

# EK Cep ve Yıldız Evrimi

## Mutlu YILDIZ

Ege Üniversitesi Fen Fakültesi Astronomi ve Uzay Bilimleri Bölümü, 35100 Bornova-İZMİR  
e-mail: yıldız@astronomy.sci.ege.edu.tr

**Özet:** EK Cep bir çok bakımdan çok özel bir ayırık çift yıldız dizgesidir. Bileşenlerinin fiziksel özellikleri yapılan ışıkölçümsel ve spektroskopik gözlemlerin analizinden çok iyi bilinmektedir. İkinci bileşen Güneş'ten biraz fazla kütleyle bir anakol öncesi yıldızdır ve yıldız evrim kuramı için önemli bir sına niteliği taşımaktadır. Aynı zamanda, 3000 yıllık bir dönemle, dizge eksen dönme hareketi yapmaktadır. Bu çalışmada, bileşenlerin modelleri yapıldı ve dizgenin yaşı yaklaşık olarak 23 milyon yıl olarak bulundu. Gözlemsel ve kuramsal eksen dönme hızı, sırasıyla, ışıkölçümsel gözlemlerden elde edilen tutulma zamanlarından ve bileşenlerin küresel bakışık modellerinden bulundu. Her iki eksen dönme hızı da daha önce başka araştırmacılar tarafından belirlenen hızlardan yaklaşık %30 daha fazla oldukları saptandı. İkinci bileşenin konvektif zarfa sahip olmasından dolayı, konvektif karışım uzunluğu, model yarıçapını gözlenenle karşılaştırmak için değiştirildi ve uyum konvektif parametrenin Güneş'tekine kıyasla oldukça küçük bir değeriyle sağlandı. Bu durumdan hareketle, evrimle (aynı zamanda kimyasal içerik ve yıldızın kütlesi ile) konvektif verimliliğin değiştiği tezi ortaya atıldı.

## 1. Giriş

EK Cep, temel özellikleri iyi bilinen ayırık, örten çift yıldızlardan birisidir (Andersen 1991, 1999). Yörünge dönemi 4,43 gün olan sistemde eksen dönmesi gözlenmektedir ve ikinci bileşen bir anakol öncesi yıldızdır. Ebbighausen (1966) tarafından elde edilen ilk fotoelektrik ışık eğrisi ve Tomkin tarafından yapılan spektrografik gözlemlere dayalı analizler sonucunda, bileşenlerin temel fiziksel özellikleri 2 %'den daha az bir hata ile belirlenmiştir. Başlangıçta, bu sistem üzerine yapılan tartışmalar, görelilik olarak küçük kütle oranına rağmen, fazla olan ikinci bileşenin yarıçapının birincinininkine oranı üzerine odaklanmış durumdadır. Tomkin, bu durumu, ikinci yıldızın anakol öncesi, birinci yıldızınsa sıfır yaş anakol yıldızı olmasının bir sonucu olarak yorumlarken, Popper (1987) onu destekler ve nihai saptama için ikinci bileşenin tayfindan Li bolluğunun elde edilmesini önerir. Martin ve Rebolo (1993) bu gözlemi Li I 6708Å bölgesinde yaparak, ikinci bileşenin Li bolluğunu, anakol öncesi yıldızların bolluğuna yakın bir değer olan  $\log N(\text{Li})=3,1\pm 0,3$  bulur. Böylece,  $1,121\pm 0,012M_{\odot}$  kütle ve  $1,315\pm 0,006R_{\odot}$  yarıçapı ile ikinci bileşenin bir anakol öncesi yıldız olduğu saptanmış olur.

Bir çok araştırmacı tarafından, yıldız evrim kuramının (YUK) Güneş'in iç yapısını oldukça iyi bir şekilde açıkladığı gösterilmiştir. Öte yandan, Güneş'in, yakınlığından ötürü, gözlenen nicelikleri çok hassas olarak tespit edilebilmektedir. YUK'un başka sistemlerde test edilmesi için, tedirgin edilmiş yıldızlar, eğer

bunların kütle, yarıçap ve etkin sıcaklık gibi temel fiziksel özellikleri duyarlı bir şekilde tespit edilebiliyorsa, asli bir işleve sahiptir. Temel fiziksel özelliklerinin yanı sıra, incelenecek yıldızın kimyasal içeriğine ve, eğer konvektif zarf varsa, konvektif hücrelerin karışım uzunluğuna gereksinimimiz vardır. Maalesef, çok az yıldızın kimyasal içeriğini biliyoruz, ve, her ne kadar önemli iyileştirmeler yapıyorsa da, konveksiyonu yeteri kadar iyi betimlemekte güçlük çekiyoruz. Geleneksel olarak, konvektif zarflı yıldızların modellenmesinde, karışım uzunluğunun basınç ölçek yüksekliğine oranı olan  $\alpha$ , ya Güneş'den elde edilen ya da bir civarında keyfi bir sayı alınır. Bu çalışmada,  $\alpha$ , ikinci yıldızın modelinin gözlenen yarıçapla uyumlu olması için, serbest parametre olarak değerlendirildi. Buradan hareketle, temel özellikleri iyi bilinen konvektif zarflı başka yıldızların modelleri de yapılarak,  $\alpha$ 'nın yıldız kütlelerine, zamana, ya da evrimsel evrelere göre nasıl bir bağımlılık gösterdiğinin anlaşılması umulmaktadır.

Bir tedirginlik durumu olarak, eliptik yörüngeli bir yakın çift yıldız sisteminde bileşenler arasındaki etkileşim enberi noktasının dönmesine neden olur. Bu hareketten, yıldızların içerisindeki kütle dağılımının bir ölçütü olan yıldız harmoniklerini belirleyebiliriz. Eğer yıldızların görelilik yarıçapları küçükse, görelilik ilerlemesi denilen terim baskın olur. EK Cep, yoldaş yıldızların görelilik yarıçapları küçük olduğundan (ikincil yıldızınki  $0,0791\pm 0,0002$ , birincil yıldızınki  $0,0950\pm 0,0002$ ), genel görelilik

kuramının etkisini de saptamak için uygun sistemlerden birisidir.

Yıldız harmonikleri kuramsal olarak her yıldızın modelinden hesaplanabilirken, gözlemsel olarak, sistemin birleşik yıldız harmoniğini birinci ve ikinci yıldızların tutulma zamanlarından bulabiliriz. EK Cep sisteminin bileşen yıldızları için sadece Claret vd. (1995) model yapmışlar, ve, kuramsal ( $0,00108 \pm 0,00010$  %/cyc) ve gözlemsel ( $0,00101 \pm 0,00015$  %/cyc) eksen dönme hızları arasında iyi bir uyum olduğunu göstermişler. Her ne kadar modellerin *içindekiler* benzer de olsa, bu çalışmayla Claret vd.'nin çalışması arasındaki önemli bir fark, *serbest* parametrelere karşı stratejilerimizde saklıdır: 1)  $\alpha$ 'yı sabit almadık ve ikinci yıldızın model yarıçapını gözlenenle çakıştırmaya çalıştık; 2) Güneş'den daha genç bir yıldızın helyum ve ağır element bollukları Güneş'inkinden daha fazla olmak zorundadır. Aynı yaş ve aynı kimyasal içeriğe sahip olması gereken bileşenlerin gözlenen ve kuramsal özelliklerinden yola çıkarak, sistemin tahmini kimyasal içeriğini ve ikinci yıldız için  $\alpha$ 'yı elde ettik.

## 2. Tutulma Zamanlarından Eksen Dönme Hızının Hesabı

Biri dışında, günümüze kadar yayınlanmış 37 tutulma zamanını kullanarak bu sistem için eksen dönme hızını bulduk. Eksen dönme hızı, Yıldız vd. (2000a)'indeki yöntemi kullanarak, ( $0,00106 \pm 0,00010$  %/cyc) olarak bulundu. Bulunan eksen dönme hızı, 42%'si görelilik kuramının katkısıdır, Claret vd.'nin bulunduğu sonuçla uyumludur. Bu eksen dönme hızı,  $4100 \pm 400$  yıl'lık eksen dönme dönemine denk gelir.

İkinci tutulma derinliği çok sığ olduğu için, kullanılan 7 ikinci tutulma verisindeki belirsizlik birincilere göre daha fazladır. Daha düşük hata ile eksen dönme hızının bulunabilmesi için daha fazla ve daha kaliteli ikinci yıldızın tutulma zamanlarına gereksinim vardır.

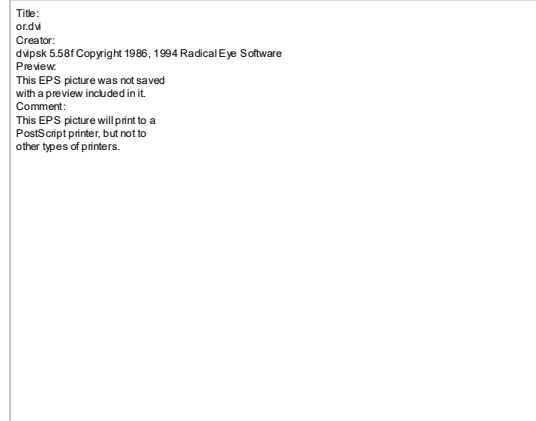
## 3. EK Cep Sistemindeki Bileşenlerin Modelleri

EK Cep sistemindeki yıldızların çekimsel büzülme, anakol öncesi ve anakol evreleri farklı kimyasal içerik ve ikinci yıldız için farklı  $\alpha$  ile çalışıldı. Modellerin ayrıntıları hakkında bilgi bu kitapçıkta bulunan, Güneş ile ilgili makalede ve orada sunulan kaynaklarda bulunabilir.

Birincil yıldız, anakol evrimi süresince konvektif bir özeğe sahip olacak kadar yeterince büyük bir kütleyle sahiptir ( $2.02 M_{\odot}$ ) ve enerji

üretimi için baskın nükleer çevrim CNO'dur. Bu yıldızın konvektif zarfı bulunmazken, ikinci bileşen  $1.12 M_{\odot}$ 'lik kütleyle sadece anakol öncesinde değil anakoldaki bütün evrimi boyunca konvektif bir zarfa sahiptir ve pp-çevrimi daha baskındır. Bu demektirki, iki yıldız niteliksel olarak birbirinden farklıdır ve herbiri YUK'un farklı kısımlarını ilgilendirmektedir.

Eğer gökada diskinde bulunan bir yıldızın kimyasal içeriği gözlemlerden tespit edilememişse, yapılacak en iyi şey, Güneş kompozisyonu ile yıldızın modelini yaparak işe başlamak. Her iki yıldız için de, Yıldız (2000b)'de sunulan Güneş modellerinden üçüncüsünün kimyasal içeriği ( $X=0,7045$ ,  $Z=0,02$  ve  $\alpha$ 'sını ( $\alpha=1.8825$ ) kullanarak elde edilen modelin evrimsel izleri Şekil 1'de sunulan HR diyagramında sunulmuştur. İlginç olan durum şu ki; anakol civarında, evrimsel olarak, birinci yıldızın ışınımgücü ve yarıçapı hiç bir zaman gözlenenler kadar düşük olmazken, ikinci yıldızın yarıçapı da anakola kıyasla oldukça fazla olmaktadır.



Şekil 1. EK Cep sistemindeki yoldaş yıldızların Güneş değerleriyle elde edilen evrimsel yollarının HR diyagramındaki izi.  
\* yıldızların gözlenen konumunu belirtmektedir.

## 3.1 Birinci Yıldız için Modeller

Birinci yıldızın gözlenen yarıçap ve ışınımgücü, Güneş değerleriyle elde edilen modelinkinden oldukça düşük olduğu için kimyasal içeriği değiştirerek uygun bir model bulmaya çalışabiliriz. Bunun için, hem sabit ağır element bolluğunda ( $Z$ ) hidrojen ( $X$ ) ve helyumun ( $Y$ ) bolluğunu değiştirerek, hem de sabit hidrojen bolluğunda ağır element ve helyum bolluğunu değiştirerek, modelin yarıçap ve ışınımgücünün  $X$  ve  $Z$ 'ye olan duyarlılığını tespit etmemiz gerekmektedir. Bu amaçla elde edilen iki ayrı modeli de kullanarak, bu duyarlılığı saptadık:

$$\left(\frac{\Delta L}{\Delta X}\right)_Z = -66,6, \quad \left(\frac{\Delta L}{\Delta Z}\right)_X = -414;$$

$$\left(\frac{\Delta R}{\Delta X}\right)_Z = 0,314, \quad \left(\frac{\Delta R}{\Delta Z}\right)_X = 11,8$$

Hidrojen bolluğu fazla olan bir model daha az olan bir başka modelden daha düşük bir merkez sıcaklığında hidrostatik dengeye ulaştığından nükleer tepkimeler göreceli olarak daha az gerçekleşmektedir ve bu nedenle ışınımgücünün X'e göre türevi eksi bir sayı olmaktadır. Işınımgücünün Z'ye göre türevinin eksi işaretli olmasının nedeni ise opasitenin Z'ye fazlaca bağımlı olmasından kaynaklanmaktadır.

Bu türevleri kullanarak, birinci yıldızın modelini gözlemlerle karşılaştırmak için gerekli olan X ve Z'yi bulabiliriz:  $X=0,765$ ,  $Z=0,0155$ . Yine birinci yıldızın özelliklerinden yola çıkarak, uygun kimyasal içeriği Claret vd.  $X=0,705$  ve  $Z=0,015$  bulurken, Gimenez ve Margrave  $X=0,80$  ve  $Z=0,02$  bolluğunu yeğlemektedirler. Her ne kadar bu değerler gözlemlerle kuramı uyumlulaştırıyor görünse de, kabul edilebilir değildirler. Çünkü, çok genç olduğunu bildiğimiz bu yıldızların, gökada diskinin evrimini gözönünde tutarak, hidrojen bolluğu Güneş'in başlangıç hidrojen bolluğundan daha az, ağır element bolluğu da daha fazla olmak durumundadır. Güneş civarında yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçta göre, Güneş'in oluşumundan bu yana helyum bolluğundaki artış ağır element bolluğundaki artışın yaklaşık dört katıdır (Tosi 1995).

### 3.2 İkinci Yıldız için Modeller

Birinci yıldız modelinin hidrojen ve ağır element bolluğuna karşı duyarlılığını tespit etmek için kullanılan kimyasal bolluklar, ikinci yıldız modeli için de kullanılarak, yarıçap ve ışınımgücünün, HR diyagramında anakoldan önceki maksimum noktasında, X ve Z'ye göre türevlerini bulduk:

$$\left(\frac{\Delta \log L_{\max}}{\Delta \log X}\right)_Z = -3,2, \quad \left(\frac{\Delta \log L_{\max}}{\Delta \log Z}\right)_X = -0,42;$$

$$\left(\frac{\Delta \log R_{\max}}{\Delta \log X}\right)_{Z,\alpha} = -0,95, \quad \left(\frac{\Delta \log R_{\max}}{\Delta \log Z}\right)_{X,\alpha} = -0,13$$

Birinci yıldızın modelini gözlemlerle uyumlu yapan kimyasal içerikle ikinci yıldız için elde

ettiğimiz model, ikinci yıldızın gözlemleri ile tutarlı olmamaktadır.

İkinci yıldızda konvektif zarfda bulunduğundan, X ve Z ile birlikte  $\alpha$ 'da bilinmeyen bir niceliktir. Güneş'den elde edilen  $\alpha$  değeriyle yapılan ikinci yıldız modelinde yarıçap çok düşük olduğu için daha küçük bir  $\alpha$ 'ya gereksinimimiz vardır. Aynı kimyasal içeriğe, fakat farklı  $\alpha$  değerlerine sahip iki ayrı modelin yine aynı noktadaki farklarından, yine ışınımgücü ve yarıçapın  $\alpha$ 'ya olan duyarlılığını bulabiliriz:

$$\left(\frac{\Delta \log R_{\max}}{\Delta \log \alpha}\right)_{X,Z} = -0,31, \quad \left(\frac{\Delta \log L_{\max}}{\Delta \log \alpha}\right)_{X,Z} = -0,1$$

$\alpha$ 'daki 0,3'lük bir azalma, en azından anakol ve yakınında etkin sıcaklıkta  $100^\circ\text{K}$ 'lik bir düşmeye neden olmaktadır. Bu durum, neden küresel kümelerdeki yıldızların yüzey sıcaklığının modellerden  $250^\circ\text{K}$  daha sıcak olduğunu açıklayabilir.

Birinci yıldızın kabul edilebilir bir kimyasal içerikli modeli gözlenen niceliklerle uyuşmadığı için, bize asıl bilgiyi ikinci yıldızın modelleri ile gözlenen nicelikleri arasındaki farklar vermektedir. Bu durumda, bulmaya çalıştığımız üç belirsiz nicelik varken (X, Z ve  $\alpha$ ), iki denklemimiz vardır:

$$L_{\text{göz}} = L_0 + \frac{\Delta L_{\max}}{\Delta X} \delta X + \frac{\Delta L_{\max}}{\Delta Z} \delta Z + \frac{\Delta L_{\max}}{\Delta \alpha} \delta \alpha,$$

$$R_{\text{göz}} = R_0 + \frac{\Delta R_{\max}}{\Delta X} \delta X + \frac{\Delta R_{\max}}{\Delta Z} \delta Z + \frac{\Delta R_{\max}}{\Delta \alpha} \delta \alpha$$

Burada,  $L_{\text{göz}}$  ve  $R_{\text{göz}}$ , sırasıyla, ikinci yıldızın gözlenen ışınımgücü ve yarıçapıyken,  $L_0$  ve  $R_0$  ise, herhangi bir modelin anakol öncesi maksimumdayken sahip olduğu ışınımgücü ve yarıçapıdır. Eğer  $L_0$  ve  $R_0$ 'ı Güneş değerleriyle elde edilen modelden alırsak,  $\delta X$ ,  $\delta Z$ ,  $\delta \alpha$  Güneş değerleri ile bu sistem arasındaki farkları belirtir.

Bilinmeyenleri çözebilmemiz için gereksinim duyduğumuz üçüncü denklemi oluştururken, hareket noktamız birinci yıldız modelinin gözlemlere kıyasla daha büyük ve daha parlak, ikinci yıldızın modelininse daha küçük ve daha sönük olmalarıdır. Bu demektirki, birinci yıldız anakoldaki ışınımgücü ve yarıçapın minimum olduğu noktaya yakın bir evrimsel süreçte olmalı, ikinci yıldızda anakol öncesi maksimum noktasına çok yakın olmalıdır. Sistemin tek bir yaşı olacağından hareketle,

$$\tau = t_1 - t_2$$

yazabiliriz. Burada,  $t_1$ , herhangi bir kimyasal içerik ile elde edilmiş birinci yıldız modelinin, çekimsel çökme evresinden anakolda ışınımgücünün minimum olduğu noktaya kadar geçen zamandır.  $t_2$  ise, aynı kimyasal içerik ve herhangi bir  $\alpha$  ile yapılan ikinci yıldız modelinin, başlangıçtan anakol öncesinde ışınımgücünün maksimum olduğu noktaya kadar geçen süredir. Doğal olarak,  $\tau=0$  olmalıdır:

$$\tau = 0 = \tau_0 + \frac{\Delta\tau}{\Delta X} \delta X + \frac{\Delta\tau}{\Delta Z} \delta Z + \frac{\Delta\tau}{\Delta\alpha} \delta\alpha$$

Birinci yıldız ile ikinci yıldız modellerinin arasındaki zamansal farkların sayısal türevleri şöyledir;

$$\left( \frac{\Delta\tau}{\Delta X} \right)_{Z,\alpha} = -4,7 \times 10^7 \text{ yıl}$$

$$\left( \frac{\Delta\tau}{\Delta Z} \right)_{X,\alpha} = 7,8 \times 10^7 \text{ yıl}$$

$$\left( \frac{\Delta\tau}{\Delta\alpha} \right)_{X,Z} = -0,2 \times 10^7 \text{ yıl}$$

Üç denklemin çözümünden elde ettiğimiz sonuç:

$$\delta X = -0,11, \quad \delta Z = 0,022, \quad \delta\alpha = -0,525$$

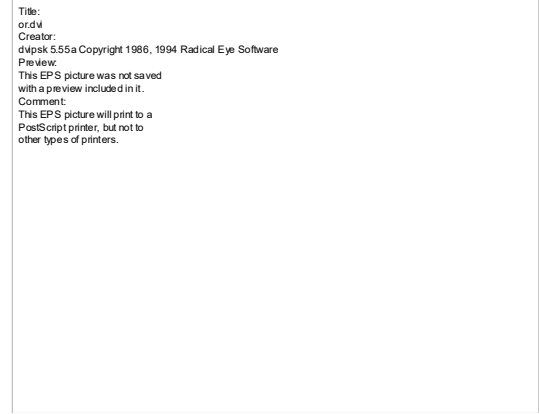
Bu değerler Güneş'e göre değişimi ifade etmektedir ve EK Cep sisteminin tahmini kimyasal içeriği ve ikinci yıldızın  $\alpha$ 'sı aşağıdaki gibidir.

$$X = 0,597, \quad Z = 0,042, \quad \alpha = 1,36$$

Elde ettiğimiz tahmini kimyasal içerikten  $\Delta Y$ 'nin  $\Delta Z$ 'ye oranını 3,8 bulmaktayız ve bu sonuç Güneş komşuluğunda gözlenen kimyasal evrimle oldukça tutarlıdır. Ayrıca, tahmini kimyasal içerik ve  $\alpha$  ile elde edilen ikinci yıldızın modeli gözlemden bilinen hem yarıçap hem de ışınımgücünü 23 milyon yıl yaşında vermektedir.

#### 4. Sonuçlar ve Değerlendirme

Şimdiye kadar olan incelememizde, ikinci bileşenin tutulma zamanındaki saçılmaların yanı sıra, eksen dönme dönemine kıyasla toplam gözlem zamanının çok kısa olmasından dolayı, eksen dönme hızını, kuramsal ve gözlemsel sonuçları birbiriyle karşılaştırma işleminde hiç hesaba katmadık. Girişimimiz, gözlenen yarıçap ve ışınımgücü için uygun kimyasal içerik ve  $\alpha$ 'yı



Şekil 2. Farklı kimyasal içerik ve konvektif parametrelerle elde edilmiş modellerden bulunan eksen dönme hızının (sadece klasik terim) zamana göre değişimi.

aramak yönünde oldu. İkinci yıldızın tahmini değerlerle elde edilen modeli gözlemlerle çok iyi bir uyum gösterirken, aynı durum birinci yıldız için geçerli olamamaktadır.

Orta halli bir elptik yörüngesi olan EK Cep sisteminde bulunan yıldızların modellerinden yıldız harmoniklerini hesaplayarak elde edilen sonucu, tutulma zamanından elde edilenle kıyaslayarak, elde ettiğimiz tahmini değerlerin isabetli olup olmadığını kontrol edebiliriz. Şekil 2'de, eksen dönme hızından görelilik kuramının etkisi çıkarıldıktan sonra arta kalan klasik terimin modellerden ve gözlemden elde edilen değerleri zamana bağlı olarak gösterilmektedir. Yatay düz çizgi klasik terimin gözlenen değerini, noktalı çizgi de hata payını belirtmek için kullanılmıştır. Şekil 2'de ilginç olan durum, birbirinden çok farklı kimyasal içerik ve  $\alpha$  ile elde edilen bütün modeller belirli zamanlarda gözlemlerle uyumlu olmaktadır. Ancak, önemli olan tek başına eksen dönme hızının değil, yıldızların özelliklerinin de aynı zamanda sağlanıyor olmasıdır. Bu koşul, en iyi tahmini değerlerle elde edilen modeller tarafından sağlanmaktadır: eksen dönme hızının klasik terimi de (★ ile işaretlenmiş noktalı çizgi) 23 milyon yıl gibi bir zamanda gözlenene eşit olmaktadır.

Birinci yıldızın modelleri, en azından çok genç olan başka sistemlerdeki benzerleri gibi (örneğin; DI Her ve GG Lup sistemlerindeki bileşenler), gözlemlerle uyumsuzluk göstermektedir. Ancak, bu durum, tuhaf kimyasal içerik varsayımları ile değil de, bu yıldızların bizim modellerde gözönünde bulundurmadığımız başka özelliklere sahip olması ile açıklanabilir; yıldızın derinlikle değişen bir dönme hızı profiline sahip olması gibi.

Konvektif parametre  $\alpha$ , yıldız kütlesi arttıkça azalma gösteriyor gibi bir sonuç çıkarmak mümkün olsa da, başka sistemlerde de incelenmelidir.

## Kaynaklar

- Claret A., Gimenez A., Martin E.L., 1995, *A&A*, **302**, 741
- Ebbighausen E.G., 1966, *AJ*, **71**, 642
- Gimenez A., Margrave T.E., 1983, *AJ*, **90**, 358
- Martin E.L., Rebolo R., 1993, *A&A*, **274**, 274
- Popper D.M., 1987, *ApJ*, **313**, L81
- Tomkin J., 1983, *ApJ*, **271**, 717
- Tosi M., 1995, *astro-ph/9512096*
- Yıldız M., 2000a, *Variable Stars as Essential Astrophysical Tools*, (ed. C. İbanoğlu), Kluwer Academic Press, p.577
- Yıldız M., 2000b, *Variable Stars as Essential Astrophysical Tools*, (ed. C. İbanoğlu), Kluwer Academic Press, p.169