Durlewich O. V., et al. 1999, IBVS, No.4659
Rucinski, S. M., & Duerbeck, H. W. 1997, PASP, 109, 1340
Rucinski, S. M., Lu, S. M., Capobianco, C. C., et al. 2002, AJ, 124, 1738
Straizys, V., & Kuriliene, G. 1981, Ap&SS, 80, 253
Van Hamme, W. 1993, AJ, 106, 2096

"XIV. Ulusal Astronomi Kongresi" 31 Ağustos – 4 Eylül 2004, Kayseri
Editörler: İ.KÜÇÜK, F.F.ÖZEREN ve İ.YUSİFOV

V776 Cas ve V842 Her Değen Çift Yıldızlarının Işık Eğrisi Analizi

Hakan Volkan ŞENAVCI, Mesut YILMAZ, İbrahim ÖZAVCI, Ozan AKSU, Cem ÇETİNTAŞ, Aslı ELMASLI, Arzu KARA, Taner TANRIVERDİ, Berahitdin ALBAYRAK ve Selim Osman SELAM

Ankara Üniversitesi
Astronomi ve Uzay Bilimleri Bölümü,
06100, Tandoğan, Ankara

Özet: HIPPARCOS uydusu keşfi V776 Cas ve 1955 yılında keşfedilen ancak ihmal edilmiş V842 Her yıldızlarının sırasıyla U, B, V ve B, V bandları ışık eğrileri, sistemlerin fiziksel parametrelerini elde etmek amacıyla Wilson-Devinney ve Djurasevic'in ışık eğrisi analiz programları kullanılarak çözüldü. Gözlemler TÜBİTAK ULUSAL GÖZLEMEVİ'nde 8-9 Ekim 2002 ve 3-4 Temmuz 2003 tarihleri arasında gerçekleştirildi. V776 Cas için varılan sonuçlar, sistemin yüksek değme oranına sahip A-türü bir W UMa olduğunu göstermektedir. V776 Cas ADS 1485 görsel çiftinin bir üyesi olduğundan, elde edilen ışık eğrileri üçüncü ışık katkısını içermektedir. Analizlerde üçüncü ışık etkisi de dikkate alındı. V842 Her için elde edilen sonuçlara göre sistemde, daha büyük kütleli bileşenin üzerinde bulunan soğuk leke nedeniyle daha küçük kütleli bileşene göre daha soğuk görüldüğü tipik bir W-türü W UMa olduğunu göstermektedir. Işık eğrisindeki O'Connell etkisi, daha büyük kütleli bileşenin üzerinde soğuk bir lekenin var olabileceğine işaret etmektedir.

Anahtar kelimeler: Örten değişen çift yıldızlar, ışık eğrisi analizi, V776 Cas, V842 Her

Abstract: New photometric U, B, V and B, V light curves were obtained for the HIPPARCOS discovery V776 Cas and for the neglected contact binary V842 Her respectively to determine the physical parameters of the systems by Wilson-Devinney and Djurasevic's light curve analysis program. The light curves were obtained at the TÜBİTAK National Observatory during the nights October 8 and 9, 2003, July 3 and 4, 2003, respectively. The results for V776 Cas indicate that the system is a A-type W UMa binary with a high degree of overcontact configuration. Because V776 Cas is the brighter member of the visual binary ADS 1485, the light curves were contaminated by the third light. So the solutions includes the third light effect. The light curve solutions of V842 Her indicates that the system is a typical W-type W UMa which the more massive larger component is slightly cooler than the less massive smaller one due to a cool spot.

Key words: Eclipsing binary stars, Light curve analysis, V776 Cas, V842 Her

1. Giriş

V776 Cas (HIP 8821, BD +69 121) HIPPARCOS Astrometri Uydusu (ESA, 1997) tarafından keşfedilen bir örten çift yıldız sistemidir. Sistem F0 tayf türünden ve $8^m.943$ den $9^m.090$ a değişen, birinci ve ikinci minimum derinlikleri neredeyse eşit olan bir değişim genliğine sahiptir (ESA, 1997). Duerbeck (1997), bu yıldızın gerçek periyodunun, HIPPARCOS periyodunun iki katı bir periyoda sahip olduğunu ve düşük genlikli EW türü bir sistem olduğunu belirtti. Sisteme ait yerden yapılan ilk gözlemler Gomez-Forrellad vd. (1999) tarafından gerçekleştirildi. 14 cm'lik bir teleskopla V bandında elde ettikleri ışık eğrisine göre birinci minimum derinliği $0^m.19$ iken ikinci minimum derinliği $0^m.137$ dir. Gomez-Forrellad vd, elde ettikleri düşük genlikli ışık eğrisine göre bu sistemin marjinal tutulmalara sahip bir çift yıldız veya bir elipsoidal değişen olabileceğini ileri sürdüler. Rucinski vd. (2001) sisteme ait ilk radyal hız çalışmasında; $q = m_c/m_h = 0.130(4)$, $V\gamma(km/sn) = -24.71 \pm 0.69$, $M_h + M_c = 0.975 \pm 0.026\ M_\odot$ parametrelerini belirledi. Yine aynı çalışmada sistemin F2 V tayf türünden bir A-türü WUMa olduğu tespit edildi. Bu çalışmada düşük kütle fonksiyonu ve özellikle düşük yörünge eğimi sebebiyle küçük genlikli ışık eğrisine sahip bu sisteme ait ilk fotometrik analiz gerçekleştirilmiştir.

V842 Her yıldızının değişen bir yıldız olduğu ilk defa Geyer vd. (1955) tarafından fotoğrafik gözlemlerden bulundu. Sistem, Filatov (1960) tarafından RR Lyr türü bir değişen yıldız olarak tanımlandı ancak daha sonra Vandenbroere (1993) tarafından WUMa türü bir değişen olduğu anlaşıldı. Vandenbroere (1993) sistemin leke aktivitesi gösterdiğini belirtti. Torres-Melendo (1996), sisteme ait fiziksel parametreleri Binary Maker 2.0 programı kullanarak belirlediler ve sistemin ışık eğrisindeki asimetriyi (O'Connell etkisi) ikinci

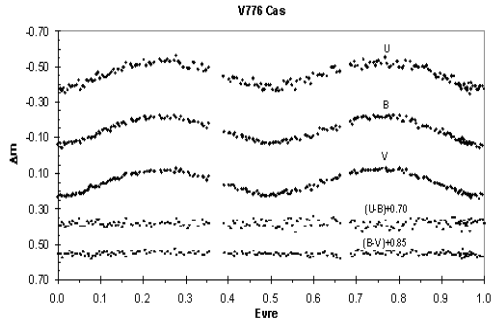
Bildiri tam metni için : Hakan Volkan ŞENAVCI
e-mail: volkan@astro1.science.ankara.edu.tr

bileşen üzerinde yer alan bir sıcak leke ile açıklamaya çalıştılar. V842 Her yıldızına ait ilk dikine hız gözlemleri Rucinski vd. (1999) tarafından yapıldı. Bu çalışmada sisteme ait dikine hız parametreleri $q = m_c/m_h = 3.852(24)$, $V\gamma$(km/sn) = -57.98 ± 1.55 olarak belirlendi. Yine aynı çalışmada sistemin tayf türünün F9 V olduğu bulundu, ancak Rucinski vd. W-türü bir WUMa için bu tayf türünün erken ve 0.42 günlük dönemin biraz uzun olduğunu belirttiler.

2. Gözlemler

V776 Cas'a ait gözlemler 8-9 Ekim 2002 tarihlerinde TÜBİTAK ULUSAL GÖZLEMEVİ (TUG)'nde 40 cm lik Cassegrain teleskobuna bağlı SSP-5A fotometresi ile UBV bandlarında gerçekleştirildi. Gözlemlerde mukayese ve denet yıldızı olarak Gomez-Forrellad vd (1999)'nin de kullandığı sırasıyla K0 tayf türünden BD+69°0118 ve G5 tayf türünden BD+69°0122 yıldızları kullanıldı. Gözlem esnasında her filtrede 182 nokta alındı. Her bir geceye ait ve her renk için sönümleme katsayıları mukayese yıldızı gözlemlerinden hesap edildi. Diferansiyel U, B, V ışık ve U-B ile B-V renk eğrileri Şekil 2.1.'de verildi. Her gözlemin olası hatası U, B, V bandları için sırası ile ± 0.017, ± 0.005 ve ± 0.007 olarak bulundu. Bu gözlemlerden elde edilen minimum zamanları yardımıyla hesaplanan ışık elemanları Tanrıverdi vd (2003) tarafından yayınlandı:

HJD MinI=2452556.3106(5) + 0.^{d}44041618(1) x E.



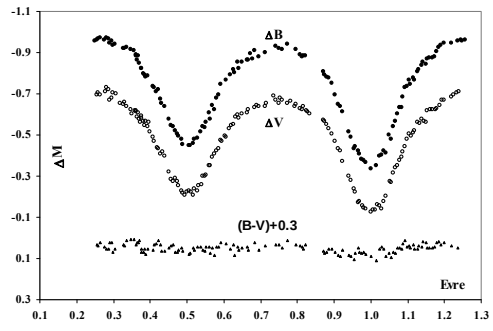
Şekil 2.1. V776 Cas'a ait diferansiyel U, B, V ışık, U-B ve B-V renk eğrileri

V776 Cas yıldızı ADS 1485 görsel çiftinin parlak bileşenidir. Diğer bileşeninin ayrıklığı 5.″38 olup V776 Cas'tan 2 kadir daha sönüktür. Ayrıklığın çok küçük olması nedeniyle bu yeni gözlemler süresince diğer bileşen diyafram dışında tutulamadı. Bu nedenle sisteme ait ışık eğrisi ayrık bileşene ait üçüncü ışık katkısını da içermektedir. HIPPARCOS verilerine göre V776 Cas'ın V bandı görünen parlaklığı 9.160 kadir ve daha sönük olan diğer bileşeninki ise 11.164 kadir olarak verilmektedir. Bu verilere göre Pogson formülü kullanılarak bulunan üçüncü ışık katkısı $L_3 = 0.136$ dır. Benzer şekilde CCDM kataloğunun (Dommanget & Nys, 2002) ikinci baskısından alınan verilere göre üçüncü ışık katkısı $L_3 = 0.091$ olarak hesaplandı.

V842 Her örten çiftine ait gözlemler 3-4 Temmuz 2003 tarihlerinde TÜBİTAK ULUSAL GÖZLEMEVİ (TUG)'nde yapıldı. Gözlemler 40 cm lik Cassegrain teleskobuna bağlı SSP-5A fotometresi ile B ve V bandlarında alındı. Gözlemlerde mukayese ve denet yıldızı olarak sırası ile GSC 03497-0031 ve GSC 03497-0349 yıldızları kullanıldı. Gözlem esnasında B ve V filtrelerinden sırasıyla 135 ve 154 nokta alındı. Her bir geceye ait ve her renk için sönümleme katsayıları mukayese yıldızı gözlemlerinden hesaplandı. Diferansiyel B, V ışık ve B-V renk eğrileri Şekil 2.2.'de verildi. Her gözlemin olası hatası B ve V bandları için sırası ile ± 0.026 ve ± 0.013 olarak hesaplandı. Gözlemlerde elde edilen minimum zamanlarından ve daha önce sisteme ilişkin elde edilmiş minimum zamanlarından sistemin düzeltilmiş ışık elemanları :

HJD MinI=2450177.4857(19)+0.^{d}41903822(58)xE. olarak bulundu.

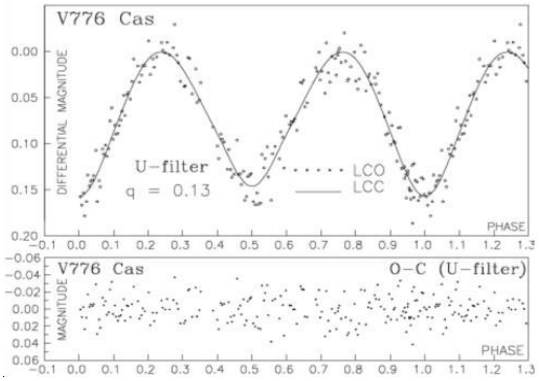
Sistemin B ve V bandlarında elde edilmiş olan ışık eğrilerinde maksimumlar arasındaki fark B-bandında 0.031 ve V-bandında 0.023 kadirdir. Sisteme ilişkin B ve V bandı ışık eğrilerinin maksimumları arasında izlenen seviye farkının (asimetrinin) bileşenlerden en az birinde bulunan leke veya lekelerden kaynaklandığı düşünülmektedir. Şekil 2.2.'den de anlaşılabileceği gibi sisteme ait B-V renginde birinci minimum civarında soğuk bileşenin sıcak bileşenin büyük bir kesrini örtmesinden kaynaklanan küçük bir kızarma etkisi görülmektedir. Bunun dışında B-V renginde kayda değer bir değişim görülmemesi, bileşenleri saran ortak zarf boyunca ısının düzgün olarak dağıtıldığının bir göstergesidir.



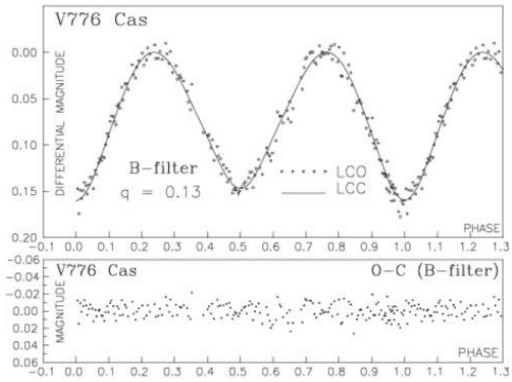
Şekil 2.2. V842 Her'e ait diferansiyel B, V ışık, ve B-V renk eğrileri

3. Işık Eğrisi Analizi

Bu çalışmada V776 Cas'a ait fiziksel parametreleri belirlemek için Roche modeli ve Wilson-Devinney programının prensiplerine dayanan Djurasevic (Djurasevic, 1992a, 1992b)'in ışık eğrisi analizi programı kullanıldı. Işık eğrileri ile dikine hız gözlemleri eş zamanlı olarak çözüldü. Işık eğrisi analizi için programa normal noktalar yerine direkt olarak gözlemsel veriler girildi. Rucinski vd. (2001)'nin belirlediği tayf türüne göre sisteme ait birinci bileşenin sıcaklığı Popper (1980)'ın sıcaklık kalibrasyon tablolarından T_h = 6980°K olarak belirlendi. Sisteme ilişkin sıcaklıklara bağlı olarak lineer olmayan kenar kararma katsayıları Claret (2000)'in tablolarından belirlendi. Çekim kararma katsayıları ve albedo değerleri sistemin fiziğine uygun bir şekilde sırası ile Lucy (1967) ve Rucinski (1969)'den alındı. Model atmosfer olarak Djurasevic'in programında Basel yıldız atmosferi modeli (Lejeune vd., 1997, 1998) kullanıldı. Sisteme ait fiziksel parametrelerin çözüm sonuçları, sistemin üç banddaki gözlemsel ve kuramsal ışık eğrileri ve farkları ile sistemin 0.25 evresindeki geometrik modeli sırası ile Çizelge 3.1., Şekil 3.1. ve Şekil 3.2., Şekil 3.3. ve Şekil 3.4. de sunuldu.



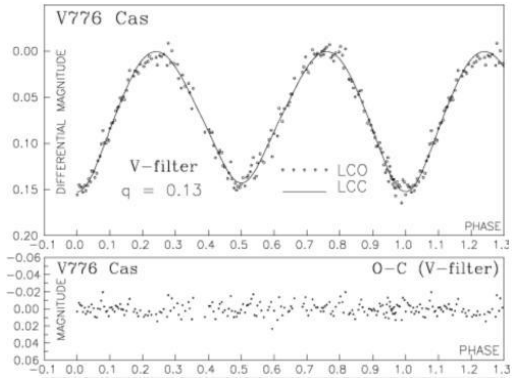
Şekil 3.1. V776 Cas'ın U-bandı gözlemsel ve kuramsal ışık eğrileri ile farkları.



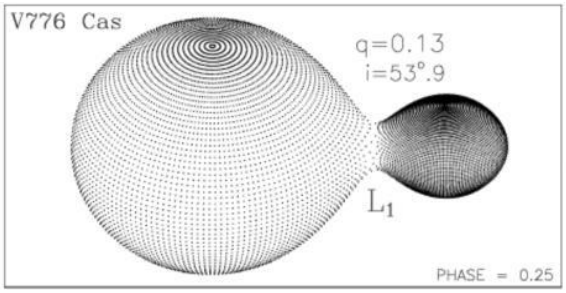
Şekil 3.2. V776 Cas'ın B-bandı gözlemsel ve kuramsal ışık eğrileri ile farkları

Çizelge 3.1. V776 Cas'ın ışık eğrisi analizi sonuçları

nicelik	U-filtresi	B-filtresi	V-filtresi
n	182	182	182
Σ(O-C)2	0.0457	0.0138	0.0093
L_3	0	0	0.136
$q = m_c/m_h$	0.13		
T_h	6890		
$g_h = g_c$	0.32		
$A_h = A_c$	0.5		
T_c	6654 ± 90	6544 ± 49	6620 ± 46
i	53.9 ± 0.4	54.0 ± 0.2	55.8 ± 0.2
$a^1_{h,c}$	0.38, 0.34	0.31, 0.31	0.37, 0.38
$a2_{h,c}$	0.90, 0.87	0.96, 0.82	0.87, 0.80
$a^3_{h,c}$	-0.55, -0.4	-0.63,-0.38	-0.77,-0.64
$a^4_{h,c}$	0.11, 0.04	0.17, 0.07	0.26, 0.20
$\Omega_{h,c}$	2.0149	2.0111	1.9984
R_h(D = 1)	0.526	0.527	0.531
R_c(D = 1)	0.216	0.217	0.221
L_h / $L_{h,c,3}$	0.875	0.881	0.748
$M_h(M_\odot)$	1.63±0.02		1.63
$M_c(M_\odot)$	0.21±0.02		0.21
$R_h(R_\odot)$	1.71±0.02		1.73
$R_c(R_\odot)$	0.71±0.02		0.74
log gh	4.18±0.02		4.18
log gc	4.06±0.02		4.03
Mbolh	2.86±0.02		2.83
Mbolc	4.94±0.03		4.86
ayör($R_\odot$)	2.985±0.008		2.985



Şekil 3.3. V776 Cas'ın V-bandı gözlemsel ve kuramsal ışık eğrileri ile farkları



Şekil 3.4. V776 Cas'ın 0.25 evresindeki geometrik modeli

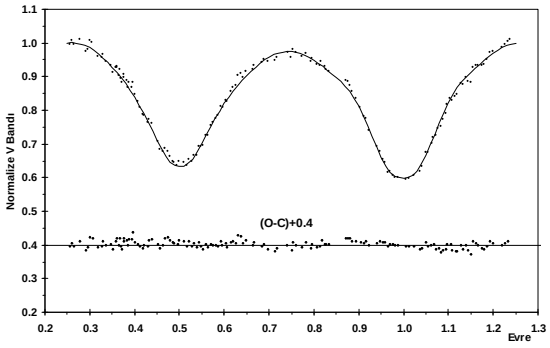
V842 Her yıldızına ait fiziksel parametreleri belirlemek için WD-2003 programı kullanıldı. Işık eğrileri ile dikine hız gözlemleri eş zamanlı olarak çözüldü. Işık eğrisi analizi için programa normal noktalar yerine direkt olarak gözlemsel veriler girildi. Sisteme ait ışık eğrilerindeki asimetri daha önce Nomen-Torres ve Garcia-Melendo (1996)'nun Binary Maker 2.0 programını kullanarak yaptığı analizde ikinci bileşen üzerine sıcak bir leke koyarak modellenmişti. Ancak sistemin dönem değişimi ile ilgili bilgilerin yetersiz olmasından ve güneş benzeri soğuk bileşenler içermesinden dolayı bu çalışmada soğuk leke ile modelleme tercih edildi.

Rucinski vd. (2001) nin belirlediği tayf türüne göre sisteme ait birinci bileşenin sıcaklığı Popper (1980)'ın sıcaklık kalibrasyon tablolarından T_1 = 6000 K olarak belirlenmiş, ancak Rucinski vd. (1999)'nin de irdelediği gibi sisteme göre yüksek olan bu sıcaklıkta uygun bir fit gerçekleştirilemedi. Ardışık denemeler sonucunda birinci bileşenin sıcaklığı T_1 = 5700 K'e çekilerek analize devam edildi. Sisteme ilişkin sıcaklıklara bağlı olarak lineer olmayan kenar kararma katsayıları van Hamme (1993)'nin tablolarından alındı. Çekim kararma katsayıları ve albedo değerleri sistemin fiziğine uygun bir şekilde sırası ile Lucy (1967) ve Rucinski (1969)'den alındı. Model atmosfer olarak WD-2003 programında kullanılan Kurucz (1993) yıldız atmosferi modeli kullanıldı.

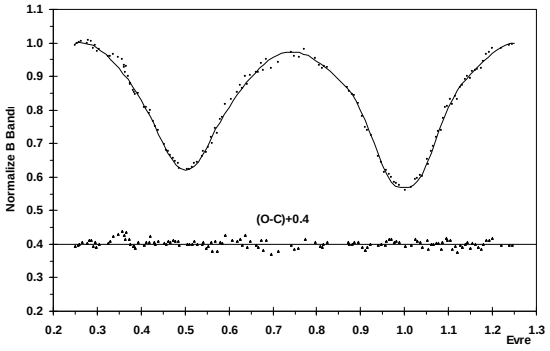
Sisteme ait fiziksel parametrelerin çözüm sonuçları, sistemin her iki banddaki gözlemsel ve kuramsal ışık eğrileri ve farkları ile sistemin 0.75 evresindeki geometrik modeli sırası ile Çizelge 3.2., Şekil 3.5., Şekil 3.6., ve Şekil 3.7.' de sunuldu.

Çizelge 3.2. V842 Her'in ışık eğrisi analizi sonuçları

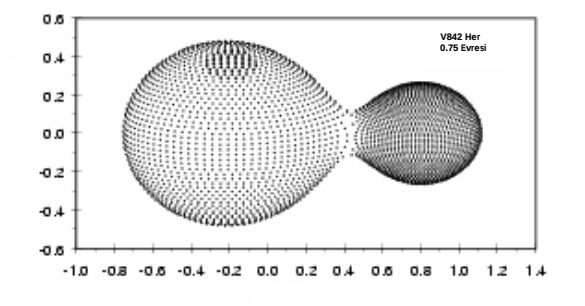
nicelik	B-filtresi	V-filtresi
n	135	154
Σ(O-C)2	0.2479	
q = mc/mh	3.852	
T_1	5700	
$g_1 = g_2$	0.32	
A1 = A2	0.5	
T_2	5362 ± 20	5362 ± 20
i	77.74 ± 0.74	77.74 ± 0.74
X_1	0.539	0.275
X_2	0.347	0.568
$\Omega_{1,2}$	7.566± 0.02	7.566± 0.02
$L_1 / L_{1,2}$	0.297± 0.006	0.278± 0.005
M1($M_\odot$)	0.38	
M2($M_\odot$)	1.46	
R1($R_\odot$)	0.82	
R2($R_\odot$)	1.48	
log g1	4.19	
log g2	4.26	
Mbol1	5.28	
Mbol2	4.26	
ayör($R_\odot$)	2.881±0.01	



Şekil 3.5. V842 Her'in V bandı gözlemsel ve kuramsal ışık eğrileri ile farkları



Şekil 3.6. V842 Her'in B bandı gözlemsel ve kuramsal ışık eğrileri ile farkları



Şekil 3.7. V842 Her yıldızının 0.75 evresindeki geometrik modeli.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada V776 Cas ve V842 Her örten çift yıldızlarının sırası ile U, B, V ve B, V bandları ışık eğrileri elde edilmiş ve Djurasevic'in ışık eğrisi analiz programı ile Wilson-Devinney ışık eğrisi analiz programları kullanılarak ışık eğrisi çözümlerinden elde edilen ilk sonuçlar sunulmuştur.

V776 Cas'a ait elde edilen fiziksel parametrelere göre sistem, bileşenler arası sıcaklık farkının oldukça az olduğu yüksek değme derecesine sahip bir sistemdir. Yine elde edilen çözümlerden ikinci bileşenin, sistemin daha soğuk bileşeni olduğu ve ortalama çekiminin birinci bileşene nazaran daha düşük olduğunu göstermektedir. Bu özellikler de tipik bir A-türü WUMa örten çift sisteminin gösterdiği özelliklerdendir.

V842 Her'e ait elde edilen fiziksel parametrelere göre daha büyük kütleli bileşen, üzerindeki soğuk leke nedeniyle daha küçük kütleli bileşene nazaran 338°K daha soğuk olduğu görülmektedir. Dolayısıyla sistemde birinci minimumda örtülen yıldız daha küçük kütleli olan bileşendir. Bu özellik de tipik bir W-türü WUMa örten çift yıldızının gösterdiği özelliklerdendir.

Bu çalışma, Türkiye Bilimler Akademisi (BA/TÜBA-GEBİP/2001-2-2) ve 20040705090 proje numarasıyla Ankara Üniversitesi Araştırma Fonu tarafından desteklenmiştir.

5. Kaynaklar

Claret, A., 2000, A&A, 363, 1081
Djurasevic, G., 1992a, Ap&SS 197, 17
Djurasevic, G., 1992b, Ap&SS 196, 241
Dommanget, J., and Nys. O., 2002, Observations et Travaux 54, 2 (VizieR On-Line Data Catalogue: I/24)
Duerbeck, H., W., 1997, IBVS, No. 4513
ESA, 1997, The Hipparcos and Tycho Catalogues, SP-1200
Filatov, G.S., 1960, Astr. Circular, No. 215
Geyer, E., Kippenhahn, R., Strohmeier, W., 1955, Kleine Veroffentlichungen der Remeis-Sternwarte Bamberg, No. 11
Gomez-Forrellad, J.M., Garcia-Melendo, E., Guarro-Flo, J., 1999, IBVS, No. 4702
Kurucz, R., L., New Atmospheres for Modelling Binaries and Disks, in E., F., Milone (ed.), Light Curve Modelin of Eclipsing Binary Stars, pp93-102, Springer, New York
Lejuene, T., Cuisiner, F., Buser, R., 1997, A&AS, 125, 229
Lejuene, T., Cuisiner, F., Buser, R., 1998, A&AS, 130, 65
Lucy, L., B., 1967, Zeitschr. F. Astrophys., 65, 89
Popper, D.M., 1980, ARA&A, 18, 115P
Rucinski, S., M., 1969, Acta Astr., 19, 245
Rucinski, S.M., Lu, M., 1999, AJ, 118, 2451
Rucinski, S.M., Lu, M., Mochnacki, S., W., 2001, AJ, 122, 1974
Tanrıverdi T., Kutdemir E., Elmaslı A., Şenavcı H.V., Albayrak B., Selam S.O., Aydın C., Aksu O., Bulca I., Çınar D., Kara A., Demirhan M., Yılmaz M., Çetintaş C., Gözler A.P., Karakaş T., Sezgin A.S., Turhanoğlu B., 2003, IBVS, No. 5407
Torres, J.N., Melendo, E.G., 1996 IBVS, No. 4365
van Hamme, W., 1993, AJ, 106, 2096
Vandenbroere, J., 1993, IBVS, No., 3946
Wilson, R.E., Devinney, E.J., 1971, ApJ, 166, 605

"XIV. Ulusal Astronomi Kongresi" 31 Ağustos – 4 Eylül 2004, Kayseri
Editörler: İ.KÜÇÜK, F.F.ÖZEREN ve İ.YUSİFOV

NN Vir ve V351 Peg'in Fotometrik Analizi

Mesut YILMAZ, Taner TANRIVERDİ, Cem ÇETİNTAŞ, Hakan Volkan ŞENAVCI, Ozan AKSU, Arzu KARA, Aslı ELMASLI, İbrahim ÖZAVCI, Berahitdin ALBAYRAK ve Selim Osman SELAM

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

Özet: Yakın tarihli birer keşif olan NN Vir ve V351 Peg örten değişen çift sistemlerin fotometrik B, V ve B, V, R ışık eğrileri, sistemlerin ilk kez fiziksel parametrlerini belirleyebilmek için analiz edildi. NN Vir ve V351 Peg'in ışık eğrileri sırasıyla Ankara Üniversitesi Gözlemevi'nde ve TÜBİTAK Ulusal Gözlemevi'nde elde edildi. Çözümlerde Djurasevic ışık eğrisi analiz programı kullanılark NN Vir ve V351 Peg sistemlerinin bileşenler arasında düşük sıcaklık farkı bulunan değen çift sistemler olduğunu göstermektedir. Ayrıca her iki çözümde büyük kütleli bileşenden daha küçük kütleli bileşen doğru gerçekleşen enerji ve kütle transferinin varlığı belirlendi.

Anahtar kelimeler: Örten çift yıldızlar, ışık eğrisi analiz, NN Vir, V351 Peg

Abstract: Photometric BV and BVR light curves of the recently discovered eclipsing binaries NN Vir and V351 Peg were studied for the first time to derive physical parameters of the systems. The light curves of NN Vir and V351 Peg were obtained at the Ankara University Observatory and TÜBİTAK National Observatory, respectively. The solutions made by using Djurasevic's inverse problem method describe the NN Vir and V351 Peg systems as an overcontact binaries with a relatively small temperature differences between the components. Also, in the both solution were obtained a significant mass and energi transfer from the more massive primary onto the less massive secondary.

Key words: Eclipsing binary stars, light curve analysis, NN Vir, V351 Peg

1. Giriş

NN Vir (HD 125488, BD +06 2869) Hipparcos uydusu (ESA, 1997) tarafından keşfedilen bir değişen yıldızdır. Hipparcos fotometrik gözlemlerine göre sistemin ışık değişim genliği $0^m.41$ ve Woitas (1997) göre bu yıldız ~0.20 günlük döneme sahip RR Lyrae türü bir değişen yıldızdır. Gomez-Forrellad vd. (1997), V bandında 6 cm teleskopla elde ettikleri ışık eğrisinden sistemin W UMa türü örten bir çift yıldız olduğunu göstermişlerdir. Ayrıca NN Vir'in dört minimum zamanını da gözlemleyerek sistemin ilk ışık elemanlarını belirlemişlerdir. Yakın tarihte Rucinski ve Lu (1999) her iki bileşenin radyal hız eğrisini elde ederek sistemin kütle oranı $q=m_2/m_1=0.491$ olarak hesaplamışlardır. Rucinski ve Lu (1999), NN Vir'in F0/F1 V tayf sınıfına sahip A alt sınıfından bir W UMa türü örten değişen olduğuna dikkat çekmişlerdir.

V351 Peg'in (HD 220659, BD 14 4990) değişen bir yıldız olduğu ilk Hipparcos uydusu (ESA, 1997) tarafından fark edilmiş. Hipparcos fotometrik gözlemlerine göre sistem genliği $0^m.31$ olan bir ışık değişimi göstermektedir. Hipparcos verilerine göre bu sistem dönemi ~0.30 gün olan RRc türü pulsasyon yapan bir değişen yıldızdır. Gomez-Forrellad vd. (1997) V bandında 6 cm teleskopla elde ettikleri ışık eğrisinden sistemin W UMa türü örten bir çift yıldız olduğunu göstermişlerdir. Ayrıca ışık eğrisinden elde ettikleri minimum zamanları kullanarak V351 Peg'in ilk ışık elemanlarını belirlemişlerdir. Rucinski vd. (2001) her iki bileşenin radyal hız eğrilerini elde ederek sistemin kütle oranı $q=m_2/m_1=0.360$ olarak hesaplamışlardır. Rucinski vd. (2001), V351 Peg'in W alt sınıfından bir W UMa türü örten değişen olduğu ve tayf türünün A8 V olarak belirtmişlerdir.

2. Gözlemler

NN Vir örten çiftin BV bandlarındaki gözlemleri Mayıs 2002'de 3 gecede Ankara Üniversitesi Gözlemevi'ndeki 30-cm Maksutov teleskobu ve ona bağlı SSP-5A fotometresi ile elde edildi. Gözlemlerde sırasıyla BD+06 2864 ve BD+05 2865 yıldızları mukayese ve denet yıldızları olarak kullanıldı. Gözlemler esnasında mukayese ve denet yıldızında herhangi bir ışık değişimi görülmedi. Ayrıca her gece için atmosferik sönümleme katsayıları da mukayese yıldız gözlemleri kullanılarak hesap edildi. Gözlemlerde her filtre için toplam 217 nokta elde edildi. B ve V

Mesut YILMAZ
e-mail: mesuty@science.ankara.edu.tr

bandlarındaki gözlemlerin olası hataları sırasıyla ±0.020 ve ±0.026 olarak belirlendi. NN Vir, mukayese ve denet yıldızlarına ait katalog bilgisi Tablo 1'de verilmektedir.

NN Vir'in BV ışık eğrileri Şekil 1'de verilmektedir. Şekil 1'deki ışık eğrileri (1) ifadesinde verilen yeni ışık elamanları ile oluşturuldu. NN Vir'in tüm differansiyel gözlem verisi Müyesseroğlu (2003) tarafından standart parlaklık sistemine dönüştürüldü. Tablo 2'de ışık eğrilerinin minimum ve maksimumlarındaki ışık seviyeleri ve farkları verilmiştir. Tablo 2 ve Şekil 1'den kolayca görülebileceği gibi, B ve V bandlarındaki ışık eğrilerimizde birinci minimum ikinci minimumlardan daha derin gözükmektedir. Ayrıca ışık eğrilerin iki maksimumu arasında önemli bir seviye farkı ve asimetrik bir yapı gözükmemektedir.

NN Vir'in ışık eğrisi iki minimum zamanı da kapsamaktadır. Ayrıca 2002 gözlem programı çerçevesinde NN Vir'e ait üç minimum zamanı daha gözlemlendi ve bu zamanlar Kwee & van Woerden (1956) yöntemi ile hesaplanıp Albayrak vd. (2002) tarafından yayınlandı. NN Vir'in bu minimum zamanları ile birlikte Gomez-Forrelland vd. (1997)'in dört minimum zamanıda kullanılarak aşğıdaki yeni ışık elamnları elde edildi:

HJD MinI=2450520.5962(5)+0^{d}.48068667(2)xE (1)

Tablo 1. NN Vir, mukayese ve denet yıldızlarına ait katalog bilgisi

Parametre	NN Vir	Mukayese	Denet
BD	+06 2869	+06 2864	+05 2865
HD	125488	124970	
α_{2000}	$14^{h}19^{m}38^{s}$	$14^{h}16^{m}35^{s}$	$14^{h}18^{m}26^{s}$
δ_{2000}	05°53'47''	05°31'55''	05°13'25''
m_V	$7^{m}.64$	$8^{m}.33$	$9^{m}.95$
Tayf	F0/F1 V	F5	F0

Tablo 2. NN Vir' in ışık eğrisi karakteristiği

	B	V	Hip
Max. light at 0.25	7.896 ± 0.012	7.493 ± 0.015	7.609 ± 0.029
Max. light at 0.75	7.887 ± 0.026	7.502 ± 0.029	7.581 ± 0.012
Min. light at 0.00	8.351 ± 0.013	7.938 ± 0.022	8.031 ± 0.024
Min. light at 0.50	8.271 ± 0.011	7.910 ± 0.008	8.026 ± 0.012
$\Delta\max(m_{0.25}-m_{0.75})$	0.009	–0.009	0.028
$\Delta\min(m_{0.00}-m_{0.50})$	0.080	0.028	0.005
Depth of Min. I	0.455	0.445	0.417
Depth of Min. II	0.384	0.408	0.445

V351 Peg örten çiftin BVR bandlarındaki gözlemleri 29, 30 ve 31 Ağustos 2003 tarihlerinde TÜBİTAK Ulusal Gözlemevi'ndeki (TUG) 40-cm Cassegrain teleskobu ve ona bağlı SSP-5A fotometresi ile elde edildi. Gözlemlerde sırasıyla BD+15 4830 ve BD+14 4974 yıldızları mukayese ve denet yıldızları olarak kullanıldı. Geceye ait atmosferik sönümleme katsayıları mukayese yıldız gözlemleri kullanılarak hesap edildi. Gözlemlerde, B, V ve R bandlarında olmak üzere toplam 888 nokta elde edildi. B, V ve R bandlarında yapılan gözlemlerin olası hataları sırasıyla ±0.012, ±0.010 ve ±0.009 olarak hesap edildi. V351 Peg, mukayese ve denet yıldızlarına ait katalog bilgisi de Tablo 3'de verilmektedir.

V351 Peg'in diferansiyel BVR ışık eğrileri Şekil 2'de gösterilmiştir. Işık eğrileri (2) ifadesinde verilen yeni ışık elamanları ile oluşturuldu. Tablo 4'te ışık eğrilerinin minimum ve maksimumdaki ışık seviyeleri ve farkları gösterilmiştir. Tablo 4 ve Şekil 2'den kolayca görülebileceği gibi, B, V ve R bandlarındaki ışık eğrilerinde iki maksimum seviyeyeler arasında önmli bir seviye farkı görünmemektedir. Ayrıca ışık eğrilerinde önemli bir asimetrik bir yapı gözükmemektedir.

V351 Peg'in ışık eğrisi gözleminde üç minimum zamanı da elde edildi ve bu minimum zamanları Kwee & van Woerden (1956) yöntemi ile hesaplandı. V351 Peg'in bu minimum zamanları ile birlikte Selam vd. (2003) ait bir minimum zamanı ve Gomez-Forrellad vd. (1999)'ne ait bir minimum zamanı kullanılarak V351 Peg'in yeni ışık elamnları elde edidi:

HJD MinI=2452881.3927(3)+0^{d}.5932963(1)xE (2)

Tablo 3. V351 Peg, mukayese ve denet yıldızlarına ait katalog bilgisi

Parametre	NN Vir	Mukayese	Denet
BD	+14 4990	+15 4830	+14 4974
HD			
α_{2000}	$23^{h}25^{m}25^{s}$	$23^{h}29^{m}02^{s}$	$23^{h}20^{m}45^{s}$
δ_{2000}	15°41'19''	16°00'45''	15°02'53''
m_V	$8^{m}.03$	$7^{m}.10$	$7^{m}.65$
Tayf	A8 V	A2	A5

Tablo 4. V351 Peg'in ışık eğrisi karakteristiği

	ΔB	ΔV	ΔR
Max. light at 0.25	1.033±0.003	0.824±0.003	0.665±0.004
Max. light at 0.75	1.032±0.005	0.820±0.003	0.665±0.004
Min. light at 0.00	1.370±0.006	1.142±0.006	0.985±0.006
Min. light at 0.50	1.361±0.003	1.134±0.005	0.980±0.004
$\Delta\max(m_{0.25}-m_{0.75})$	0.001	0.004	0.000
$\Delta\min(m_{0.00}-m_{0.50})$	0.009	0.008	0.005
Depth of Min. I	0.336	0.318	0.320
Depth of Min. II	0.328	0.314	0.315

3. Işık Eğrisi Analizi

Bu çalışmada NN Vir ve V351 Peg'e ait fiziksel parametreler Djurasevic (1992a, 1992b, 1998) ışık eğrisi analiz programı ile belirlendi. Bu programın temeli Roche modeli ve Wilson-Devinney (1971) programının prensiplerine dayanmaktadır. Işık eğrisi analizleri Djurasevic (1992b) koduna modife edilmiş Marquardt (1963) algoritması ile gerçekleştirildi.

Bu programda, yıldızların boyutu Roche lobu doldurma derecesi ile tanımlıdır, ki bu bize

sistemdeki yıldızın kritik lobun nekadarının doldurduğunu söyler. Roche lobu doldurma faktörü $F_{h,c}$, bileşenlerin kutupsal yarıçaplarının kritik Roche lobunun kutupsal yarı çapları oranı olarak tanımlanmıştır ($F_{h,c}=R_{h,c}/R_{Rocheh,c}$), burada h ve c ise sırasıyla birinci ve ikinci bileşenlerdir. Bu durumda değen çift sistemler için Roche lobu doldurma faktörü F>1 olacaktır.

NN Vir ve V351 Peg'in ışık eğrisi analizinde normal noktalar yerine doğrudan gözlem verileri kullanılarak çözüme gidildi. Çözüm ışık ve dikine hız eğrilerinin eş zamanlı kullanımı ile gerçekleştirildi. Ayrıca her iki çözümde sistemdeki bileşenlerin eş dönme oranlarına (f=1.0) sahip olduğu kabulü yapıldı.

NN Vir'in ışık eğrisi analizinde kütle oranı q=0.491değeri , Rucinski ve Lu (1999)'nun yaptığı dikine hız çalışmasından elde edilerek ışık eğrisi analizinde sabit veri olarak dikkate alındı. Yine aynı çalışmadan NN Vir için belirlenen F0/F1 V tayf türü, sisteme ait birinci bileşenin sıcaklığına atıf yapılarak Popper (1980) sıcaklık kalibrasyon tablolarından birinci bileşenin sıcaklığı T_1=6900 K olarak hesaplandı.

V351 Peg'in ışık eğrisi analizinde ise kütle oranı q=0.36 değeri, Rucinski vd. (2001)'nin yaptığı dikine hız çalışmalarından alınarak ışık eğrisi analizinde sabit veri olarak dikkate alındı. Rucinski vd. (2001), V351 Peg için belirlediği A8 V tayf türü, sisteme ait birinci bileşenin sıcaklığına atıf yapılarak Popper (1980) sıcaklık kalibrasyon tablolarından birinci bileşenin sıcaklığı T_1=7580 K olarak elde edildi.

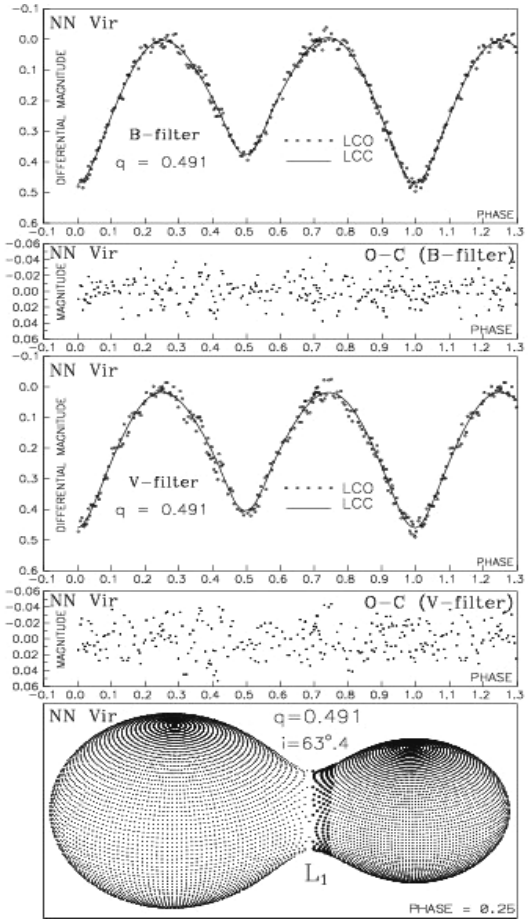
Işık eğrisi analizlerinde he iki sisteme ilişkin lineer olmayan kenar kararma katsayıları Claret (2000)'in tablolarından elde edildi. Kenar kararma katsayıları, kimyasal kompozisyona, etkin sıcaklığa ve yüzey çekim ivmesine (log$g$) bağlı olarak ışık eğrisi analizinde her diferansiyel düzeltme sonrasında Claret (2000) tablolarından iterasyonla hesaplanarak analizde yeniden işletildi. Her iki ışık eğrisi analizinde en iyi çözümler Basel model atmosfer yaklaşımı altında gerçekleştirildi. NN Vir için en iyi çözüm Güneş kimyasal bolluk değerinde (Fe/H=0) elde edildi, V351 Peg için ise en iyi çözüm yakın Güneş kimyasal bolluk (Fe/H=-1.0) değerinde elde edildi.

NN Vir'in ışık eğrisi analizinde çekim kararması üssü değerleri ($\beta_{h,c}$) sistemin fiziğine uygun olarak teorik değeri kullanıldı. Bileşenlerin kütlesine, sıcaklığına ve yüzey çekim ivmesine bağlı olarak çekim kararması üssü değerleri Claret (1998) tablolarından β_h=0.06 ve β_c=0.12 olarak belirlendi ve buna bağlı olarak ta yansıma katsayıları $A_{h,c}$=0.5 olarak belirlendi. V351 Peg'in sıcaklığı yaklaşık T_{eff}=7600 K olması nedeniyle ortak zarfında ışımasal ve konvektif enerji taşınım mekanizmaların bir karışımı beklenmelidir. Bundan dolayı V351 Peg'in ışık eğrisi analizinde çekim kararması üssü değerleri serbest parametre olarak bırakıldı ve en iyi çözüm β_h=0.20 ve β_c=0.18 değerleri için elde edildi. Buradan da yansıma katsayıları $A_{h,c}$=10. olarak belirlendi.

Her iki sistemin gözlemsel ışık eğrilerini tüm özelliklerini ortaya koyabilmek için bir çok farklı çözüm denemesi gerçekleştirildi. Yapılan tüm denemelerde her iki teorik eğrininde gözlemsel eğrilere en iyi uyum sağlayan çözümlerin $A_{h,c}$ yansıma katsayılarının serbest bırakılmasıyla elde edildiği görüldü. Bu çözümlerde her iki sistemin küçük kütleli bileşenlerinin yansıma katsayı değerleri teorik değerlerinin çok üzerinde bir değer çıkmasından dolayı, küçük kütleli bileşenlerinin L_1 Lagrangean noktlarına bakan yüzeylerindeki sıcaklık artışının nedenini ancak sıcak leke kabulü ile yapılabildi. Bu nedenle her iki sistemin en iyi ışık eğrisi çözümü küçük küteli bileşenlerin üzerinde sıcak leke kabulü ve $A_{h,c}$ yansıma katsayılarının teorik değerlerinde sabit tutulması ile ulaşıldı. NN Vir'e ait parametrelerin çözüm sonuçları, gözlemsel ve teorik ışık eğrileri ve farkları ile sistemin 0.25 evresindeki geometrik model sırası ile Tablo 5 ve Şeklil 1'de verilmektedir. V351 Peg'e ait parametrelerin çözüm sonuçları, gözlemsel ve teorik ışık eğrileri ve farkları ile sistemin 0.25 evresindeki geometrik model ise sırası ile Tablo 6 ve Şeklil 2'de verilmektedir.

Tablo 5. NN Vir'in ışık eğrisi analiz sonuçları

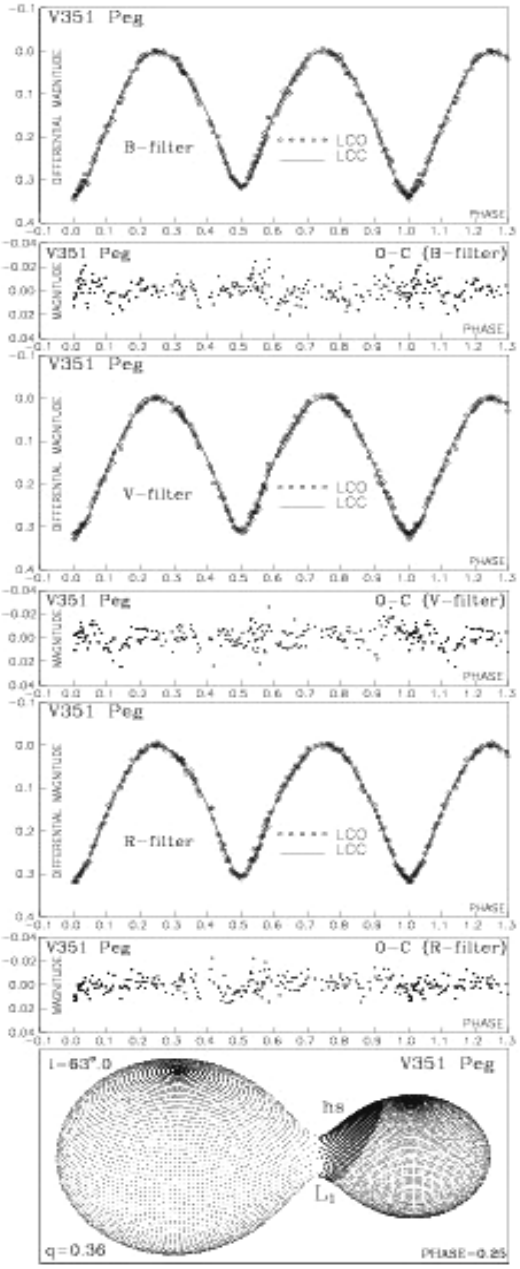
Quantity	B–filter	V–filter
n	217	217
$\Sigma(O-C)^2$	0.0500	0.0890
σ	0.0152	0.0202
$q = m_c/m_h$	0.491	
T_h	6900	
β_h	0.06	
β_c	0.12	
$A_h = A_c$	0.5	
$f_h = f_c$	1.0	
T_c	6676 ± 43	6796 ± 66
F_h	1.073 ± 0.001	1.075 ± 0.001
i [°]	63.3 ± 0.2	63.4 ± 0.2
$A_S = T_S/T_c$	1.22 ± 0.01	1.25 ± 0.02
θ_S[°]	34.1 ± 0.6	32.2 ± 1.0
λ_S[°]	182.2 ± 0.4	179.6 ± 0.7
φ_S[°]	0.0	0.0
$a_1^{h,c}$	+0.3071, +0.3051	+0.3738, +0.3739
$a_2^{h,c}$	+0.9694, +0.8873	+0.8779, +0.8602
$a_3^{h,c}$	−0.6385, −0.4883	−0.7808, −0.7433
$a_4^{h,c}$	+0.1788, +0.1195	+0.2633, +0.2468
$\Omega_{h,c}$	2.6906	2.6856
Ω_{in}	2.8585	2.8585
Ω_{out}	2.5647	2.5647
f_{over}[%]	57.15	58.86
$R_h[D=1]$	0.446	0.447
$R_c[D=1]$	0.330	0.331
$L_h/(L_h+L_c)$	0.657	0.636
$M_h[M_\odot]$	1.34 ± 0.02	
$M_c[M_\odot]$	0.66 ± 0.02	
$R_h[R_\odot]$	1.58 ± 0.02	
$R_c[R_\odot]$	1.19 ± 0.02	
$\log g_h$	4.17 ± 0.02	
$\log g_c$	4.11 ± 0.02	
M_{bol}^h	3.02 ± 0.03	
M_{bol}^c	3.74 ± 0.05	
$a_{orb}[R_\odot]$	3.248 ± 0.009	



Şekil 1. NN Vir'in teorik ile gözlemsel ışık eğrileri ve farkları, sistemin 0.25 evresindeki geometrik model

Tablo 6. V351 Peg'in ışık eğrisi analiz sonuçları

Quantity	*Value*
n	888
$\Sigma(O-C)^2$	0.0511
σ	0.0076
$q = m_c/m_h$	0.36
$f_{h,c}$	1.0
$A_{h,c}$	1.0
T_h	7580
$A_{hs} = T_{hs}/T_c$	1.066 ± 0.005
θ_{hs}	41.3 ± 0.9
λ_{hs}	182.7 ± 0.8
φ_{hs}	23.8 ± 2.2
T_c	7559 ± 15
F_h	1.020 ± 0.002
i [°]	63.0 ± 0.1
β_h	0.20 ± 0.01
β_c	0.18 ± 0.01
$a_1^{h,c}(B;V;R)$	$+0.3665, +0.4102;\ +0.4417, +0.3709;\ +0.4138, +0.4440$
$a_2^{h,c}(B;V;R)$	$+0.9718, +0.8917;\ +0.7722, +0.9630;\ +0.8932, +0.7786$
$a_3^{h,c}(B;V;R)$	$-0.7497, -0.9159;\ -0.9245, -0.7462;\ -0.9288, -0.9424$
$a_4^{h,c}(B;V;R)$	$+0.2191, +0.3367;\ +0.3560, +0.2214;\ +0.3455, +0.3660$
$\Omega_{h,c}$	2.5496
Ω_{in}	2.5953
Ω_{out}	2.3738
f_{over}[%]	20.64
$R_{h,c}[D=1]$	0.450, 0.284
$L_h/(L_h+L_c)(B;V;R)$	0.700; 0.702; 0.703
$\mathcal{M}_h[M_\odot]$	1.627 ± 0.05
$\mathcal{M}_c[M_\odot]$	0.586 ± 0.02
$\mathcal{R}_h[R_\odot]$	1.872 ± 0.03
$\mathcal{R}_c[R_\odot]$	1.192 ± 0.03
$\log g_h$	4.105 ± 0.03
$\log g_c$	4.053 ± 0.03
M_{bol}^h	2.246 ± 0.03
M_{bol}^c	3.238 ± 0.05
$a_{orb}[R_\odot]$	3.868 ± 0.05



Şekil 2. V351 Peg'in teorik ile gözlemsel ışık eğrileri ve farkları, sistemin 0.25 evresindeki geometrik model

5. Sonuçlar

Bu çalışmada NN Vir ve V351 Peg değen çift yıldız sistemlerinin sırası ile B, V ve B, V,R bandları ışık eğrileri elde edilerek Djurasevic ışık eğrisi analiz programı ile analiz edildi ve her iki sistemin ilk fiziksel ve mutlak parametreleri belirlendi. Eşzamnalı gerçekleştirilen tüm çözümlerde üm bantlarda teorik ışık eğrilerinin gözlemsel eğrilerle oldukça uyumlu olduğu görüldü.

NN Vir için elde edilen fiziksel parametrelere göre sistem, büyük değme oranına sahip (f ~ %58) ve bileşenler arası küçük sıcaklık farkı bulunan

(ΔT=160 K) bir sistemdir. Sistem yaklaşık olarak i ~ 63^o yörünge eğikliğine sahip tipik bir A türü W UMa değen çift sistemlerin özelliklerini göstermektedir. Ayrıca çözümde büyük kütleli bileşenden küçük kütleli bileşen doğru madde ve enerji transferinin varlığı belirlendi ve bunun doğal sonucu olarak ta en iyi çözüm küçük kütleli bileşenin boyun bölgesinde sıcak leke varsayımı ile elde edildi.

V351 Peg için elde edilen fiziksel parametrelere göre sistem, NN Vir'e göre daha az değme oranına sahip (f ~ %21) ve bileşenler arası sıcaklık farkı oldukça düşük (ΔT=21 K) bir sistemdir. Sistem yaklaşık olarak i ~ 63^o yörünge eğikliğine sahip ve W türü W UMa değen çift sistemlerin özelliklerine nazaran A türü W UMa değen çift sistemlerin özelliklerini göstermektedir. Ayrıca çözümde büyük kütleli bileşenden küçük kütleli bileşen doğru madde ve enerji transferinin varlığı belirlendi ve bunun doğal sonucu olarak ta en iyi çözüm küçük kütleli bileşenin boyun bölgesinde sıcak leke varsayımı ile elde edildi. Bileşenlerin sıcaklıkları (yaklaşık olarak T~ 7600 K) ve çekim kararması üssü değerlerine (β_1=0.20 ve β_2=0.18) bakıldığında, ortak zarfta ışımasal ve konvektif enerji taşınım mekanizmalrının bir karışımı olduğu görülmektedir.

Bu çalışma, Türkiye Bilimler Akademisi (BA/TÜBA-GEBİP/2001-2-2) ve 20040705090 proje numarasıyla Ankara Üniversitesi Araştırma Fonu tarafından desteklenmiştir.

12. Kaynaklar

Albayrak, B., Tanrıverdi, T., ve Aydın, C. 2002, IBVS, No. 5300 .
Claret, A., 1998, A&A, 131, 395 .
Claret, A., 2000, A&A, 363, 1081.
Djurasevic, G., 1992a, Ap&SS, 196, 241.
Djurasevic, G., 1992b, Ap&SS, 197, 17.
Djurasevic, G., Zakirov, M., Hojaev, A., Arzumanyants, G., 1998, A&AS, 131, 17.
ESA, 1997, The Hipparcos and Tycho Catalogs, SP-1200.
Gomez-Forrellad, J. M., ve Garcia-Melendo, E., 1997, IBVS, No. 4469.
Gomez-Forrellad, J. M., Garcia-Melendo, E., Guarro-Flo, J., 1999, IBVS, No. 4702.
Kwee, K. K., van Woerden, H., 1956, Bull. Astr. Inst. Neth., 12, 327.
Marquardt, D. W., 1963, J. Soc. Ind. Appl. Math., 11(2), 431.
Popper, D. M., 1980, ARA&A, 18, 115.
Rucinski, S. M., ve Lu, W., 1999, AJ, 118, 2451.
Rucinski, S. M., Lu, W., Mochnacki, S. W., 2001, AJ, 122, 1974.
Selam, S. O., Albayrak, B., Şenavcı, H. V., Tanrıverdi, T., Elmaslı, A., Kara, A., Aksu, O., Yılmaz, M., Karakaş, T., Çınar, D., Demirhan, M., Şahin, S., Çeviker, S., Gözler, A. P., IBVS, No. 5471.
Wilson, R. E., Devinney, E. J., 1971, ApJ, 166, 605
Woitas, J., 1997, IBVS, No. 4444

"XIV. Ulusal Astronomi Kongresi" 31 Ağustos – 4 Eylül 2004, Erciyes Üniversitesi, Kayseri

BB Peg Sisteminin Dönem ve Işık Eğrisi Analizi

C. Çetintaş, H.V. Şenavcı, A. Elmaslı, T. Tanrıverdi, T. Tunç, M. Yılmaz, İ. Özavcı, A. Kara, O. Aksu, B. Albayrak ve S.O. Selam

ÖZET

Örten değişen BB Peg sisteminin dönem değişim analizi O-C diyagramı temel alınarak yapıldı. Diyagramdaki çevrimsel değişimin, üçüncü bir cismin ışık-zaman etkisinden (LTE) kaynaklandığı düşüncesinden hareketle, sisteme bağlı olası cismin dönemi P_3 = 20.873 ± 0.562 yıl olarak bulundu. Ayrıca analiz sonucunda cisme ait yörüngenin basıklığı e = 0.395 ± 0.070, cismin kütlesi M_3 = 0.139 ± 0.012 $M_\odot$ ve yarı büyük eksen değeri ise a_3 = 9.346 ± 0.043AB olarak belirlendi.

Sistemin fotoelektrik ışık eğrisi B,V,R filtrelerinde TÜBİTAK Ulusal Gözlemevi'nde elde edildi. Binary Maker 2.0 programı kullanılarak sistemin fotometrik yörünge parametreleri için ilk yaklaşım değerleri hesaplandı. İlk yaklaşım değerleri Wilson-Devinney ışık eğrisi analiz programı için başlangıç değerleri olarak kullanıldı. Işık eğrisinin maksimumları arasında ve birinci minimum iniş-çıkış kollarında izlenen asimetri, bu ilk yaklaşım sırasında büyük boyutlu bileşen üzerinde soğuk Güneş benzeri leke ile modellendi.

1. GİRİŞ

BB Peg (HIP 110493, V_{max} = 11^m.8) F8 tayf türünden (Kukarkin *vd.*, 1970), W UMa türü örten değişen bir sistemdir. Sistemin yörünge dönemi Hoffmeister (1931) tarafından 4.3 gün olarak verilmiştir. Daha sonra Whitney (1959) sistemin yörünge dönemini 0.36 gün olarak düzeltmiştir.

Sistemin fotometrik gözlemleri ve yörünge çözümleri Cerruti-Sola ve Scaltriti (1980), Cerruti-Sola vd. (1981), Leung vd. (1985) ve Awadalla (1988) tarafından yapılmıştır. Elde ettikleri ışık eğrilerindeki düzensizliklerin, bileşenlerin yüzey parlaklık dağılımındaki anormalliklere bağlı olduğunu söylemişlerdir.

Sistemin ilk radyal hız çalışması Hrivnak (1990) tarafından yapılmıştır. Ardından Lu ve Rucinski (1999) yeni elde ettikleri radyal hız eğrisini analiz ederek sistemin tayfsal kütle oranını q = 0.36 olarak belirlemişler ve literatürdeki fotometrik çözüm sonuçlarıyla birleştirerek sisteme ait salt parametreleri R_1 = 1.26 $R_\odot$, R_2 = 0.76 $R_\odot$, M_1 = 1.38 $M_\odot$, M_2 = 0.50 $M_\odot$ olarak vermişlerdir.

Sistemin dönem değişim çalışmaları Cerruti-Sola ve Scaltriti (1980), Awadalla (1988) ve Qian (2001) tarafından yapılmıştır. Awadalla (1988) ve Qian (2001) oluşturdukları O-C diyagramlarında, minimum zamanlarının parabolik yönelim gösterdiği sonucundan hareketle, sistemin dönem değişimini ΔP ≈ 1.5 x 10^{-7} günyıl^{-1} (Awadalla (1988)) ve ΔP ≈ 4.75 x 10^{-8} günyıl^{-1} (Qian (2001)) olarak belirlemişlerdir.

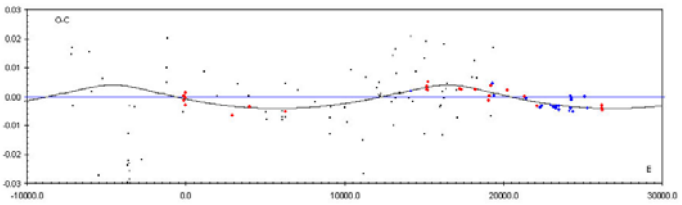
2. GÖZLEMLER, DÖNEM ANALİZİ ve IŞIK EĞRİSİ ANALİZİ

BB Peg sisteminin fotometrik gözlemleri, 14, 17, 19 ve 20 Ağustos 2004 tarihlerinde TÜBİTAK Ulusal Gözlemevi (TUG)'nin 40 cm'lik Cassegrain teleskobuna bağlı SSP-5A fotometrisiyle elde edildi. BD +15 4626 ve BD +15 4637 mukayese ve denet yıldızları olarak seçildi. Gözlemlerden iki adet birinci minimum ve üç adet ikinci minimum zamanı elde edildi. Minimum zamanlarının hesaplanmasında Kwee & van Woerden (1959) yöntemi kullanıldı. Elde edilen ve literatürde yayımlanmış olanlarla beraber, 137 görsel, 9 fotoğrafik, 28 fotoelektrik ve 20 CCD olmak üzere, 1931 ve 2004 yılı aralığına dağılan toplam 194 minimum zamanı O-C analizinde kullanıldı.

O-C diyagramının oluşturulmasında son beş yılın verilerine yapılan doğrusal çakıştırma sonucu elde edilen ışık elemanları kullanıldı:

$$\text{Min I} = 2443764.33492 \pm 0.0029 + 0.361502051 \pm 1.21 \times 10^{-7} \times E$$

Toplanan görsel ve fotoğrafik verilerin saçılma aralığı geniş olduğundan, teorik O-C eğrisinin oluşturulmasında yalnızca fotoelektrik ve CCD verileri temel alındı. (Şekil 1).



Şekil.1 BB Peg sisteminin O-C diyagramı. Üçgenler fotoelektrik verileri, daireler ise CCD verileri temsil etmektedir.

Sistemin dönemindeki üçüncü bir cismin yarattığı ışık-zaman etkisine bağlı değişime ait parametrelerin bulunmasında ve O-C diyagramının oluşturulmasında Irwin (1952) tarafından verilen denklemler kullanıldı :

$$O-C = \frac{A}{\sqrt{1-e'^2\cos^2 w'}}\, x \left\{ \frac{1-e'^2}{1+e'\cos v'}\ \sin(v'+w') + e'\sin w' \right\}$$

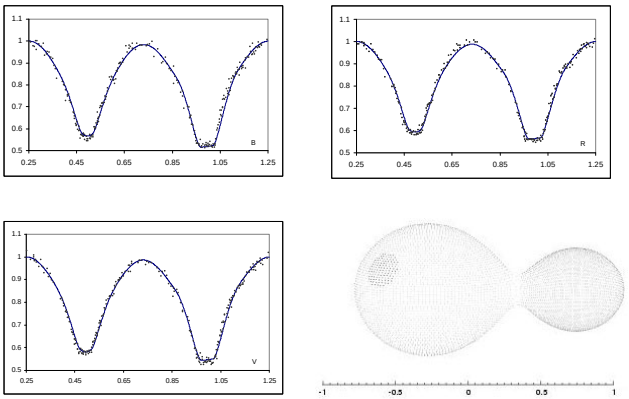
$$A = \frac{1}{2}\left((O-C)_{max} - (O-C)_{min}\right) = \frac{a'_{12}\sin i'\sqrt{1-e'^2\cos^2 w'}}{2.590x10^{10}}$$

Analiz sonuçlarından elde edilen parametreler Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Üçüncü cisim için elde edilen parametreler.

Parametreler	Değer	Standard Hata
$a'_{12}\sin i'$	0.691	±.064
e'	0.395	±.070
ω'	95.00	±5.39
T HJD	2457408	±73.69
P_3(yıl)	20.873	±.562
A (gün)	0.004	±.00036
f(m_3) $M_\odot$	0.0007575	±.0001794
$\sum$(O-C)^2(gün^2)	1.2496943 * 10^{-4}	

Sistemin ışık eğrilerinin fotometrik çözümleri için ilk yaklaşımlar sırasında Binary Maker 2.0 programı kullanıldı. Sistemin fiziksel parametrelerini elde etmek için, Binary Maker2.0 programından elde edilen değerler, Wilson-Devinney ışık eğrisi analiz programında başlangıç değerleri olarak kullanıldı. Sistemin BVR bandlarında alınmış ışık eğrilerine yapılan çakıştırmalar ve sistemin Güneş benzeri lekeyle modellenmiş Roche geometrisi aşağıda verilmiştir.



Şekil.2 Sistemin BVR bandlarındaki ışık eğrisine ilk yaklaşım olarak yapılan çakıştırmalar ve geometrik modeli.

Analiz sonucunda elde edilen parametreler aşağıda listelenmiştir :

Tablo 2. BB Peg'in ışık eğrisi analiz sonuçları

Parametreler	Değer	Standard Hata	Parametreler	Değer	Standard Hata
L_1^B	3.96804	±.196542	β_{leke}	73.315	
L_1^V	3.91321	±.166846	ℓ_{leke}	220.491	
L_1^R	3.83571	±.134928	r_{leke}	15.077	
i	85.0962	±4.72870	T_{leke}/T_{tot}	0.869	
a	2.63813	±.029219			
q	2.78				
T_1	6200°K				
T_2	5926°K	±82			
$g_{r1} = g_{r2}$	0.32				
$A_1 = A_2$	0.5				
$\Omega_1 = \Omega_2$	6.17566	±.074			
$r_1$pole	0.28531	±.07			
$r_2$pole	0.45153	±.07			
$r_1$side	0.29888	±.09			
$r_2$side	0.48578	±.09			
$r_1$back	0.34200	±.12			
$r_2$back	0.51572	±.16			

3. SONUÇLAR

BB Peg'in son beş yıla ait minimum zamanlarından hesaplanan ışık elemanları, O-C diyagramında daha önceki çalışmalarda (Cerruti-Sola ve Scaltriti 1980, Awadalla 1988, Qian 2001) yer alan parabolik yaklaşıma ihtiyaç olmadığı gösterdi. Tüm minimum zamanlarının kullanılmasıyla oluşturulan O-C eğrisi çevrimsel bir yapı göstermektedir. Bu çevrimsel yapı, sisteme çekimsel olarak bağlı olası bir üçüncü cisim varlığı (LTE) dikkate alınarak incelendi. Üçüncü cismin ikili sistem etrafındaki yörünge dönemi yaklaşık 20.873 ± 0.562 yıl dır. Kütlesi, çift sistemle aynı düzlemde olması durumunda 0.139 ± 0.012 $M_\odot$ dır.

BB Peg için elde edilen yeni ışık eğrisi sistemin tipik bir W-tipi W UMa olduğunu göstermektedir. Işık eğrisinde, birinci minimum iniş ve çıkış kollarında maksimum ışık düzeylerinde, ve minimum derinliklerinde simetrik olmayan yapılar göze çarpmaktadır. Bu nedenle sistemin modellenmesinde büyük boyutlu bileşen üzerinde Güneş benzeri bir lekenin varlığı yaklaşımı altında yapılan ilk teorik çakıştırmalar, elde ettiğimiz ışık eğrisi ile uyum içerisindedir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Türkiye Bilimler Akademisi (BA / TÜBA – GEBİP / 2001-2-2) ve 20040705090 proje numarasıyla Ankara Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri tarafından desteklenmiştir.

REFERANSLAR

Awadalla, N. S. 1988, Astrophys. and Space Science, 140, 137
Cerruti-Sola, M. ve Scaltriti, F. 1980, Astron. Astrophys. Suppl., 40, 85
Cerruti-Sola, M., Milano, L. ve Scaltriti, F. 1981, Astron. Astrophys., 101, 273
Hoffmeister, C. 1931, Astron. Nachr., 242, 133
Hrivnak, B. J. 1990, BAAS, 22, 1291
Irwin, J. B 1952, ApJ, 116, 211
Kukarkin, B. V., Kholopov, P. N., Efremov, Y. N., Kukarkina, N. P., Kurochkin, N. E., Medvedeva, G. I., Perova, N. B.,Fedorovich, V. P. ve Frolov, M. S. 1970, General Catalogue of Variable Stars
Kwee, K. K. ve van Woerden, H. 1956, BAN, 12, 327
Leung, K. C., Zhai, D. ve Zhang, Y. 1985, Astron. J., 90, 515
Lu, W., Rucinski, S. M. 1999, Astron. J., 118, 515
Qian, S. 2001,Mon Not. R. Astron. Soc. 328, 635
Whitney, B. 1959, Astron. J., 64, 258

Available online at www.sciencedirect.com
SCIENCE DIRECT®
New Astronomy 9 (2004) 425–434
New Astronomy
www.elsevier.com/locate/newast

A photometric study of the recently discovered eclipsing binary V776 Cassiopei

G. Djurašević [a,b], B. Albayrak [c,*], S.O. Selam [c], S. Erkapić [a,b], H.V. Şenavcı [c]

[a] *Astronomical Observatory, Volgina 7, 11160 Belgrade, Serbia and Montenegro*
[b] *Isaac Newton Institute of Chile, Yugoslav Branch, Santiago, Chile*
[c] *Faculty of Science, Department of Astronomy and Space Sciences, Ankara University, Tandoğan, Ankara 06100, Turkey*

Received 8 December 2003; accepted 9 February 2004

Communicated by E.P.J. van den Heuvel

Abstract

Photoelectric *UBV* light curves of the recently discovered eclipsing binary V776 Cas were studied for the first time to derive the physical parameters of the system. The light curves were obtained at the *TÜBİTAK National Observatory (TUG)* during 8–9 October 2002. Due to the proximity of the visual companion the light curves were contaminated by the third light effect which has a relatively small impact on the system parameters estimation. This effect dominantly changes only the degree of overcontact and orbit inclination. The solutions made by using Djurašević's inverse-problem method describe the V776 Cas system as a high overcontact configuration ($f_{\rm over} \sim 41\%$ without, and 55% and 58% with two different values of the third light effect – $L_3 = 0.091$ and $L_3 = 0.136$) with a relatively small temperature differences between the components. Because of the large difference in masses of the components ($q = m_{\rm c}/m_{\rm h} = 0.13$) these solutions suggest a significant mass and energy transfer from the hotter – more massive primary onto the cooler – less massive secondary through the connecting neck of the common envelope. The obtained orbital inclination ($i \sim 53^\circ.9$ without, and $i \sim 55^\circ$ and $i \sim 56^\circ$ with two different values of the third light effect – $L_3 = 0.091$ and $L_3 = 0.136$) explains the characteristic shape of the light curves with a relatively small amplitude which is due to partial eclipses of the components in both of the photometric minima.
© 2004 Elsevier B.V. All rights reserved.

PACS: 97.10.Nf; 97.10.Pg; 97.80.Fk; 97.80.Hn

Keywords: Binaries: eclipsing; Binaries: close; Stars: fundamental parameters; Stars: individual: V776 Cas

1. Introduction

V776 Cas (HIP 8821) was discovered as an eclipsing binary by the *Hipparcos Astrometry Satellite* (ESA, 1997). The system has a spectral type

* Corresponding author. Tel.: +90-312-212-6720/1424; fax: +90-312-223-2395.
E-mail addresses: gdjurasevic@aob.bg.ac.yu (G. Djurašević), albayrak@astro1.science.ankara.edu.tr (B. Albayrak), selim@astro1.science.ankara.edu.tr (S.O. Selam), serkapic@aob.bg.ac.yu (S. Erkapić).

1384-1076/$ - see front matter © 2004 Elsevier B.V. All rights reserved.
doi:10.1016/j.newast.2004.02.001

of F0 and an amplitude of $0^m.147$ ranging from $8^m.943$ to $9^m.090$ in V band, and also almost equal depth of primary and secondary eclipses (ESA, 1997). The parallax measured by *Hipparcos* is $\pi = 4.86$ mas, for a distance of 205.8 pc. First ground-based photometry of the system was performed by Gomez-Forrellad et al. (1999). They published a light-curve obtained in the V band using a 14-cm telescope. The light-curve shows that the primary minimum is the deeper one with an amount of $0^m.19$ while the depth of the secondary minimum is $0^m.137$. Rucinski et al. (2001) presented spectroscopic observations yielding the first reliable spectroscopic elements of the system: $q = m_c/m_h = 0.130(4)$, $V_\gamma(\mathrm{km\,s^{-1}}) = -24.71 \pm 0.69$, $(M_h + M_c)\sin^3 i = 0.975 \pm 0.026 M_\odot$. The indices h and c refer to the hotter-more massive and cooler-less massive component, respectively. They pointed out that the spectral type of the system is F2 V and that it belongs to the A sub-class of W UMa configuration. The photometric observations of V776 Cas show a light-curve variation with a small amplitude of $0^m.147$ (ESA, 1997) and $0^m.156$ (Gomez-Forrellad et al., 1999), which is consistent with the relatively small $f(m)$, both most probably due to a low orbital inclination angle. V776 Cas is the brighter member of the visual binary ADS1485 (CCDM J01534 + 7003). The companion, at separation of $5''.38$, is 2^m fainter than the contact binary. The photometric elements of the system have not been published yet. Thus, we observed and analyzed V776 Cas.

2. The observational data and light curves

New observations of V776 Cas in *UBV* were obtained at the *TÜBİTAK National Observatory (TUG)* on the nights of 8 and 9 October 2002, by using a SSP-5A photometer attached to a 0.4 m Cassegrain telescope. We have used the same comparison (BD+69°0118) and check (BD+69°0122) star as Gomez-Forrellad et al. (1999). The relevant catalogue data for the stars are given in Table 1. A total of 182 observations was secured during the observations in each filter. The nightly extinction coefficients for each colour were determined by observing the comparison star. The differential U, B, and V magnitudes in the sense variable minus comparison corrected for atmospheric extinction, are given in Table 2. The differential U, B, and V light curves and U–B and B–V colour curves are shown in Fig. 1. The probable error of a single observation point was estimated to be ± 0.017, ± 0.005, and ± 0.007 in U, B, and V colours, respectively. The photometric phases of the light and colour curves are calculated with the following ephemeris given by Tanrıverdi et al. (2003):

Table 1
The catalogue information for V776 Cas, the comparison, and check stars

Parameter	V776 Cas	Comparison	Check
BD	+69°0121	+69°0118	+69°0122
α_{2000}	$01^h53^m23^s$	$01^h48^m18^s$	$01^h55^m26^s$
δ_{2000}	+70°02′33″	+70°34′32″	+70°29′08″
V	$9^m.00$	$8^m.74$	$8^m.37$

$$\mathrm{HJD\ MinI} = 2452556.3106(5) + 0.^d44041618(1) \times E. \quad (1)$$

Due to the close proximity of the visual companion it could not be excluded from the diaphragm during the observations and therefore our photometric measurements were contaminated by the third light. Rucinski et al. (2001) were able to avoid this visual companion during the radial velocity observations of the system. Although they observed separately the radial velocity of the visual companion on two occasions, they haven't calculated the third light parameter L_3. We were able to calculate L_3 only in V band based on the published magnitudes of the visual components from two different sources: as $L_3 = 0.136$ from *Hipparcos Double and Multiple Stars Annex* (ESA, 1997), and as $L_3 = 0.091$ from the second edition of the *CCDM Catalogue* (Dommanget and Nys, 2002). Separate light-curve solutions have been obtained with these two L_3 values in V band and the comparison between the results with and without L_3 are discussed in Section 4.

The light levels estimated by averaging data around the maxima and minima (taking a $\Delta\phi = \pm 0.02$ interval) and their differences are listed in Table 3. The maxima of all light curves seem to be equal and there are no significant asymmetry.

Table 2
Observational data for V776 Cas

HJD 2400000+	ΔU	ΔB	ΔV	HJD 2400000+	ΔU	ΔB	ΔV	HJD 2400000+	ΔU	ΔB	ΔV
52556.2853	−0.405	−0.085	0.210	52556.4213	−0.528	−0.210	0.086	52556.5938	−0.496	−0.154	0.140
52556.2870	−0.396	−0.069	0.197	52556.4237	−0.540	−0.218	0.087	52556.5954	−0.496	−0.145	0.136
52556.2897	−0.400	−0.067	0.206	52556.4267	−0.526	−0.209	0.085	52556.5975	−0.499	−0.163	0.128
52556.2914	−0.382	−0.065	0.217	52556.4315	−0.534	−0.226	0.097	52556.5990	−0.470	−0.141	0.128
52556.2936	−0.379	−0.056	0.220	52556.4330	−0.559	−0.215	0.073	52556.6020	−0.474	−0.156	0.111
52556.2952	−0.406	−0.070	0.220	52556.4360	−0.526	−0.205	0.094	52557.4938	−0.512	−0.190	0.104
52556.2974	−0.408	−0.064	0.238	52556.4377	−0.518	−0.217	0.081	52557.4954	−0.508	−0.177	0.098
52556.2991	−0.390	−0.070	0.223	52556.4406	−0.497	−0.195	0.095	52557.4978	−0.529	−0.200	0.087
52556.3015	−0.388	−0.063	0.226	52556.4453	−0.492	−0.202	0.096	52557.4993	−0.499	−0.210	0.101
52556.3030	−0.368	−0.045	0.228	52556.4469	−0.492	−0.188	0.111	52557.5014	−0.508	−0.211	0.104
52556.3053	−0.372	−0.039	0.246	52556.4504	−0.523	−0.192	0.121	52557.5056	−0.485	−0.216	0.094
52556.3071	−0.393	−0.056	0.221	52556.4520	−0.522	−0.189	0.107	52557.5071	−0.539	−0.217	0.080
52556.3092	−0.391	−0.053	0.223	52556.4556	−0.484	−0.186	0.119	52557.5096	−0.507	−0.217	0.084
52556.3108	−0.375	−0.057	0.237	52556.4601	−0.511	−0.175	0.116	52557.5117	−0.497	−0.206	0.085
52556.3134	−0.372	−0.069	0.226	52556.4617	−0.474	−0.163	0.126	52557.5142	−0.524	−0.204	0.084
52556.3149	−0.363	−0.042	0.228	52556.4645	−0.477	−0.154	0.144	52557.5183	−0.522	−0.224	0.086
52556.3170	−0.376	−0.068	0.229	52556.4664	−0.496	−0.182	0.122	52557.5198	−0.504	−0.212	0.081
52556.3185	−0.351	−0.059	0.234	52556.4820	−0.448	−0.130	0.169	52557.5219	−0.526	−0.217	0.085
52556.3209	−0.367	−0.067	0.227	52556.4876	−0.427	−0.126	0.166	52557.5237	−0.533	−0.214	0.079
52556.3225	−0.396	−0.076	0.232	52556.4893	−0.414	−0.127	0.169	52557.5261	−0.518	−0.215	0.077
52556.3247	−0.384	−0.072	0.227	52556.4920	−0.440	−0.113	0.169	52557.5301	−0.550	−0.215	0.074
52556.3262	−0.389	−0.064	0.220	52556.4937	−0.435	−0.122	0.184	52557.5319	−0.519	−0.220	0.089
52556.3286	−0.391	−0.074	0.223	52556.4961	−0.432	−0.100	0.197	52557.5341	−0.498	−0.223	0.086
52556.3301	−0.395	−0.082	0.211	52556.5005	−0.402	−0.115	0.192	52557.5355	−0.500	−0.209	0.092
52556.3329	−0.423	−0.082	0.211	52556.5020	−0.423	−0.105	0.189	52557.5383	−0.513	−0.225	0.083
52556.3345	−0.367	−0.069	0.218	52556.5047	−0.402	−0.101	0.191	52557.5428	−0.529	−0.206	0.082
52556.3370	−0.390	−0.089	0.214	52556.5062	−0.393	−0.085	0.205	52557.5446	−0.498	−0.222	0.076
52556.3386	−0.383	−0.085	0.200	52556.5087	−0.397	−0.095	0.207	52557.5472	−0.489	−0.191	0.086
52556.3415	−0.424	−0.097	0.195	52556.5127	−0.434	−0.091	0.219	52557.5488	−0.500	−0.191	0.100
52556.3429	−0.418	−0.102	0.182	52556.5142	−0.396	−0.077	0.213	52557.5512	−0.537	−0.216	0.079
52556.3452	−0.428	−0.100	0.167	52556.5167	−0.397	−0.088	0.201	52557.5560	−0.529	−0.189	0.112
52556.3470	−0.416	−0.104	0.181	52556.5182	−0.385	−0.080	0.220	52557.5576	−0.487	−0.203	0.112
52556.3493	−0.424	−0.103	0.181	52556.5210	−0.400	−0.064	0.230	52557.5605	−0.502	−0.195	0.114
52556.3509	−0.455	−0.117	0.177	52556.5225	−0.368	−0.068	0.224	52557.5620	−0.505	−0.181	0.121
52556.3531	−0.469	−0.129	0.178	52556.5245	−0.372	−0.070	0.232	52557.5643	−0.494	−0.154	0.131
52556.3546	−0.435	−0.126	0.165	52556.5261	−0.394	−0.068	0.228	52557.5687	−0.501	−0.162	0.128
52556.3570	−0.450	−0.142	0.159	52556.5289	−0.396	−0.064	0.229	52557.5701	−0.494	−0.164	0.125
52556.3585	−0.440	−0.148	0.159	52556.5305	−0.397	−0.067	0.225	52557.5724	−0.506	−0.165	0.124
52556.3610	−0.441	−0.147	0.156	52556.5332	−0.367	−0.071	0.219	52557.5743	−0.485	−0.162	0.136
52556.3626	−0.449	−0.142	0.146	52556.5358	−0.364	−0.074	0.227	52557.5766	−0.472	−0.151	0.146
52556.3647	−0.455	−0.138	0.143	52556.5382	−0.376	−0.077	0.218	52557.5810	−0.459	−0.135	0.159
52556.3663	−0.465	−0.159	0.142	52556.5398	−0.364	−0.069	0.216	52557.5829	−0.439	−0.145	0.156
52556.3685	−0.482	−0.161	0.132	52556.5428	−0.366	−0.081	0.212	52557.5854	−0.441	−0.127	0.162
52556.3701	−0.460	−0.156	0.135	52556.5443	−0.418	−0.087	0.205	52557.5872	−0.463	−0.131	0.167
52556.3725	−0.483	−0.179	0.131	52556.5469	−0.403	−0.087	0.196	52557.5893	−0.429	−0.146	0.169
52556.3740	−0.485	−0.165	0.134	52556.5485	−0.414	−0.071	0.219	52557.5908	−0.449	−0.118	0.175
52556.3769	−0.478	−0.182	0.124	52556.5510	−0.426	−0.084	0.217	52557.5930	−0.432	−0.113	0.185
52556.3788	−0.497	−0.183	0.112	52556.5525	−0.394	−0.091	0.202	52557.5945	−0.431	−0.122	0.184
52556.3810	−0.522	−0.176	0.102	52556.5561	−0.368	−0.101	0.193	52557.5971	−0.411	−0.119	0.180
52556.3865	−0.514	−0.203	0.109	52556.5577	−0.419	−0.092	0.200	52557.5986	−0.447	−0.101	0.187
52556.3884	−0.496	−0.192	0.103	52556.5610	−0.427	−0.085	0.202	52557.6012	−0.447	−0.100	0.191
52556.3910	−0.504	−0.189	0.104	52556.5666	−0.413	−0.114	0.184	52557.6028	−0.403	−0.086	0.204

Table 2 (*continued*)

HJD 2400000+	ΔU	ΔB	ΔV	HJD 2400000+	ΔU	ΔB	ΔV	HJD 2400000+	ΔU	ΔB	ΔV
52556.3926	−0.514	−0.200	0.105	52556.5683	−0.443	−0.107	0.177	52557.6050	−0.403	−0.085	0.213
52556.3953	−0.514	−0.208	0.095	52556.5708	−0.437	−0.105	0.167	52557.6068	−0.392	−0.082	0.201
52556.4000	−0.541	−0.216	0.098	52556.5724	−0.403	−0.100	0.196	52557.6091	−0.371	−0.099	0.223
52556.4022	−0.505	−0.203	0.094	52556.5748	−0.460	−0.108	0.171	52557.6108	−0.397	−0.084	0.212
52556.4056	−0.522	−0.208	0.092	52556.5793	−0.450	−0.121	0.173	52557.6132	−0.379	−0.077	0.220
52556.4071	−0.513	−0.221	0.087	52556.5815	−0.454	−0.152	0.143	52557.6147	−0.370	−0.071	0.225
52556.4103	−0.524	−0.215	0.090	52556.5843	−0.454	−0.148	0.149	52557.6170	−0.343	−0.074	0.229
52556.4166	−0.539	−0.224	0.088	52556.5859	−0.456	−0.148	0.157	52557.6186	−0.371	−0.057	0.230
52556.4181	−0.531	−0.210	0.096	52556.5888	−0.444	−0.140	0.144				

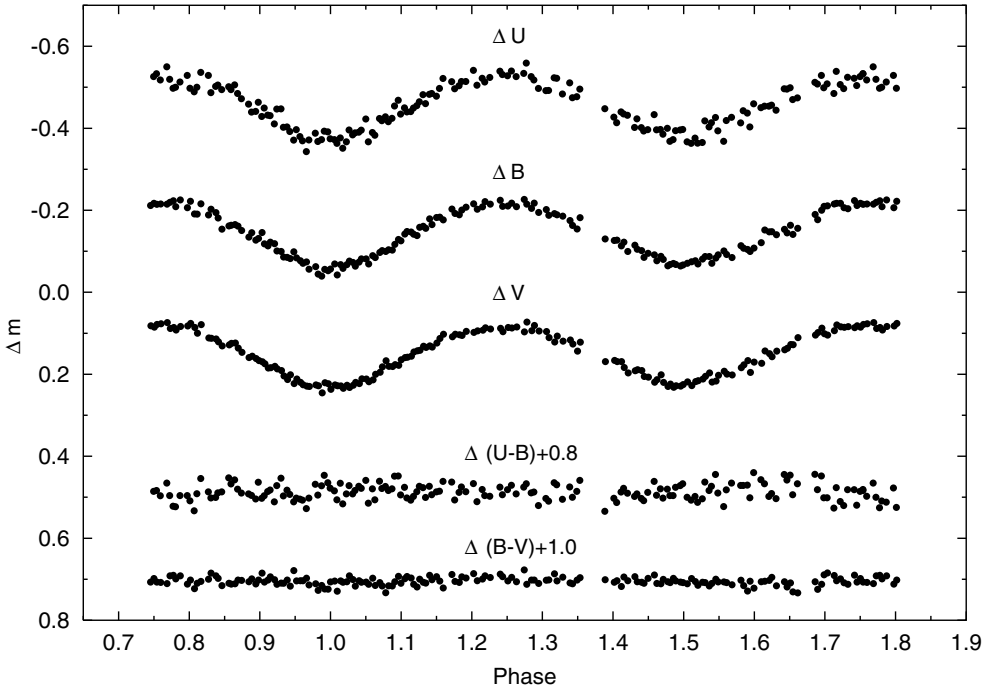


Fig. 1. Differential U, B, and V light, U–B and B–V colour curves of V776 Cas.

A small difference between the depths of the light level of the primary and secondary minimum is visible in the B light curve, but not in the U and V light curves (see Fig. 1 and Table 3). The absence of the significant phase dependence of colour curves in Fig. 1 indicates a good thermal contact between the components. The observations cover two minima which were also given among other minima of the system in Tanrıverdi et al. (2003).

3. The light-curve analysis

To estimate the parameters of V776 Cas, we used Djurašević (1992a)'s programme generalised to the case of an overcontact configuration (Djurašević et al., 1998). The programme is based on the Roche model and the principles arising from the paper by Wilson and Devinney (1971). The light-curve analysis was made by applying the

Table 3
The light levels with the errors in the estimates and their differences in the light curves of V776 Cas

	ΔU	ΔB	ΔV
Max. light at 0.25	-0.532 ± 0.006	-0.216 ± 0.007	0.090 ± 0.005
Max. light at 0.75	-0.519 ± 0.016	-0.214 ± 0.006	0.082 ± 0.005
Min. light at 0.00	-0.374 ± 0.013	-0.056 ± 0.011	0.230 ± 0.007
Min. light at 0.50	-0.380 ± 0.015	-0.069 ± 0.004	0.225 ± 0.006
$\Delta\max(m_{0.25}-m_{0.75})$	−0.013	−0.002	0.008
$\Delta\min(m_{0.00}-m_{0.50})$	0.006	0.013	0.005
Depth of Min. I	0.157	0.160	0.140
Depth of Min. II	0.139	0.145	0.143

inverse-problem method (Djurašević, 1992b) based on Marquardt (1963) algorithm.

According to this method, the stellar size in the model is described by the filling factors for the critical Roche lobes $F_{h,c}$ of the hotter primary and cooler secondary component, respectively, which tell us to what degree the stars in the system fill their corresponding critical lobes. For synchronous rotation of the components, these factors are expressed as the ratio of the stellar polar radii, $R_{h,c}$, and the corresponding polar radii of the critical Roche lobes, i.e., $F_{h,c} = R_{h,c}/R_{\mathrm{Roche}_{h,c}}$. In the case of an overcontact configuration the potential $\Omega_{h,c}$ characterising the common photosphere, is derived with a filling factor of the critical Roche lobe $F_h > 1$ of the primary, while the factor F_c may be excluded from further consideration. The degree of overcontact is defined in the classical way (Lucy and Wilson, 1979) as:

$$f_{\mathrm{over}}[\%] = 100 \cdot (\Omega_{h,c} - \Omega_i)/(\Omega_o - \Omega_i),$$

where $\Omega_{h,c}$, Ω_i, and Ω_o are the potentials of the common photosphere and of the inner and outer contact surfaces, respectively.

The present analysis yields $F_h > 1$ for the filling coefficient in the critical Roche lobe, i.e., the overcontact configuration. Tidal effects are expected to contribute to synchronisation of the rotational and orbital periods. Therefore, in the inverse problem we adopted $f_{h,c} = \omega_{h,c}/\omega_K = 1.0$ for nonsynchronous rotation coefficients, where $f_{h,c}$ is the ratio of the angular rotation rate ($\omega_{h,c}$) to the Keplerian (ω_K) orbital revolution rate.

In the analysis of the light curves, instead of the often used and somewhat questionable practice of forming normal points, we used the original observational data in order to avoid negative influences of such normalization. The mass ratio of the components was fixed in the inverse problem at $q = m_c/m_h = 0.130 \pm 0.004$, estimated by Rucinski et al. (2001) from radial velocity solution. Based on the spectral type of F2 V, the temperature of the hotter – more massive component, T_h, was set at 6980 K.

Following Lucy (1967), Rucinski (1969) and Rafert and Twigg (1980), the gravity-darkening exponents of the stars, $\beta_{h,c}$, and their albedos, $A_{h,c}$, were set at the values of 0.08 and 0.5, respectively, appropriate for stars with convective envelopes.

To achieve more reliable estimates of the model parameters in the light-curve analysis programme, we applied a quite dense coordinate grid, having $72 \times 144 = 10368$ elementary cells per star. The intensity and angular distribution of radiation of elementary cells are determined by the stellar effective temperature, limb-darkening, gravity-darkening and by the effect of reflection in the system.

A non-linear limb-darkening law has been used in the present work to avoid the possible negative influence of the wrong evaluation of limb-darkening coefficients on other parameters in the inverse problem. In agreement with Claret's (2000) paper, whose tables we used, we chose the new approximation which can be written as:

$$\frac{I(\mu)}{I(1)} = 1 - a_1(1-\mu^{1/2}) - a_2(1-\mu) - a_3(1-\mu^{3/2}) - a_4(1-\mu^2),$$

where $a_{1,2,3,4}$ are the limb-darkening passband specific coefficients and $\mu = \cos\gamma$. $I(1)$ is the

passband specific intensity at the center of the stellar disc, and γ is the angle between the line of sight and the emergent flux. This law, based on the Least-Squares Method, is able to describe the intensity distribution over the whole stellar disk very well, with very good flux conservations. For a given metallicity, the values of the passband limb-darkening coefficients are derived from the current values of the stellar effective temperature $T_{\rm eff}$ and surface gravity $\log\ g$ in each iteration, by interpolation for both of these quantities in Claret's (2000) tables. This was achieved by *bi-linear* interpolation (Press et al., 1992).

The computer programme for the light-curve analysis can be run choosing among three possibilities for the treatment of the radiation law: (1) simple black-body theory, (2) stellar atmosphere models by Carbon and Gingerich (1969) (CG), and (3) the Basel Stellar Library (BaSeL).

The present light-curve analysis was carried out using all three possibilities. The final choice of the approximation used in the light-curve analysis is made in such a way as to keep the disagreement between different individual passbands solutions at a minimum. In this case we found that BaSeL model flux distributions, with the assumed solar chemical abundance for the components of the system ([Fe/H] = 0), provided much better agreement between the individual U, B, and V solutions than the simple black-body theory or CG stellar atmosphere models.

We have explored the "corrected" BaSeL model flux distributions, consistent with extent empirical calibrations (Lejeune et al., 1997, 1998), the fluxes are calculated in each iteration for current values of temperatures and $\log g$, by bi-linear interpolation for both of these quantities in the atmosphere tables, for a given metallicity [Fe/H] of the components. The surface gravities can be derived very accurately from the masses and radii of CB stars, but the temperature determination is related to the assumed metallicity and strongly depends on photometric calibration.

In the model for the light-curve synthesis we have included the third light effect. The influence of this effect on the light-curve shape is graphically presented on Fig. 2. One can easily see that the third light contribution in the total light of the system can significantly change the shape of the light curve. Therefore, it is necessary to accurately estimate this quantity. We must keep in mind that the third light contribution in the total light cannot be estimated by solving the inverse problem, i.e., in the light-curve analysis. So, this has to be done in an independent way. The contamination of the light-curve by the third light evidently changes the depth of the eclipses which is reflected above all in the estimates of the orbit inclination and in the degree of overcontact for the system. If we do not take this effect into account we are going to have an error in the estimates of the real parameters of the system.

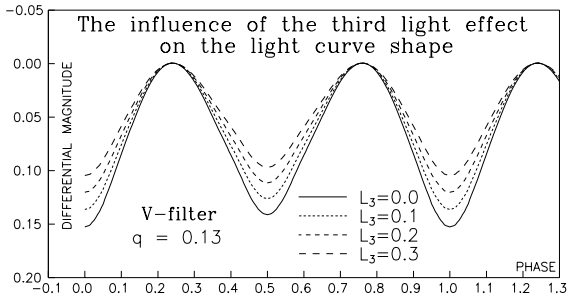


Fig. 2. The view of the synthetic light curves of V776 Cas with different third light contribution (L_3) to the total light of the system ($L_3 = 0.000$, $L_3 = 0.1$, $L_3 = 0.2$, and $L_3 = 0.3$).

For a successful application of this model in the analysis of the observed light curves, the inverse-problem method proposed by Djurašević (1992b) was used. Optimum model parameters are obtained through the minimization of $\Sigma(O-C)^2$, where $O-C$ is the residual between the observed (LCO) and synthetic (LCC) light curves for a given orbital phase. The minimisation of $\Sigma(O-C)^2$ is done in an iterative cycle of corrections of the model parameters by using the modified Marquardt (1963) algorithm. In this way, the inverse-problem method provides estimates of the system parameters and their standard errors.

4. Results and discussion

The inverse problem of the optimisation of system parameters provides well mutual consistency between the solutions obtained in the anal-

yses of individual U, B, and V light curves. These solutions are given in Table 4.

The first three rows of the table present the number of observations n, the final sum of the squares of the residuals between observed (LCO) and synthetic (LCC) light curves

$$\sum_{i=1}^{n} (O_i - C_i)^2,$$

and the standard deviation of the residuals

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (O_i - C_i)^2}{(n-1)}}.$$

The determination of system parameters is based on a simultaneous fitting of the available light curves in the U, B, and V photometric bands.

Finally, in Table 4 we present some important absolute parameters of the system. They are derived from the mass ratio of the components $q = m_c/m_h = 0.13$, estimated by Rucinski et al. (2001) from radial velocity solution.

The errors of the parameter estimates arise from the nonlinear Least-squares method, on which the inverse-problem method is based. The uncertainties of these parameters may be larger than we estimated. Our estimate of the accuracy in the determination of these parameters is based on the influence of formal errors arising from the nonlinear method of the light-curve analysis. Keeping in mind the errors of the input parameters of the model, which are treated as fixed in the inverse-problem method, the real errors of the parameters will definitely be larger (approximately 2 times). The main contribution comes from the error in effective temperature of the primary fixed on the basis of its spectral type, which means with a relatively high uncertainty. Thus, the estimated error of the temperature of the secondary component is significantly larger than the tabular values obtained under the assumption that the temperature of the primary is accurate. The errors in the estimates of the stellar radii are included (through the filling factors), while the errors in the masses are not formally used (the mass ratio is treated as fixed), but certainly they contribute in real accuracy of the system parameter estimation. Because of all these, the real error bars are larger than the values given in the table.

Using the inverse-problem solutions for individual light curves, Fig. 3 gives the graphical representations of these results, where the optimum synthetic light curves (LCC) and the observed light curves (LCO) are shown (without L_3 treatment). The O–C residuals between the observed (LCO) and optimum synthetic (LCC) light curves are also given. Finally the bottom of the figure shows the view of the Roche model of the system V776 Cas, obtained with the parameters estimated by analysing the light curves. Using such plots, one can see how the system would seem at a certain orbital phase.

The light curves of V776 Cas have peculiar shapes. The obtained orbital inclination explains the characteristic shape of the light curves with a relatively small amplitude which is due to partial eclipses of the components in both of the photometric minima. In the analysis of these light curves, the inclination of the orbit was estimated to be $i \sim 53^\circ.9$ without, and $i \sim 55^\circ$ and $i \sim 56^\circ$ with two different values of the third light effect ($L_3 = 0.091$ and $L_3 = 0.136$), which suggests the partial eclipses in both of the light-curve minima. During the deeper (primary) minimum, the cooler – less massive and smaller component partially eclipses the hotter – more massive and larger one. The filling coefficient for the critical Roche lobe F_h indicates a distinct overcontact configuration with a high degree of overcontact ($f_{over} \sim 41\%$ without, and 55% and 58% with two different values of the third light effect – $L_3 = 0.091$ and $L_3 = 0.136$).

It is evident in Table 4 and Fig. 3 that the Roche model of the system gives a satisfactory fit to the analysed light curves.

The influence of the third light contribution by the visual companion of 9–13.6% of the total light can be seen in Fig. 4 and in parameter differences in Table 4. As seen from Fig. 4 the third light effect (drawn only for $L_3 = 0.136$) reduces the amplitude of the V light-curve only by $\Delta A \sim 0^m.025$. This corresponds to an increase in orbital inclination i of $\Delta i = 55^\circ.8 - 53^\circ.6 = 2^\circ.2$ and to a change in the degree of overcontact from $f_{over} \sim 41.2\%$ ($L_3 = 0$) to $f_{over} \sim 58.4\%$ ($L_3 = 0.136$) (see Table 4 – V-filter solutions).

Table 4
Results of the analysis of V776 Cas *UBV* light curves obtained by solving the inverse problem for the Roche model. The V light-curve is analysed with different third light effect ($L_3 = 0.000$, $L_3 = 0.091$, and $L_3 = 0.136$)

Quantity	*U*-filter	*B*-filter	*V*-filter	*V*-filter	*V*-filter
n	182	182	182	182	182
$\Sigma(O–C)^2$	0.0457	0.0138	0.0093	0.0092	0.0093
σ	0.0158	0.0087	0.0072	0.0071	0.0072
L_3	0.000	0.000	0.000	0.091	0.136
$q = m_c/m_h$	0.13				
T_h	6890				
$\beta_h = \beta_c$	0.08				
$A_h = A_c$	0.5				
$f_h = f_c$	1.0				
T_c	6654 ± 90	6544 ± 49	6610 ± 50	6616 ± 48	6620 ± 46
F_h	1.017 ± 0.001	1.019 ± 0.001	1.018 ± 0.001	1.024 ± 0.001	1.026 ± 0.001
$i[^\circ]$	53.9 ± 0.4	54.0 ± 0.2	53.6 ± 0.2	54.7 ± 0.2	55.8 ± 0.2
$a_1^{h,c}$	+0.3756, +0.3364	+0.3074, +0.3075	+0.3746, +0.3824	+0.3744, +0.3811	+0.3743, +0.3805
$a_2^{h,c}$	+0.8979, +0.8684	+0.9645, +0.8217	+0.8720, +0.7916	+0.8732, +0.7990	+0.8735, +0.8021
$a_3^{h,c}$	−0.5459, −0.3941	−0.6301, −0.3755	−0.7708, −0.6206	−0.7726, −0.6325	−0.7731, −0.6377
$a_4^{h,c}$	+0.1077, +0.0367	+0.1751, +0.0745	+0.2586, +0.1917	+0.2595, +0.1973	+0.2597, +0.1997
$\Omega_{h,c}$	2.0149	2.0111	2.0129	2.0013	1.9984
Ω_{in}	2.0476	2.0476	2.0476	2.0476	2.0476
Ω_{out}	1.9633	1.9633	1.9633	1.9633	1.9633
$f_{over}[\%]$	38.81	43.29	41.18	54.96	58.39
$R_h[D = 1]$	0.526	0.527	0.527	0.530	0.531
$R_c[D = 1]$	0.216	0.217	0.216	0.220	0.221
$L_h(L_h + L_c + L_3)$	0.875	0.881	0.872	0.790	0.748
$M_h[M_\odot]$	1.63 ± 0.02			1.63	1.63
$M_c[M_\odot]$	0.21 ± 0.02			0.21	0.21
$R_h[R_\odot]$	1.71 ± 0.02			1.73	1.73
$R_c[R_\odot]$	0.71 ± 0.02			0.73	0.74
$\log\ g_h$	4.18 ± 0.02			4.18	4.18
$\log\ g_c$	4.06 ± 0.02			4.04	4.03
M_{bol}^h	2.86 ± 0.02			2.84	2.83
M_{bol}^c	4.94 ± 0.03			4.88	4.86
$a_{orb}[R_\odot]$	2.985 ± 0.008			2.985	2.985

BaSeL approximation of stellar atmosphere ($[Fe/H]_{h,c} = 0.0$ – adopted metallicity of the components)

Note: n – number of observations, $\Sigma(O–C)$ –final sum of squares of residuals between observed and synthetic light curves, σ – standard deviation of the observations, L_3 – third light, $q = m_c/m_h$ – mass ratio of the components, $T_{h,c}$ – temperature of the hotter primary and cooler secondary, $\beta_{h,c}$, $A_{h,c}$, $f_{h,c}$ – gravity-darkening exponents, albedos and nonsynchronous rotation coefficients of the components respectively, F_h – filling factor for the critical Roche lobe of the hotter primary, $i[^\circ]$ – orbit inclination (in arc degrees), $a_1^{h,c}$, $a_2^{h,c}$, $a_3^{h,c}$, $a_4^{h,c}$ – nonlinear limb-darkening coefficients of the components (Claret's formula), $\Omega_{h,c}$, Ω_{in}, Ω_{out} – dimensionless surface potentials of the components and of the inner and outer contact surfaces respectively, $f_{over}[\%]$ – degree of overcontact, $R_{h,c}$ - polar radii of the components in units of the distance between the component centres, $L_h/(L_h + L_c + L_3)$ – luminosity of the more massive hotter star, $M_{h,c}[M_\odot]$, $R_{h,c}[R_\odot]$, – stellar masses and mean radii of stars in solar units, $\log g_{h,c}$ – logarithm (base 10) of the system components effective gravity, $M_{bol}^{h,c}$ – absolute bolometric magnitudes of V776 Cas components and $a_{orb}[R_\odot]$ – orbital semi-major axis in units of solar radius.

In general one can see in Table 4 that the absolute dimensions do not differ too much. So, the level of the third light effect produces relatively small changes in the system parameters and can be practically ignored in the case of V776 Cas. However, it cannot be ignored in systems like e.g. V899 Her (Özdemir et al., 2002), where we have a more pronounced third light effect. A detailed treatment of the third light effect can be done only if multi-colour magnitude differences between the visual components are available.

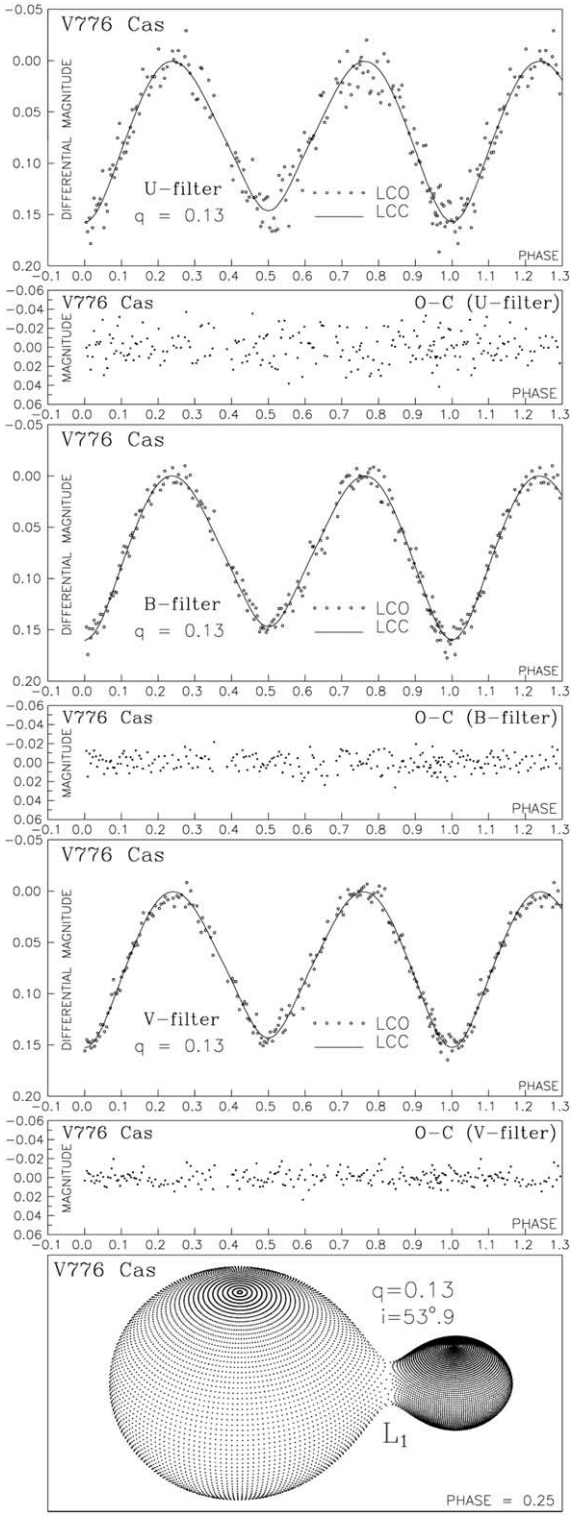


Fig. 3. Observed (LCO) and final synthetic (LCC) light curves of the V776 Cas with final O–C residuals obtained by analysing the U, B, and V observations and the view of the system at orbital phase 0.25, obtained with parameters estimated from the observations.

Inspite of the large difference between the masses of the components ($q = m_c/m_h = 0.13$), the light-curve analysis has shown that their temperatures are not too different ($\Delta T = T_h - T_c \sim 280$ K). This fact can be explained as a consequence of an intensive mass and energy exchange between the components, directed from the hotter – more massive primary onto the cooler secondary, through the neck region connecting the common envelope, i.e., of a mechanism leading to small differences in stellar temperatures.

5. Conclusions

A summary of our results, given in Table 4, proves that a Roche model of V776 Cas can successfully simulate the observed light curves. Synthetic light curves, obtained by solving the inverse problem, fit the observations very well, and we have quite good agreement between the solutions for individual light curves in different *UBV* filters of the photometric system. All this suggests the suitability of our Roche model in simulating the real observations.

The results describe the V776 Cas system as a high overcontact configuration with relatively small temperature differences between the components. They also suggest a significant energy transfer from the hotter – more massive primary onto the less massive secondary through the connecting neck of the common envelope. From the obtained solutions we can see that the secondary is the slightly cooler component of the system, and that the mean gravity of the secondary is somewhat smaller than the value for the primary, which holds well for the A-type W UMa systems.

The third light contribution (coming from the visual companion) to the total light of the system V776 Cas is relatively small. Therefore, it does not impact too seriously the estimation of basic system parameters. The existence of the third light is re-

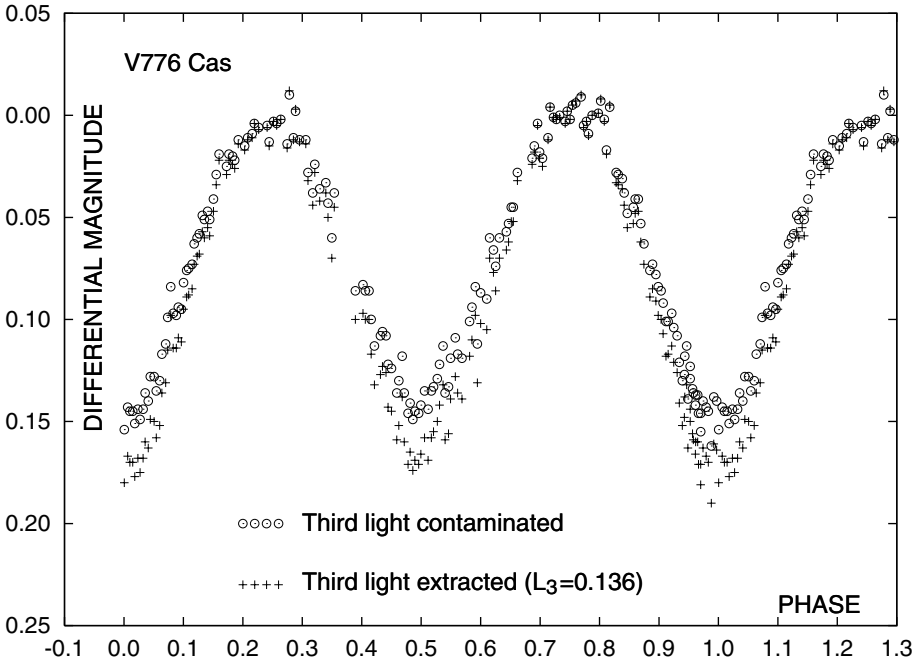


Fig. 4. A comparison between the V light curves of V776 Cas with and without the third light.

flected above all in the estimation of the degree of overcontact and in the orbit inclination of the system.

Acknowledgements

This work has been supported by the Ministry for Sciences and Technology of Serbia through the project 1191 "Stellar physics" and by the Turkish Academy of Sciences, in the framework of the Young Scientist Award Program (BA/TÜBA-GEBİP/2001-2-2). This research has made use of the Simbad database, operated at CDS, Strasbourg, France. The authors would like to thank to the *TÜBİTAK National Observatory (TUG)* for the observing time and to A. Elmaslı for her assistance during the observations and also to the reviewer for the valuable comments.

References

Carbon, D., Gingerich, O., 1969. In: Gingerich, O. (Ed.), Theory and Observation of Normal Stellar Atmospheres. MIT Press, Cambridge, MA, p. 377.
Claret, A., 2000. A&A 363, 1081.
Djurašević, G., 1992a. Ap&SS 196, 241.
Djurašević, G., 1992b. Ap&SS 197, 17.
Djurašević, G., Zakirov, M., Hojaev, A., Arzumanyants, G., 1998. A&AS 131, 17.
Dommanget, J., Nys O., 2002. Observations et Travaux 54, 2 (VizieR On-Line Data Catalog: I/274).
ESA, 1997. The Hipparcos and Tycho Catalogs, SP-1200.
Gomez-Forrellad, J.M., Garcia-Melendo, E. Guarro-Flo, J., Nomen-Torres, J., Vidal-Sainz, J., 1999. IBVS 4702.
Lejeune, T., Cuisinier, F., Buser, R., 1997. A&AS 125, 229.
Lejeune, T., Cuisinier, F., Buser, R., 1998. A&AS 130, 65.
Lucy, L.B., 1967. Zs. f. Ap. 65, 89.
Lucy, L.B., Wilson, R.E., 1979. ApJ 231, 502.
Marquardt, D.W., 1963. J. Soc. Ind. Appl. Math. 11 (2), 431.
Özdemir, S., Demircan, O., Erdem, A., Çiçek, C., Bulut, İ., Soydugan, E., Soydugan, F., 2002. A&A 387, 240.
Press, W.H., Teukolsky, S.A., Vetterling, W.T., Flannery, B.P., 1992. Numerical Recipes in Fortran, second ed. In: The Art of Scientific Computing, vol. 120. Cambridge University Press, New York.
Rafert, J.B., Twigg, L.W., 1980. MNRAS 193, 79.
Rucinski, S.M., 1969. Acta Astr. 19, 245.
Rucinski, S.M., Lu, W., Mochnacki, S.W., 2001. AJ 122, 1974.
Tanrıverdi, T., Kutdemir, E., Elmaslı, A., Şenavcı, H.V., Albayrak, B., Selam, S.O., Aydın, C., et al., (18 authors), 2003. IBVS 5407.
Wilson, R.E., Devinney, E.J., 1971. ApJ 166, 605.

Available online at www.sciencedirect.com
SCIENCE DIRECT®
New Astronomy 10 (2005) 163–172
New Astronomy
www.elsevier.com/locate/newast

A photometric study of eclipsing binary V351 Pegasi

B. Albayrak [a,*], G. Djurašević [b], S.O. Selam [a], O. Atanacković-Vukmanović [c], M. Yılmaz [a]

[a] Department of Astronomy and Space Sciences, Faculty of Science, Ankara University, Tandoğan, 06100 Ankara, Turkey
[b] Astronomical Observatory, Isaac Newton Institute of Chile, Yugoslav Branch, Volgina 7, 11160 Belgrade, Serbia and Montenegro
[c] Department of Astronomy, Faculty of Mathematics, University of Belgrade, Studentski trg 16, 11000 Belgrade, Serbia and Montenegro

Received 16 August 2004; received in revised form 17 September 2004; accepted 21 September 2004
Available online 19 October 2004
Communicated by E.P.J. van den Heuvel

Abstract

Photoelectric *BVR* light curves of the recently discovered eclipsing binary V351 Peg were studied for the first time to derive the physical parameters of the system. The light curves were obtained at the *TÜBİTAK National Observatory* (*TUG*) during three nights in August 2003. The solutions made by using Djurašević's inverse-problem method describe the V351 Peg system as an overcontact configuration ($f_{over} \sim 21\%$) with a very small temperature difference between the components ($\Delta T = T_h - T_c \sim 21$ K). Having in mind large difference in their masses, this suggests a good thermal contact between the components, i.e. a significant energy transfer from the more massive primary onto the less massive secondary. The bright area on the less massive star, near the neck region of the common envelope, can be taken as a consequence of this energy exchange between the components. Roche model with this bright active region on the less massive star successfully fits the observations. The relatively small amplitude of light curves arises from partial eclipse caused by the low orbital inclination ($i \sim 63°$). The stellar temperatures ($T_h \sim 7580$ K and $T_c \sim 7560$ K) and the estimated values of the gravity-darkening exponents ($\beta_h \sim 0.20$ and $\beta_c \sim 0.18$) indicate that there is a mixture of radiative and convective transport of energy.
© 2004 Elsevier B.V. All rights reserved.

PACS: 97.10.Nf; 97.10.Pg; 97.80.Fk; 97.80.Hn

Keywords: Binaries: eclipsing; Binaries: general; Stars: fundamental parameters; Stars: individual: V351 Peg

1. Introduction

V351 Peg was discovered to be a variable star by the Hipparcos satellite (ESA, 1997). The Hipparcos

* Corresponding author. Tel.: +903122126720/1424; fax: +903122232395.
E-mail address: albayrak@astrol.science.ankara.edu.tr (B. Albayrak).

1384-1076/$ - see front matter © 2004 Elsevier B.V. All rights reserved.
doi:10.1016/j.newast.2004.09.002

photometric observations of the system show a light-curve variation with an amplitude of $0^m.309$ ranging from $8^m.003$ to $8^m.312$. According to Hipparcos mission, this star is an RRc type pulsating variable with a 0.30 day period. Gomez-Forrellad et al. (1999) correctly classified the system as a W Ursa Majoris (W UMa) type eclipsing binary. They published V band light curve obtained using a 6-cm telescope and determined the initial light elements of the system. The light curve shows two almost equal-depth minima with an amplitude of $0^m.32$. Rucinski et al. (2001) obtained radial velocity curves of both components and determined a mass ratio of $q = m_c/m_h = 0.36$. The indices (h, c) refer to the hotter more massive and cooler less massive component, respectively. Rucinski et al. (2001) pointed out that the spectral type of the system is A8 V and that it belongs to the W sub-class of W UMa configuration. More recently, Selam et al. (2003) published one minimum time of V351 Peg. We observed and analyzed the system in order to carry out its full modelling.

2. The observational data and light curves

New observations of V351 Peg in *BVR* were obtained at the *TÜBİTAK National Observatory (TUG)* on the nights of 29, 30 and 31 August 2003, by using a SSP-5A photometer attached to a 0.4-m Cassegrain telescope. BD + 15°4830 and BD + 14°4974 were chosen as a comparison and check star, respectively. The relevant catalogue data for the stars are given in Table 1. A total of 888 observations was secured in *B*, *V* and *R* passbands. The extinction coefficients for each colour were determined by observing the comparison star.

Table 1
The catalogue data for V351 Peg, comparison and check star

Parameter	V351 Peg	Comparison	Check
BD	+14°4990	+15°4830	+14°4974
α_{2000}	$23^h25^m25^s$	$23^h29^m02^s$	$23^h20^m45^s$
δ_{2000}	+15°41′19″	+16°00′45″	+15°02′53″
V	$8^m.03$[a]	$7^m.10$[a]	$7^m.65$
B–V	$0^m.344$[a]	$0^m.080$[a]	

[a] From *Hipparcos* Catalogue (ESA, 1997).

The differential *B*, *V* and *R* magnitudes (variable minus comparison star) corrected for atmospheric extinction, are given in Table 5. The differential *B*, *V*, and *R* light curves and *B–V* and *V–R* colour curves are shown in Fig. 1. The error of a single observation was estimated to be ±0.012, ±0.010, and ±0.009 in *B*, *V*, and *R* colour, respectively. The observations cover three minima. Their timings were calculated using the method of Kwee and van Woerden (1956) and are listed in Table 2 together with those published by Selam et al. (2003) and Gomez-Forrellad et al. (1999). Thus, by using the timings to compute the phase of the observations, we determined the following light elements:

$$\text{HJD MinI} = 2452881.3927(3) + 0^d.5932963(1) \times E. \quad (1)$$

The light levels estimated by averaging data around the maxima and minima (by taking a $\Delta\phi = \pm 0.02$ interval) and their differences are listed in Table 3. The light curves are slightly *asymmetric* with almost equal maxima. There is also no significant difference between the levels of the two minima in *B*, *V* and *R* colours (see Fig. 1 and Table 3). There are slight variations in *V–R* colour curve around minima. The shape of the light curve indicates the overcontact configuration of the system with partial eclipse due to a small orbit inclination.

3. The light-curve analysis

We analyzed the light curves of V351 Peg using the code by Djurašević (1992a) modified for overcontact configurations (Djurašević et al., 1998). The programme is based on the Roche model and the principles arising from the paper by Wilson and Devinney (1971). The light-curve analysis was made by applying the inverse-problem method (Djurašević, 1992b) based on the modified Marquardt (1963) algorithm.

In the code, the stellar size is described by the filling factors for the critical Roche lobes $F_{h,c}$ of the primary and secondary component, respectively, which tell us to what degree the stars in the system fill their corresponding critical lobes.

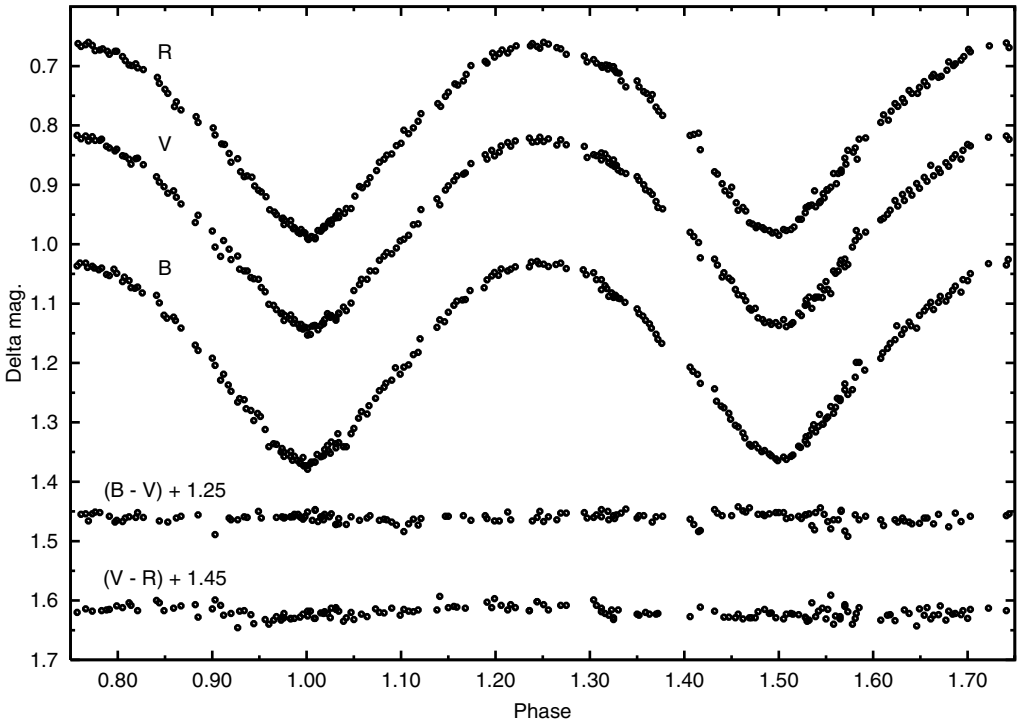


Fig. 1. Differential B, V and R light, B–V and V–R colour curves of V351 Peg.

Table 2
Observed times of minimum of V351 Peg

HJD 2400000+	Error	Type	Filter	Reference
48500.4930	0.0010	I	V	Gomez-Forrellad et al. (1999)
52924.4121	0.0002	II	UBV	Selam et al. (2003)
52881.3928	0.0002	I	BVR	This study
52882.5798	0.0004	I	BVR	This study
52883.4686	0.0003	II	BVR	This study

Table 3
The light levels and their differences in the B, V and R curves of V351 Peg

	ΔB	ΔV	ΔR
Max. light at 0.25	1.033 ± 0.003	0.824 ± 0.003	0.665 ± 0.004
Max. light at 0.75	1.032 ± 0.005	0.820 ± 0.003	0.665 ± 0.004
Min. light at 0.00	1.370 ± 0.006	1.142 ± 0.006	0.985 ± 0.006
Min. light at 0.50	1.361 ± 0.003	1.134 ± 0.005	0.980 ± 0.004
Δmax($m_{0.25}$–$m_{0.75}$)	0.001	0.004	0.000
Δmin($m_{0.00}$–$m_{0.50}$)	0.009	0.008	0.005
Depth of Min. I	0.336	0.318	0.320
Depth of Min. II	0.328	0.314	0.315

Table 4
Results of the simultaneous analysis of the V351 Peg *B*, *V* and *R* light curves obtained by solving the inverse problem for the Roche model with hot spot area in the neck region on the less-massive (cooler) component

Quantity	Value
n	888
$\sum(O-C)^2$	0.0511
σ	0.0076
$q = m_c/m_h$	0.36
$f_{h,c}$; $A_{h,c}$	1.0 ; 1.0
T_h	7580
$A_{hs} = T_{hs}/T_c$	1.066 ± 0.005
θ_{hs}	41.3 ± 0.9
λ_{hs}	182.7 ± 0.8
φ_{hs}	23.8 ± 2.2
T_c	7559 ± 15
F_h	1.020 ± 0.002
i (°)	63.0 ± 0.1
$\beta_h;\beta_c$	0.20 ± 0.01 ; 0.18 ± 0.01
$a_1^{h,c}[B]$	+0.3665,+0.4102
$a_2^{h,c}[B]$	+0.9718,+0.8917
$a_3^{h,c}[B]$	−0.7497,−0.9159
$a_4^{h,c}[B]$	+0.2191,+0.3367
$a_1^{h,c}[V]$	+0.4417,+0.3709
$a_2^{h,c}[V]$	+0.7722,+0.9630
$a_3^{h,c}[V]$	−0.9245,−0.7462
$a_4^{h,c}[V]$	+0.3560,+0.2214
$a_1^{h,c}[R]$	+0.4138,+0.4440
$a_2^{h,c}[R]$	+0.8932,+0.7786
$a_3^{h,c}[R]$	−0.9288,−0.9424
$a_4^{h,c}[R]$	+0.3455,+0.3660
$\Omega_{h,c}$; $f_{over}(\%)$	2.5496 ; 20.64
$R_{h,c}(D=1)$	0.450, 0.284
$L_h/(L_h+L_c)$	0.700 [*B*]; 0.702 [*V*]; 0.703 [*R*]
$\mathscr{M}_h[M_\odot]$	1.627 ± 0.05
$\mathscr{M}_c[M_\odot]$	0.586 ± 0.02
$\mathscr{R}_h[R_\odot]$	1.872 ± 0.03
$\mathscr{R}_c[R_\odot]$	1.192 ± 0.03
$\log g_h$	4.105 ± 0.03
$\log g_c$	4.053 ± 0.03
M_{bol}^h	2.246 ± 0.03
M_{bol}^c	3.238 ± 0.05
$a_{orb}[R_\odot]$	3.868 ± 0.05

Note: n – total number of the *B*, *V* and *R* observations, $\sum(O-C)^2$ – final sum of squares of residuals between observed (LCO) and synthetic (LCC) light curves, σ – standard deviation of the observations, $q = m_c/m_h$ – mass ratio of the components, $f_{h,c}$, $\beta_{h,c}$, $A_{h,c}$ – non-synchronous rotation coefficients, gravity-darkening exponents and albedo of the components, $T_{h,c}$ – temperature of the hotter primary and cooler secondary, A_{hs}, θ_{hs}, λ_{hs} and φ_{hs} – hot spot temperature coefficient, angular dimension, longitude and latitude (in arc degrees), F_h – filling factor for the critical Roche lobe of the hotter (more-massive) star, i (°) – orbit inclination (in arc degrees), $a_1^{h,c}$, $a_2^{h,c}$, $a_3^{h,c}$, $a_4^{h,c}$ – non-linear [*B*;*V*;*R*] limb-darkening coefficients of the components (Claret's formula), $\Omega_{h,c}$ – dimensionless surface potentials of the components, $f_{over}(\%)$ – degree of overcontact, $R_{h,c}$ – polar radii of the components in units of the distance between the component centers, $L_h/(L_h+L_c)$ – [*B*;*V*;*R*] luminosity of the hotter star (including hot spot on the cooler one), $\mathscr{M}_{h,c}[M_\odot]$, $\mathscr{R}_{h,c}[R_\odot]$ – stellar masses and mean radii of stars in solar units, $\log g_{h,c}$ – logarithm (base 10) of the mean surface gravity of the components, $M_{bol}^{h,c}$ – absolute bolometric magnitudes of V351 Peg components, and $a_{orb}[R_\odot]$ – orbital semi-major axis in units of solar radius.

For synchronous rotation of the components, these factors are expressed as the ratios of the stellar polar radii, $R_{h,c}$, and the corresponding polar radii of the critical Roche lobes, i.e. $F_{h,c} = R_{h,c}/R_{Roche_{h,c}}$. In the case of an overcontact configuration the potential $\Omega_{h,c}$ characterizing the com-

Table 5
Observational data for V351 Peg

HJD 2400000+	ΔB	ΔV	ΔR	HJD 2400000+	ΔB	ΔV	ΔR	HJD 2400000+	ΔB	ΔV	ΔR
52881.3775	1.344	1.116	1.116	52882.3198	1.259	1.045	1.045	52882.5558	1.341	1.101	1.101
52881.3789	1.350	1.120	1.120	52882.3215	1.260	1.033	1.033	52882.5587	1.336	1.103	1.103
52881.3827	1.358	1.127	1.127	52882.3244	1.245	1.038	1.038	52882.5603	1.337	1.110	1.110
52881.3842	1.364	1.133	1.133	52882.3260	1.253	1.034	1.034	52882.5634	1.350	1.117	1.117
52881.3871	1.364	1.135	1.135	52882.3292	1.245	1.005	1.005	52882.5649	1.357	1.128	1.128
52881.3886	1.369	1.141	1.141	52882.3308	1.224	0.994	0.994	52882.5693	1.349	1.119	1.119
52881.3915	1.373	1.140	1.140	52882.3370	1.212	0.979	0.979	52882.5714	1.357	1.127	1.127
52881.3932	1.373	1.141	1.141	52882.3468	1.192	0.959	0.959	52882.5755	1.366	1.135	1.135
52881.3960	1.367	1.138	1.138	52882.3483	1.183	0.956	0.956	52882.5770	1.359	1.143	1.143
52881.3980	1.367	1.137	1.137	52882.3511	1.175	0.950	0.950	52882.5801	1.379	1.153	1.153
52881.4015	1.358	1.137	1.137	52882.3528	1.167	0.943	0.943	52882.5818	1.370	1.152	1.152
52881.4033	1.356	1.134	1.134	52882.3557	1.161	0.927	0.927	52882.5843	1.367	1.137	1.137
52881.4060	1.339	1.117	1.117	52882.3572	1.137	0.936	0.936	52882.5864	1.354	1.144	1.144
52881.4078	1.352	1.123	1.123	52882.3601	1.152	0.916	0.916	52882.5891	1.357	1.132	1.132
52881.4111	1.343	1.128	1.128	52882.3616	1.143	0.927	0.927	52882.5905	1.346	1.127	1.127
52881.4129	1.334	1.117	1.117	52882.3645	1.131	0.909	0.909	52882.5934	1.348	1.120	1.120
52881.4161	1.341	1.106	1.106	52882.3661	1.137	0.917	0.917	52882.5949	1.333	1.120	1.120
52881.4177	1.341	1.112	1.112	52882.3694	1.141	0.898	0.898	52882.5977	1.336	1.124	1.124
52881.4207	1.319	1.099	1.099	52882.3711	1.120	0.906	0.906	52882.5992	1.319	1.116	1.116
52881.4226	1.310	1.078	1.078	52882.3741	1.112	0.887	0.887	52883.3576	1.059	0.846	0.846
52881.4258	1.293	1.068	1.068	52882.3759	1.106	0.894	0.894	52883.3603	1.070	0.848	0.848
52881.4274	1.282	1.059	1.059	52882.3784	1.098	0.867	0.867	52883.3617	1.075	0.855	0.855
52881.4306	1.286	1.059	1.059	52882.3800	1.110	0.885	0.885	52883.3644	1.082	0.866	0.866
52881.4321	1.272	1.045	1.045	52882.3829	1.098	0.874	0.874	52883.3659	1.087	0.869	0.869
52881.4363	1.259	1.045	1.045	52882.3844	1.088	0.879	0.879	52883.3685	1.091	0.875	0.875
52881.4384	1.247	1.027	1.027	52882.3879	1.096	0.863	0.863	52883.3700	1.092	0.878	0.878
52881.4413	1.241	1.020	1.020	52882.3895	1.087	0.869	0.869	52883.3729	1.098	0.881	0.881
52881.4429	1.234	1.014	1.014	52882.3920	1.078	0.855	0.855	52883.3802	1.109	0.886	0.886
52881.4462	1.229	1.016	1.016	52882.3936	1.071	0.849	0.849	52883.3815	1.117	0.892	0.892
52881.4489	1.208	1.007	1.007	52882.3972	1.081	0.857	0.857	52883.3843	1.121	0.900	0.900
52881.4517	1.219	0.994	0.994	52882.3986	1.059	0.842	0.842	52883.3858	1.128	0.908	0.908
52881.4539	1.207	0.992	0.992	52882.4016	1.062	0.832	0.832	52883.3882	1.134	0.911	0.911
52881.4568	1.203	0.985	0.985	52882.4030	1.049	0.834	0.834	52883.3895	1.141	0.916	0.916
52881.4597	1.186	0.967	0.967	52882.4146	1.033	0.820	0.820	52883.3922	1.151	0.928	0.928
52881.4626	1.182	0.966	0.966	52882.4256	1.035	0.818	0.818	52883.3936	1.160	0.938	0.938
52881.4643	1.159	0.942	0.942	52882.4272	1.026	0.823	0.823	52883.3960	1.167	0.941	0.941
52881.4747	1.140	0.924	0.924	52882.4352	1.037	0.817	0.817	52883.4134	1.207	0.980	0.980
52881.4765	1.127	0.934	0.934	52882.4374	1.032	0.822	0.822	52883.4155	1.214	0.987	0.987
52881.4797	1.131	0.909	0.909	52882.4405	1.032	0.818	0.818	52883.4186	1.219	0.997	0.997
52881.4817	1.114	0.902	0.902	52882.4420	1.039	0.826	0.826	52883.4201	1.234	1.023	1.023
52881.4854	1.103	0.893	0.893	52882.4447	1.037	0.819	0.819	52883.4290	1.243	1.025	1.025
52881.4872	1.096	0.885	0.885	52882.4463	1.040	0.825	0.825	52883.4305	1.265	1.035	1.035
52881.4910	1.094	0.882	0.882	52882.4491	1.043	0.825	0.825	52883.4335	1.273	1.055	1.055
52881.4925	1.093	0.880	0.880	52882.4507	1.040	0.823	0.823	52883.4351	1.276	1.048	1.048
52881.4957	1.078	0.864	0.864	52882.4538	1.051	0.835	0.835	52883.4379	1.285	1.057	1.057
52881.5047	1.073	0.849	0.849	52882.4553	1.053	0.838	0.838	52883.4394	1.295	1.061	1.061
52881.5061	1.060	0.857	0.857	52882.4586	1.042	0.843	0.843	52883.4422	1.305	1.076	1.076
52881.5092	1.054	0.842	0.842	52882.4601	1.049	0.840	0.840	52883.4437	1.308	1.085	1.085
52881.5108	1.048	0.851	0.851	52882.4636	1.063	0.851	0.851	52883.4467	1.318	1.087	1.087
52881.5135	1.053	0.845	0.845	52882.4651	1.055	0.852	0.852	52883.4482	1.326	1.095	1.095
52881.5151	1.042	0.834	0.834	52882.4677	1.061	0.857	0.857	52883.4508	1.337	1.108	1.108

(*continued on next page*)

Table 5 (*continued*)

HJD 2400000+	ΔB	ΔV	ΔR	HJD 2400000+	ΔB	ΔV	ΔR	HJD 2400000+	ΔB	ΔV	ΔR
52881.5192	1.045	0.829	0.829	52882.4692	1.073	0.865	0.865	52883.4522	1.340	1.111	1.111
52881.5209	1.042	0.835	0.835	52882.4718	1.074	0.856	0.856	52883.4547	1.337	1.108	1.108
52881.5240	1.038	0.826	0.826	52882.4732	1.072	0.855	0.855	52883.4561	1.343	1.124	1.124
52881.5328	1.038	0.821	0.821	52882.4764	1.082	0.866	0.866	52883.4590	1.349	1.127	1.127
52881.5343	1.030	0.828	0.828	52882.4852	1.086	0.886	0.886	52883.4604	1.347	1.132	1.132
52881.5373	1.029	0.827	0.827	52882.4868	1.099	0.895	0.895	52883.4633	1.353	1.131	1.131
52881.5389	1.033	0.820	0.820	52882.4900	1.120	0.903	0.903	52883.4647	1.356	1.135	1.135
52881.5415	1.034	0.827	0.827	52882.4918	1.125	0.914	0.914	52883.4674	1.361	1.132	1.132
52881.5446	1.038	0.822	0.822	52882.4959	1.123	0.910	0.910	52883.4690	1.365	1.137	1.137
52881.5496	1.034	0.833	0.833	52882.4973	1.129	0.921	0.921	52883.4722	1.358	1.127	1.127
52881.5523	1.032	0.824	0.824	52882.5004	1.141	0.932	0.932	52883.4739	1.362	1.139	1.139
52881.5559	1.041	0.833	0.833	52882.5096	1.170	0.963	0.963	52883.4769	1.357	1.135	1.135
52881.5669	1.043	0.835	0.835	52882.5110	1.179	0.951	0.951	52883.4784	1.355	1.132	1.132
52881.5687	1.052	0.854	0.854	52882.5201	1.192	0.978	0.978	52883.4817	1.340	1.116	1.116
52881.5731	1.048	0.849	0.849	52882.5217	1.204	1.005	1.005	52883.4833	1.342	1.120	1.120
52881.5750	1.059	0.851	0.851	52882.5255	1.229	1.021	1.021	52883.4866	1.324	1.094	1.094
52881.5781	1.077	0.858	0.858	52882.5272	1.219	0.994	0.994	52883.4882	1.322	1.089	1.089
52881.5826	1.088	0.863	0.863	52882.5304	1.237	1.008	1.008	52883.4925	1.316	1.089	1.089
52881.5856	1.090	0.858	0.858	52882.5317	1.248	1.026	1.026	52883.4944	1.307	1.089	1.089
52881.5871	1.086	0.867	0.867	52882.5358	1.266	1.020	1.020	52883.4976	1.303	1.077	1.077
52882.2992	1.331	1.103	1.103	52882.5374	1.260	1.042	1.042	52883.4992	1.294	1.063	1.063
52882.3007	1.336	1.101	1.101	52882.5402	1.262	1.045	1.045	52883.5036	1.285	1.045	1.045
52882.3035	1.312	1.108	1.108	52882.5418	1.277	1.045	1.045	52883.5051	1.275	1.049	1.049
52882.3050	1.304	1.091	1.091	52882.5445	1.280	1.056	1.056	52883.5083	1.264	1.027	1.027
52882.3086	1.287	1.072	1.072	52882.5462	1.297	1.058	1.058	52883.5108	1.235	1.025	1.025
52882.3103	1.303	1.090	1.090	52882.5489	1.285	1.059	1.059	52883.5180	1.199	0.977	0.977
52882.3134	1.291	1.076	1.076	52882.5506	1.290	1.073	1.073	52883.5197	1.199	0.987	0.987
52882.3151	1.274	1.083	1.083	52882.5534	1.312	1.080	1.080				

mon photosphere, is derived with a filling factor for the critical Roche lobe $F_h > 1$ of the primary, while the factor F_c may be excluded from further consideration. The degree of overcontact is defined as usually (Lucy and Wilson, 1979) through dimensionless Ω equipotentials

$$f_{over}(\%) = 100(\Omega_{h,c} - \Omega_i)/(\Omega_o - \Omega_i), \quad (2)$$

where $\Omega_{h,c}$, Ω_i, and Ω_o are the potentials of the common photosphere and of the inner and outer contact surfaces, respectively.

In this system tidal effects are expected to contribute to synchronization of the rotational and orbital periods. Therefore, we adopted $f_{h,c} = \omega_{h,c}/\omega_K = 1.0$ (synchronous rotation), where $f_{h,c}$ is the ratio of the angular rotation rate ($\omega_{h,c}$) to the Keplerian (ω_K) orbital revolution rate.

In the light-curve analysis, we used original observational data instead of normal points in order to avoid negative influence of such normalization. The mass ratio of the components was fixed at the value $q = m_c/m_h = 0.36$, estimated by Rucinski et al. (2001) from radial velocity study. Having in mind the spectral type A8 V the temperature of the more massive component, in agreement with Popper (1980) calibration, was set at $T_h = 7580$ K.

In the light-curve analysis code we applied a quite dense coordinate grid of $72 \times 144 = 10{,}368$ elementary cells per star. The intensity and angular distribution of radiation of elementary cells are determined by the stellar effective temperature, limb-darkening, gravity-darkening and by the reflection effect in the system.

According to the spectral type A8 V of the more massive primary and on the basis of preliminary

estimated temperature of the secondary, for the initial values of the stellar gravity-darkening exponents we used von Zeipel's (1924) theoretical predictions $\beta_{h,c} = 0.25$ for the stars with radiative envelope. Consequently, for the stellar albedos the values $A_{h,c} = 1.0$ were used.

A non-linear limb-darkening law was used to avoid possible negative influence of the wrong evaluation of limb-darkening coefficients on other parameters in the inverse problem. In agreement with Claret (2000) paper, we chose a new non-linear approximation that can be written as

$$\frac{I(\mu)}{I(1)} = 1 - a_1(1-\mu^{1/2}) - a_2(1-\mu) - a_3(1-\mu^{3/2}) - a_4(1-\mu^2), \quad (3)$$

where $a_{1,2,3,4}$ are the limb-darkening passband specific coefficients, $I(1)$ is the passband specific intensity at the center of the stellar disc and $\mu = \cos\gamma$ where γ is the angle between the line of sight and the emergent flux. This law, based on the least-squares method, describes the intensity distribution over the whole stellar disk very well, with very good flux conservation. Given metallicity, the values of the passband limb-darkening coefficients are derived from the current values of the stellar effective temperature T_{eff} and surface gravity $\log g$ in each iteration, by interpolation for both of these quantities in Claret (2000) tables. This was achieved by bi-linear interpolation (Press et al., 1992).

The computer programme for the light-curve analysis can be run choosing among three possibilities for the treatment of radiation: (1) simple black-body theory; (2) stellar atmosphere models by Carbon and Gingerich (1969) (CG); (3) the Basel Stellar Library (BaSeL). Also we can choose between the individual and simultaneous solving of the light curves in several filters.

The present light-curve analysis was carried out using all three radiation treatments. The final choice of the approximation used is made in a way as to keep the disagreement between different individual passband solutions at a minimum. The best fit of observations was obtained by using the corrected BaSeL model flux distributions. A change in the assumed metallicity leads to a notable change in the predicted stellar effective temperature. The optimum chemical abundance of the components was chosen by experimenting with values close to the solar metallicity. The best fit of the B, V and R light curves was obtained with [Fe/H]=−0.1 for both components of V351 Peg.

We examined the "corrected" BaSeL model flux distributions, consistent with *existing* empirical calibrations (Lejeune et al., 1997, 1998). In solving the inverse problem of the light-curve analysis, the fluxes are calculated in each iteration for current values of temperature and $\log g$, by bi-linear interpolation (Press et al., 1992) for both of these quantities in the atmosphere tables for the given metallicity [Fe/H] of the components. The surface gravities can be derived very accurately from the masses and radii of CB stars, but the temperature determination is related to the assumed metallicity and strongly depends on photometric calibration.

For a successful application of this model in the analysis of the observed light-curves, the inverse-problem method proposed by Djurašević (1992b) was used. Optimum model parameters are obtained through the minimization of $\sum(O-C)^2$, where $O-C$ is the residual between the observed (LCO) and synthetic (LCC) light curves for a given orbital phase. The minimization of $\sum(O-C)^2$ is done in an iterative cycle of corrections of the model parameters by using the modified Marquardt (1963) algorithm. In this way, the inverse-problem method provides estimates of the system parameters and their standard errors.

The light curves of V351 Peg have a peculiar shape. The analysis has shown that this system has a very distinct overcontact configuration where the less massive and smaller component partially eclipses the more massive and larger one during the deeper (primary) minimum. In order to describe all the features seen in the observed light curves we tested several different hypotheses. In the first place we tested Roche model with no spots on the components. So obtained synthetic light curves do not fit the observations well. The deviations of the fit from the observed light curves, i.e. the $O-C$ residuals indicate the existence of certain activity on the system components which deforms the light curves making them slightly asymmetric. Solving the inverse problem we ob-

tained the overcontact configuration with practically the same temperature of the components. Having in mind considerable difference in the masses of the components it is reasonable to suppose that there is some energy exchange between the components equilizing the temperature in the common envelope. Due to the fact our next step was to treat stellar albedos as free parameters in the inverse problem solution. This procedure provided better fit of the observations. We obtained that albedo of the less massive secondary is greater than the expected one corresponding to the stars with radiative envelope. It could indicate the existence of the hot region on the secondary in the neck zone. So, using this hypothesis and fixing the albedos at their expected values $A_{h,c} = 1.0$ appropriate for stars with radiative envelopes we solved the inverse problem by optimizing the system and hot spot region parameters.

In our code this active hot region on the secondary component is approximated by a circular spot, characterized by the temperature contrast of the spot with respect to the surrounding photosphere ($A_S = T_S/T_c$), by the angular dimension (radius) of the spot (θ_S) and by the longitude (λ_S) and latitude (φ_S) of the spot centre. The longitude (λ_S) is measured clockwise (as viewed from the direction of the $+Z$-axis) from the $+X$-axis (line connecting the star centers) in the range 0–360°. The latitude (φ_S) is measured from 0° at the stellar equator (orbital plane) to +90° towards the "north" ($+Z$) and −90° towards the "south" ($-Z$) pole.

Considering the stellar temperature estimations ($T_{eff} \sim 7600$ K) we expect mixed (radiative and convective) energy transport in the common envelope. Because of that the gravity-darkening exponents are treated as free parameters since their values depend on the energy transport mechanism in the envelope (see Claret, 1998). The best fit of the observations is obtained with $\beta_h = 0.20$ and $\beta_c = 0.18$. These gravity-darkening exponents estimated in the light-curve analysis were compared to theoretical predictions obtained on the basis of Claret (1998) tables. By interpolating the data from Claret's tables we obtained the tracks for corresponding stellar masses, which are in good agreement with our estimations of gravity-darkening exponents. This result confirms Claret's theoretical predictions for stars with partly convective envelopes.

4. Results and discussion

The solutions of our simultaneous light-curves analysis of V351 Peg are given in Table 4. The first three rows of the table present the total number n of B, V and R observations, the final sum of the squares of the residuals between observed (LCO) and synthetic (LCC) light curves

$$\sum_{i=1}^{n} (O_i - C_i)^2,$$

and the standard deviation of the residuals

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (O_i - C_i)^2}{(n-1)}}.$$

In the same table the spot characteristics (spot temperature factor, $A_S = T_S/T_c$, angular radius, θ_S, longitude λ_S and latitude φ_S) are also given. These parameters are determined by a simultaneous fitting of the light curves in B, V and R photometric bands.

Finally, in Table 4 we present some important absolute parameters of the system. They are derived from the mass ratio of the components $q = m_c/m_h = 0.36$ and semi-major orbital axis $a_{orb} \sim 3.87$, estimated by Rucinski et al. (2001) from radial velocity solution.

The estimated errors of the parameters arise from the non-linear least-squares method, on which the inverse-problem method is based. The real uncertainties of these parameters may be larger than the estimated ones (approximately 2–3 times). This is due to the influence of the errors of the model input parameters which are taken as fixed in the inverse-problem solution.

We obtained (see Table 4) that the temperatures of the system components are quite similar, that the secondary component is somewhat cooler and that its mean gravity is smaller than the gravity of the primary one, which holds true for A-type W UMa systems.

The optimum fit of each passband observed light curve (LCO) to the synthetic one (LCC) is

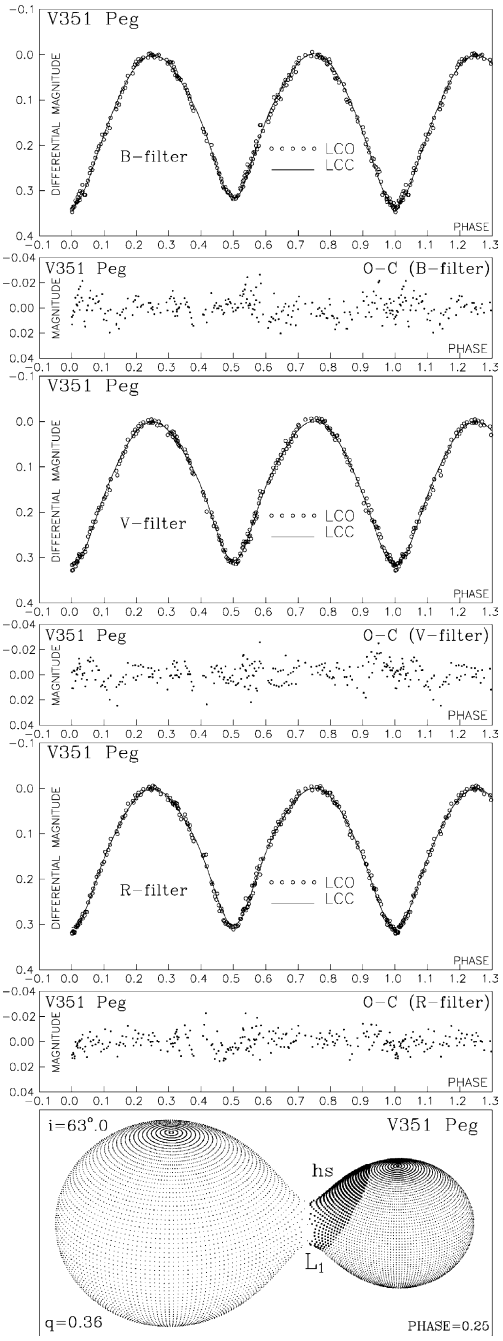


Fig. 2. Observed (LCO) and final synthetic (LCC) light curves of the V351 Peg with final $O-C$ residuals obtained by simultaneous analysis of the B, V and R observations, and the view of the system's Roche model at orbital phase 0.25, obtained with the optimum system parameters estimated by solving the inverse problem.

shown in Fig. 2. The final $O-C$ residuals between the observed (LCO) and optimum synthetic (LCC) light curves are given too. Finally, the bottom of this panel shows the view of the Roche model of the system V351 Peg, obtained with the optimum parameters, estimated by simultaneous analysis of B, V and R light curves. Using such plots, one can see how the system would seem at a certain orbital phase, chosen so that the bright region in the neck zone is visible.

It is evident from Table 4 and Fig. 2 that the Roche model with relatively large bright area on the less massive star near the neck region between the components gives a satisfactory fit to the analyzed light curves. In this active region the temperature is increased by ~7% compared to the surrounding photosphere as a consequence of the intensive energy transfer from the primary component to the secondary one through the neck area.

In the analysis of these light curves, the inclination of the orbit was estimated to be $i \sim 63°.0$, suggesting partial eclipses in both of the light curve minima. The filling coefficient for the critical Roche lobe $F_h \sim 1.020$ indicates a distinct overcontact configuration with degree of overcontact $f_{over} \sim 21\%$.

5. Conclusions

A summary of our results, given in Table 4, proves that a Roche model with a bright active region on the less massive component of V351 Peg can successfully simulate the observed light curves. Synthetic light curves, obtained by solving the inverse problem, i.e. by simultaneous analysis of the BVR passband light curves fit the observations very well in all passbands of the photometric system.

The obtained solutions show the system of V351 Peg as an overcontact configuration ($f_{over} \sim 21\%$) with a small temperature difference between the components ($\Delta T = T_h - T_c \sim 21$ K). Having in mind large difference in their masses, this suggests a good thermal contact between the components, i.e. a significant energy transfer from the more massive primary onto the less massive

secondary. The hot area located in the neck region on the less massive star can be a consequence of this energy exchange.

The light curves with relatively small amplitude are due to partial eclipse caused by the low orbital inclination ($i \sim 63°$). The stellar temperatures ($T_h \sim 7580$ K and $T_c \sim 7560$ K) and the estimated values of the gravity-darkening exponents ($\beta_h \sim 0.20$ and $\beta_c \sim 0.18$) indicate that in the common envelope there is a mixture of radiative and convective transport of energy.

Acknowledgements

This work has been supported by the Turkish Academy of Sciences, in the framework of the Young Scientist Award Program (BA/TÜBA-GEBİP/2001-2-2), by the Ministry of Science and Environmental Protection of Serbia through the project 1191 "Stellar physics" and by the research fund of the Ankara University with the project number: 20040705090. This research has made use of the Simbad database, operated at CDS, Strasbourg, France. The authors would like to thank to the *TÜBİTAK National Observatory (TUG)* for the observing time.

References

Carbon, D., Gingerich, O., 1969. In: Gingerich, O. (Ed.), Theory and Observation of Normal Stellar Atmospheres. MIT Press, Cambridge, MA, p. 377.
Claret, A., 1998. A&A 131, 395.
Claret, A., 2000. A&A 363, 1081.
Djurašević, G., 1992a. Ap&SS 196, 241.
Djurašević, G., 1992b. Ap&SS 197, 17.
Djurašević, G., Zakirov, M., Hojaev, A., Arzumanyants, G., 1998. A&AS 131, 17.
ESA, 1997. The Hipparcos and Tycho Catalogs, SP-1200.
Gomez-Forrellad, J.M., Garcia-Melendo, E., Guarro-Flo, J., Nomen-Torres, J., Vidal-Sainz, J., 1999. IBVS, 4702.
Kwee, K.K., van Woerden, H., 1956. Bull. Astr. Inst. Neth. 12, 327.
Lejeune, T., Cuisinier, F., Buser, R., 1997. A&AS 125, 229.
Lejeune, T., Cuisinier, F., Buser, R., 1998. A&AS 130, 65.
Lucy, L.B., Wilson, R.E., 1979. ApJ 231, 502.
Marquardt, D.W., 1963. J. Soc. Ind. Appl. Math. 11 (2), 431.
Popper, D.M., 1980. ARA&A 18, 115.
Press, W.H., Teukolsky, S.A., Vetterling, W.T., Flannery, B.P., 1992. Numerical Recipes in Fortran, The Art of Scientific Computing, second ed. Cambridge University Press, New York, p. 120.
Rucinski, S.M., Lu, W., Mochnacki, S.W., 2001. AJ 122, 1974.
Selam, S.O., Albayrak, B., Kara, A., Yılmaz, M., Şenavcı, T., Tanrıverdi, T., Elmaslı, A. et al., 2003 (14 authors). IBVS, 5471.
von Zeipel, H., 1924. MNRAS 84, 702.
Wilson, R.E., Devinney, E.J., 1971. ApJ 166, 605.

PHOTOMETRIC SOLUTION OF THE ECLIPSING BINARY V351 PEGASI

B. ALBAYRAK[1], G. DJURAŠEVIĆ[2], S. SELAM[1], M. YILMAZ[1], S. ERKAPIĆ[2], O. AKSU[1] and T. TANRIVERDI[1]

[1]*Department of Astronomy and Space Sciences, Ankara University Faculty of Science, TR-06100, Ankara, Turkey; E-mail: albayrak@astro1.science.ankara.edu.tr*

[2]*Astronomical Observatory, Volgina 7, 11160 Belgrade, Serbia and Montenegro, and Isaac Newton Institute of Chile, Yugoslav Branch*

(accepted April 2004)

Abstract. *BVR* light curves of the recently discovered eclipsing binary V351 Peg were studied to derive the preliminary physical parameters of the system. The light curves were obtained at the TÜBİTAK*–Turkish National Observatory (TUG) during three nights in August, 2003. The solutions were made using Djurašević's inverse problem method. V351 Peg is a system in an overcontact configuration ($f_{\rm over} \sim 21\,\%$) with a relatively small temperature difference between the components $\Delta T \approx 20$ K. The results suggest a significant mass and energy transfer from the more massive primary onto the less massive secondary. The hot area on the less massive star, near the neck region, can be considered as a consequence of this mass and energy exchange between the components through the connecting neck of the common envelope.

Keywords: binaries, close-binaries, eclipsing-V351 Peg

1. Introduction

V351 Peg (HIP 115627, BD + 14° 4990; $8^m.0$) was discovered as a variable star by the HIPPARCOS satellite project (ESA, 1997). The HIPPARCOS photometric observations of the system show a light curve variation with an amplitude of $0^m.30$, and the star was initially classified as an RRc-type pulsating variable with a 0.20 day period. Gomez-Forrellad et al. (1999) then correctly classified the system as a W Ursa Majoris type eclipsing binary. They published a light curve obtained in the V band and determined the initial light elements of the system. The light curve shows two almost equally deep minima with an amplitude of $0^m.32$. Rucinski et al. (2001) obtained radial velocity curves of both components and determined a mass ratio of $q = m_{\rm c}/m_{\rm h} = 0.36$. The indices (h, c) refer to the hotter (more massive) and cooler (less massive) component, respectively. Rucinski et al. (2001) pointed out that the spectral type of the system is A8 V, and that it belongs to the W sub-class of W UMa systems. More recently, Selam et al. (2003) published a minimum time of V351 Peg. We observed and analyzed the system in order to determine its parameters.

*TÜBİTAK: The Scientific and Technical Research Council of Turkey.



Astrophysics and Space Science **296:** 293–296, 2005.
© Springer 2005

2. Observations and Analysis

New observations of V351 Peg in B, V, and R were obtained at TUG on the nights of August 29, 30, and 31, 2003, by using an SSP-5A photometer attached to a 40 cm Cassegrain telescope. BD + 15° 4830 and BD + 14° 4974 were chosen as comparison and check stars, respectively. A total of 888 observations were secured during the observing run in each filter. The probable error of a single observation point was estimated to be ±0.012, ±0.010, and ±0.009 in B, V, and R colours, respectively.

To estimate the parameters of V351 Peg, we used the Djurašević (1992b) programme generalized for the case of an overcontact configuration (Djurašević et al., 1998). The programme is based on the Roche model and the principles arising from the paper by Wilson and Devinney (1971). The light curve analysis was performed by applying the inverse-problem method (Djurašević, 1992a) based on the Marquardt (1963) algorithm. The observed and theoretical light curves, and the view of the system at orbital phase 0.25 are shown in Figure 1. The non-linear limb darkening coefficients were taken from Claret's (2000) table.

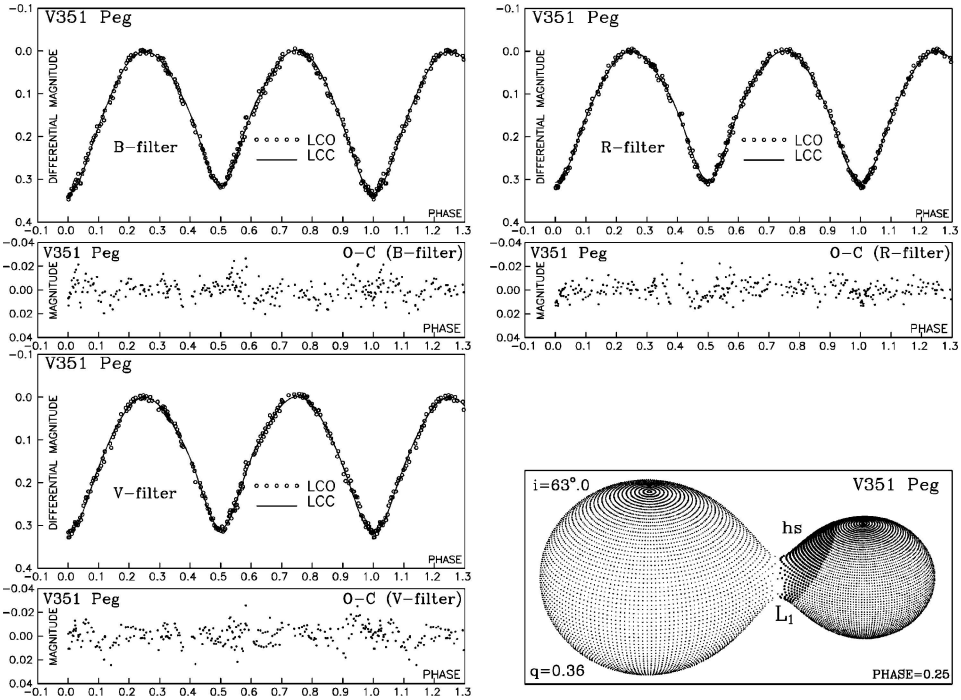


Figure 1. Observed (LCO) and final synthetic (LCC) light curves of V351 Peg with final O-C residuals obtained by analyzing B, V and R observations, and view of the system at orbital phase 0.25, obtained with the parameters of the photometric solution.

3. Conclusion

A summary of our results, given in Table I, proves that a Roche model with a hot active region on the less massive component of V351 Peg can successfully simulate the observed light curves. Synthetic light curves, obtained by solving the inverse problem, fit the observations very well, and we find quite good agreement between the solutions for individual light curves in different *BVR* filters of the photometric system. All this suggests the consistency of our Roche model with the hot area on the less massive star in simulating the real observations. Without assuming such an active region one can only find fits of much poorer quality.

The results describe the V351 Peg system as an overcontact configuration ($f_{\rm over} \sim 20.6\%$) with a relatively small temperature difference between the components of $\Delta T = T_{\rm h} - T_{\rm c} \sim 20$ K. They also suggest a significant mass and energy transfer from the more massive primary onto the less massive secondary. The hot area on the less massive star, near the neck region, is a consequence of this mass and energy exchange.

TABLE I

Results of the simultaneous analysis of the V351 Peg *BVR* light curves obtained by solving the inverse problem for the Roche model with the hot spot area in the neck region on the less-massive (cooler) component

Parameter	Value	Parameter	Value
$q = m_{\rm h}/m_{\rm c}$	0.36 (fixed)	β_h	0.20 ± 0.01
$f_{\rm over}[\%]$	20.64	β_c	0.18 ± 0.01
$i[^\circ]$	63 ± 0.1	$T_h[K]$	7580 (adopted)
$\Omega_{\rm h,c}$	2.5496	$T_c[K]$	7559 ± 15
$\Omega_{\rm in}$	2.5953	$L_h/(L_h + L_c)[B; V; R]$	0.700; 0.702; 0.703
$\Omega_{\rm out}$	2.3738	$A_{hs} = T_{hs}/T_c$	1.066 ± 0.005
$R_{\rm h}[D = 1]$	0.450	θ_{hs}	41.3 ± 0.9
$R_{\rm c}[D = 1]$	0.284	λ_{hs}	182.7 ± 0.8
$F_{\rm h}$	1.020 ± 0.002	φ_{hs}	23.8 ± 2.2
$f_{\rm h,c}$	1.0	$\Sigma(O - C)^2$	0.0511
$A_{\rm h,c}$	1.0	σ	0.0076

Note: $q = m_{\rm c}/m_{\rm h}$: mass ratio of the components, $f_{\rm over}$ [%]: degree of overcontact, i: orbit inclination (in arc degrees), $\Omega_{\rm h,c}$, $\Omega_{\rm in}$, $\Omega_{\rm out}$: dimensionless surface potentials of the components and of the inner and outer contact surfaces respectively, $R_{\rm h,c}$: polar radii of the components in units of the distance between the component centers, $F_{\rm h}$: filling factor for the critical Roche lobe of the hotter (more-massive) star, $f_{\rm h,c}$, $A_{\rm h,c}$, $\beta_{\rm h,c}$: non-synchronous rotation coefficients, albedo of the components and gravity-darkening exponents, $T_{\rm h,c}$: temperature of the hotter primary and cooler secondary, $L_{\rm h}/(L_{\rm h} + L_{\rm c})[B; V; R]$: luminosity of the hotter star (including hot spot on the cooler one), $A_{\rm hs}$, $\theta_{\rm hs}$, $\lambda_{\rm hs}$ and $\varphi_{\rm hs}$: hot spot temperature coefficient, angular dimension, longitude and latitude (in arc degrees), $\Sigma(O - C)^2$: final sum of squares of residuals between observed (LCO) and synthetic (LCC) light curves, σ: standard deviation of the observations.

Acknowledgements

The authors would like to thank the Turkish National Observatory (TUG) for the observing time. This research was supported by the Turkish Academy of Sciences in the framework of the Young Scientist Award Program (BA/TÜBA-GEBIP/2001-2-2), by the Ministry of Sciences and Technology of Serbia through the project 1191 *Stellar Physics* and by the Research Fund of Ankara University (BAP) under the research project nos: 20040705089 and 20040705090.

References

Claret, A.: 2000, *A&A* **363**, 1081.
Djurašević, G.: 1992a, *Ap&SS* **197**, 17.
Djurašević, G.: 1992b, *Ap&SS* **196**, 241.
Djurašević, G., Zakirov, M., Hojaev, A. and Arzumanyants G.: 1998, *A&AS* **131**, 17.
ESA: 1997, *The Hipparcos and Tycho Catalogues*, ESA SP-1200.
Gomez-Forrellad, J.M., Garcia-Melendo, E. and Guarro-Flo, J.: 1999, *IAU-IBVS* No. 4702.
Marquardt, D.W.: 1963, *J. Soc. Ind. Appl. Math.* **11**, No.2, 431.
Rucinski, S.M., Lu, W., Mochnacki, S.W., Ogloza, W. and Stachowski, G.: 2001, *AJ* **122**, 1974.
Selam, S.O., Albayrak, B., Şenavcı, H.V., et al.: 2003, *IAU-IBVS* No.5471.
Wilson, R.E. and Devinney, E.J.: 1971, *ApJ* **166**, 605.

FIRST GROUND-BASED PHOTOMETRY AND LIGHT CURVE ANALYSIS OF THE RECENTLY DISCOVERED CONTACT BINARY HX UMa

S. SELAM, B. ALBAYRAK, M. YILMAZ, H.V. ŞENAVCI, İ ÖZAVCI and C. ÇETINTAŞ

Department of Astronomy and Space Sciences, Faculty of Science, Ankara University, TR-06100, Ankara, Turkey; E-mail: selim@astro1.science.ankara.edu.tr

(accepted April 2004)

Abstract. Photoelectric *UBV* light curves of the recently discovered eclipsing binary HX UMa were obtained and studied to determine the preliminary physical parameters of the system for the first time. The observations were taken at the TÜBİTAK[1] – Turkish National Observatory (TUG) on three nights in April 2003. A simultaneous analysis of the light and radial velocity curves yields a typical A-type contact binary with a high degree of overcontact. The influence of the close visual companion to the total light of the system was taken into account during the analysis.

Keywords: binaries, close-binaries, eclipsing-HX UMa

1. Introduction

The variability of HX UMa (HIP 058648, HD 104425, BD + 43° 2177) was discovered during the HIPPARCOS mission (ESA, 1997). The character of the light curve is of typical W UMa-type, with an amplitude of 0.17 mag. A close companion at the distance of 0.63 arcsec was also discovered by HIPPARCOS. The initial light elements were given in the HIPPARCOS catalogue as:

$$\text{Min } I = BJD\ 2448500.3720 + 0^{\text{d}}.379156 \times E \quad (1)$$

The first radial velocity curve measurements of the system were obtained and analyzed by Rucinski et al. (2003). They estimated the spectral type of the system as F8V. Their radial velocity curve solution yields an A-type contact binary with a mass ratio of $q = 0.291 \pm 0.009$. The system has the potential of an excellent combined light and radial velocity curve solution. Thus, we obtained new photoelectric *UBV* light curves of HX UMa and analyzed them simultaneously with the radial velocity curves to obtain a consistent set of parameters of the system.

2. Observations and Analysis

HX UMa was observed in UBV pass-bands at TUG on April 6, 27, and 28, 2003, by using an OPTEC SSP-5A photoelectric photometer attached to the 40 cm

[1]TÜBİTAK: The Scientific and Technical Research Council of Turkey.



Astrophysics and Space Science **296:** 305–308, 2005.
© Springer 2005

Cassegrain telescope. HD 103954 and HD 104882 were used as comparison and check stars, respectively. A total number of 306 observations were secured in each pass-band. The probable error of a single observation point was estimated to be ± 0.015, ± 0.010, and ± 0.008 in U, B, and V filters, respectively.

Newly determined primary and secondary minima based on our observations were used together with the spectroscopically determined time of primary minimum by Rucinski et al. (2003) to calculate the updated light elements of the system:

$$\text{Min } I = HJD\ 2452757.5357(2) + 0^{\text{d}}.3791574(1) \times E \tag{2}$$

The light curves were phased by using this updated light element. The observed levels of both maxima are almost equal, which made the light curve analysis process rather uncomplicated. The observed slight difference in minima led to a very small temperature difference between the components.

To get a preliminary set of parameters for the system and find a good approximation to the third light contribution in each passband, we initially preferred to use the *Nightfall* code by Wichmann (1998), because the third light parameter L_3 is an adjustable quantity in this programme, but not in the WD-code. *Nightfall* is also based on Roche geometry, and all the principles to calculate theoretical light curves of eclipsing binaries was taken from the WD code (Wilson and Devinney, 1971), however did not yield errors of the adjusted parameters. Therefore, after having found a reasonable solution and good approximation to the L_3 parameter with the *Nightfall* programme, we obtained the final results of the analysis by using the WD code. The magnitude difference between HX UMa and its close companion was estimated to be $\Delta m = 3.27 \pm 0.10$ in V-band by Rucinski et al. (2003). We estimated the corresponding third light contribution in light units as $L_3 = 0.047$ in V-band and fixed it during the *Nightfall* analysis. We also fixed the primary

TABLE I

Results derived from the light curve modeling of HX UMa

Parameter	Value	Parameter	Value
f	58.7%	$\Omega_1 = \Omega_2$	2.3395 ± 0.0069
$q = m_2/m_1$	0.291 (fixed)	T_1 (K)	6650 (adopted)
i (degrees)	48.85 ± 0.60	T_2 (K)	6601 ± 47
r_1(pole)	0.481 ± 0.001	$L_1/(L_1+L_2+L_3)[U]$	0.731 ± 0.004
r_1(side)	0.525 ± 0.001	$L_3/(L_1+L_2+L_3)[U]$	0.013
r_1(back)	0.559 ± 0.001	$L_1/(L_1+L_2+L_3)[B]$	0.718 ± 0.003
r_2(pole)	0.284 ± 0.001	$L_3/(L_1+L_2+L_3)[B]$	0.032
r_2(side)	0.299 ± 0.001	$L_1/(L_1+L_2+L_3)[V]$	0.708 ± 0.003
r_2(back)	0.361 ± 0.002	$L_3/(L_1+L_2+L_3)[V]$	0.047

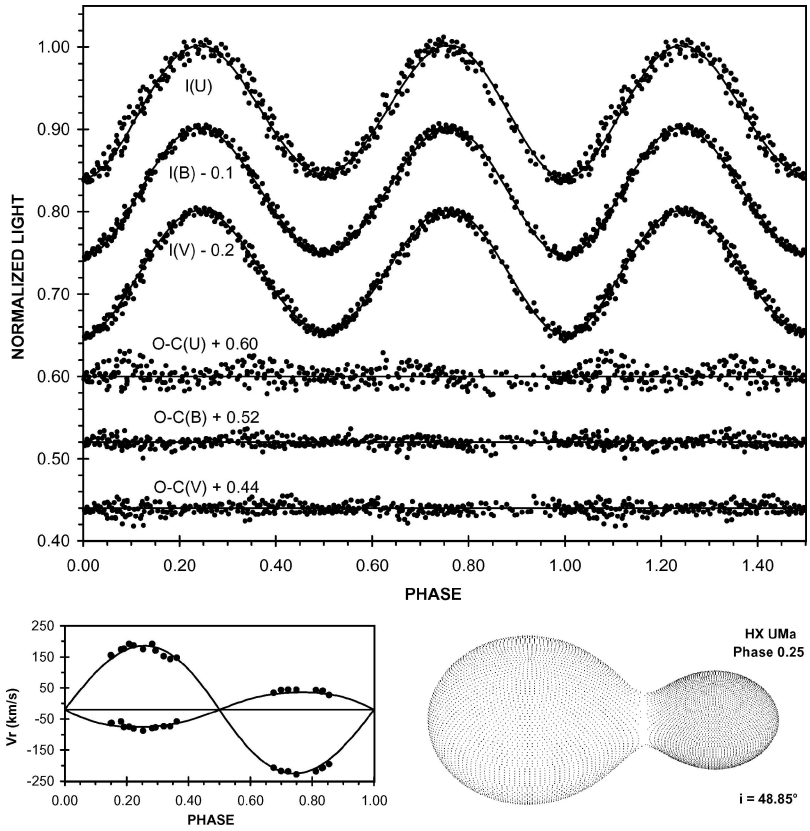


Figure 1. Top panel: Comparison between theoretical and observed light curves of HX UMa. O-C residuals from the theoretical curves in each pass-band are also shown at the bottom of the panel. Bottom left panel: Fits to the radial velocity data. Bottom right panel: Geometrical 3D model of HX UMa as seen at orbital phase 0.25.

component temperature T_1 at 6650 K according to the effective temperature versus spectral type calibration of dwarf stars by Gray and Corbally (1994). The mass ratio $q = 0.291$ was fixed at the spectroscopically determined value by Rucinski et al. (2003). Bolometric albedos and gravity darkening coefficients of the components were fixed at their theoretically adopted values for stars with convective envelopes. Limb darkening coefficients were taken from the work by Van Hamme (1993). The adjustable parameters were the orbital inclination i, the mean temperature of the secondary star T_2, the potentials of the components Ω_1 and Ω_2, the monochromatic luminosity of the primary star L_1 (Planck approximation is used to compute the luminosities), and the L_3 parameter for U and B passbands. The converged solution reveals that the third light contribution from the close companion to the total light of the system is almost negligible. After the Nightfall solution the last version of the Wilson-Devinney Code WD-2003 (Wilson and Devinney, 1971) was

used to perform the final analysis. We transferred the resulting parameters from the *Nightfall* analysis to the WD code as input parameters and made several runs to get the final solution by fixing the L_3 parameters to the values obtained during the Nightfall analysis. The fixed and adjustable parameters were the same. After several runs we obtained the best fitting model in mode 3 of the WD code. The parameters of the best fitting model are given in Table I. A comparison between theoretical and observed light curves in *UBV* passbands, fits to the radial velocity data and a 3D geometrical model of the system are shown in Figure 1.

3. Conclusions

Photoelectric UBV light curves of the eclipsing binary HX UMa were obtained and studied to determine the preliminary physical parameters of the system for the first time. The simultaneous analysis of the light curves together with the radial velocity curves showed that the temperature difference between the components is only about $\Delta T = T_h - T_c$ = 50 K. Thus, the system appears to be a typical A-subtype W UMa system with a high-degree of over-contact configuration ($f = 58.7\%$). The slightly hotter and more massive component is eclipsed at primary minimum. The third light contribution from the close companion to the total light of the system was found to be almost negligible.

Acknowledgements

The authors would like to thank the Turkish National Observatory (TUG) for the observing time. This research was supported by the Turkish Academy of Sciences in the framework of the Young Scientist Award Program (BA/TÜBA-GEBIP/2001-2-2) and by the Research Fund of Ankara University (BAP) under the research project no: 20040705090.

References

ESA: 1997, *The Hipparcos and Tycho Catalogues*, ESA SP-1200.
Gray, R.O. and Corbally, C.J.: 1994, *AJ* **107**, 742.
Rucinski, S.M., Capobianco, C.C. and Lu, W.: 2003, *AJ* **125**, 3258.
Van Hamme, W.: 1993, *AJ* **106**, 2096.
Wichmann, R.: 1998, *Nightfall User Manual* (http://www.lsw.uni-heidelberg.de/users/rwichman/Nightfall.html).
Wilson, R.E. and Devinney, E.J.: 1971, *ApJ* **166**, 605.

Astron. Nachr. / AN **326**, No. 8, 746–753 (2005) / **DOI** 10.1002/asna.200510400

Light curve solution and orbital period analysis of the contact binary V842 Herculis

S.O. SELAM, B. ALBAYRAK, H.V. ŞENAVCI, and O. AKSU

Ankara University, Faculty of Science, Dept. of Astronomy and Space Sciences, 06100 Tandoğan-Ankara, Turkey

Received 29 April 2005; accepted 23 June 2005; published online 9 September 2005

Abstract. New photoelectric BV light curves were obtained for the neglected eclipsing binary V842 Her at the *TÜBİTAK National Observatory (TUG)* and studied for the first time in detail to determine the orbital parameters and geometry of the system. The solutions obtained simultaneously for the new light curves and the radial velocity curves in the literature by using the Wilson-Devinney code reveal a typical W-type contact system. The light curves exhibit the so-called O'Connell effect which the level of the primary maxima being higher than that of the secondary ones in both pass-bands. The O'Connell effect in the light curves is explained in terms of a dark-spot located on the more massive component which makes the more massive larger component slightly cooler than the less massive smaller one. The $O-C$ diagram constructed for all available times of minima of V842 Her exhibits a cyclic character superimposed on a quadratic variation. The quadratic character yields a orbital period increase with a rate of $\mathrm{d}P/\mathrm{d}t = 7.76 \times 10^{-7}$ days yr^{-1} which can be attributed to the mass exchange/loss mechanism in the system. By assuming the presence of a gravitationally bound third body in the system, the analysis of the cyclic nature in the $O-C$ diagram revealed a third body with mass of $0.4 M_{\odot}$ orbiting around the eclipsing pair. The possibility of magnetic activity cycle effect as a cause for the observed cyclic variation in the $O-C$ diagram was also discussed.

Key words: binaries: close – binaries: eclipsing – stars: individual (V842 Her) – stars: fundamental parameters

©2005 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim

1. Introduction

The variability of V842 Her (NSV 07457 = BD+50° 2255 = BV 0103 = CSV 7268) was discovered by Geyer et al. (1955) on Bamberg photographic survey plates taken between 1929-1939. They indicated that the star has a maximum photographic magnitude of 9.7 and rapid light variations with an amplitude of $0\overset{\mathrm{m}}{.}7$. Shortly after this discovery, Filatov (1960) has suggested RR Lyr-type variability for that star based on his inspections of photographic plates taken between 1939-1959 at the Tadjikistan Observatory and gave a list of 17 photographic times of maxima. But, the real nature of this variable star as a contact binary was identified recently by Vandenbroere (1993a, 1993b) and, apparently independently, by Nomen-Torres & Garcia-Melendo (1996) with their own photometric observations. Diethelm (1994) has also confirmed the typical EW-type light variation based on his BV photometry obtained in Rosemary Hill Observatory. Vandenbroere (1993a, 1993b) has performed an extensive period-search study with all available times of extrema (both minima and maxima) and suspected a period increase. She has obtained the following best-representing linear ephemeris from her own visual and photoelectric observations:

$$\mathrm{Min}\ I = \mathrm{HJD}\ \ 2447643.1786(23) + 0\overset{\mathrm{d}}{.}4190306(25) \times E. \quad (1)$$

Independently, Nomen-Torres & Garcia-Melendo (1996) have published a different ephemeris based on their 1996 observations as:

$$\mathrm{Min}\ I = \mathrm{HJD}\ \ 2450177.4767(4) + 0\overset{\mathrm{d}}{.}41906(3) \times E\ . \quad (2)$$

Both Vandenbroere (1993a, 1993b) and Nomes-Torres & Garcia-Melendo (1996) have mentioned that their light curves exhibit the so-called O'Connell effect which the primary maximum at orbital phase $\phi = 0.25$ being higher than that of the secondary one at phase $\phi = 0.75$. Nomen-Torres & Garcia-Melendo (1996) have applied the *Binary Maker* Code (Bradstreet 1993) to their V-band light curve and found a preliminary set of parameters of the system ($q = 3.8 \pm 0.2$, $i = 79\overset{\circ}{.}0 \pm 2\overset{\circ}{.}0$ and $f = 0.25 \pm 0.10$) resulting with a W-type contact system. They have preferred to explain the O'Connell effect with a hot spot located on the secondary (less massive) component. Csizmadia (2001) has also observed V842 Her photometrically on four nights in

Correspondence to: selim@astro1.science.ankara.edu.tr

©2005 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim

April and May 2000 and tried to explain the orbital period behaviour of the system.

The first radial velocity curves of the both components of V842 Her has been obtained and analysed by Rucinski & Lu (1999). They have also estimated the spectral type of the system as F9V from their spectra. Their radial velocity curve solution yields a W-type contact system with a mass ratio of $q_{\rm sp} = 3.852 \pm 0.024$. Rucinski & Lu (1999) have pointed out that the orbital period of about $0\overset{\rm d}{.}42$ is somewhat long, and the spectral type of F9V is relatively early for a typical W-type contact system. They have noted that the system has the potential of an excellent combined light and radial velocity curve solution. Thus, we have obtained new photoelectric BV light curves of V842 Her and analysed them simultaneously with the radial velocity curves by Rucinski & Lu (1999) to obtain a more reliable set of parameters of the system.

2. Observations

New photoelectric BV observations of V842 Her were obtained at the *TÜBİTAK National Observatory (TUG)* on the nights of 3 and 4 July 2003, by using an SSP-5A photometer attached to the 0.4m Cassegrain telescope. GSC 03497-00310 and GSC 03497-00349 were chosen as comparison and check star, respectively. The relevant catalogue data for the observed stars are given in Table 1. A total of 135 and 146 observations were obtained in B and V passbands, respectively. The nightly extinction coefficients for each band were determined from the observations of the comparison star. The magnitude differences in the sense of variable minus comparison star together with their heliocentric Julian dates are listed in Table 3. The probable error of a single observation point was estimated to be $\pm$0.021, and $\pm$0.014 in B and V bands, respectively. The differential B, V band light curves and $B-V$ colour curve are given in Fig. 1. Our new observations obtained at *TUG* cover two minima, the timings of which were calculated by using the method of Kwee & van Woerden (1956) as Min I = 2452825.3883$\pm$0.0002 and Min II = 2452826.4379$\pm$0.0002. Furthermore, we have obtained new photoelectric observations of the system on the nights of 24 and 27 July 2004 in UBV filters at *Ankara University Observatory (AUO)* to have additional minima times for the system. The 0.3m Maksutov-Cassegrain telescope with an SSP-5A photometer head was used during this observing run. Two additional minima times from these observations were also calculated by using the method of Kwee & van Woerden (1956) as Min I = 2453211.3187$\pm$0.0005 and Min II = 2453214.4648$\pm$0.0004. The photometric phases of the light and colour curves were calculated with the following linear ephemeris which is corrected by using recent photoelectric and ccd minima times including our new times of minima:

$$\text{Min } I = \text{HJD } 2450177.4857(4) + 0\overset{\rm d}{.}41904(3) \times E\,. \quad (3)$$

The light levels were estimated by averaging data around the maxima and minima (by taking a $\Delta\phi = \pm 0.02$ interval) and their differences are listed in Table 2. The

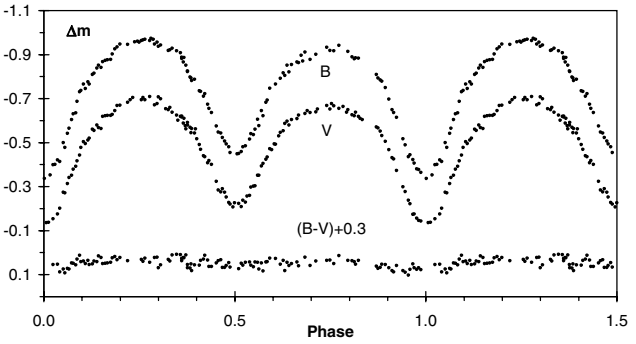


Fig. 1. Differential B, V light and $B-V$ colour curves of V842 Her.

magnitude differences between the two maxima exhibit the so-called O'Connell effect amounts to Δm = Max I – Max II = 0.033 and 0.032 for B and V bands, respectively. Nomen-Torres & Garcia-Melendo (1996) and Vandenbroere (1993a) have also mentioned that their V light curves exhibit O'Connell effect as Δm = Max I – Max II = 0.03 and Δm = Max I – Max II = 0.1, respectively. This kind of light curve asymmetries are generally attributed to inhomogeneities in surface brightness distribution (cool or hot stellar spots) of the component stars in late-type contact binaries.

Table 1. The catalogue information for V842 Her, comparison and check stars

Parameter	V842 Her	Comparison	Check
GSC	03497-00263	03497-00310	03497-00349
TYC		3497-310-1	3497-349-1
α_{2000}	$16^{\rm h}\ 06^{\rm m}\ 02^{\rm s}$	$16^{\rm h}\ 06^{\rm m}\ 04^{\rm s}$	$16^{\rm h}\ 05^{\rm m}\ 16^{\rm s}$
δ_{2000}	$+50^\circ\ 11'\ 12''$	$+50^\circ\ 07'\ 49''$	$+50^\circ\ 06'\ 47''$
B_T	$10\overset{\rm m}{.}729$	$11\overset{\rm m}{.}574$	$12\overset{\rm m}{.}169$
V_T	$10\overset{\rm m}{.}177$	$10\overset{\rm m}{.}710$	$11\overset{\rm m}{.}180$
$B-V$	0.512	0.758	0.857

Table 2. The light levels and their differences in the light curves of V842 Her

	ΔB	ΔV
Max. light at $\phi = 0.25$	–0.965$\pm$0.015	–0.698$\pm$0.015
Max. light at $\phi = 0.75$	–0.932$\pm$0.015	–0.666$\pm$0.015
Δmax ($m_{0.75} - m_{0.25}$)	0.033	0.032
Depth of Min. I	0.584	0.566
Depth of Min. II	0.515	0.471

3. The light curve analysis

Our new photoelectric light curves and radial velocity curves by Rucinski & Lu (1999) were analyzed simultaneously with the aid of revised version of light curve analysis method (WD-2003) by Wilson & Devinney (1971) to obtain a consistent set of physical and orbital parameters of V842 Her. All photometric observation points and radial velocity data

©2005 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim

were considered during the analysis. Some parameters of the model were fixed to their theoretical values according to the known physical nature of the component stars such as bolometric albedos $A_1 = A_2 = 0.5$ (Rucinski 1969) and gravity-darkening coefficients $g_1 = g_2 = 0.32$ (Lucy 1967). The mass ratio ($q = 3.852$) and the velocity of the center of mass ($V_\gamma = -57.98$ km s^{-1}) were set to the corresponding values determined by Rucinski & Lu (1999) and kept constant during the solution. The effective temperature of the primary component (T_1) was adopted from effective temperature calibration for dwarf stars by Gray & Corbally (1994) according to the spectral type F9V indicated by Rucinski & Lu (1999). Square-root law limb-darkening coefficients x_1, y_1, x_2 and y_2 were interpolated from van Hammes's (1993) tables. Synchronous rotation for both components ($F_1 = F_2 = 1.0$) and a circular orbit ($e = 0.0$) for the system have been assumed. The orbital inclination angle (i), the surface potentials of the both components ($\Omega_{1,2}$), the effective temperature of the secondary component (T_2) and the relative monochromatic luminosity of the primary component (L_1) were chosen as adjustable parameters and the relative monochromatic luminosity of the secondary component L_2 was coupled to L_1 during the iterations. Although the profiles of the light curves provide us some clues about Roche lobe filling components and contact configuration of the system, we have initially demonstrated different possible modes of WD code (i.e., contact, semi-detached and detached configurations). The differential corrections proposed by different modes always yield an over-contact configuration during these test runs. Therefore, we have performed the final analysis in MODE-03 of the WD code which is convenient for contact binaries.

By using the adopted effective temperature for the primary component as $T_1 = 6000$ K which is corresponding to the spectral type F9V by Rucinski & Lu (1999), no reasonable solution could be obtained during the iterations. The spectral type of the system was mentioned in *New Catalogue of Suspected Variable Stars* as G0 (Kukarkin et al. 1982) and Rucinski & Lu (1999) emphasized that the spectral type of F9 V is relatively early for a typical W-type W UMa system. Taking into account this discrepancy on spectral type of the system we have made a trial search on the effective temperature of the primary component and have reached a reasonable solution only by decreasing the effective temperature of the primary component to $T_1 = 5700$ K which is correspond to G2 spectral type according to the effective temperature calibration for dwarf stars by Gray & Corbally (1994).

The observed light curve asymmetry in maxima (i.e., the O'Connell effect) is attributable to inhomogeneities of surface brightness distribution of the component stars and can be tackled by invoking cool and/or hot spots on the surface of one or both component stars after a reasonable geometric solution was obtained during light curve analysis. In their preliminary analysis Nomen-Torres & Garcia-Melendo (1996) have found that the O'Connell effect in their light curve could be best modelled with a hot spot on the secondary component. We have used two different spotted-solution; a cool spot on the primary component and a hot spot on secondary component during our analysis and found that the model with

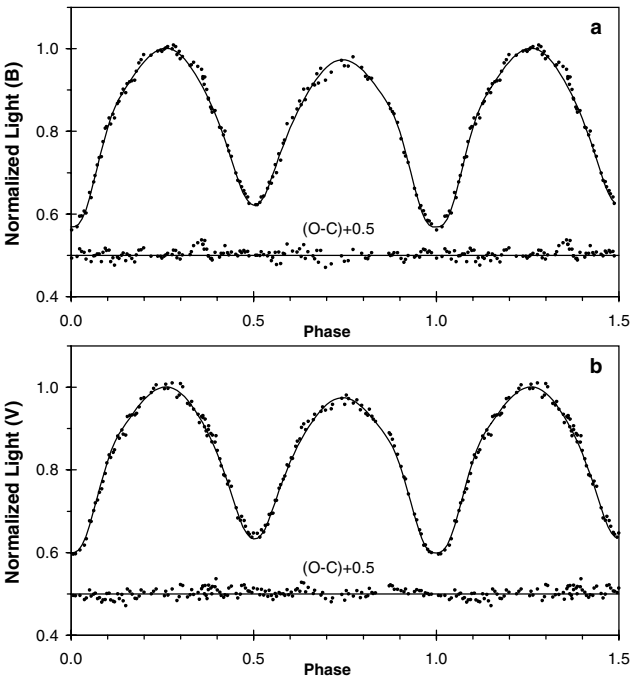


Fig. 2. a) Observational and theoretical light curves with the $O-C$ residuals of V842 Her in B-Band **b)** same as a) but for V-Band.

a cool spot placed on the primary component is converged very quickly to a solution with a better $\Sigma(O-C)^2$ residual after several iterations. The resulting spot parameters were co-longitude $\lambda = 290.5°$, co-latitude $\beta = 28.9°$, spot radius $\theta = 17°$, and the temperature factor $T_f = 0.75$.

The results derived from our simultaneous light and radial velocity curve modelling of V842 Her are given in Table 4 and represented graphically in B and V bands with Fig. 2 a) and b), respectively. These figures also containing $O-C$ residuals from the model at the bottom of each light curve for visual inspections about the goodness of fit. We believe that the scatter in these residuals are mainly arise from the measurement errors.

4. The orbital period of the system

The behaviour of the orbital period of V842 Her was recently studied by Vandenbroere (1993a, 1993b) and Csizmadia (2001). Vandenbroere (1993a, 1993b) has suspected a period increase by analysing all available extrema of the system while Csizmadia (2001) has stated that the orbital period of V842 Her has been constant in the last decade. However he also pointed out that sudden period change or changes in the past cannot be excluded for the system but the available data is not sufficient to give a decision on that matter. V842 Her is a neglected system after its' discovery in 1955 and therefore the number of minima times of the system are rather low in the literature. The interval of the available minima times of V842 Her only cover the last 15 years by the end of year 2004. All available times of minima in the literature were collected from their original sources and listed in Table 5 together with our newly determined ones.

©2005 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim

Nomen-Torres & Garcia-Melendo (1996) haven't published the minima times relevant to their 1996 photometry of the system. These times of minima were listed in the minima table by Csizmadia (2001) after a private communication between them and show rather large scatter in the $O-C$ diagram. We have also privately communicated with Garcia-Melendo (2003) and he has kindly sent us their photometric data. We have recalculated the times of minima from their original observations by using the method of Kwee & van Woerden (1956) and found slightly different values from the published ones (compare the values in our Table 5 and Table 1 by Csizmadia (2001)). We should also note that the minimum time listed as 2450228.5892 in the Table 1 by Csizmadia (2001) couldn't be recalculated by us from the Garcia-Melendo's (2003) original data due to the insufficient data points in the relevant night's observations (ascending branch of the minimum profile is absent for that night's observations). Three of the visual minima by Vandenbroere were also showed very large scatter in our initially formed $O-C$ diagram. Csizmadia (2001) have changed the type of minima from primary to secondary or vice versa for two of them and omitted one of them in his minima list. We have privately communicated with Vandenbroere (2003) about this three problematic minima and confirmed the corrected values of them. The change of type for the minimum 2451327.534 by Csizmadia (2001) was confirmed by Vandenbroere (2003) but not for the minimum 2449205.367 which is actually a misprint in BBSAG Bull no.105 and should be read as 2449206.367. The same situation is also true for the minimum 2449112.391 which was omitted by Csizmadia (2001) and should be read as 2449112.504. There is another misprint in the literature for the minimum time 2453111.80053 by Nelson (2005) in which the type of minimum was listed as primary instead of secondary. After the recalculations and corrections we had a data set of 56 visual, 2 photographic and 30 photoelectric+ccd minima timings as listed in Table 5.

An $O-C$ diagram with all these timings is plotted in Fig. 3a by using the light elements given in Eq. (3). The time span of the data is only 15 years, but systematic deviations from the linear ephemeris is present in the current $O-C$ diagram. Although, the visual timings follow the same variation character with the others they were omitted during the further $O-C$ analysis due to their large amount of scatter. This removal does not reduce the overall time span covered by all available minima times and the remaining photographic, photoelectric and ccd minima are again cover an interval of about 15 years. The new form of $O-C$ diagram excluding the visual minima and formed by the rest of the data is shown in Fig. 3b which has a obvious upward curving parabolic character indicating a period increase of the system. The existence of this structure has also been suspected by Csizmadia (2001), but he has shown that the sums of squared residuals are not significantly different for linear and parabolic approximations to the $O-C$ data by using the limited number of minima times available to him. Therefore he has concluded that it is too early to mention about a period change for V842 Her. However, with the current data, one additional structure in the $O-C$ dia-

Table 3. Observational data for V842 Her

HJD 2400000+	ΔB	ΔV	HJD 2400000+	ΔB	ΔV
52825.3029	-0.9134	-0.6487	52825.5291	-0.9277	-0.6382
52825.3075	-0.8886	-0.6262	52825.5340	-0.9165	-0.6244
52825.3099	-0.8800	-0.6218	52825.5355		-0.6006
52825.3114	-0.8845	-0.6381	52825.5381	-0.9081	-0.6182
52825.3145	-0.8829	-0.6185	52825.5396	-0.8826	-0.6204
52825.3162		-0.6105	52825.5420	-0.8864	-0.6101
52825.3187		-0.6040	52825.5435		-0.5760
52825.3342	-0.8089	-0.5710	52825.5459	-0.8253	-0.5799
52825.3358	-0.7932	-0.5658	52825.5498	-0.7925	-0.5441
52825.3382	-0.7840	-0.5516	52825.5546		-0.5618
52825.3401	-0.7780	-0.5309	52825.5561		-0.5171
52825.3439	-0.7501	-0.5049	52826.3777	-0.8876	-0.6152
52825.3479	-0.6972	-0.4668	52826.3795	-0.8654	-0.5885
52825.3513	-0.6493	-0.4318	52826.3823	-0.8510	-0.5622
52825.3532	-0.6367	-0.4247	52826.3841	-0.8222	-0.5910
52825.3562	-0.6143	-0.3728	52826.3868	-0.7982	-0.5687
52825.3634	-0.5165	-0.2987	52826.3885	-0.7821	-0.5641
52825.3658	-0.4887	-0.2775	52826.3917	-0.7875	-0.5433
52825.3693	-0.4353	-0.2380	52826.3969	-0.7344	-0.4913
52825.3709	-0.4445	-0.2214	52826.3986	-0.7328	-0.4686
52825.3740	-0.4229	-0.1742	52826.4014	-0.7098	-0.4393
52825.3757	-0.4070	-0.1755	52826.4031	-0.7224	-0.4355
52825.3784	-0.3806	-0.1564	52826.4061	-0.6743	-0.4080
52825.3803	-0.3775	-0.1465	52826.4076	-0.6547	-0.4180
52825.3829	-0.3645	-0.1430	52826.4103	-0.6362	-0.4000
52825.3890	-0.3370		52826.4158	-0.5753	-0.3229
52825.3909		-0.1352	52826.4178	-0.5472	-0.2843
52825.3935		-0.1372	52826.4204	-0.5426	-0.2758
52825.3953	-0.3519		52826.4222	-0.5222	-0.2905
52825.3984	-0.3990	-0.1538	52826.4249	-0.5070	-0.2746
52825.4005	-0.4005		52826.4265	-0.4935	-0.2522
52825.4035	-0.4213	-0.1746	52826.4294	-0.4808	-0.2272
52825.4057	-0.4137	-0.2017	52826.4309	-0.4541	-0.2202
52825.4096	-0.4995	-0.2740	52826.4340		-0.2077
52825.4113	-0.4777	-0.2708	52826.4358		-0.2254
52825.4144	-0.5414	-0.3129	52826.4385	-0.4487	
52825.4161	-0.5655	-0.3410	52826.4401	-0.4496	-0.2234
52825.4187	-0.6044	-0.3518	52826.4431	-0.4587	-0.2079
52825.4207	-0.6308	-0.3793	52826.4448	-0.4804	-0.2384
52825.4234	-0.6351	-0.3912	52826.4476	-0.4845	-0.2295
52825.4250	-0.6866	-0.4169	52826.4494		-0.2562
52825.4276	-0.7313	-0.4430	52826.4521	-0.5160	-0.2596
52825.4292	-0.7366	-0.4782	52826.4537	-0.5395	-0.2976
52825.4320	-0.7649	-0.5031	52826.4563	-0.5363	-0.3017
52825.4339	-0.7449	-0.4953	52826.4580	-0.5608	-0.3031
52825.4366	-0.7763	-0.5115	52826.4608	-0.6060	-0.3508
52825.4383	-0.7649	-0.5195	52826.4623	-0.5761	-0.3508
52825.4418	-0.8088	-0.5608	52826.4651	-0.6453	-0.3932
52825.4435	-0.8156	-0.5544	52826.4670	-0.6222	-0.4054
52825.4464	-0.8383	-0.5794	52826.4699	-0.6820	-0.4244
52825.4482	-0.8518	-0.5672	52826.4716	-0.6928	-0.4347
52825.4511	-0.8411	-0.5639	52826.4743	-0.7464	-0.4719
52825.4528	-0.8673	-0.6181	52826.4763		-0.4671
52825.4556	-0.8727	-0.6218	52826.4790		-0.4943
52825.4583	-0.8755	-0.6224	52826.4806	-0.7656	-0.4921
52825.4615	-0.8781	-0.6224	52826.4842		-0.5301
52825.4633	-0.9029	-0.6268	52826.4859	-0.7920	-0.5458
52825.4664	-0.9258	-0.6445	52826.4889	-0.8168	-0.5526
52825.4689	-0.9344	-0.6674	52826.4908	-0.8048	-0.5870
52825.4718	-0.9478	-0.6701	52826.4934	-0.8519	-0.5967
52825.4804	-0.9463	-0.6833	52826.4954	-0.8207	-0.5797
52825.4830		-0.6946	52826.4983	-0.8540	-0.6041
52825.4859		-0.7040	52826.5043	-0.8652	-0.6085
52825.4881	-0.9573		52826.5059	-0.8637	-0.6240
52825.4913	-0.9603		52826.5086	-0.8958	
52825.4928	-0.9566		52826.5103	-0.8698	
52825.4955	-0.9627	-0.6937	52826.5131	-0.9105	-0.6320
52825.4970	-0.9655	-0.7052	52826.5152		-0.6446
52825.4993	-0.9693	-0.6948	52826.5184	-0.8774	-0.6361
52825.5044	-0.9635	-0.7085	52826.5250	-0.9005	-0.6390
52825.5060	-0.9734		52826.5267		-0.6519
52825.5085	-0.9691		52826.5370	-0.9325	-0.6679
52825.5100	-0.9478	-0.6707	52826.5403	-0.9182	-0.6521
52825.5124	-0.9563	-0.6771	52826.5422		-0.6772
52825.5138	-0.9371	-0.7069	52826.5447	-0.9173	-0.6672
52825.5163	-0.9432	-0.6992	52826.5502	-0.9420	-0.6555
52825.5220		-0.6539	52826.5545		-0.6642
52825.5250	-0.9187	-0.6499	52826.5585		-0.6370
52825.5266	-0.9209	-0.6597			

©2005 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim

gram came out which can be seen in the residuals from the parabolic approximation in Fig. 3c. This additional structure has a smooth cyclic character superimposed on the general quadratic trend. We have quickly tested the significance of this cyclic character by looking the difference in the values of sum of squared residuals of the fits to the $O-C$ data with only a parabolic and a parabolic+cyclic approximations. The sum of squared residuals $\Sigma(O-C)^2$ turns out to be 0.00139 day^2 and 0.00042 day^2 for pure parabolic and parabolic+cyclic fits, respectively. There are two groups of outliers of minima times in our data set which are encircled in Fig. 3c; one by Garcia-Melendo (2003) (4 minima) and the other by Agerer et al. (2003) (2 minima) around epoch numbers $E \sim 0$ and $E \sim 2990$, respectively. If we have excluded these outliers from the current analysis, we have reached an improvement in the $\Sigma(O-C)^2$ by a factor of about 8. In this case the resulting sum of squared residuals are 0.00055 and 0.00007 for pure parabolic and parabolic+cyclic approximations, respectively. As seen from these values the sum of squared residuals substantially improved when the cyclic variation has been taken in account and we believe that the observed cyclic variation is real in the $O-C$ diagram.

The cyclic character has one minimum and almost two maxima with the present observational data which could not be realized by Csizmadia (2001) due to the insufficient coverage of data in time. Four years of addition of new minima times to the list of Csizmadia (2001) give the possibility to see that variation. By assuming the presence of a gravitationally bound third body in the system, we were performed an analysis of this variation and derived the parameters of the light-time orbit with the following equation which is based on formulation by Irwin (1952):

$$(O-C) = O - [T_0 + P_{\rm orb} \times E + \frac{1}{2}\frac{{\rm d}P}{{\rm d}E} \times E^2 + \frac{A}{\sqrt{1-e^{'2}\cos^2\omega^{'}}}\{\frac{1-e^{'2}}{1+e^{'}\cos\nu^{'}}\sin(\nu^{'}+\omega^{'}) + e^{'}\sin\omega^{'}\}], \quad (4)$$

where

$$A = \frac{a^{'}_{12}\sin i^{'}\sqrt{1-e^{'2}\cos^2\omega^{'}}}{2.590\times10^{10}}$$

is the semi-amplitude of the light-time effect in days, $a^{'}_{12}$, $e^{'}$, $i^{'}$ and $\omega^{'}$ are the semi-major axis, eccentricity, inclination and the longitude of the periastron passage of the orbit of the eclipsing pair around the mass center of the system, respectively, $\nu^{'}$ is the true anomaly of the position of the eclipsing pairs' mass center on the orbit, 2.590×10^{10} is the speed of light in km/day. E, $P_{\rm orb}$, T_0 and ${\rm d}P/{\rm d}E$ are stand for the cycle number, orbital period, the reference epoch for the primary minimum and the rate of the secular period change of the eclipsing pair, respectively. The epoch $T^{'}$ of the periastron passage and the period P_{12} of the third body orbit can be derived from the parameters in Eq. (4).

We used the computer code called OC2LTE30 by Ak et al. (2004) to determine the eight free parameters (namely T_0, $P_{\rm orb}$, ${\rm d}P/{\rm d}E$, P_{12}, $T^{'}$, $a^{'}_{12}\sin i^{'}$, $e^{'}$, $\omega^{'}$) by least-squares fitting the $(O-C)$ values with the theoretical function given in Eq. (4). By applying this procedure, we have found the parameters and their standard errors given in Table 6. The estimated errors of these parameters arise from the non-linear least-squares method, on which the inverse problem solving method is based. Therefore, the real uncertainties of these parameters may be larger than the estimated ones, because this method does not taking into account the noise of the individual data points and possible correlation between the fitted parameters. So, the current values of standard errors listed in Table 6 should be taken in account as lower limits for their corresponding parameters. These parameters were used to obtain the theoretical $O-C$ curve which is plotted with a solid curve in Fig. 3b along with the observed values. The value of the sum of the squares of the residuals from Eq. (4) is $\Sigma(O-C)^2 = 0.00042$ day^2. The residuals from the overall fit can be seen in Fig. 3d.

Table 4. Results derived from the simultaneous light and radial velocity curve modelling of V842 Her in MOD-03 of the WD code. The parameters without errors are coupled to the other parameters or fixed

Parameter	Value±Error
Fixed parameters:	
$A_1 = A_2$	0.5
$g_1 = g_2$	0.32
$F_1 = F_2$	1.0
e (eccentricity)	0.0
V_γ [km s^{-1}]	−57.98
$q(m_2/m_1)$	3.852
T_1 (K)	5700
$x_1(B,V)$	0.539, 0.275
$y_1(B,V)$	0.347, 0.568
$x_2(B,V)$	0.694, 0.403
$y_2(B,V)$	0.177, 0.441
Adjusted parameters:	
i [°]	77.74±0.74
$\Omega_1 = \Omega_2$	7.566±0.020
T_2 (K)	5362±20
L_1/L_1+L_2 (B)	0.297±0.006
L_1/L_1+L_2 (V)	0.278±0.005
L_2/L_1+L_2 (B)	0.654
L_2/L_1+L_2 (V)	0.677
Roche geometry related dimensions:	
r_1 (pole)	0.261±0.001
r_1 (side)	0.273±0.002
r_1 (back)	0.314±0.003
r_2 (pole)	0.476±0.001
r_2 (side)	0.517±0.002
r_2 (back)	0.544±0.002
f (fill-out factor)	25.4 %
$\Sigma(O-C)^2$	0.02

5. Results and conclusions

New B and V light curves of V842 Her were obtained and analysed simultaneously with the radial velocity curves by Rucinski & Lu (1999). Revised version of the Wilson-Devinney (WD-2003) code was used during this analysis. The analysis yield that the more massive component is 338 K

©2005 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim

Table 5. All available minima times of V842 Her

HJD Min (2400000+)	Type	Meth	$O-C$	Ref	HJD Min (2400000+)	Type	Meth	$O-C$	Ref	HJD Min	Type	Meth	$O-C$	Ref
47646.5258	1	vis	0.0293	1	49074.6000	1	vis	0.0254	3	51433.3550	1	ccd	0.0211	14
47666.4470	2	ptg	0.0462	2	49075.4300	1	vis	0.0173	3	51660.4646	1	vis	0.0127	15
47670.4210	1	ptg	0.0394	2	49076.4590	2	vis	-0.0013	3	51664.4431	2	ccd	0.0103	16
47724.4573	1	vis	0.0199	1	49112.5040	2	vis	0.0065	3	51668.4211	1	ccd	0.0075	16
47758.4179	1	vis	0.0385	1	49124.4590	1	vis	0.0190	3	51670.5306	1	vis	0.0218	15
48072.4829	2	vis	0.0353	1	49124.6595	2	pe	0.0099	4	51722.4750	1	vis	0.0056	17
48086.5102	1	vis	0.0248	1	49206.3670	2	vis	0.0052	3	51782.4020	1	vis	0.0103	18
48148.3332	2	vis	0.0399	1	49237.3750	2	vis	0.0045	3	51786.3870	2	pe	0.0144	14
48513.3116	2	vis	0.0370	1	49296.2650	1	vis	0.0198	5	51816.3550	1	vis	0.0213	18
48622.6629	2	pe	0.0197	1	49780.6620	1	vis	0.0100	6	52053.5100	1	vis	0.0014	18
48661.6339	2	vis	0.0202	1	49799.5080	1	vis	-0.0006	6	52087.4550	1	vis	0.0044	19
48714.6430	1	vis	0.0212	1	49929.4182	1	ccd	0.0081	7	52113.4560	1	vis	0.0251	19
48732.4452	2	vis	0.0143	1	50144.3803	1	ccd	0.0042	8	52215.2800	1	vis	0.0231	17
48733.4994	1	vis	0.0209	1	50144.5898	2	ccd	0.0042	8	52321.4980	2	vis	0.0152	17
48746.4931	1	vis	0.0245	1	50151.5038	1	ccd	0.0041	8	52347.4840	2	vis	0.0209	19
48747.5362	2	vis	0.0200	1	50171.6103	1	ccd	-0.0032	9	52359.4217	1	ccd	0.0160	20
48749.4341	1	vis	0.0322	1	50177.4767	1	ccd	-0.0033	9	52367.3780	1	vis	0.0106	19
48755.5041	2	vis	0.0262	1	50178.5243	2	ccd	-0.0033	9	52426.4670	1	ccd	0.0154	14
48756.5507	1	vis	0.0252	1	50200.5350	1	vis	0.0080	10	52427.5141	2	ccd	0.0149	21
48759.4833	1	vis	0.0245	1	50207.4403	2	ccd	-0.0008	9	52452.4460	1	ccd	0.0141	14
48760.5381	2	vis	0.0317	1	50516.4872	1	ccd	0.0063	11	52764.4150	2	vis	0.0101	2
48763.4631	2	vis	0.0235	1	50538.4860	2	vis	0.0056	10	52825.3883	1	pe	0.0135	22
48768.4776	2	vis	0.0095	1	50541.4204	2	ccd	0.0068	11	52826.4379	2	pe	0.0155	22
48803.4718	1	vis	0.0141	1	50556.4990	2	vis	0.0000	12	53081.8388	1	ccd	0.0134	23
48811.4271	1	vis	0.0077	1	51030.4410	2	vis	0.0112	13	53111.8005	2	ccd	0.0139	23
48862.3545	2	vis	0.0221	1	51326.4894	1	pe	0.0099	14	53134.6371	1	ccd	0.0130	24
48877.4339	2	vis	0.0162	1	51327.5340	2	vis	0.0070	13	53211.3187	1	pe	0.0108	22
48888.3267	2	vis	0.0140	1	51425.3880	1	vis	0.0158	13	53214.4648	2	pe	0.0141	22
48983.6534	1	pe	0.0098	1	51430.4120	1	vis	0.0114	13					
49061.5912	1	vis	0.0067	1	51430.4190	1	ccd	0.0184	14					

References: 1- Vandenbroere (1993a), 2- Hübscher et al. (2003), 3- Vandenbroere, BBSAG Bull no.105, 4- Diethelm (1994), 5- Vandenbroere, BBSAG Bull no.107, 6- Vandenbroere, BBSAG Bull no.110, 7- Diethelm, BBSAG Bull no.109, 8- Agerer et al. (1997), 9- Garcia-Melendo (2003) 10- Vandenbroere, BBSAG Bull no.115, 11- Agerer et al. (1998), 12- Vandenbroere, BBSAG Bull no.116, 13- Vandenbroere, BBSAG Bull no.121, 14- Agerer et al. (2003), 15- Meyer (2000), 16- Csizmadia (2001), 17- Diethelm (2004), 18- Hübscher et al. (2001), 19- Hübscher et al. (2002), 20- Blaetter, BBSAG Bull no.128, 21- Diethelm, BBSAG Bull no.128, 22- This study, 23- Nelson (2005), 24- Dvorak (2005)

Table 6. Parameters derived from $(O-C)$ analysis

Parameters	Value	Standard Error
T_0 [HJD]	2450177.48750	0.00025
$P_{\rm orb}$ [days]	0.419034924	0.000000078
$\frac{{\rm d}P}{{\rm d}E}$ [days/cycle]	8.90×10^{-10}	0.14×10^{-10}
$a_{12}\sin i^{'}$ [AU]	1.275	0.075
$e^{'}$	0.480	0.039
$\omega^{'}$ [°]	196.0	2.1
$T^{'}$ [HJD]	2453140.0	37.1
P_{12} [year]	12.35	0.08
A [days]	0.0064	0.0002
$f(m_3)$ [$M_\odot$]	0.01267	0.00218

cooler than the less massive component due to a dark-spot on its surface. The results of the light curve analysis indicate that V842 Her is a rather evolved (fill-out $f = 25.4\%$) W-type W UMa contact binary where the less massive and smaller but slightly brighter component is occulted at the primary minimum. A view of the system's Roche geometry at orbital phase 0.75 based on our final model can be seen in Fig. 4. The parameters from light curve analysis and the precise mass ratio from radial velocity curve analysis by Rucinski & Lu (1999) allows us to determine absolute parameters of the V842 Her system as listed in Table 7. Moreover, we estimated the distance to the system by using these absolute parameters. Taking the bolometric magnitudes of the components and a bolometric correction of $-0\overset{\rm m}{.}07$ for the corresponding spectral type, a distance modulus could be calculated as $5\overset{\rm m}{.}90$ with the assumption of $A_V = 0$. The dynamical parallax derived in that way yields a distance of 151.48 ± 2.30 parsecs which is the first distance estimate for V842 Her in the literature.

Table 7. Absolute dimensions of V842 Her

Parameter	Value
$a[R_\odot]$	2.881±0.010
$R_1[R_\odot]$	0.812±0.009
$R_2[R_\odot]$	1.474±0.010
$M_1[M_\odot]$	0.378±0.004
$M_2[M_\odot]$	1.455±0.026
${\rm Log}g_1$[cgs]	4.196±0.004
${\rm Log}g_2$[cgs]	4.264±0.002
$M_{\rm bol,1}$	5.263±0.023
$M_{\rm bol,2}$	4.234±0.031

It is obvious from the $O-C$ analysis that the orbital period of V842 Her is changing with a cyclic character superimposed on a monotonically increasing structure. The secular character which was represented with a quadratic term in the light elements during the analysis corresponds to a rate of orbital period increase by ${\rm d}P/{\rm d}t = 7.76 \times 10^{-7}$ days yr^{-1} and can be attributed to mass exchange/loss mechanism in the system. If the period increase is originated from the conservative mass transfer phenomenon, then the direction of the mass transfer should be from the less massive to the more massive component with a rate of about ${\rm d}M/{\rm d}t = 3.15 \times 10^{-7}$ $M_\odot$ yr^{-1}. In case of conservative mass transfer one can also es-

©2005 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim

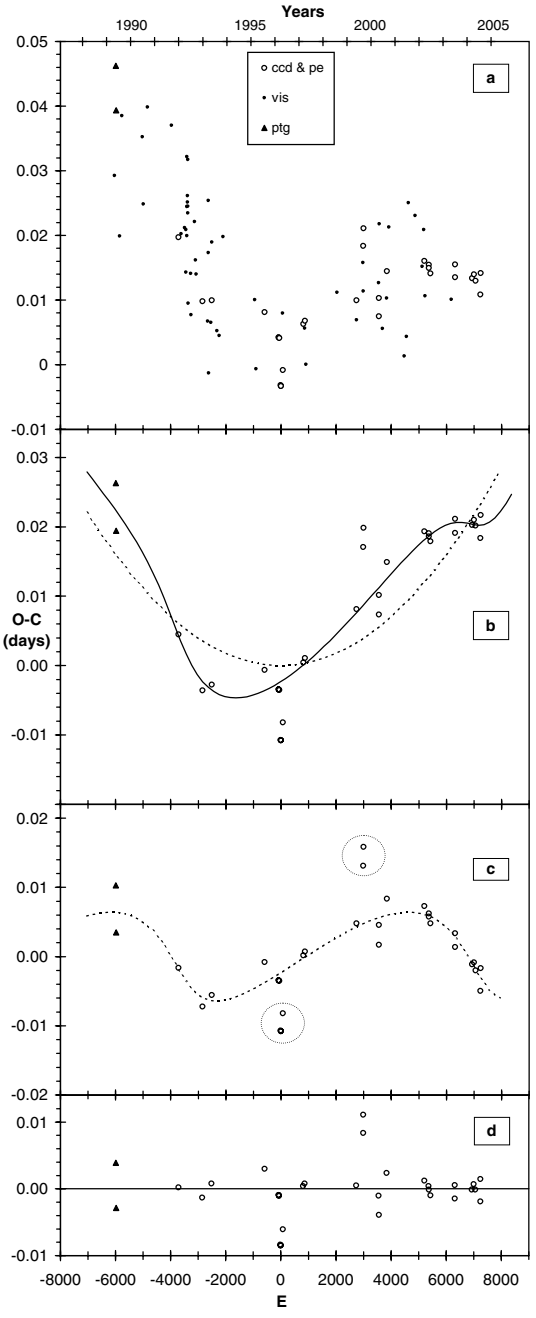


Fig. 3. a) The $O-C$ diagram for all available minima times of V842 Her, b) same as in a) but for photographic and photoelectric&CCD minima. The dashed curve representing the quadratic part of the fitted function, while the solid curve is the overall fit, c) the residuals from the quadratic fit. The dashed curve representing the cyclic part of the fitted function. See text for the encircled minima, d) final residuals from the fitted curve.

timate the rate of change of the mass ratio using the formulation given by Yang & Liu (2003). We calculated the rate of change of mass ratio for V842 Her due to the mass transfer in the system as $\mathrm{d}q/\mathrm{d}t = -2.73 \times 10^{-7}$ yr^{-1}. However, it should be noted here that the secular period change, studied in the present paper, may be part of a long-period cyclic variation, which needs more photoelectric or CCD times of light minimum to ascertain.

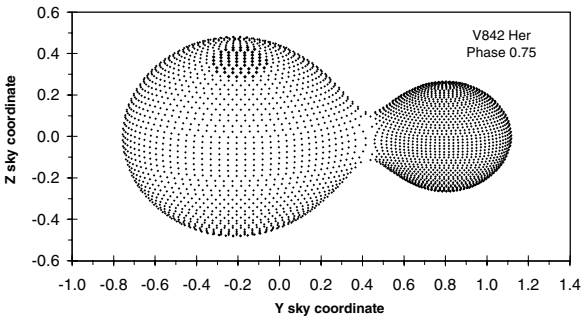


Fig. 4. The Roche geometry of V842 Her seen at phase 0.75.

Under the assumption of presence of a gravitationally bound third body in the system as a cause of observed cyclic character in the $O-C$ we calculated the third body specific parameters. The eclipsing pair completes a revolution on this wide orbit in 12.35 ± 0.08 yrs. The projected distance of the mass center of the eclipsing pair to the center of mass of the triple system should be 1.275 ± 0.075 AU. These values lead to mass function of $f(m_3) = 0.0127 \pm 0.0022 \mathrm{M}_\odot$ for the hypothetical third body. If the third body orbit is co-planar with the systemic orbit (i.e., $i' = i = 77\overset{\circ}{.}74$), its mass would be 0.41 ± 0.03 $\mathrm{M}_\odot$. Then, Kepler's third law gives the semi-major axis of the orbit to be 7.01 ± 0.04 AU. By adopting the distance to V842 Her $d = 151.48$ parsecs obtained in this study, we get the maximum angular separation of the third body from the eclipsing pair to be $0\overset{''}{.}0462 \pm 0.0005$. Using the mass-luminosity relation for main-sequence stars given by Demircan & Kahraman (1991), we can estimate the bolometric absolute magnitude of the third body for the given distance to be about $M_{\mathrm{bol}} = 8\overset{\mathrm{m}}{.}4 \pm 0.2$ which is about $4\overset{\mathrm{m}}{.}5$ fainter than the combined brightness of the binary system. Thus, the third star, if it exist, is just at the detection limit of various observational techniques. Especially, the mass of the hypothetical third body which is comparable with mass of the secondary component of V842 Her, turn out to be large enough to permit its spectroscopic determination. However, Rucinski & Lu (1999) have not mention a trace of a third component in their work. Therefore the hypothetical third body, if it exist, should be a very under-luminous compact object in comparison to the main sequence stars or it may also be a low-mass close binary system.

W UMa-type contact binaries, especially W-subtypes, are well known to be magnetically very active, e.g. with starspots, chromospheric emission, coronal X-ray emission, and generally, the primary components of them are dominant in the level of this activity. Applegate (1992) has shown that any cyclic change in the activity level of one component in a close binary system can produce cyclic variation in the orbital period of the system. The basic idea of the magnetic activity cycle effect on the orbital period of a binary system depends on the existence of the spin-orbit coupling. Any change in the rotational regime of a binary star component due to the magnetic activity, will be reflected to the orbit as a consequence of the spin-orbit coupling. As an alternative for the cause of the observed cyclic variation in the O-C diagram of V842 Her, we have calculated the activity related parameters

©2005 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim

by following the Applegate's (1992) formulation as; the cycle length $P_{\rm cyc} = 12.35$ years, the amplitude of the cyclic period variation $\Delta P = 0.323$ sec cycle^{-1}, the angular momentum transfer of $\Delta J = -3.56 \times 10^{47}$ g cm^2 s^{-1} required to produce the observed cyclic effect on the orbital period, required energy $\Delta E = 1.25 \times 10^{41}$ ergs for the ΔJ transfer, the corresponding luminosity change $\Delta L = 1.01 \times 10^{33}$ ergs s^{-1} and the brightness variation $\Delta m = 0\overset{\rm m}{.}10$ of the primary component, and finally the subsurface magnetic field $B = 12.6$ kG of the primary component. Applegate (1992) also predicts that *i)* the long-term light variation and the O-C curve formed by the times of minima should have the same cycle length, *ii)* extrema in one should coincide with extrema in the other, and *iii)* the colour of the system should become bluer as the active star brightens. Unfortunately, we do not have enough precise and long-term photometric observations for V842 Her to check such brightness variations. But there is an evidence about the variable amount of O'Connell effect in the light curves of V842 Her (see Section 2). So, the system deserves to long-term photometric monitoring to clarify its plausible magnetic activity cycle characteristics.

It is important to distinguish the responsible mechanism for the observed cyclic variations in the O-C diagrams of the close binary stars. The light-time effect should give more strict periodicities than the magnetic activity cycle in the O-C diagrams. From the analogy of magnetic activity cycles in the Sun and chromospherically active stars, we know that the cycle periods and amplitudes can vary even from cycle to cycle. Therefore, their reflections in the O-C diagrams should have a quasi-periodic character. We can not discriminate the responsible mechanism for the cyclic variation in the O-C diagram of V842 Her at the moment due to the short time-span of the observational data. Only long-term systematic observations will give us a chance to decide on this matter.

Acknowledgements. This work has been supported by the Turkish Academy of Sciences, in the framework of the Young Scientist Award Program (BA/TÜBA-GEBİP/2001-2-2) and by the Research Fund of Ankara University (BAP) under the research projects nos. 20040705089 and 20040705090. This research has made use of the SIMBAD database, operated at CDS, Strasbourg, France and NASA's Astrophysics Data System. The authors would like to thank to the TÜBİTAK National Observatory (TUG) for their kind (partial financial and equipment) support and to the referee for his/her constructive suggestions and comments. Finally, we would like to thank E. Garcia-Melendo who has sent us their original photometric observations and to J. Vandenbroere who has sent us her complete list of timings (both minima and maxima) of V842 Her.

References

Agerer, F., Hübscher, J.: 1997, IBVS 4472 (BAV Mitt. 99)
Agerer, F., Hübscher, J.: 1998, IBVS 4562 (BAV Mitt. 102)
Agerer, F., Hübscher, J.: 2003, IBVS 5484 (BAV Mitt. 158)
Ak, T., Albayrak, B., Selam, S.O., Tanrýverdi, T.: 2004, NewA 9, 265
Applegate, J.H.: 1992, ApJ 358, 621
Bradstreet, D.H.: 1993, *Binary Maker 2.0*, Contact Software, Norristown, Pennsylvania
Csizmadia, Sz.: 2001, IBVS 5191
Demircan, O., Kahraman, G.: 1991, Ap&SS 181, 313
Diethelm, R.: 1994, IBVS 4011
Diethelm, R.: 2004, IBVS 5543
Dvorak, S.W.: 2005, IBVS 5603
Filatov, G.S.: 1960, Astron. Circular 215
Garcia-Melendo, E.: 2003, private communication
Geyer, E., Kippenhahn, R., Strohmeier, W.: 1955, Kleine Veröff. Remeis-Sternwarte Bamberg No. 11
Gray, R.O., Corbally, C.J.: 1994, AJ 107, 742
Hübscher, J., Agerer, F., Busch, H., Goldhahn, H., Hassforther, B., Lange, T., Paschke, A.: 2001, BAV Mitt. 143
Hübscher, J., Agerer, F., Busch, H., Goldhahn, H., Hassforther, B., Lange, T., Paschke, A.: 2002, BAV Mitt. 154
Hübscher, J., Agerer, F., Hassforther, B., Lange, T., Paschke, A.: 2003, BAV Mitt. 157
Irwin, J.B.: 1952, ApJ 116, 211
Kukarkin, B.V., Kholopov, P.N., Artiukhina, N.M., et al. (16 authors): 1982, *New Catalogue of Suspected Variable Stars*, Publ. Office Nauka, Moscow
Kwee, K.K., van Woerden, H.: 1956, BAN 12, 327
Lucy, L.B.: 1967, ZA 65, 89
Meyer, F.: 2000, BAV-Rundbrief 4
Nelson, R.H.: 2005, IBVS 5602
Nomen-Torres, J., Garcia-Melendo, E.: 1996, IBVS 4365
Rucinski, S.M.: 1969, AcA 19, 245
Rucinski, S.M., Lu, W.: 1999, AJ 118, 2451
van Hamme, W.: 1993, AJ 106, 2096
Vandenbroere, J.: 1993a, GEOS-EB Circ. No.21
Vandenbroere, J.: 1993b, IBVS 3946
Vandenbroere, J.: 2003, private communication
Yang, Y., Liu, Q.: 2003, A&A 401, 631
Wilson, R.E., Devinney, E.J.: 1971, ApJ 166, 605

©2005 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim

Ankara Üniversitesi Basımevi • 2002
www.ankara.edu.tr