

Örten **Wolf-Rayet Sistemlerinin** Uzun Dönemli Işık Değişimi

İbrahim Aköz, Kadri Yakut

Ege Üniversitesi, Astronomi ve Uzay Bilimleri Bölümü

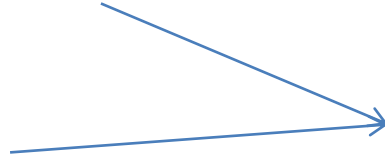
Kısa Tarihçe: Wolf-Rayet (WR) Yıldızları

- Yaklaşık **150** yıl önce Paris Gözlemevi'nde 40cm Foucault teleskobu kullanılarak **Charles Wolf** ve **George Rayet**, Cyg takımyıldızında üç yıldızın geniş salma çizgili yapıya sahip olduğunu belirlemiştir (HD 197165, HD 192103 ve HD 192641; **WR134**, **WR135** ve **WR137**).
- **Normal** yıldızlardan tayf aldığımızda **soğurma çizgili tayfsal** yapıya sahip olduğunu gözlerken, WR yıldızlarının tayflarında **geniş salma çizgili** yapıyı görürüz.
- **1868** de Helyum elementinin keşfedilmesiyle bu çizgilerin Helyum çizgileri olduğu anlaşılmıştır.
- **1882**'de **Edward C. Pickering** fotografik plağın önüne geniş prizma koyarak çoklu sistemlerin eşzamanlı olarak tayfını fotoğraflama yöntemini geliştirmiştir. **Balmer serisine** benzer olarak sıra dışı Hidrojen durumunu gösteren **Pickering Serisini** bulmuştur.

Kısa Tarihçe: Wolf-Rayet (WR) Yıldızları

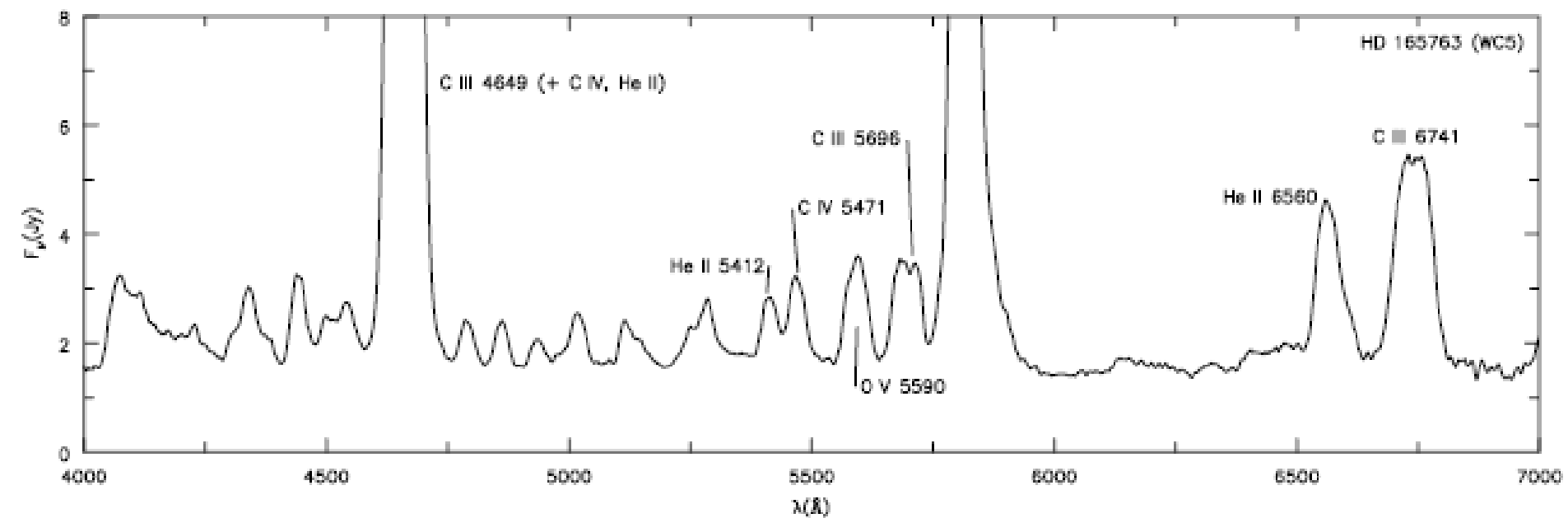
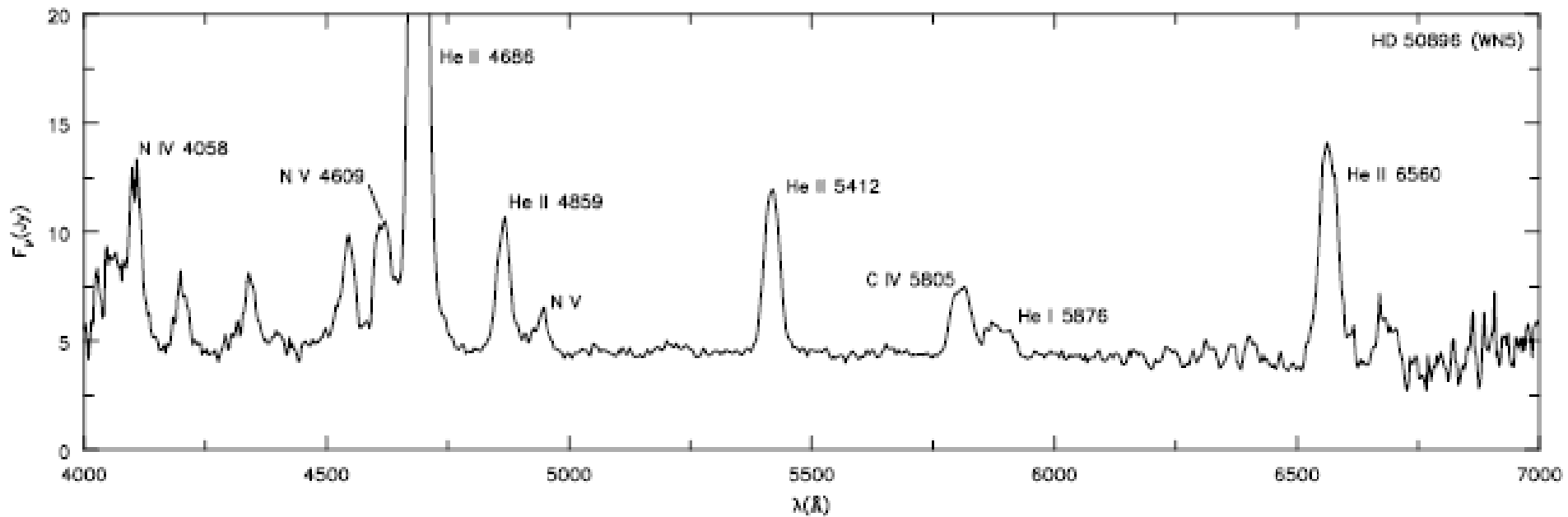
- Pickering WR yıldızları ile bulutsuların tayfının benzer olduğunu fark etmiş ve bu benzerlikten dolayı gezegenimsi bulutsunun merkezindeki yıldızlarının tümü ya da çoğunun WR yıldızı olduğu sonucuna ulaşılmıştır.
- **1929**'da gözlenmiş olan bu geniş salma çizgileri Doppler genişlemesi olarak belirlenmiş ve bunun genişleyen atmosfer katmanından kaynaklandığı belirlenmiştir.
- WR yıldızlarının tayfında **He** salmasına ek olarak **C**, **O** ve **N** salmaları da belirlenmiştir. **1938** yılında **IAU (Uluslararası Astronomi Birliği)** tarafından WR tayfsal olarak **WN** ve **WC** olmak üzere iki alt sınıfa ayrılmıştır.
- Daha sonra güçlü O salmalarının gözlenmesiyle **WO** tayf sınıfı da eklenmiştir.

Wolf-Rayet?

- **O tayf türü** yıldızların evriminin son aşaması ve süpernova evresinin öncesi evrim durumunda olan yıldızlardır.
- Başlangıç kütlesi $M_i \sim \geq 20M_{\odot}$ (Genel kabul)
- Yüzey sıcaklığı **30 kK- 200 kK**
- Güçlü yıldız rüzgarları yoluyla kütle kaybı $\dot{M}_{WR} \sim 10^{-5} M_{\odot} yr^{-1}$, $\dot{M}_{\odot} \sim 10^{-14} M_{\odot} yr^{-1}$
- Genişlemiş atmosfer yapısına sahip  Güçlü geniş salma çizgili tayfsal yapı
- Yüzeyini saran H zarfını atmış yıldızlar (görelî olarak evrimleşmiş)
- Yüzeyinde nükleer tepkimelerle ürettiği malzemeyi gösteren yıldızlardır (**Gamov, 1943**)

Tayfsal Sınıflandırılması

- **WN:** N (Azot) çizgilerinin baskın olduğu salma çizgili tayf yapısı. N salmasının şiddetine göre WN2-WN11 e kadar 12 alt sınıfa ayrılmıştır.
- **WNh** ve **WNha** (**h:** tayfında H salması gösteren yıldızları, **ha:** Tayfında H hem salma hem de soğurma çizgisi gösterenler.)
- **WNE:** Erken tür WN yıldızlarını temsil etmektedir (WN2-WN4). **WNL:** Geri tür WN yıldızlarını temsil eder (WN6-WN11). WN5 türü hem erken hem de geri tür sınıflamaya dahil edilmiştir.
- **WC:** C (Karbon) çizgilerinin baskın olduğu salma çizgili tayf yapısı. C salmasının şiddetine göre WC4-WC9 kadar 6 alt sınıfa ayrılmıştır.
- **WO:** O (Oksijen) çizgilerinin baskın olduğu salma çizgili tayf yapısı. O salmasının şiddetine göre WO1-WO4'e kadar 4 alt sınıfa ayrılmıştır.



- Hillier (2000)

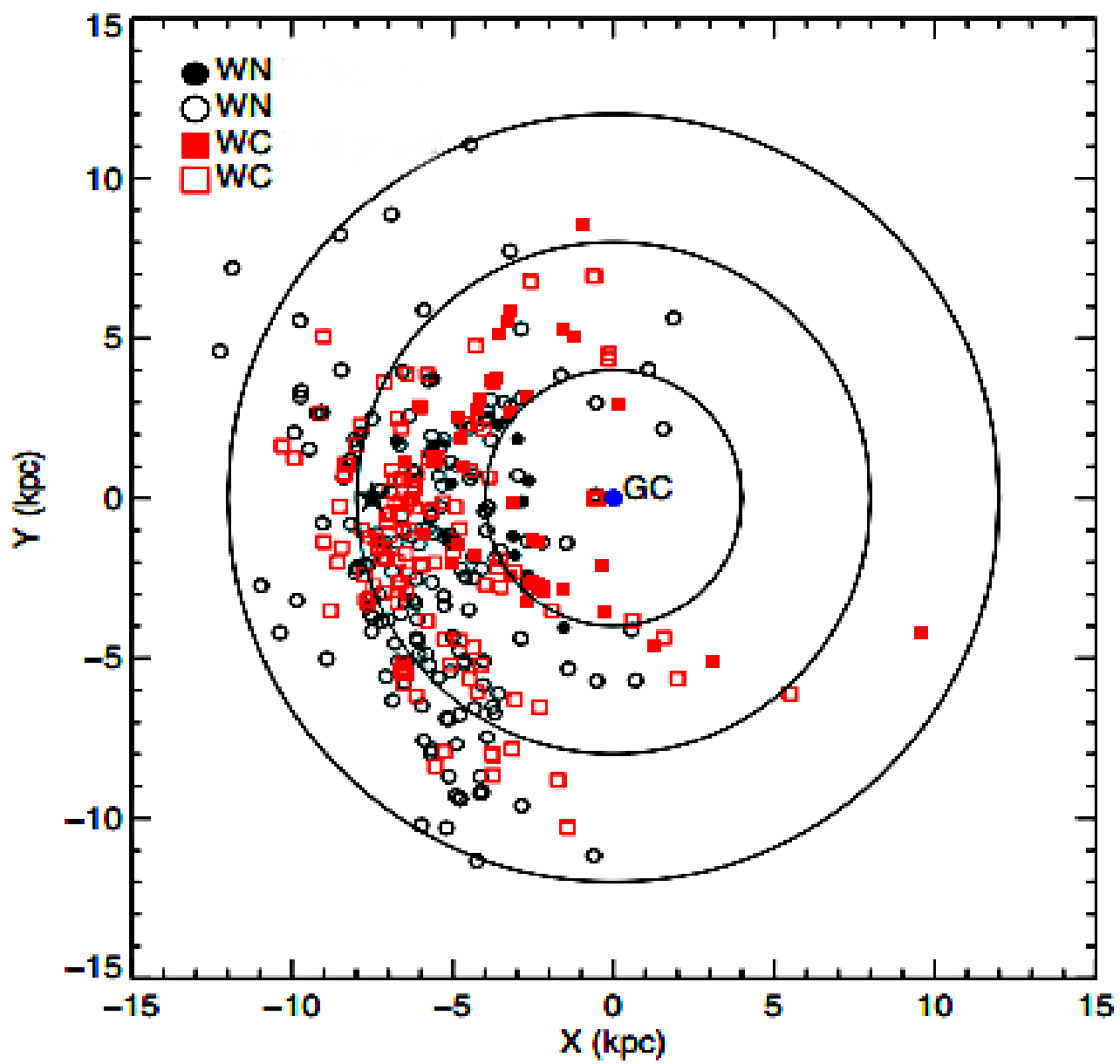


- Galaksimizdeki **WR124 (WN8h)** yıldızı ve etrafındaki en genç rüzgar bulutsusu M1-67 (ESO Teleskobu).

Kaynak: <https://www.eso.org/public/images/wr124/>

WR Yıldızlarının Galaktik Dağılımı

- WR türü yıldızlar büyük kütle aralıklarına sahip oldukları için yoğun bulutsuların bulunduğu bölgelerde toplanmıştır. Genellikle Galaktik disk içinde büyük kütleli yıldız oluşum bölgelerinde görülürler (**Hucht, 2001**).
- Samanyolu galaksisindeki bilinen WR yıldızlarının çeyreği Galaktik merkezdeki kütleli kümelerde veya **Westerlund 1**'de bulunur (**van der Hucht, 2006**).
- Geçen son on yılda kızıl öte detektörlerinin gelişmesi ile **627** tane WR türü yıldız olduğu, bunların **357 WN**, **8 WN/WC**, **273 WC** ve **4** tane de **WO** türü olduğu belirlenmiştir (**Crowther, 2015**).



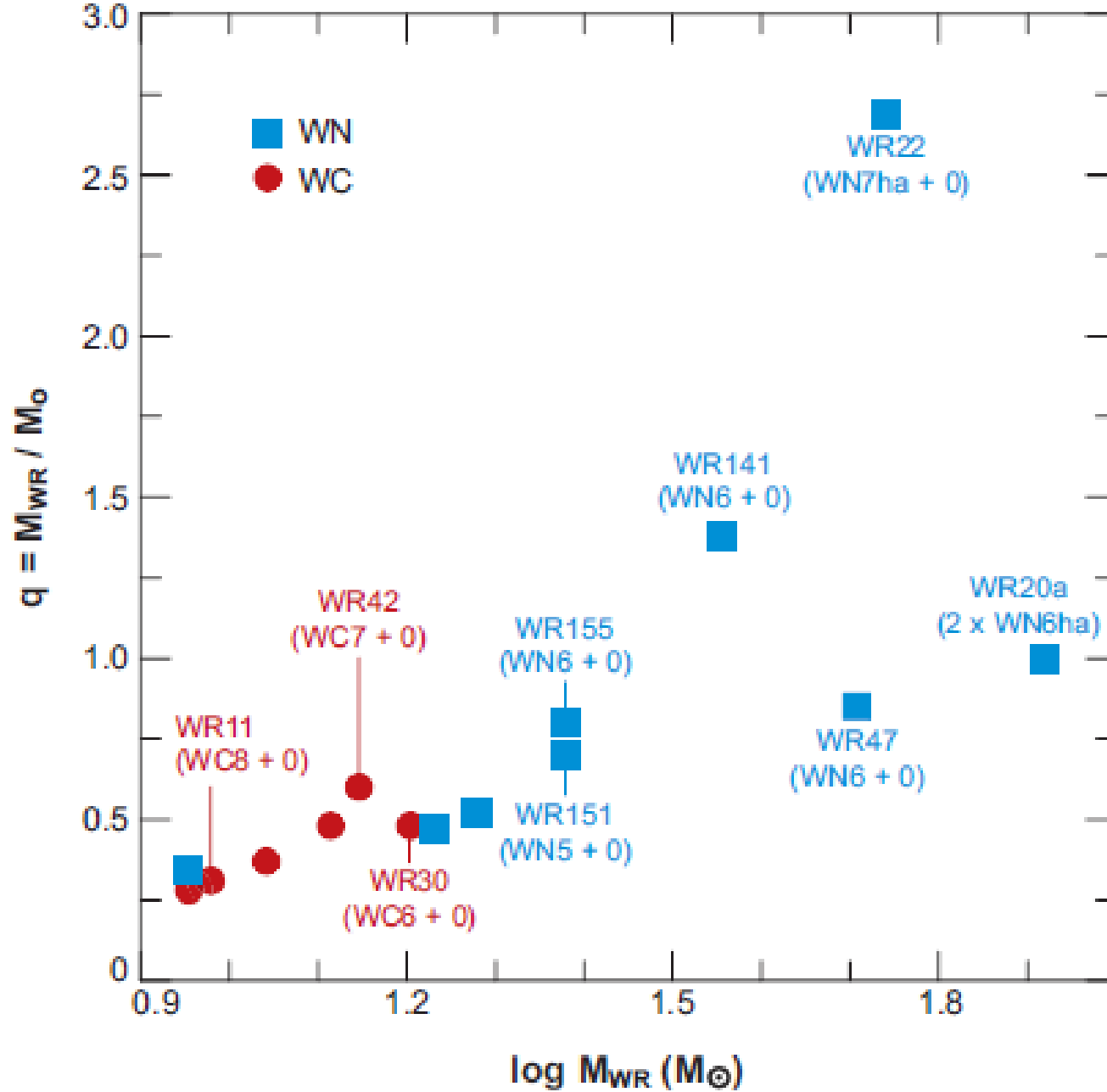
WR Galaktik dağılımı (Shara et al., 2012).

WR Yıldızlarının Fiziksel Özellikleri

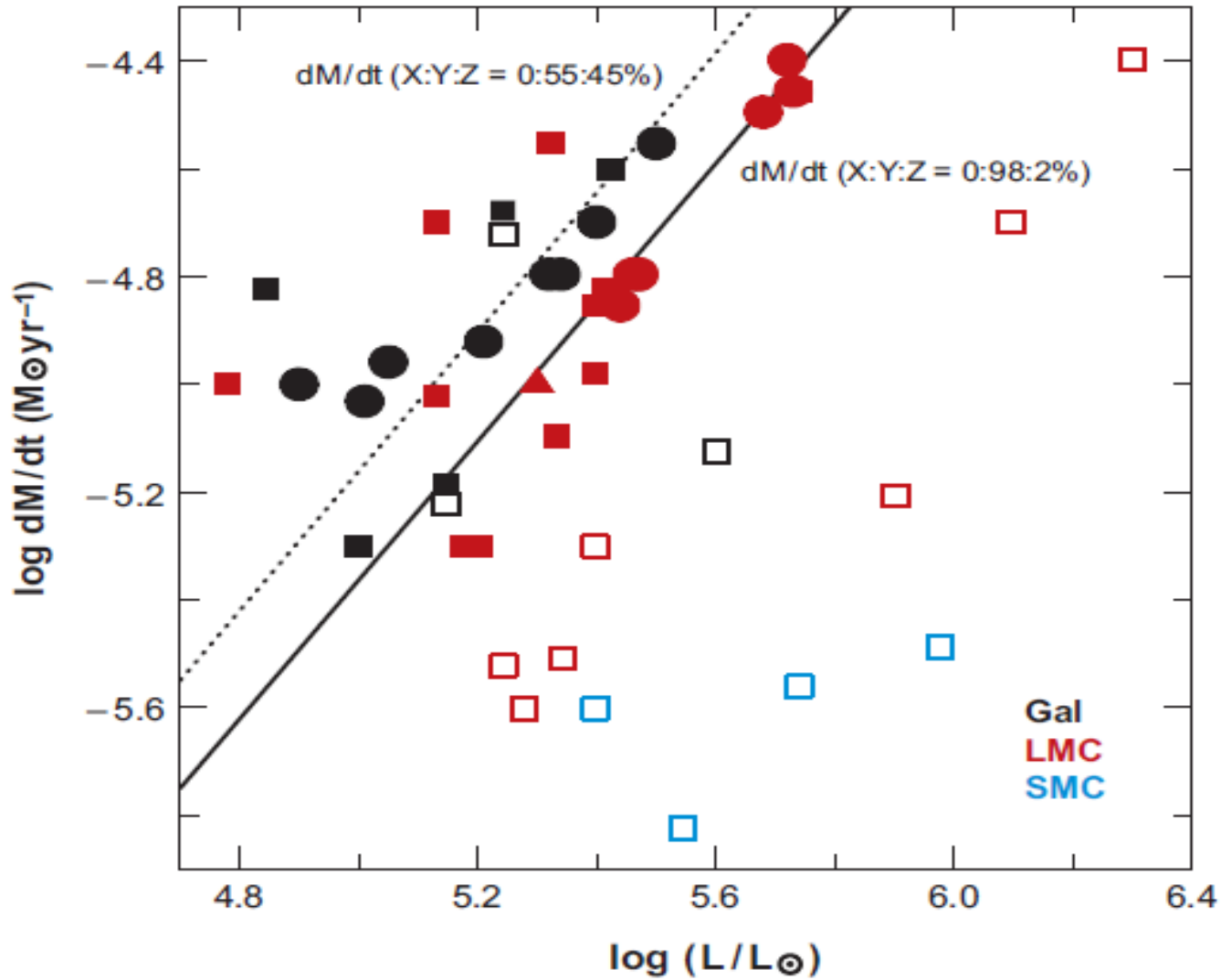
- Başlangıç kütlesi $M_i \geq 20M_{\odot}$ (Moffat et al., 2016)
- Güneşin metal bolluğuna sahip ($Z_* = Z_{\odot}$) bir yıldızın WR olabilmesi için limit kütle $20M_{\odot}$ 'tir. $Z_* = 0.1Z_{\odot}$ ise başlangıç kütlesi $45M_{\odot}$ (Meynet & Meader, 2005).
- Başlangıç kütlesi $\sim 75 M_{\odot}$ 'ten daha büyük olanlar,
 - $O \rightarrow WN$ (H-zengini) $\rightarrow LBV \rightarrow WN$ (H-yoksunu) $\rightarrow WC \rightarrow SNIc$,
- Başlangıç kütlesi $\sim 40-75 M_{\odot}$ olanlar,
 - $O \rightarrow LBV \rightarrow WN$ (H-yoksunu) $\rightarrow WC \rightarrow SNIc$,
- ve başlangıç kütlesi $\sim 25-40 M_{\odot}$ olanlar,
 - $O \rightarrow LBV/RSG \rightarrow WN$ (H-yoksunu) $\rightarrow WC \rightarrow SNIb$ (Crawther, 2008).

<u>Sp</u>	<u>T_e</u>	<u>log L</u>	<u>M</u>	<u>v_∞</u>	<u>logN(LyC)</u>	<u>M_v</u>	<u>Örnek</u>
Türü	kK	L _⊙	M _⊙ yr ⁻¹	km s ⁻¹	ph s ⁻¹	mag	
WN							
3-w	85	5.34	-5.3	2200	49.2	-3.1	WR3
4-s	85	5.3	-4.9	1800	49.2	-4.0	WR6
5-w	60	5.2	-5.2	1500	49.0	-4.0	WR61
6-s	70	5.2	-4.8	1800	49.1	-4.1	WR134
7	50	5.54	-4.8	1300	49.4	-5.4	WR84
8	45	5.38	-4.7	1000	49.1	-5.5	WR40
9	32	5.7	-4.8	700	48.9	-6.7	WR105
WNha							
6ha	45	6.18	-5.0	2500	49.9	-6.8	WR24
9ha	45	6.18	-5.0	2500	49.9	-6.8	WR24
WC ve WO							
(WO)	(150)	(5.22)	(-5.0)	(4100)	(49.0)	(-2.8)	(BAT123)
(4)	(90)	(5.54)	(-4.6)	(2750)	(49.4)	(-4.5)	(BAT52)
5	85	5.1	-4.9	2200	48.9	-3.6	WR111
6	80	5.06	-4.9	2200	48.9	-3.6	WR154
7	75	5.34	-4.7	2200	49.1	-4.5	WR90
8	65	5.14	-5.0	1700	49.0	-4.0	WR135
9	50	4.94	-5.0	1200	48.6	-4.6	WR103

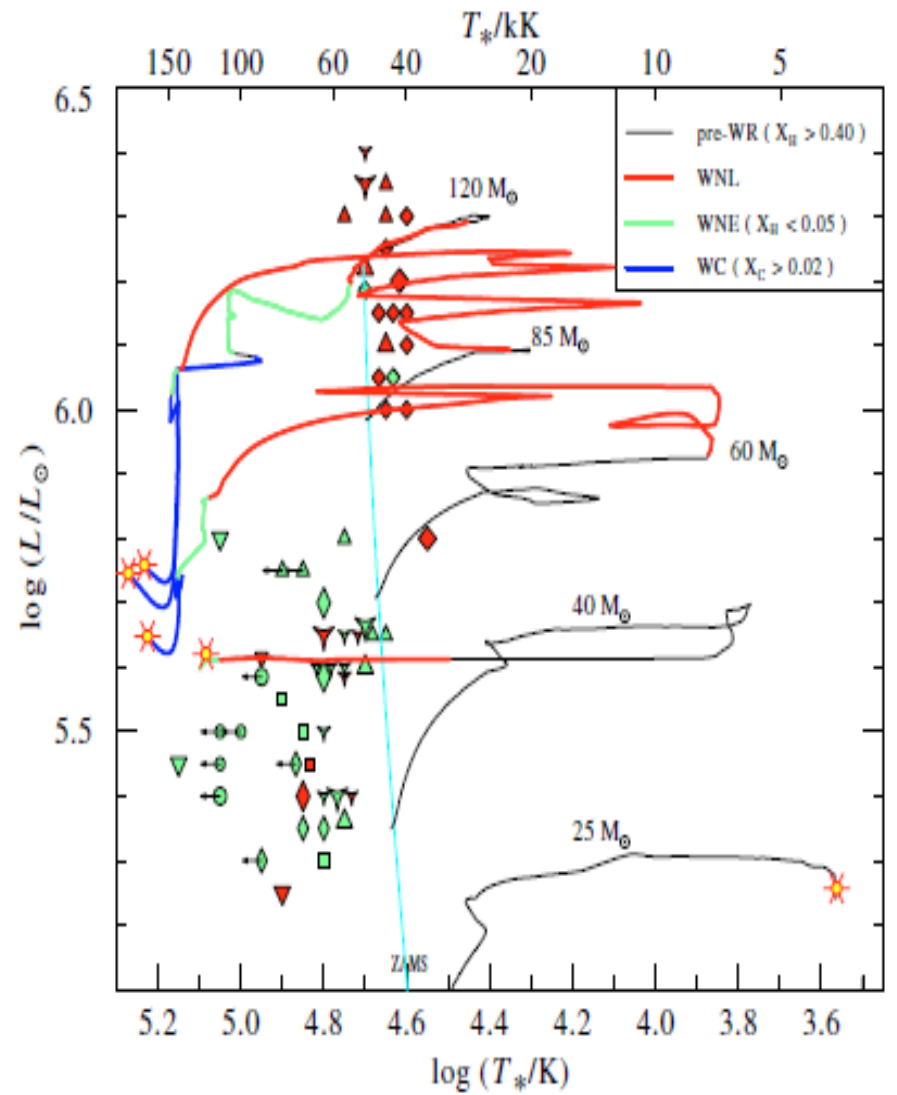
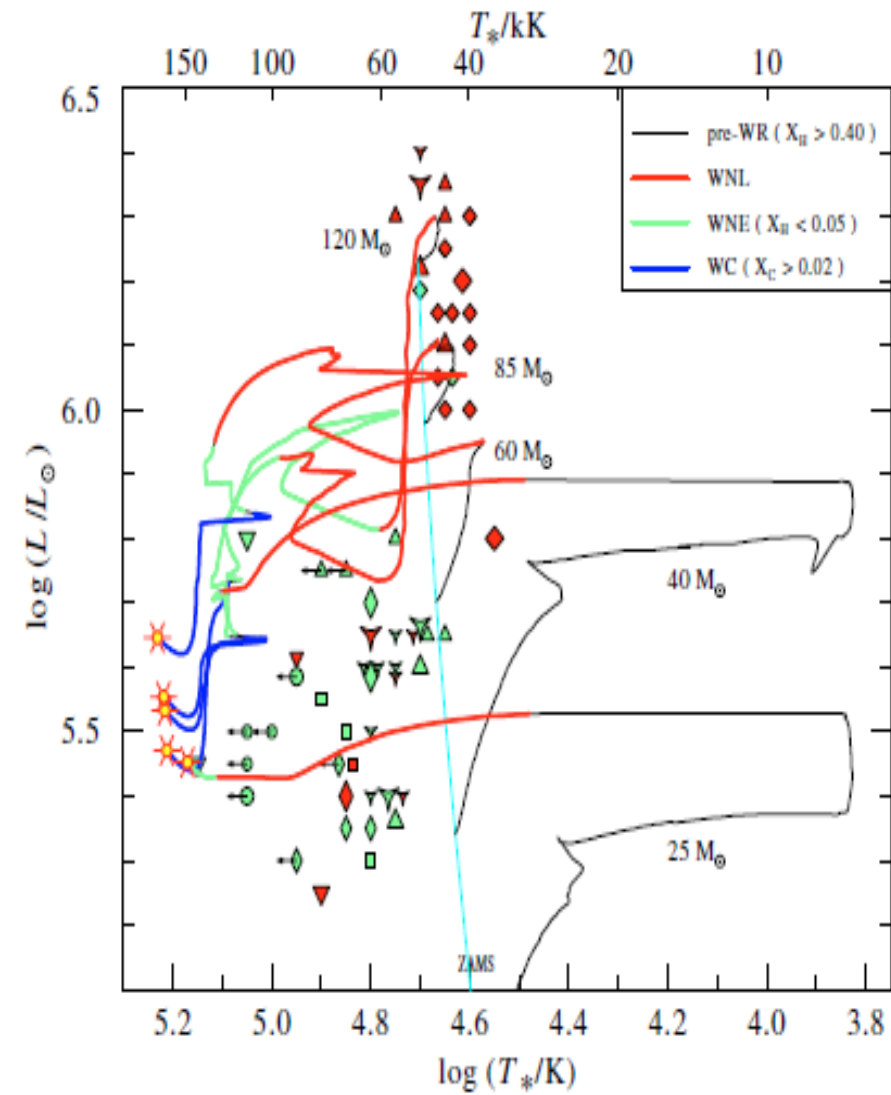
- Crowther (2008)



- Bazı WR yıldızlarının kütle dağılım grafiği (Crowther, 2008).



- **Kare:** WN3-6, **Daire:** WC5-9 ve **Üçgen:** WO yıldızlarını temsil etmektedir. Katı siyah ve noktalı çizgiler **Nugis & Lamers (2000)** çalışmasında türetilen kütle kayıp formülünden elde edilmiştir. İçi dolu/boş semboller yüzeyinde H olan/olmayan yıldızları temsil eder (**Crowther, 2008**).



- Şekilde farklı kütle aralıklarına sahip Galaktik WN türü yıldızların H-R diyagramındaki evrim yolu görülmektedir. **Sol taraf dönme etkisi** dikkate alınarak, **sağ taraf ise dönme etkisinin olmadığı** varsayımı ile elde edilen evrim yolunu göstermektedir (Hamann et al. 2006).

WR Çiftleri

- WR yıldızlarının % **40** çift sistem olduğu düşünülmektedir (Hucht, 2001).
- WR çiftlerinin önemi ! → Süpernova, X-Işın çiftleri?, Çift kara delik sistemleri, vb.
- 2001 yılında Hucht tarafından hazırlanan **Galaktik Wolf-Rayet Yıldızlarının VII. Kataloğu**'nda göre toplamda **89** adet çift/olası WR sistemi bulunmaktadır. Bunlardan **19** tanesi çift çizgili tayfsal çift sistemlerdir.
- Tez çalışması kapsamında yakın zamanda çalışılmış tüm WR sistemleri taranmış ve katalogda verilen bilgiler güncellenmiştir.
- Son yıllarda yapılan çalışmalarda **4** adet daha çift çizgili tayfsal çift olduğu belirlenmiştir (WR35a, WR62a, WR68a ve WR20a).

Yeni Gözlemler

- **TUG-T60** : Proje no 811
- Gözlemler **2015B, C, D** ve **2016 A** dönemi (1 yıl)
- U,B,V,R ve I filtrelerinde gözlemler yapılmıştır. 1-20 sn poz süreleri kullanılmıştır.
- ~ **25 000** gözlem noktası

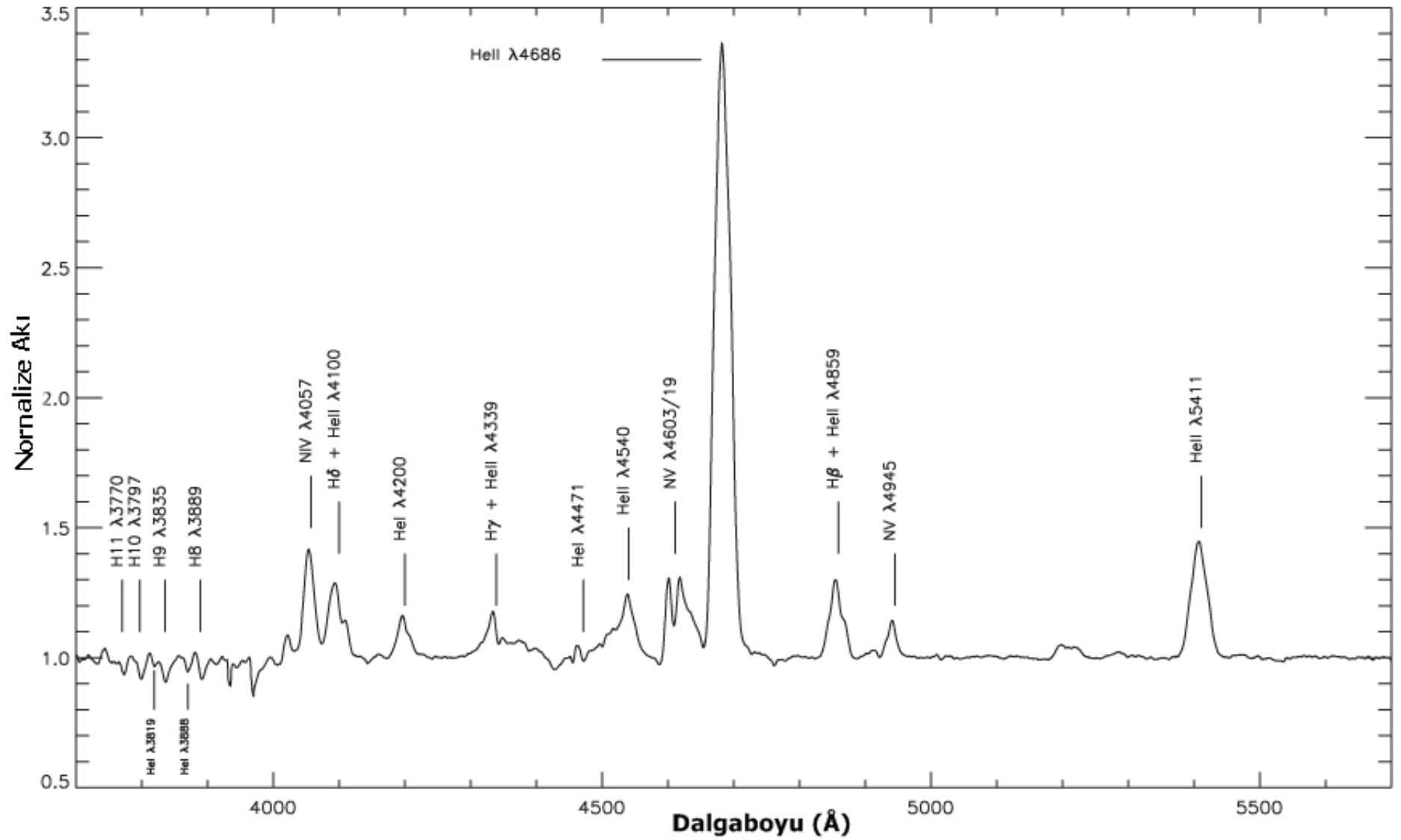
Sistem	W-R	Sağ Açıklık (α)	Dik Açıklık (δ)	Tayf Türü	U mag	B mag	V mag	Dönem (gün)
QY <u>Vul</u>	WR 127	19 46 15.94	28 16 19.09	WN3+O9.5V	9.86	10.50	10.23	9.55
V1676 <u>Cyg</u>	WR 133	20 05 57.32	35 47 18.14	WN5+O9I	6.11	6.88	6.75	112.4
V1770 <u>Cyg</u>	WR 136!	20 12 06.54	38 21 17.78	WN6 (h) -s	7.12	7.49	7.50	4.55
HD 193077	WR 138	20 17 00.02	37 25 23.78	WN5-w+B?	7.82	8.32	8.01	1538
V444 <u>Cyg</u>	WR139	20 19 32.40	38 43 53.96	WN5+O6II-V	8.15	8.53	8.00	4.21
V2183 <u>Cyg</u>	WR 141	20 21 31.72	36 55 12.77	WN5-w+O5V-III	10.67	10.60	9.78	21.7
V1696 <u>Cyg</u>	WR 148	20 41 21.54	52 35 15.15	WN8h+B3IV/BH	10.42	10.87	10.30	4.31
CX Cep	WR 151	22 09 33.44	57 44 30.50	WN4+O5V	12.78	12.91	12.12	2.12
GP Cep	WR 153	22 18 45.60	56 07 33.90	WN6o+O6I	8.84	9.39	9.00	6.68
CQ Cep	WR 155	22 36 53.95	56 54 20.98	WN6+O9II-Ib	8.68	9.21	8.80	1.64

Seçilen Sistemlerin Poz Süreleri

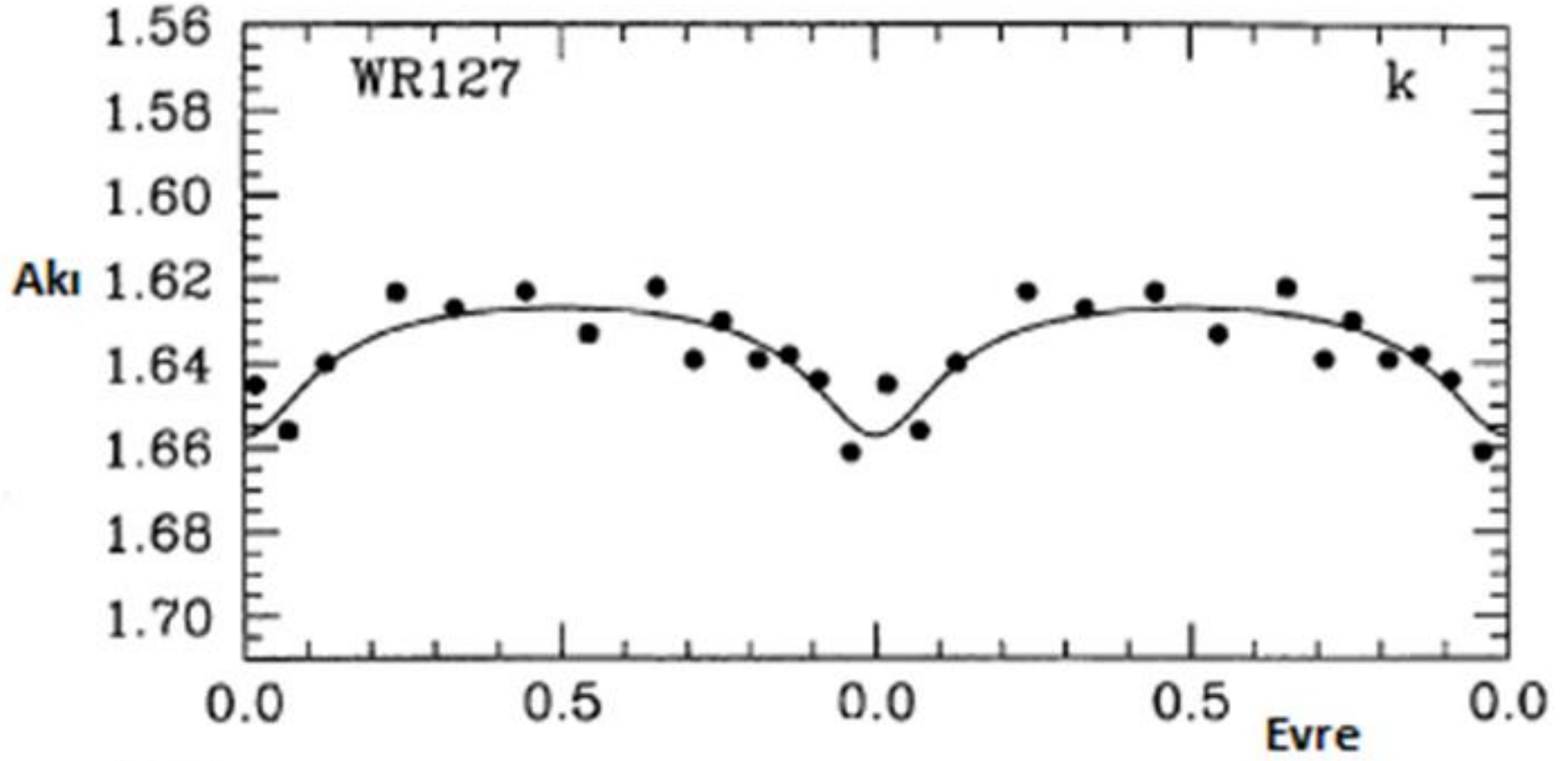
Nesne İsmi	α	δ	U	B	V	R	I	Toplam Poz Süresi
WR127	19 46 15.94	+28 16 19.09	20	5	5	5	5	40
WR 133	20 05 57.32	+35 47 18.14	5	1	1	1	1	9
WR 136	20 12 06.54	+38 21 17.78	5	1	1	1	1	9
WR 138	20 17 00.02	+37 25 23.78	5	1	1	1	1	9
WR 139	20 19 32.40	+38 43 53.96	20	1	1	1	1	24
WR 141	20 21 31.72	+36 55 12.77	20	20	5	5	5	55
WR 148	20 41 21.54	+52 35 15.15	60	20	5	5	5	95
WR 151	22 09 33.44	+57 44 30.50	60	60	20	20	20	180
WR 153	22 18 45.60	+56 07 33.90	20	5	1	1	5	32
WR 155	22 36 53.95	+56 54 20.98	20	5	1	1	**	27

WR 127 (QY Vul)

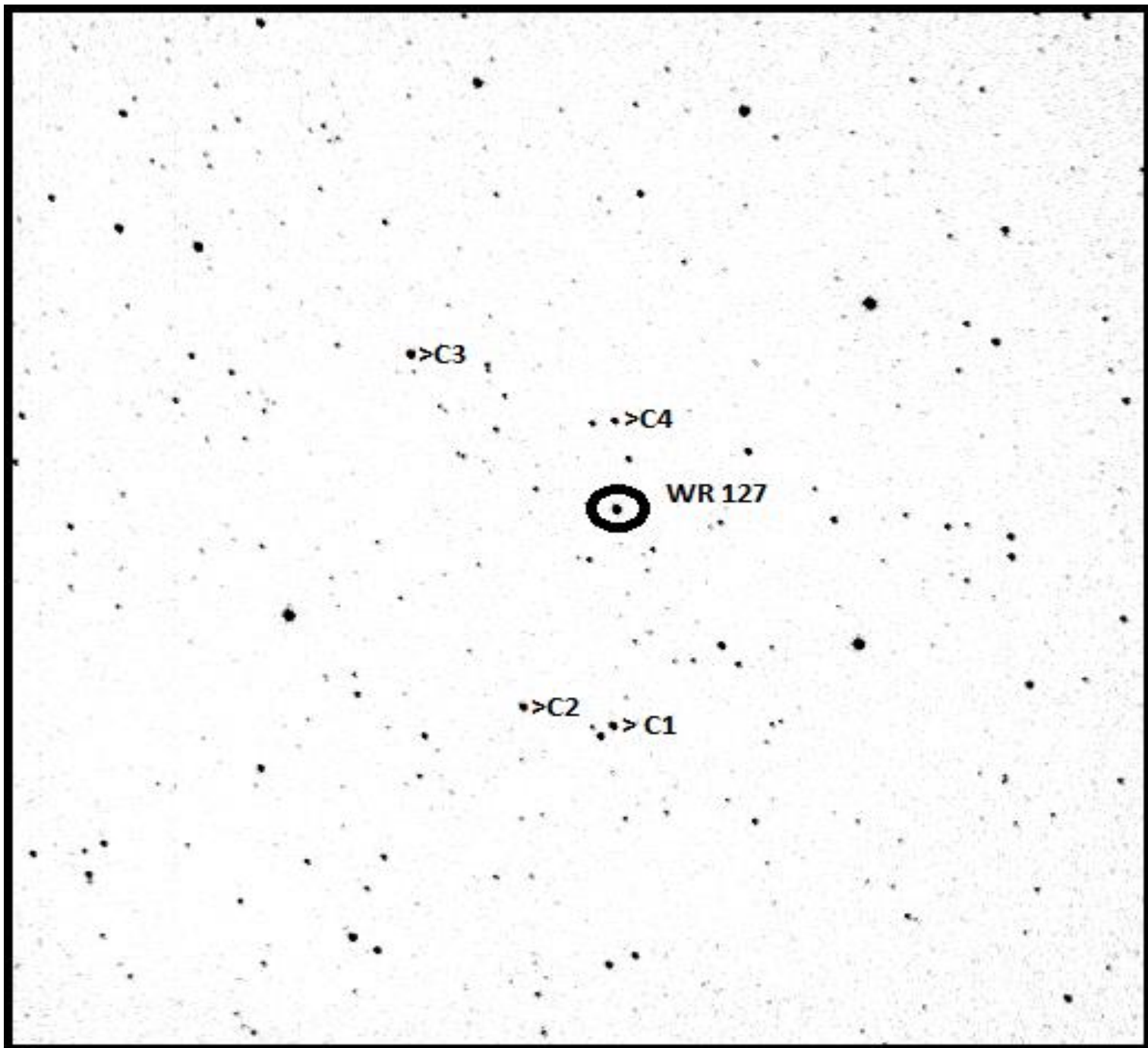
- 1941 yılından **Wilson** tarafından ilk defa gözlemi yapılmıştır. WR çifti olduğu belirlenmiştir.
- 1945 yılında **Hiltner** McDonald ve Yerkes Gözlemevlerinden elde ettiği tayfsal çalışmalar ile sistemin başyıldızını WN5, yoldaşı B tayf türü olarak belirlemiştir.
- Sistemin salma çizgili tayfında baskın **He II 4686 Å** çizgisidir (SB2).
- **Moffat et al (2011)** WR 127 sisteminin tayfsal çalışmasını yapmışlardır. Sistemin dönemini $P = 9.5550$, yörünge eğimini $i = 55.5 \pm 4.7$ olarak belirlemiştir.
- WR+O çift sisteminin **WN5o** başyıldızın kütlesini $13.4 \pm 2.5M_{\odot}$, yoldaşının kütlesini $23.9 \pm 4.4M_{\odot}$ ve **O8.5** tayf türünden olduğunu belirtmiştir. Sistemi oluşturan bileşenlerin yarıçapları baş ve yoldaş yıldız için sırasıyla $28 \pm 2.1R_{\odot}$ ve $35.2 \pm 2.4R_{\odot}$ olarak hesaplamıştır.



WR 127 (WN5+O8.5) sisteminin tayfı (Moffat et al., 2011)



- WR127 sisteminin 1996 yılında Lamontagne ve arkadaşları ile elde ettikleri ışık eğrisi



•>C3

••>C4

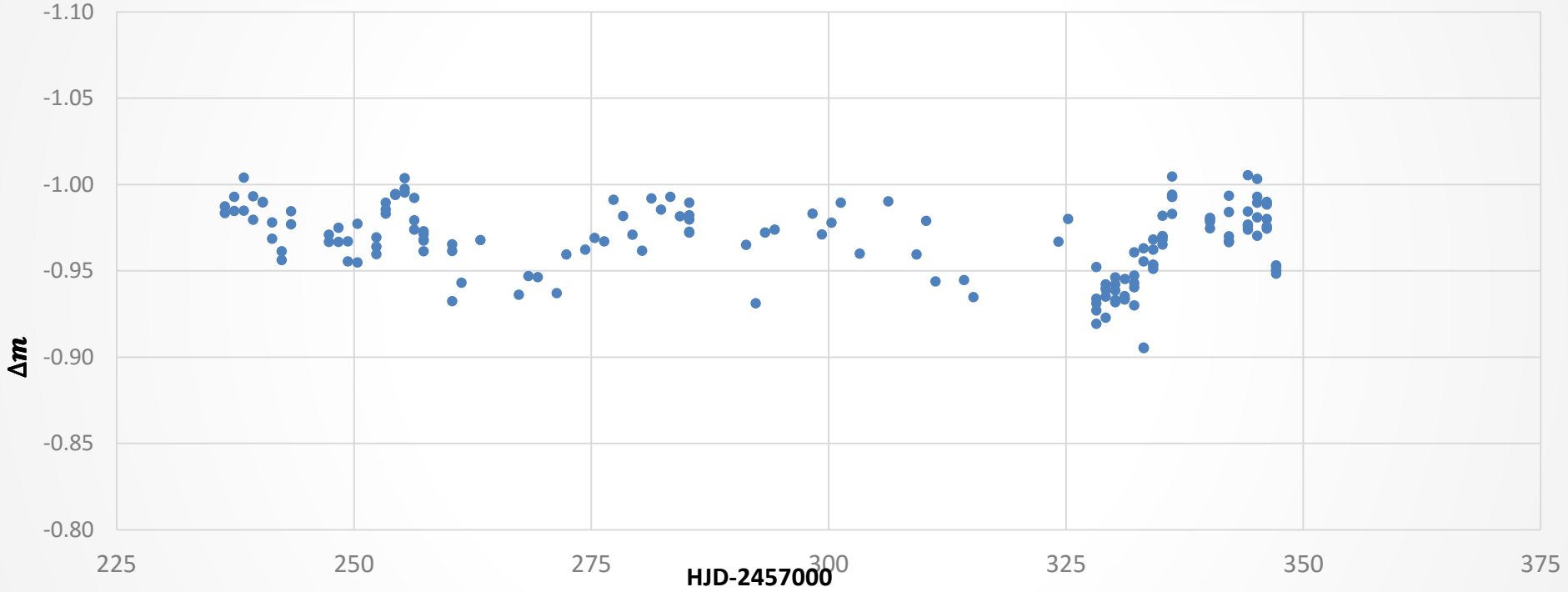


WR 127

•>C2

••>C1

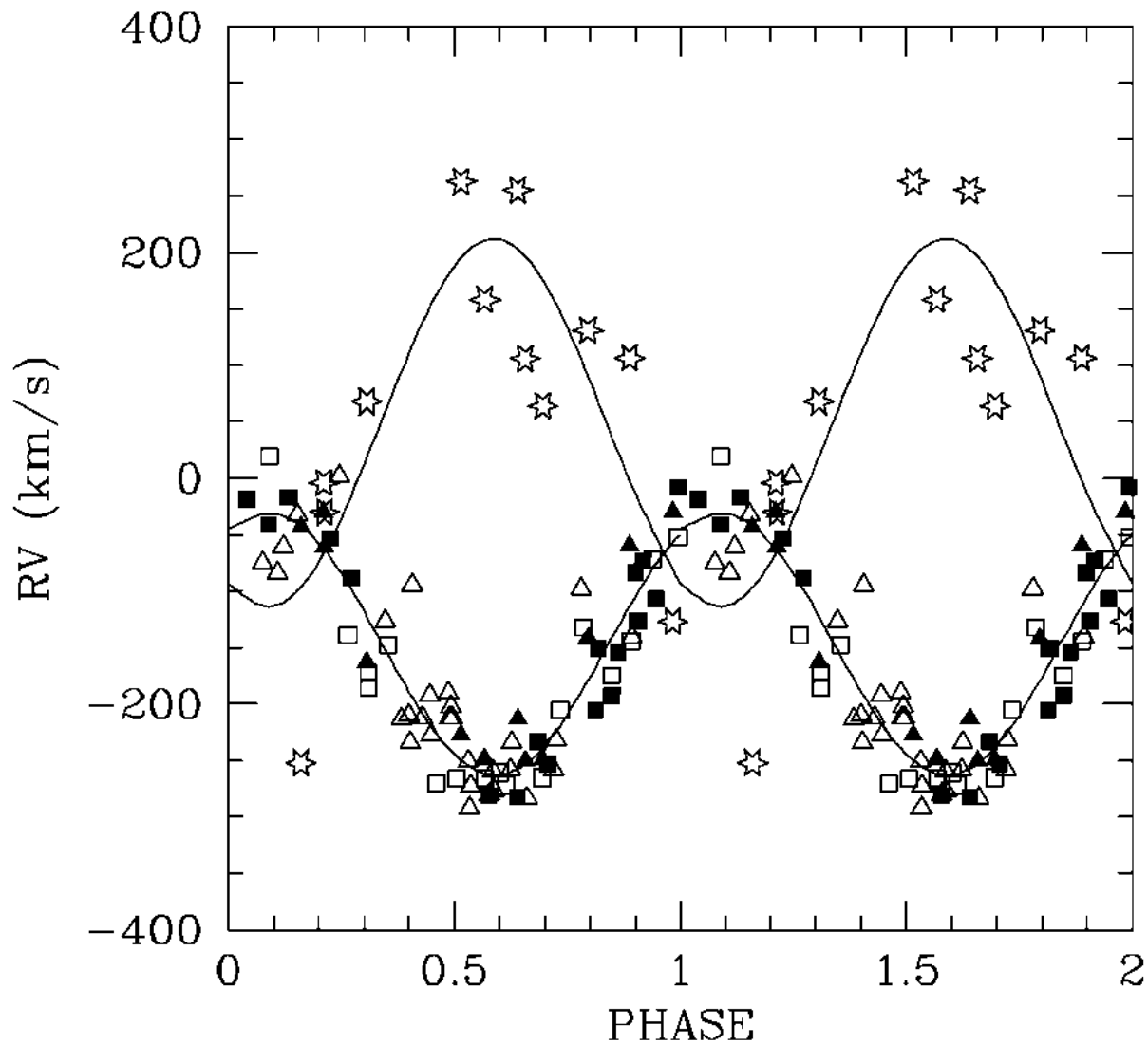
T60_WR127_I



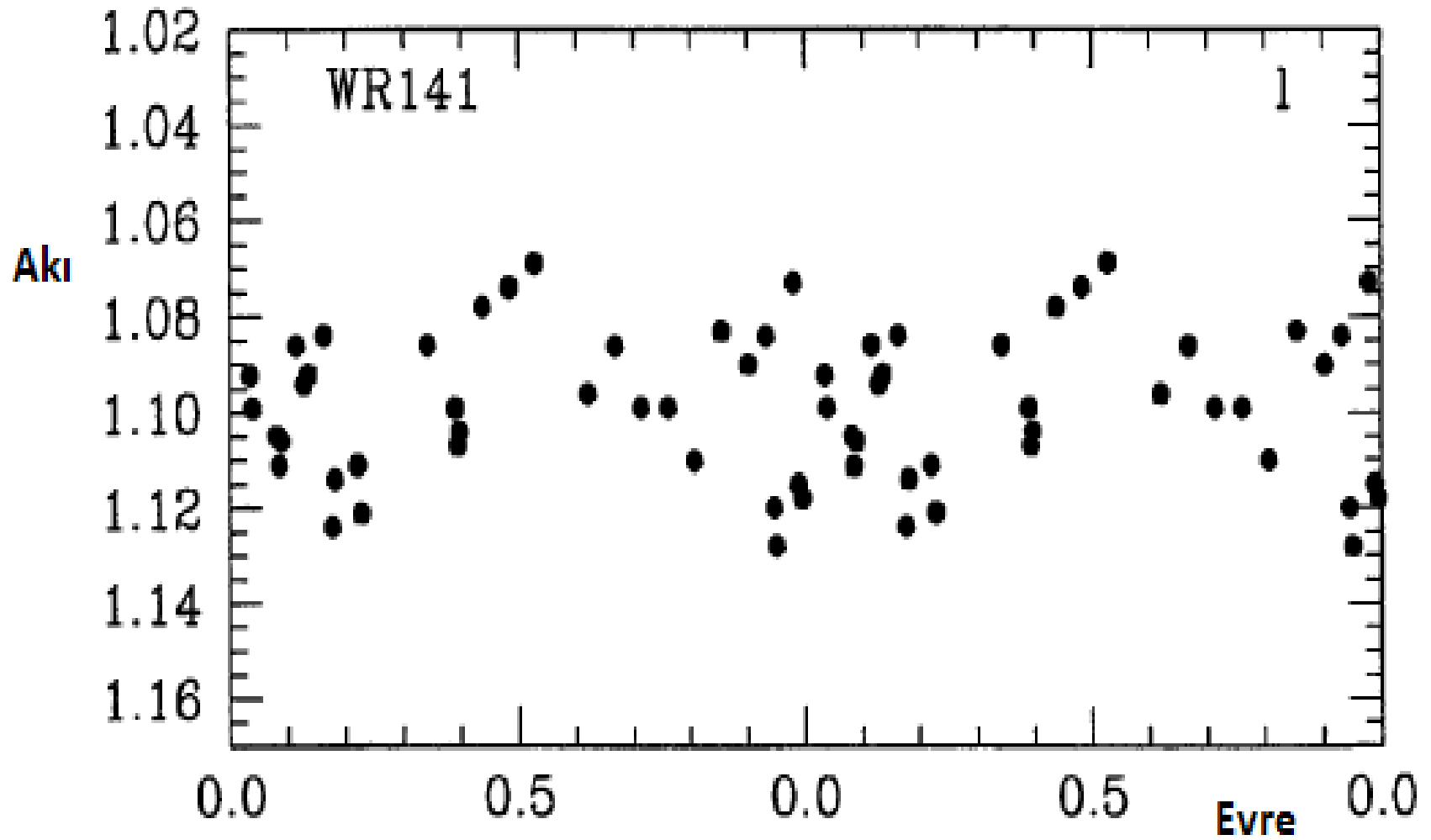
- WR 127 sisteminin Tug T60 Teleskobu gözlemleriyle elde edilen ışık değişim grafiği.

WR 141 (V2183 Cyg)

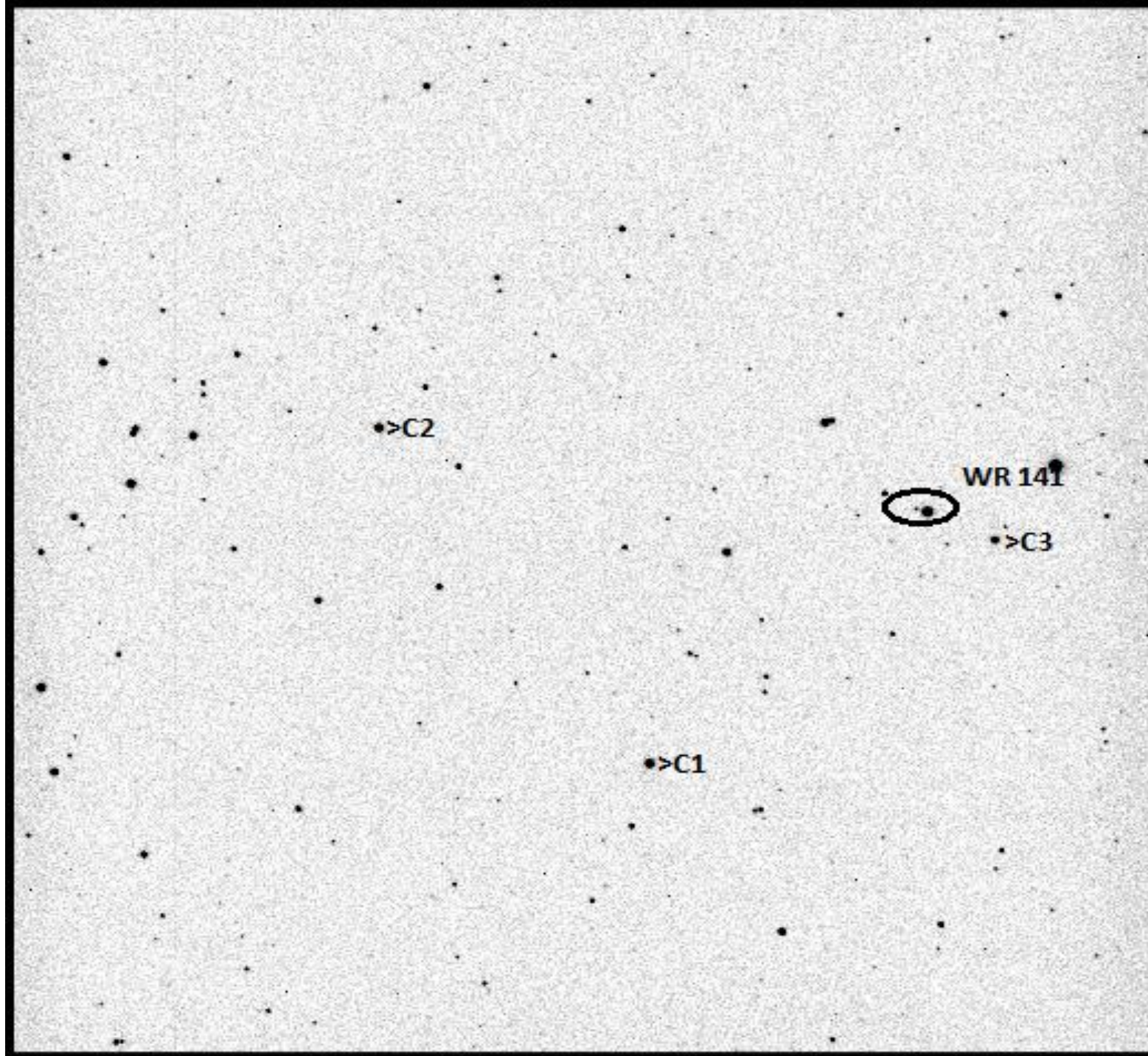
- 1941 yılından **Wilson** tarafından ilk defa gözlemi yapılmıştır. WR çifti olduğu belirlenmiştir.
- Hiltner (1945) sistemin tayfsal çalışmasını yapmış ve başyıldızı WN6 türü, sistemin dönemini ise 21.64 gün olarak belirlemiştir.
- 1991 yılında **Grandchamps & Moffat** sistemi tayf çalışmasını yapmış ve sistemi oluşturan bileşenlerinin kütlelerini $M_{WN6} = 23.8 \pm 8.6M_{\odot}$, $M_O = 22.9 \pm 3.3M_{\odot}$ ve sistemin eğim açısını $i = 71^{\circ}.7$ olarak belirlemiştir.
- 1998 yılında **Marchenko ve arkadaşları** sistemi tayfsal ve fotometrik olarak çalışılmış ve türünü **WN5o+O5 V-III** olarak belirlenmiştir. Sistemin dönemini $P = 21^d.6895 \pm 0.0003$, $e = 0.018 \pm 0.035$, $i = 68^{\circ} \pm 12$, bileşenlerin kütlelerini $M_{WR} = (36 - 54)M_{\odot}$, $M_O = (26 - 33)M_{\odot}$ ve yıllık kayıp kütle miktarı $\dot{M} = 1.8 \times 10^{-5}M_{\odot}yr^{-1}$.



- **Yıldız imgeleri** O bileşenini 1988-1989 (Antony et al.); **Açık üçgenler** Hiltner (1945); **açık kareler**, Ganesh & Bappu (1968); **içi dolu üçgenler**, 1988-89 (Antony et al.); **içi dolu kareler**, 1992 yılı datası (Antony et al., 1998).



- WR 141'in V filtresiyle elde edilmiş ışık eğrisi ([Lamontagne et al., 1996](#))

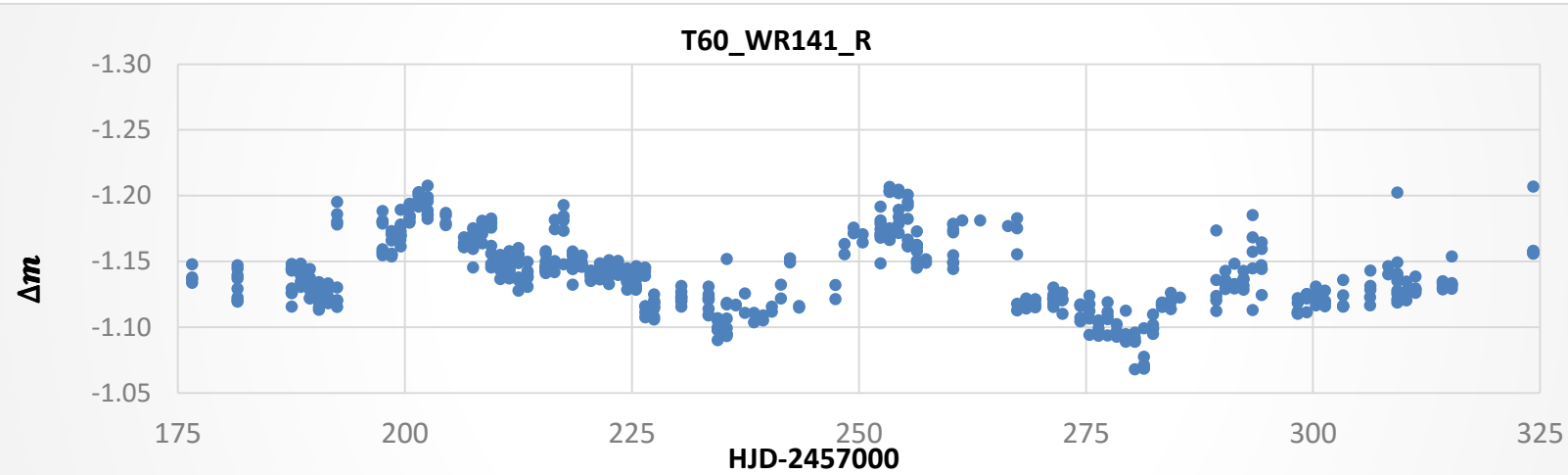
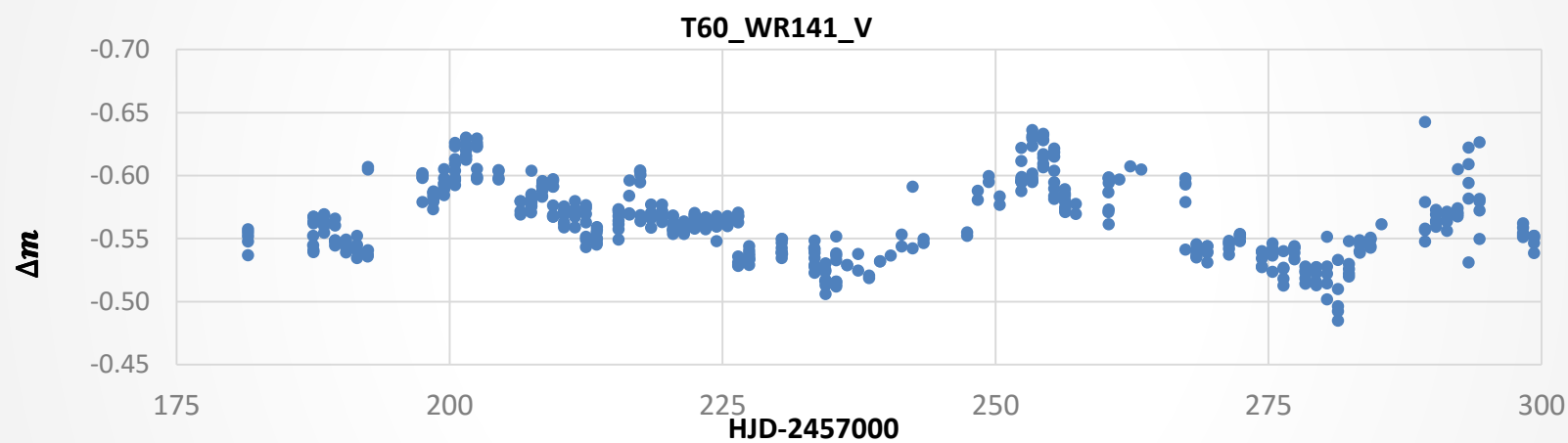
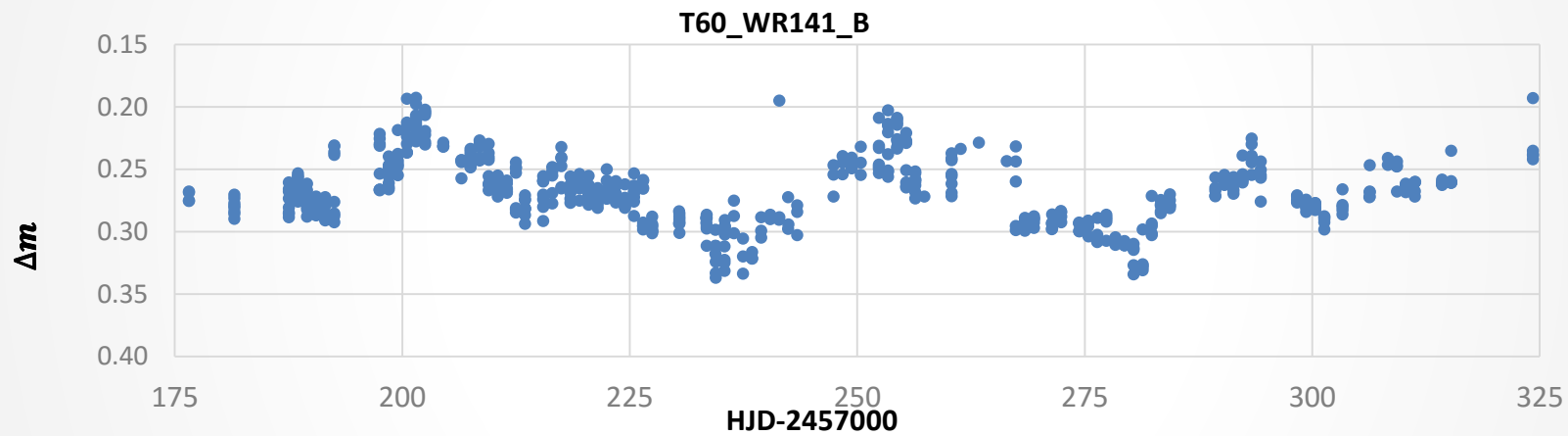


•>C2

WR 141

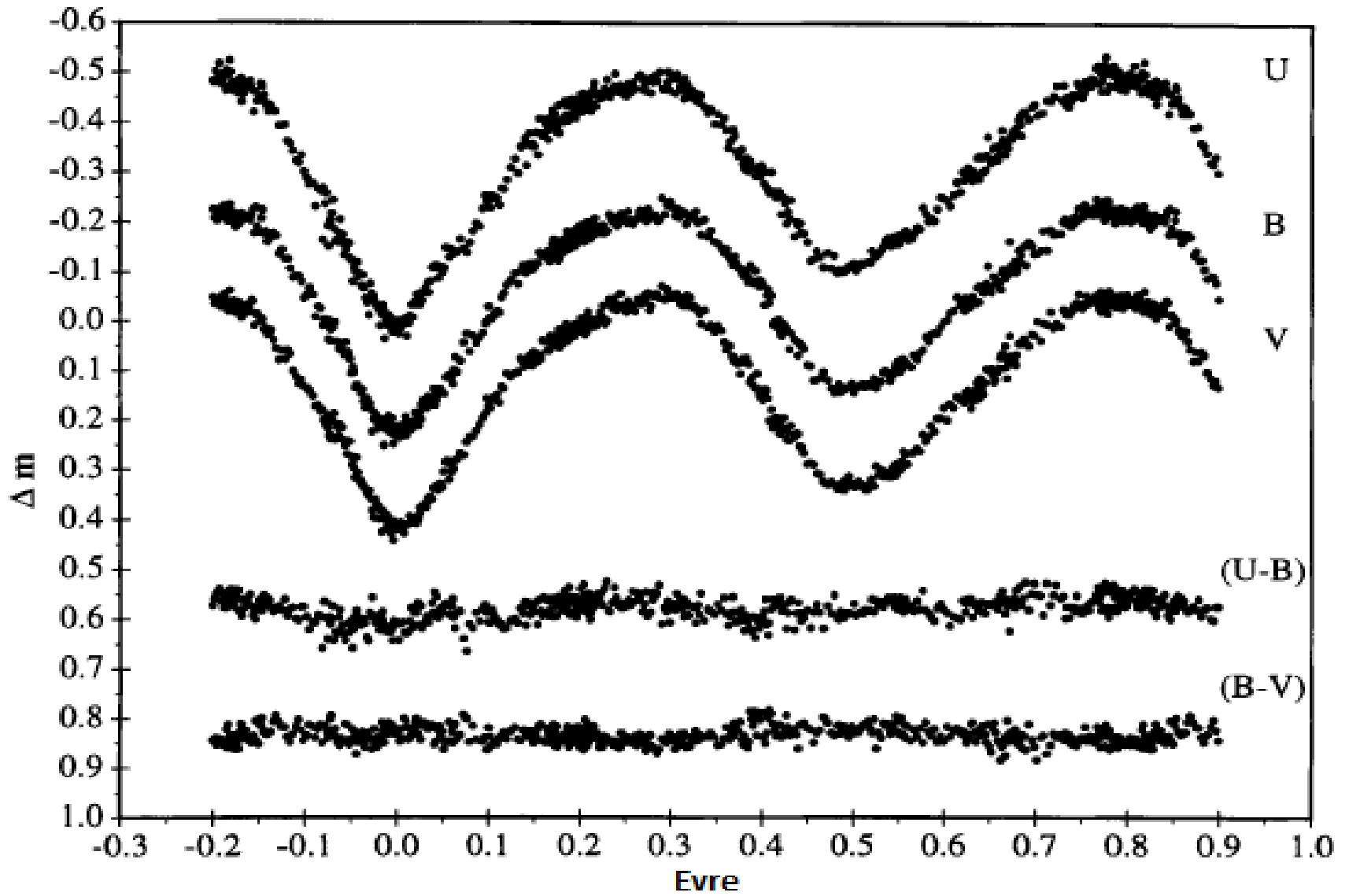
•>C3

•>C1

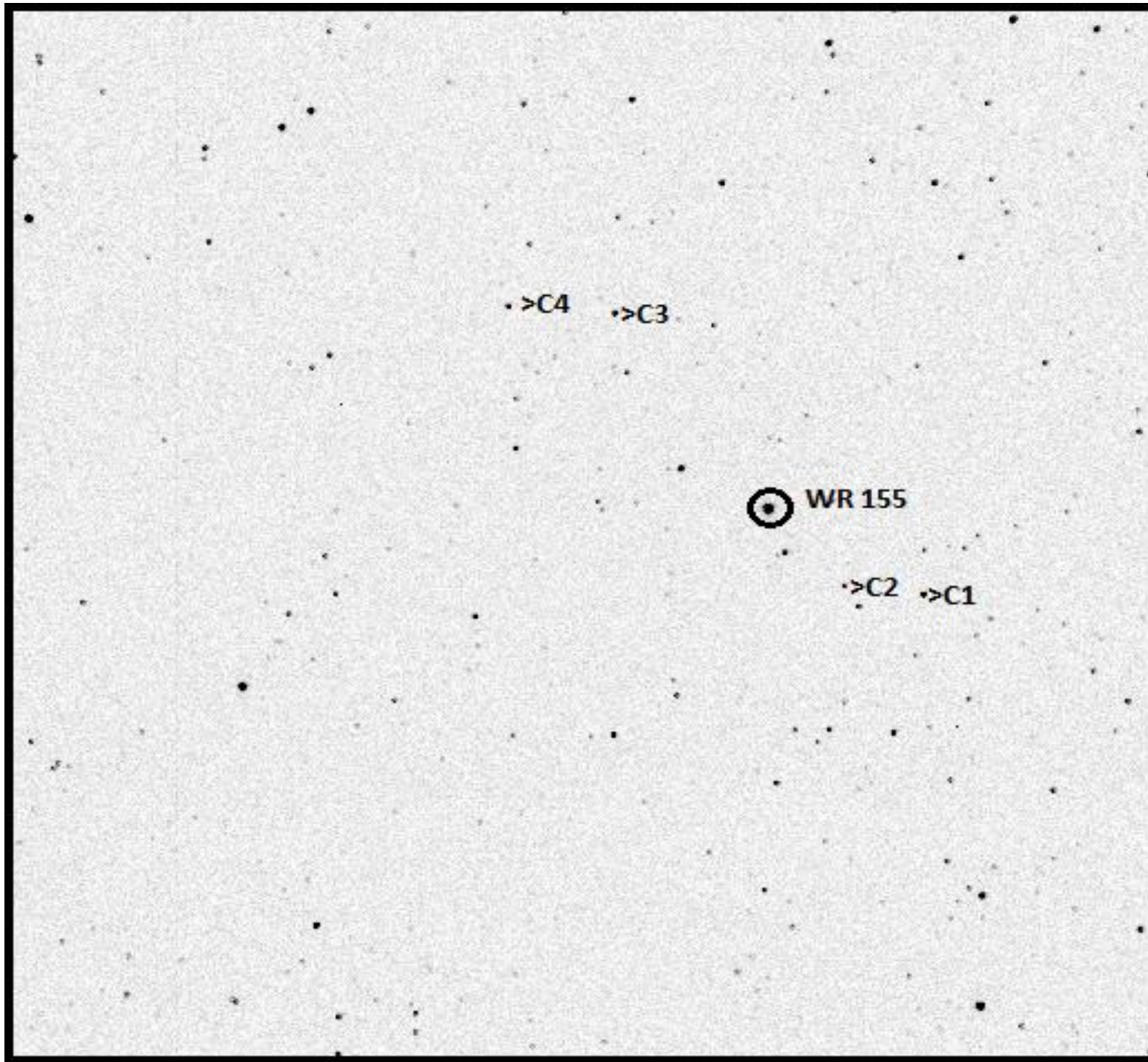


WR 155 (GP Cep)

- İlk olarak 1941 yılında çift sistem olduğu **Hiltner** tarafından belirlenmiştir. Hiltner 1944 yılında WR 155 tayfsal çift sisteminin **β -Lyre** türü ışık eğrisine sahip olduğunu, dönemini $P = 1^d.641272$.
- **Gaposchkin** (1944) tayfsal ve fotografik gözlemleriyle sistemin örten çift olduğunu ve sistemi oluşturan bileşenlerinin kütlelerini $M_{WN6} = 13.9M_{\odot}$, $M_{B1} = 16.7M_{\odot}$ olarak elde etmiştir.
- **Smith** (1968) sistemin türünü **WN7+O7** olduğunu tespit etmiştir.
- **Demircan ve ark.** (1997) sistemin türünü **WN6+O9** olarak belirlemiştir. Sistem bileşenlerin kütlelerini $M_{WN6} = 20.8 \pm 2.3M_{\odot}$, $M_O = 21.4 \pm 1.6M_{\odot}$, yarıçaplarını $R_{WR} = 8.2 \pm 0.2R_{\odot}$, $R_O = 8.3 \pm 0.2R_{\odot}$, etkin sıcaklıklarını $T_{eff}(WR) = 43600K$, $T_{eff}(O) = 37000K$ ve yörünge eğimini de $i = 68^{\circ}.8 \pm 0.6$, dönemi $P = 1^d.641229$ olarak hesaplanmıştır.



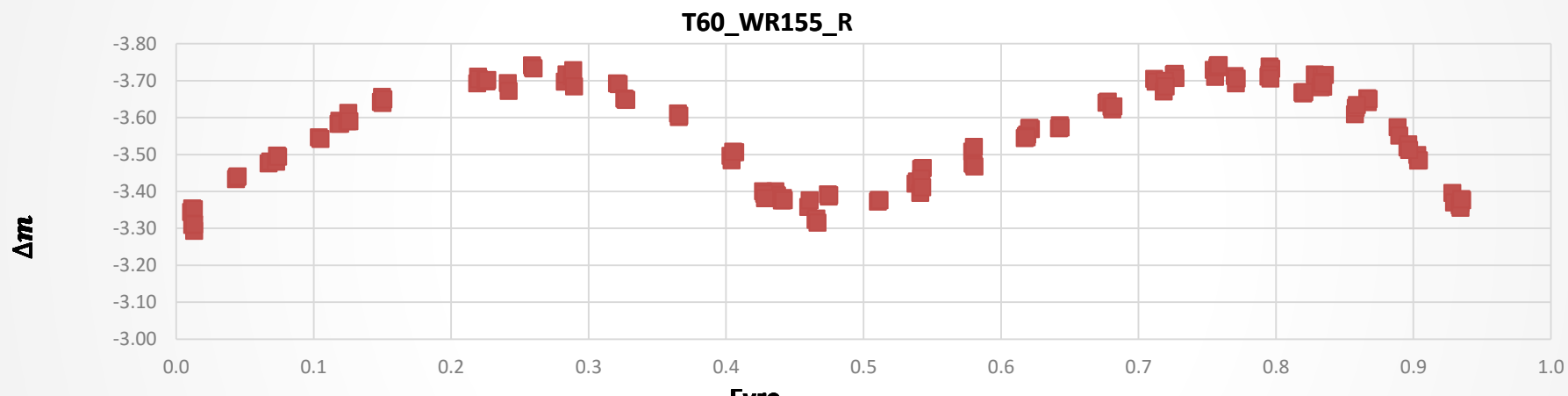
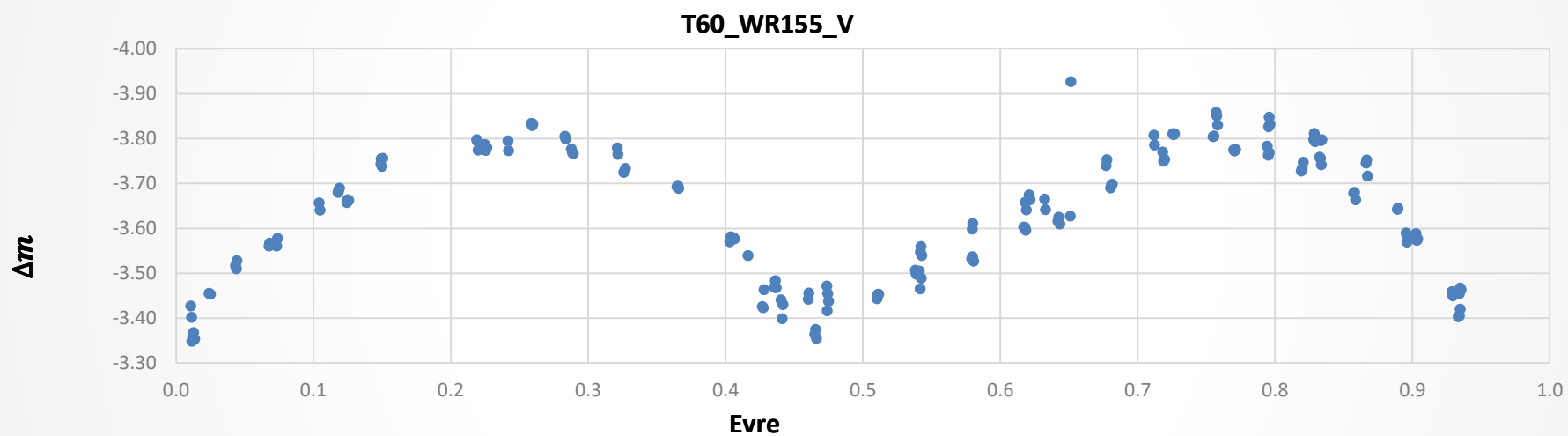
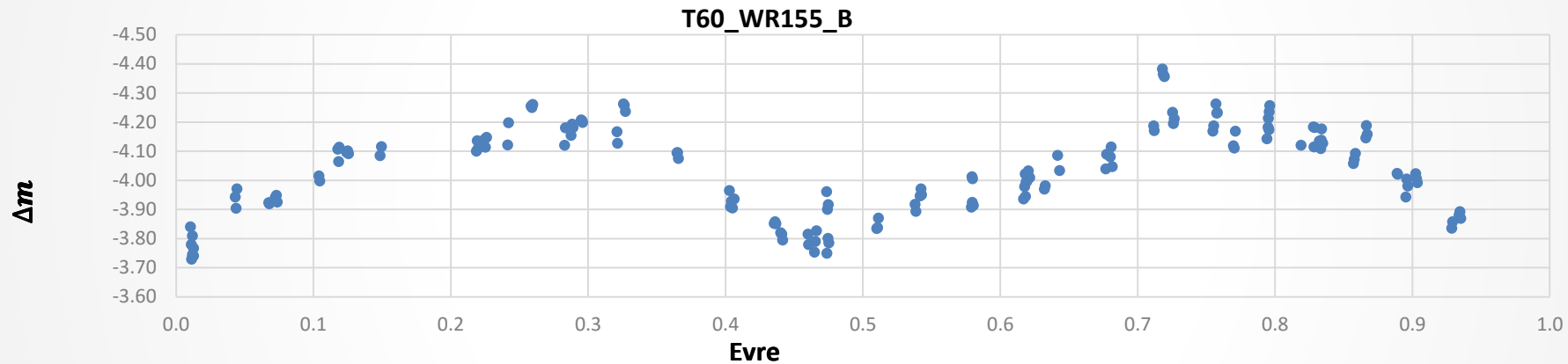
- WR 155 sisteminin U,B ve V filtrelerinden elde edilen ışık eğrisi (Demircan ve ark., 1997).



·>C4 ·>C3

⊙ WR 155

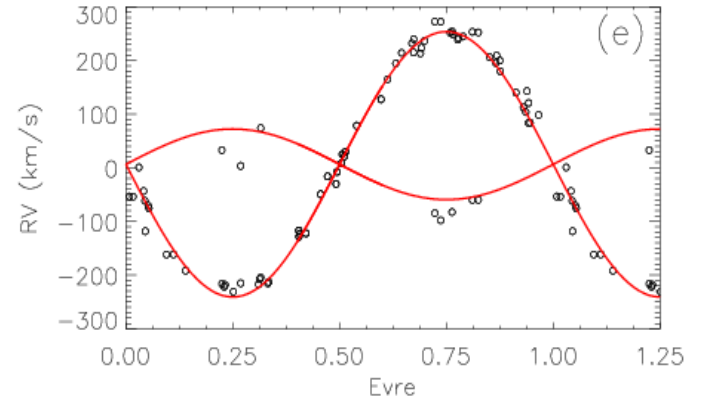
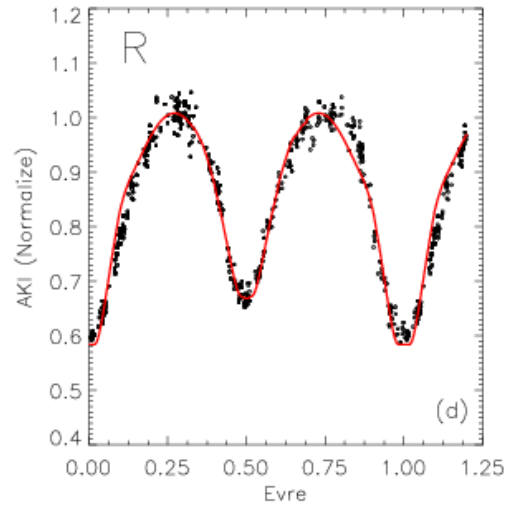
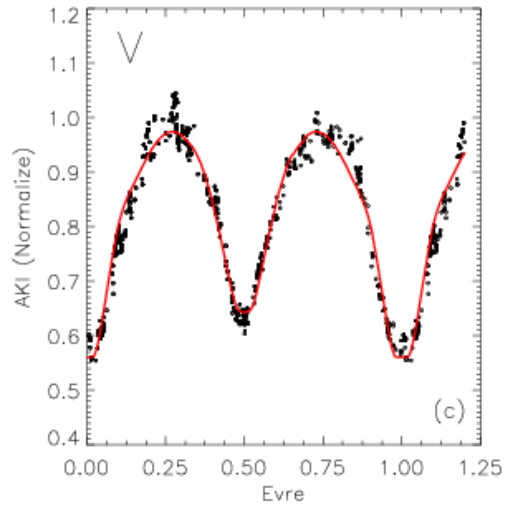
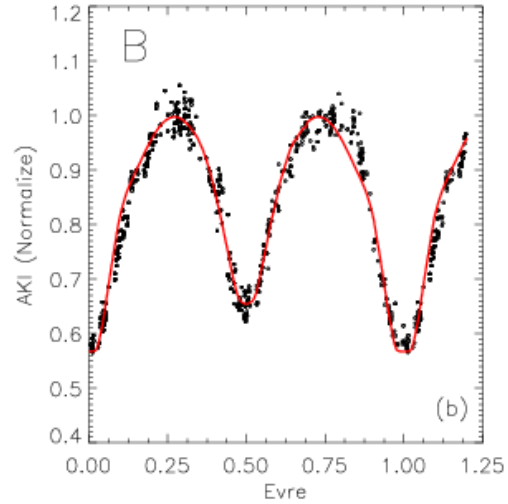
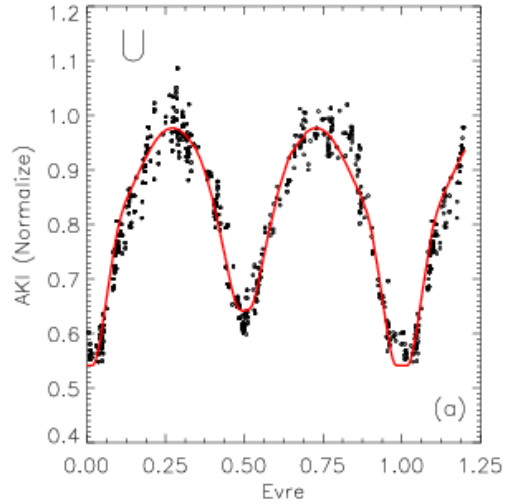
·>C2 ·>C1



Sonuçlar:

- 1 yıl süren gözlemler süresince, 10 sistem için UBVRİ renklerinde gözlem yapıldı ve uzun dönemli ışık değişimleri elde edildi.
- WR 127, WR141 ve WR155 sistemlerine ilişkin tam ışık eğrileri elde edildi.
- Fotometrik değişimlerin analizi yapılarak çift sistemin **yörünge öğeleri** ve **fiziksel parametreleri** türetilecek ve **evrim durumları** irdelenecektir.

WR adayı RY Scuti:



Gözlemler:
Ege Üniversitesi Gözlemevi (T40)
TUG (T60)



- Dinlediğiniz için teşekkürler...