


Kataklismik Değişen Yıldızlarda Madde Transferinin Bileşen Yıldızların Evrimine Etkisi

Dicle Zengin Çamurdan[★] 

Ege University, Science Faculty, Department of Astronomy and Space Sciences, 35100 Bornova, Izmir, Turkey

Accepted: April 26, 2022. Revised: April 11, 2022. Submitted: March 18, 2022.

Özet

Bileşenler arası madde transferinin gözlemlendiği ($10^{-11} - 10^{-9} M_{\odot}/\text{yıl}$) kataklismik değişen yıldızların (CV) uzun dönemli evrimi, yörünge açısal momentumunun kaybedilmesi ile sürdürülür ve bu süreç çiftin yörünge döneminde de önemli değişimlere yol açtığı gözlemlenmiştir. CV'lerin gözlemsel yörünge dönem dağılımlarının açıklamaya dayanan standart CV evrim modellerinde en çok kabul gören bozulmuş manyetik frenleme modeli açısal momentum kaybındaki ani değişimleri, kırmızı cüce bileşenin kütle transferine tepkisiyle ısısal dengesinin bozulması ile açıklamaya dayanmaktadır. Bileşenler arasındaki kütle transferi ile CV'lerin kısa yörünge dönemlerine doğru evrimi aslında ikinci bileşenin evrimsel durumu ile ilişkilidir. Diğer yönden aktarılan hidrojen zengin madde, beyaz cüce yüzeyi üzerinde birikir ve sonunda termonükleer kaçak olarak adlandırılan bir süreç ile nova patlamasına ve beyaz cücenin madde biriken atmosferinin bir kısmının atılmasına yol açar. Buna ek olarak kısa ve uzun dönemli madde toplanmasının beyaz cüce sıcaklığını etkilediği gözlemlenmiştir. Bu çalışmada CVlerdeki madde transferinin hem kırmızı cüce hem de beyaz cüce bileşen üzerindeki etkileri literatürdeki gelişmeler incelenerek ortaya konulmaya çalışılmıştır.

Abstract

The long-term evolution of cataclysmic variables (CV), which mass transfer is observed between components ($10^{-11} - 10^{-9} M_{\odot}/\text{year}$), is driven by angular momentum loss and this process leads to significant orbital period change in the system. The motivation for the development of standard CV evolution model is the need to explain the observed orbital period distribution and the recognized disrupted magnetic braking model is based on explaining a sudden change in the angular momentum loss rate indicate that the donor stars driven out of thermal equilibrium. The evolution to shorter orbital period due to the mass transfer is related with the evolutionary status of the donor star. Moreover, the hydrogen rich mass is accreted on to the white dwarf and eventually, a thermo-nuclear runaway occurs leading to a nova outburst by the ejection of most of the accumulated envelope. Additionally, the observations show that the effective temperature of white dwarf is affected by short-term and long-term mass accretion. In this study, we reviewed a comprehensive relevant recent literature in order to present the effects of the mass transfer in CVs on the red dwarf and white dwarf companion stars.

Anahtar Kelimeler: stars:binaries – stars:novae,cataclysmic variable – accretion

1 Giriş

Kataklismik değişenler (CV) genellikle bileşenlerinden birisi K yada M gibi geri tayf türünden roche lobunu doldurmuş bir yoldaş yıldızın, beyaz cüce olan baş bileşenine kütle aktardığı etkileşen yakın çift sistemlerdir (Warner 2003). CV'ler madde toplanması ve çift yıldız evrimi gibi iki temel astrofiziksel sürecin çalışıldığı kaynaklardır. Kısa yörünge dönemine sahip ($\sim 1 - 15$ sa) bu yıldızlar madde transferinin biçimi açısından göz önüne alındığında beyaz cüce bileşenin manyetik alan yoğunluğuna göre manyetik ve manyetik olmayan CV'ler olarak iki ana sınıfa ayrılabilir. Eğer beyaz cüce güçlü bir manyetik alana sahip değilse ($B \leq 10^6$ G) ikinci bileşen yıldızdan transfer edilen madde beyaz cüce etrafında bir toplanma diski oluşturur. Madde transfer miktarı çok yüksek ise disk, görsel bölgede sistemden en fazla ısıtmanın alındığı kaynak durumuna gelir. Beyaz cücenin manyetik alan yoğunluğunun çok fazla olduğu manyetik CV'lerde ($B \geq 10^7$ G) ise

madde toplanması, beyaz cücenin manyetik alan çizgilerini izleyerek, beyaz cüce üzerinde küçük bir bölge olan kutup başlığı üzerindeki toplanma kolunu yolu ile gerçekleşir (Cropper 1990). Manyetik alan yoğunluğuna bağlı olarak bazı alt türlerde disk yapısı bozulur. Bu durumda madde toplanması önce disk yolu ile, manyetik basıncın gaz basıncı geçtiği noktadan sonra manyetik alan çizgilerini izleyerek beyaz cüce üzerine yönlendiği gözlenmektedir (Meintjes 2004). CV evrim modelleri hem manyetik hem de manyetik olmayan sistemlerde bileşenler arasındaki kütle transferinin en belirgin uzun dönemli etkisinin kırmızı cüce bileşende olduğunu göstermektedir (Rappaport et al. 1983; Spruit & Ritter 1983; Livio & Pringle 1994).

Bunlara ek olarak tüm bu özelliklerinin yanında ışık eğrisindeki değişimler göz önüne alındığında CV'ler anlık parlaklık değişimleri öngörülemez biçimde hızlı değişkenlik sergileyen; cüce novalar, nova-benzeri değişenler, klasik ve tekrarlayan novalar gibi pek çok alt türe sahiptir. Patlamalı davranışların sergilendiği alt türlerdeki parlaklık değişimi aralığı oldukça fazladır. Örneğin alt türlerden biri olan cüce novalar 3–5 kadirlik bir parlaklık değişimi gösterebilmektedir. Bu

★ dicle.zengincamurdan@ege.edu.tr

yıldızlarda her bir patlama 1–10 gün kadar sürebilmekte ve ayrıca yarı-dönemli olan bu patlamalar kendini günler ve on yıllar mertebesinde tekrar edebilmektedir (Seward & Charles 2010). Klasik novalarda ise parlaklık değişimi daha keskin biçimde değişmektedir, nova öncesi ile maksimum parlaklık 6-19 kadir aralığında değişkenlik gösterebilmektedir. Gözlemler CV'lerin uzun dönemli evriminde bazılarında günler bazılarında yıllar mertebesinde değişen dönemlerde gerçekleşen patlamalar da özellikle beyaz cüce yıldız üzerinde etkili olduğu göstermektedir (Szkody et al. 2002; Gänsicke 2000; Gänsicke et al. 2009; Sion et al. 2008; Sion 2012).

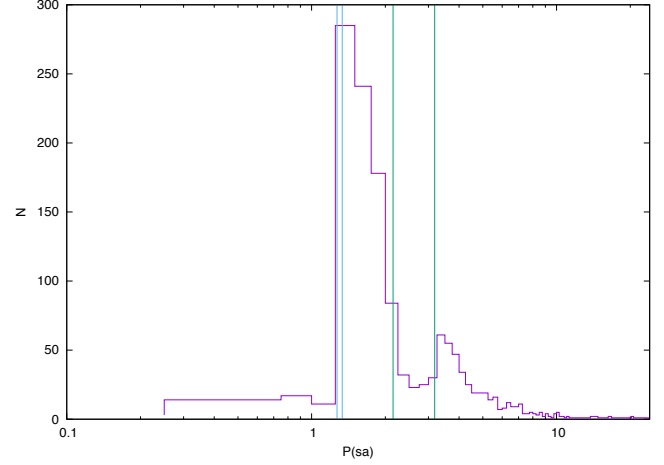
Bu çalışmada CV'lerdeki hem kırmızı cüce hem de beyaz cüce bileşen yıldızın uzun dönemli evrimleri üzerinde kütle transferi ile ilişkili olarak ortaya çıkan etkiler ve CV evrimsel süreçleri üzerine literatürdeki çalışmalar inceleyerek ortaya koymaya çalışılmıştır.

2 Katakлизмik Değişen Yıldızlarda Kütle Aktarımı ve Sistemin Tepkisi

CV'lerin iki anakol yıldızı içeren ayırık çift sistemlerden evrimleştiği önerilmektedir. CV oluşumu öncesindeki ortak zarf (CE) olarak adlandırılan süreçte dinamik olarak kararsız kütle aktarımı sonucunda daha az kütleli olan yıldız, daha kütleli olan ve daha hızlı evrimleşen yıldızın genişlemiş atmosferinde dolanır ve sonuçta yörünge açılmal momentumunun kaybı ile bir beyaz cüce ve bir anakol yıldızından oluşan CV türü bir çift sisteme dönüşür (Paczynski 1976; Taam et al. 1980). Bu sistemlerde kütle aktarımına sistemin verdiği tepkiyi anlayabilmek için öncelikle bir çift sistemin yörünge açılmal momentumunu gözönüne alındığında toplam kütle ve açılmal momentumun korunumu ($\dot{M} = 0$ ve $\dot{J} = 0$) durumunda ikinci bileşenden kütle kaybı ile bileşenler arası uzaklık ve yörünge döneminin azaldığı görülür ki bu ayırık sistemler zaman içerisinde daha kısa dönemli yarı-ayırık CV'lere doğru evrimleşirler.

Ancak katakлизмik değişenlerde kütle oranı tam tersi olarak $q < 1$ 'dir ve ikinci bileşenden madde transferi, bileşenler arası uzaklığı ve yörünge döneminin artması ile sonuçlanır. Ayrıca ikinci bileşenin Roche yarıçapındaki değişimi $\dot{M} = 0$ ve $\dot{J} = 0$ durumunda, ikinci bileşenden kütle aktarımında, $q < 5/6$ olduğunda ikinci bileşenin Roche lobunun genişlemesine yol açtığı göstermektedir (Warner 2003). Sonuç olarak bileşenler arasındaki uzaklığın artması ikinci bileşenin Roche lobundan ayrılmasına yol açar, daha fazla kütle kaybı gerçekleşemez. Aslında katakлизмik değişenleri gözlemleyebilmemiz, bileşenler arası kütle aktarımının hala gerçekleştiğinin gösterir çünkü tüm elektromanyetik tayf bölgelerinde gözlemlenen değişimler kütle aktarımı ile gerçekleşmektedir. Bu durumda bir katakлизмik değişende hangi koşullarda kararlı ve uzun süreli kütle aktarımı gerçekleşir sorusu aklımıza gelmektedir? Birinci olasılık ikinci bileşenin kırmızı dev bir yıldız evrimleşmesidir. İkinci bileşenin genişlemesi kendi Roche lobuna değmesini sağlar ve bu durum kararlı kütle aktarımına yol açar. Ancak bu olasılık çoğu katakлизмik değişeni açıklayamaz çünkü bunlar yaşam süreleri çok uzun olan, güneş kütlelerinden daha az kütleli cüce yıldızlardır.

1980'li yıllarda CV'lere ilişkin standart bir model oluşturma amacıyla yapılan bir çok çalışma çift sistemlerde evrimsel sürecin güdücü kaynağının sistemden sürekli bir açılmal momentum kaybına yol açtığını göstermiştir (Paczynski & Sienkiewicz 1981; Verbunt & Zwaan 1981; Rappaport et al. 1983; Spruit & Ritter 1983). Yörünge açılmal momentum kaybı ile çiftin yörünge boyutları küçülür ve böylece ikinci



Şekil 1. Ritter & Kolb (2011) kataloğunda yer alan 1400'den fazla katakлизмik değişen yıldızın yörünge dağılımı. Yeşil çizgiler arasında gösterilen bölge dönem boşluğunu ($2.15 \text{ sa} < P_{orb} < 3.18 \text{ sa}$: Knigge (2006)), mavi çizgiler arasındaki bölge ise minimum yörünge dönemi (80 dk, Gänsicke et al. (2009), 76.2 dk Knigge (2006)) işaret etmektedir.

bileşenin Roche lobu da küçülür ve maddenin, yeni Roche lobu boyutundan fazla olan kısmının transfer edilmesine yol açar. Sonuç olarak CV'lerde kararlı ve sürdürülebilir kütle transferi yalnızca açılmal momentum kaybı (AML) ile gerçekleşir. Bu aslında madde toplanma miktarlarının teorik olarak hesaplanmasını da sağlar ve madde toplanma miktarları açılmal momentum kaybının yörünge dönemi ile keskin bir şekilde arttığını göstermektedir (Knigge et al. 2011). Katakлизмik değişenlerde açılmal momentum kaybına yol açan iki mekanizmanın olduğu düşünülmektedir: çekimsel ışıma ve manyetik frenleme. Aslında manyetik rüzgarlar ile düşük kütleli ikinci bileşenden açılmal momentum kaybı uzun süredir bilinen bir durumdur (Weber & Davis 1967). Çekimsel ışıma ise özellikle kısa yörünge dönemli çift sistemlerde etkili olan ve AML yol açan diğer mekanizmadır. Genel olarak uzun dönemli CV'lerde ($P > 3 \text{ sa}$) manyetik frenleme, kısa dönemli ($P < 2 \text{ sa}$) CV'lerde ise çekimsel ışıma mekanizmasıyla açılmal momentum kaybı, sistemi daha küçük kütleli ve kısa yörünge dönemlerine doğru evrimleştirir. Günümüzde standart modelin CV'lerde gözlemlenen tüm özellikleri açıklamasına da en temel özelliklere bir açıklama getirebildiği görülmektedir.

2.1 Yörünge Dönem Dağılımı ve CV Evrimi

Katakлизмik değişenler sistemler hakkında en iyi belirlenebilen parametre yörünge dönemidir, Ritter & Kolb (2003) tarafından güncellenen katakлизмik değişenler kataloğunda 1400 den fazla CV yer almaktadır. Bu sistemlerin gözlemsel yörünge dönem dağılımları Şekil 1'de gösterilmektedir ve bu şekil ikinci bileşen yıldızın evrimiyle de doğrudan ilişkili olduğu belirlenmiştir. Bu aslında madde toplanma miktarlarının teorik olarak hesaplanmasını da sağlar ve madde toplanma miktarları açılmal momentum kaybının yörünge dönemi ile keskin bir şekilde arttığını göstermektedir (Knigge et al. 2011). CV'lerin evrimini açıklayan standart model çalışmaları incelendiğinde bu modelin temel gereksiniminin Şekil 1'de yer alan gözlemsel özellikleri, özellikle de 2–3 saat aralığındaki yörünge dönemine sahip CV'lerin sayısının neden az olduğunu açıklamak üzerine olduğu

görülmektedir. Evrimsel açıdan bakıldığında bir kataklizmik değişenin oluştuğu yörünge dönemi, çiftin ortak zarf evresinden çıktığı andaki kırmızı cücenin boyutu ile ilişkilidir. Eğer kırmızı cücenin boyutu, Roche lobundan küçükse kütle aktarımı gerçekleşmez ve sistem çoğu zaman pre-kataklizmik değişen (pre-CV) yada kataklizmik değişen öncesi olarak adlandırılır. Evrim modelleri sistemin uzun dönemli evrim süreci ile ilişkili bir zaman ölçeğinde manyetik frenleme ile çiftin yörünge ayrıklığının azaldığını ve sonunda ikinci bileşenin Roche lobu ile değme sağlandığında, kütle transferi başladığını önermektedir.

2.1.1 Uzun Dönemli Sistemler ($3 \text{ sa} < P_{orb} < 15 \text{ sa}$)

Kataklizmik değişen yıldızların yörünge dönem dağılımlarına bakıldığında (bkz. Şekil 1), $\sim 10 - 15 \text{ sa}$ üstünde yörünge dönemine sahip sistemlerin sayısının azaldığı görülmektedir. Bunun nedeni hızlı ve karmaşık kütle transferinden kaçınmak için ikinci bileşenin kütesinin beyaz cücenin kütesinden küçük olma gerekliliğinden kaynaklanır (Hellier 2001). Beyaz cücenin kütesi Chandrasekhar limitinin altında olması gerektiğinden, kırmızı cücenin kütesi bu sınırdan daha az değildir. Bu nedenle ikinci bileşenin kütesi de yörünge dönemi ile orantılı olarak değişir ve bu nedenle CVlerde $\sim 10 - 15 \text{ sa}$ 'lık bir dönemden sonra gözlemlenen CV sayısı hızlı biçimde azalır. Eğer bir CV yaşamına uzun bir yörünge döneminde başlamış ise (şu anda bilinen CV'leri kabaca %5'ine karşılık gelmektedir) her iki bileşen de $> 0.4 M_{\odot}$ 'den daha kütlelidir (Howell et al. 2001). Baraffe & Kolb (2000) ve Howell (2001) yaptıkları evrimsel modellerde 7 saatten uzun döneme sahip CVlerde ikinci bileşenlerin başlangıç kütleleri $> 1 M_{\odot}$ 'tir ve değme sağlanmadan önce bu yıldızlar evrimleştiğini işaret etmektedir.

2.1.2 Dönem Boşluğu ($2 \text{ sa} < P_{orb} < 3 \text{ sa}$)

CV'lerin yörünge dönem dağılımı incelendiğinde (bkz. Şekil 1) manyetik frenleme ile AML kararlı bir şekilde kısa yörünge dönemlerine evrimi açıklayabilir ancak dönem boşluğu olarak adlandırılan 2-3 sa aralığındaki sistemlerin sayısı aniden azalır. Bu aralığın altındaki sistemler ($P_{orb} < 2 \text{ sa}$) çekimsel ışına ile kütle aktarım miktarlarına sahipken ($\dot{M} \sim 10^{-10} - 10^{-11} M_{\odot}/\text{yıl}$, Patterson (1984)), dönem boşluğunun üstündeki sistemler ($P_{orb} > 3 \text{ sa}$) manyetik frenleme ile daha yüksek kütle aktarım miktarlarına sahiptir ($\dot{M} \sim 10^{-9} - 10^{-8} M_{\odot}/\text{yıl}$, Spruit & Ritter (1983)). Bu durum Rappaport et al. (1983) ve ondan bağımsız olarak Spruit & Ritter (1983) tarafından bu dönem aralığında açılmalı momentum kaybının engellenmesi (disrupted magnetic breaking) ile açıklanmaktadır. Bu modelde bir kataklizmik değişen $P_{orb} \simeq 3 \text{ sa}$ evrimleştiğinde manyetik frenleme mekanizmasının kapandığını yada engellendiğini varsayılmaktadır. Burada neden daha düşük bir kütle aktarımına doğru bir değişim yerine bir dönem boşluğu görülmektedir? Bunun nedeni kabaca ikinci bileşenin kütle aktarımı ile denge durumunun dışına çıkarılması ile ilişkili olduğu önerilmektedir (Knigge et al. 2011). İkinci bileşenin kütle transferine tepki olarak yarıçapındaki azalma ısısal zaman ölçeğinde gerçekleşir. Eğer bu zaman ölçeği madde transferi zaman ölçeğinden daha uzun ise - ki manyetik frenlemenin baskın olduğu süreçte durumun böyle olduğu varsayılmaktadır- yıldız kendini yeterince hızlı bir şekilde bu duruma adapte edemez ve kütesine göre yarıçapı çok hızlı bir şekilde artar. Ancak manyetik frenleme durduğunda (ya da engellendiğinde), ikinci bileşen Roche lobundan ayrılarak olması gereken yarıçapa küçülür ve bileşenler arası madde

transferi de son bulur. Burada manyetik frenleme durmasının neden olan şeyin ikinci bileşenin tamamıyla konvektif bir yıldız haline gelmesi olduğu düşünülmektedir ($M_2 \sim 0.2 - 0.3 M_{\odot}$). Yıldız manyetik alanlarının dinamo mekanizması ile üretildiğini bilinmektedir ve radyatif çekirdekli olanlara göre tamamıyla konvektif yıldızlarda yıldız manyetik alan özelliklerinin farklı olduğuna ilişkin teorik olarak bir çok çalışma bulunmaktadır (Reiners & Basri 2008, 2009, 2010; Donati et al. 2008; Morin et al. 2010). Güneş dinamosunun radyatif iç kısım ile konvektif zarf aralığında üretildiği düşünülmektedir (MacGregor & Charbonneau 1997; Charbonneau & MacGregor 1997). Yıldızın toplam kütesi azaldığında, yıldızın dış konveksiyon bölgesinin derinliği artar, çok küçük kütleli yıldızlarda yıldızlar tamamıyla konvektif hale gelebilirler. Tamamıyla konvektif yıldızlarda üretilen manyetik alanların, kabuk dinamosundan daha az etkin olan bir dinamo ile üretildiği düşünülmektedir (Durney & Latour 1978). McDermott & Taam (1989) çalışmasında ikinci bileşen yıldızın tamamıyla konvektif hale gelmesi ile oluşan net etki, açılmalı momentum kaybının keskin biçimde azalması olduğunu önermektedir.

Kütle aktarımının yeniden başlayabilmesi için yörünge boyutları küçülmelidir ve çekimsel ışına bu azalmayı gerçekleştirebilir böylece ikinci bileşen Roche lobu ile değmeyi sağlar. $P_{orb} \simeq 2 \text{ sa}$ yörünge döneminde değme yeniden sağlanır ve kütle aktarımı devam eder. Buradan sonra evrimsel süreçte, daha kısa yörünge dönemlerine doğru kütle transferinin çekimsel ışına ile daha düşük miktarlarda sürdürülür. Günümüzde yapılan bir çok çalışma ile 2-3 saat aralığındaki CV'lerin sayısı giderek artmaktadır ancak halen uzun ve kısa dönemli CV'lere göre sayısı oldukça azdır. Ritter & Kolb (2011) yılındaki kataloguna göre disk yolu ile toplanma gösteren sistemlerin %9'u dönem boşluğunda yer almaktadır. Ancak bu durum eğer beyaz cüce kuvvetli bir manyetik alana sahipse değişebilir. Bu durumda beyaz cücenin manyetik alan çizgileri ikinci bileşenin manyetik alan çizgileri ile eşleşir ve sistemin evrimini etkiler. Yapılan son çalışmalar manyetik sistemlerin farklı davranabileceğini işaret etmektedir (Pretorius et al. 2013; Pala et al. 2019; Belloni et al. 2020). Pretorius et al. (2013) sadece manyetik CV'lerin popülasyonu gözönüne alarak yaptığı popülasyon çalışmasında dönem boşluğunun MCV'lerde daha az belirgin olabileceğini işaret etmektedir.

2.1.3 Kısa Yörünge Dönemli Sistemler ($P_{orb} < 2 \text{ sa}$)

Dönem dağılımda kısa yörünge dönemlerine doğru gidildikçe $P_{orb} \leq 2 \text{ sa}$ saatin altındaki sistemlere sayısı ani azalır ve $P_{orb} \sim 80 \text{ dk}$ yörünge dönemi CV'lerde gözlemlenen minimum yörünge dönemidir. 80 dk ile 2 sa aralığında CV'lerin sayısı toplam CV'lerin %50 sini oluşturmaktadır. Ancak Gänsicke et al. (2009) yılında SDSS gökyüzü taraması ile keşfedilen CV'leri gözönüne aldığı çalışmasında $P_{min} \sim 80 - 86 \text{ dk}$ aralığını belirlemiştir ki bu dönem daha önce gözlenenlerden daha büyüktür. Standart model bu minimum yörünge dönemi 65-70 dk olarak belirlemiştir ancak gözlemler ile elde edilen minimum dönem daha büyüktür. Bu durum çiftin boyutlarının daha büyük olması ve ikinci bileşenin daha büyük yarıçaplı olmasını anlamına gerektirmektedir. 80 dakikalık minimum döneme yaklaşıldığında kırmızı cüce bileşenin kütesi o kadar azalır ki yozlaşmış bir yıldızdır ve standart model ikinci bileşenin bir beyaz cüce gibi davranmaya başladığını önermektedir (Paczynski & Sienkiewicz 1981). Böylece kütle transferi yozlaşmış ikinci bileşenin kütesini azalttığından, tepki olarak yörünge döneminde bir artışa neden olur. Yörünge

dönemi 100 dakikaya ulaştığında ikinci bileşenin kütlesi ($\approx 0.2M_{\odot}$) olacağı önerilmektedir. Düşük kütleli ikinci bileşen ve yörünge döneminin uzaması ile birlikte kütle transferi de hızla azalır ($P_{orb} = 100$ dk için $4 \times 10^{-12}M_{\odot}/yıl$) ve çift sönükleşir, belirlenmesi artık çok zor olur (Hellier 2001). Böylece sistemin yörünge döneminin değişimi yön değiştirerek daha uzun dönemlere doğru evrimleşir, bunlar minimum yörünge döneminin ötesine evrimleşmiş sistemler (period bouncer) olarak adlandırılmaktadır. Standart CV evrim modelinin gözlemlendiğimiz dönem dağılımı ile de uyumlu olduğu görülmekte ve son dönemlerde manyetik olmayan CV'ler için yapılan popülasyon modelleri ile CV evrimini daha da iyi anlaşılmasına başlanmıştır (Knigge et al. 2011; Kalomeni et al. 2016; Schreiber et al. 2016; Belloni et al. 2018).

2.2 İkinci bileşen yıldız

CV evriminde kütle transferinin ikinci bileşen üzerindeki uzun dönemli etkisini, standart model çerçevesinde nasıl olduğunu bir önceki bölümde incelendi. Bu sürecin ikinci bileşen yıldızın parametreleri üzerinde etkisi Baraffe & Kolb (2000) tarafından incelenmiştir. Başlangıç kütlesi $1M_{\odot}$ olan güneş bolluğundaki ve ZAMS'ta yer alan bir ikinci bileşen için yarıçap değişimi, güneş bolluğundaki ZAMS yıldızları ile karşılaştırılmıştır. Farklı miktarlardaki kütle aktarımlarının gözönüne alındığı ($10^{-9} - 10^{-7}M_{\odot}/yıl$) $M_2 > 0.6M_{\odot}$ olan yıldızlarda kütle transferinin ZAMS'daki yıldızlarla karşılaştırıldığında yıldızın yarıçapının azalmasına, $M_2 < 0.6M_{\odot}$ olan yıldızlarda ise artmasına yol açtığı belirlenmiştir. Kütle transferi arttıkça yarıçaptaki bu ayrılma daha da artar. Baraffe & Kolb (2000)'un bu çalışması ile $P_{orb} \sim 3 - 6$ sa aralığındaki CV'lerde ikinci bileşenin ısısal dengede olmama durumunun aynı kütledeki anakol yıldızları ile karşılaştırıldığında yarıçaplarının daha büyük olmasına yol açtığı gösterilmiştir. Littlefair et al. (2008) çalışmasında kısa dönemli CV'lerin ikinci bileşenlerinin yarıçaplarının Kolb & Baraffe (1999)'da yapmış olduğu modellerde önerdiği yarıçaplardan $\sim\%10$ daha büyük yarıçaplı olduğunu önermektedir. İkinci bileşenin daha büyük yarıçaplı olma durumu, daha uzun dönemli CV'lerde de karşılaşılan bir durumdur. Bu durumu açıklamak için olası iki neden önerilmektedir. Birincisi açısal momentum kaybının artması ki bu da kütle kaybını arttırarak ikinci bileşeni ısısal dengenin dışında olmaya iter (Patterson 1998; Kolb & Baraffe 1999; Willems et al. 2005), diğeri ise bu durumun ikinci bileşenin hızlı dönmesinin etkileri ile bağlantılı olarak manyetik aktivitesi ile ilişkili olabileceğidir (Chabrier et al. 2007). Daha sonraki yıllarda Knigge et al. (2011) tarafından yapılan CV evrim model çalışmalarında, standart model ve gözlemsel olarak bilinen CV'lerin ikinci bileşen yıldızlarının kütle-yarıçap ve dönem-kütle değişimi incelenmiştir. Bu çalışmada standart modelden ($f_{GR} = 1$ ve $f_{MB} = 1$, sırasıyla çekimsel ışıma ve manyetik frenleme ile açısal momentum kaybı (AML) etkisi) farklı olarak geliştirdikleri yeni CV evrim modelinde ek çekimsel ışıma ile AML eklenmiş ($f_{GR} = 2.5$) ve uzun dönemlerde etkili olan manyetik frenleme ile AML ise azaltılmıştır ($f_{MB} = 0.66$). Bu çalışmanın ortaya koyduğu temel sonuçlardan biri CV'lerdeki sistematik açısal momentum kaybının genel olarak, ikinci bileşen yıldızın ısısal zaman ölçeği ile karşılaştırılabilir bir zaman ölçeğinde gerçekleştiğinin gösterilmesidir. Ancak açısal momentum kayıp zaman ölçeğinin daha kısa olduğu durumda ikinci bileşenin ısısal dengesini yitirerek aynı kütleli tek anakol yıldızları ile karşılaştırıldığında daha büyük yarıçaplı hale geldiği belirlenmiştir. Yarıçaptaki bu artış ikinci bileşenden kütle kaybı arttıkça artmaktadır. Bu durum hem dönem boşluğunun

üstündeki hemde altındaki dönemlerdeki CV'lerde kendini göstermektedir. Bunlara ek olarak ikinci bileşen yıldızdan kütle kaybı olmasa bile Roche lobunu dolduran ikinci bileşen yıldızın çekimsel etkiler ve hızlı dönmeyle ilgili olarak ikinci bileşen yıldızın yarıçapında, aynı kütleli tek anakol yıldızları ile karşılaştırıldığında yarıçap artışına neden olduğu görülmüştür. Çünkü kısa dönemli yarı-ayrık bu çift sistemlerde ikinci bileşen yıldız, baş yıldız olan beyaz cücenin çekim etkileriyle küresel yapısı bozulmuştur. Yalnızca bu etkiler gözönüne alındığında bile CV'lerin ikinci bileşenlerinin yarıçapları dönem boşluğunun altında $\sim\%4-5$ 'lik artış, dönem boşluğunun üstünde ise $\sim\%8$ 'lik artış göstermektedir. Bir diğeri, ikinci bileşenin beyaz cüceye bakan yüzünün ısıtılması, yıldızın yarıçap artışına katkısıdır ancak bunu CV'lerde dönem boşluğunun altında $\%1-2$ den az, dönem boşluğunun üstünde ise $\%3$ 'den az olduğu işaret edilmektedir (Knigge et al. 2011).

Ancak ikinci bileşen kütle kaybına tepki olarak çift sistemin ayrıklığı arttığı düşünüldüğünde ve kütle aktarım miktarlarının çok düşük ($\dot{M} \sim 10^{-12} - 10^{-11}M_{\odot}/yıl$) olması beklenmektedir. Elbetteki bu noktada çok küçük kütleli ikinci bileşeni gözlemsel olarak belirlemek zordur çünkü optik bölgede parlak olan beyaz cüce ve toplanma diski daha baskın gelmektedir ancak sistem parlak durumda olduğu bir nova yada cüce nova patlamasında olması durumunda gözlemlenebilir. Bu dönem aralığında olduğu gözlemsel olarak belirlenen 20 aday CV bulunmaktadır. Hernández Santisteban et al. (2018) çalışmasında SDSS ve Palomar gökyüzü taraması ile elde edilen verilerde herhangi bir şekilde CV olarak sınıflaması yapılmamış ~ 2600 çift yıldız içerisinde kütle transferinin çok az olduğu beyaz cüce ve çok sönük ikinci bileşene sahip (ki bu durumda neredeyse tek beyaz cüce gibi davranan) sistemler taranmıştır. Beyaz cücenin baskın olduğu minimum yörünge döneminin ötesine evrimleşmiş bu sistemlerin 75–120 dakika aralığında olması ve düşük kütleli ikinci bileşenin yarıçapının $R_2 \sim 0.1R_{\odot}$ olması beklenmektedir. Bunların $\sim\%10$ 'unun tutulma gösteren sistem olması beklenmiştir ki bu tür sistemleri belirlemenin en iyi yolunun derin tutulmaları gözlemek olduğu düşünülmüştür. Ancak çalışma sonuçlarında böylesi herhangi bir sistem bulunamamıştır, yapılan modelleme de ise bu tür sistemlerin uzay yoğunluğunun düşük olduğunu göstermektedir ($r < 2 \times 10^{-5}pc^{-3}$). Beyaz cüce sıcaklığının ise 8000–12 000 K sıcaklık aralığında olması beklenmektedir. Kawka et al. (2021) yapmış olduğu çalışma ile birlikte şimdiye kadar belirlenen zayıf yada etkileşim göstermeyen manyetik bir beyaz cüce ve kahverengi cüce bileşenli üç sistem belirlenmiştir. SDSS J1212+0136, SDSS J1514+0744 ve SDSS J1606-1000. Bu sistemlerin ortak özellikleri ~ 90 dk yörünge dönemine sahiptirler ve beyaz cüce sıcaklıkları 10 000 K kadar olduğu belirlenmiştir. Pala et al. (2019) CV'lerdeki WD etkin sıcaklıklarının incelendiği çalışmada standart CV evrim modelinin önerdiği minimum yörünge döneminin ötesine evrimleşen CV'ler için kütle aktarım miktarları $2 \times 10^{-11}M_{\odot}/yıl$ ve karşılık gelen WD sıcaklığı 11 500 K olarak belirlenmiştir.

3 Madde transferinin beyaz cüce yıldız üzerindeki etkisi

3.1 Beyaz cüce kütlesi ile ilişkili problem

CV'lerde ikinci bileşenden kütle transferi, manyetik olmayan sistemlerde disk yoluyla, manyetik CV'lerde ise WD'nin manyetik alan çizgilerini izleyerek beyaz cüce üzerindeki toplanma kolonu yolu ile WD üzerine yığılır ve sonuçta WD'nin kütlesini arttırması beklenir. Bu noktada karakteristik kütle

toplanma miktarları ve evrimsel zaman ölçekleri ($P > 3$ sa, 10^8 yıl ve $P < 2$ sa, 10^9 yıl) göz önüne alındığında CV'lerdeki WD kütlelerinin Chandrasekhar kütle sınırına yaklaşması ve SNIa Süpernovaya dönüşmesine yol açar mı sorusu akıllara gelmektedir. Ancak klasik novalara ilişkin gözlemsel ve teorik çalışmalar, WD kütlesinin tipik bir CV yaşam sürecinde monoton olarak artmadığını göstermektedir. WD'nin kütle ve sıcaklığına bağlı olarak, $10^{-6} - 10^{-4} M_{\odot}$ /yıl kadarlık bir hidrojen toplanma katmanından sonra, yozlaşmış çekirdek sınırında patlamalı bir termonükleer reaksiyon ile yanma başlar. Ve nova patlamasıyla maddenin toplandığı katman ve merkezden gelen karıştırılan madde ile birlikte fırlatılır. Bu konudaki ilk çalışmalarda Prialnik & Kovetz (1995) yaptıkları nova simülasyonlarında, bir çok ardaşık nova çevrimi geçiren bir sistem için $10^{-9} M_{\odot}$ /yıl'dan daha az kütle transfer miktarlarında, tüm durumlarda beyaz cücesini kütlelerinin azaldığını önermektedir. Yalnızca $10^{-8} M_{\odot}$ /yıl'dan fazla kütle transfer miktarları WD kütlesine arttırılabilmektedir. Gänsicke (2000) çalışmasında tek bir nova patlaması boyunca kütle aktarım miktarının bir fonksiyonu olarak WD kütlesinin değişimi incelenmiştir. Bir CV'nin yaşam süresi boyunca bir kaç 1000 belki de 10bin nova patlaması geçirdiği düşünülürse, WD kütlesinin zamanla azalması beklenir. Ve bu açıdan düşünüldüğünde CV'ler zayıf bir SNIa tür süpernova aday olmalıdır. Ancak Gänsicke (2000) $10^{-8} M_{\odot}$ /yıl büyük kütle aktarım miktarlarında WD kütlesi zamanla artacağını önermektedir. Yine aynı çalışmada yörünge dönemine göre WD kütlesinin değişimi incelendiğinde kısa dönemli CV'lerin daha düşük kütleli WD'ler içerdiğini, tam tersine uzun dönemli CV'lerin daha büyük kütleli WD içerdiğini belirlenmiştir ve bu durumu ardaşık nova patlamalarının WD çekirdek kütlesini erozyona uğratması ile ilişkili olduğunu önermektedir. Buna ek olarak CV'lerdeki ortalama WD kütle değeri, tek WD'lerin kütleleri ile karşılaştırıldığında farklı olduğu görülmüştür. Daha önceki yıllarda yapılan çalışmalar CV'lerde ortalama WD kütlelerini $0.8 - 1.2 M_{\odot}$ (Warner 1973; Ritter 1987) aralığında yer aldığını göstermektedir. Bu değer tek WD ortalama kütleleri olan $0.6 M_{\odot}$ (Koester 1979; Liebert et al. 2005; Kepler et al. 2007) daha büyüktür.

3.2 Beyaz cüce etkin sıcaklıkları ve kütle aktarımı ile ilişkisi

CV'lerin yörünge dönem dağılımları farklı yörünge dönem aralıklarında, farklı madde transfer miktarlarına karşılık gelmektedir ve yörünge dönemi kütle toplanma miktarı ve sistemin evrim durumunu belirlemede ilk aşamada hızlı ve kolay bir tahmin yapmamızı sağlar. Ancak ortalama kütle aktarım miktarını ölçmenin en doğru yolu WD etkin sıcaklığının ölçümü ile mümkündür ki bu değer WD yüzeyinde toplanarak sıkışan maddenin ısınması ile ilişkilidir (Townesley & Bildsten 2004) ve WD zarfının ısıl zaman ölçeğinde (100–10 bin yıl) uzun dönemli kütle transferinin ölçülmesine olanak sağlar. CV'lerdeki WD'ler sistemin sıcak bileşenleri olduğundan ($T_{eff} > 10000$ K) maksimum enerjilerini UV bölgede salarlar. Bu dalgaboylarında, optik bölgeye göre bu bölgeye akan maddenin ve ikinci bileşenin katkıları azdır, bu nedenle de uzay teleskopları ile gözlemler bu noktada önem kazanmaktadır. Hubble uzay teleskobu (HST), FUSE moröte tayföçeri ve ROSAT, EXOSAT, XMM-Newton ve Chandra, Hopkins UV teleskobunda yer alan X-ışın ve uzak moröte gözlemler ile birlikte CV'ler çalışılmış ve madde toplanma sürecinden nasıl etkilendiği araştırılabilmektedir. Özellikle 3–2000 Å dalgaboyu aralığında CV'lerdeki WD,

disk ve WD yüzeyi arasındaki sınır katman ve toplanma diskleri ve rüzgarlar bu gözlemlerle belirlenebilmiştir. CV'lerdeki beyaz cüceler için uzay gözlemleri, özellikle parlak toplanma diskinin yada maddenin diske çarptığı parlak noktasının katkısının olmadığı sakin evrede yapılmaktadır. Böylece bu gözlemler ile WD'nin yüzey sıcaklığı, kütle toplanma miktarları, dönme hızı, kimyasal bolluklar belirlenebilmektedir ve ayrıca madde toplanmasının ve nükleer kaçak ile tetiklenen patlamaların zamanla WD üzerinde yarattığı atmosferik kimyasındaki değişimi, yapısında ve evrimindeki değişiklikler üzerine çalışılabilme imkanı sağlamaktadır. Bu konudaki ilk çalışmalar Szkody et al. (2002), Gänsicke et al. (2009) ve Sion et al. (2008); Sion (2012) çalışmalarıdır. Sion (2012) yapmış olduğu çalışmada CV'lerdeki WD'lerin yörünge dönemi yüzey sıcaklığının değişimi yani gözlemlenen ısınma ve soğuma durumunun evrimsel modellerle karşılaştırılarak uzun dönemli evrimi üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

3.3 Beyaz cüce etkin sıcaklıkları ve nova patlamaları ile ilişkisi

Toplanma göstermeyen beyaz cücelerden farklı olarak CV'lerdeki WD'lerin fotosferik sıcaklıkları, uzun dönemli ortalama kütle aktarımının ve nova patlamalarının etkileri ile doğrudan ilişkilidir ve bu nedenle de bu yıldızların sıcaklıkları evrimlerini anlamak açısından da oldukça önemli hale getirmektedir. Bu sıcaklıklar cüce novaların, nova benzeri sistemlerin sakin evrede ve Polar türü sistemlerin düşük kütle toplanma miktarlarını işaret eden low-state durumunda elde edilen tayflarının WD atmosfer modelleriyle fit edilmesinden elde edilmektedir. Ancak toplanma göstermeyen tek beyaz cüce sıcaklıklarından farklı olarak, CV'lerdeki WD bileşenlerinin etkin sıcaklıkları, WD kütlelerinin çok da iyi bilinmemesi ve kaynağın uzaklığındaki hatalar nedeniyle başarılı bir şekilde belirlenmemektedir. Bunlara ek olarak CV doğrultusundaki kızılilaşma, WD dışındaki çift sistemde uzakmoröte akıya katkı sağlayan belirlenememiş diğer kaynaklar ve zamanla değişim gösteren madde toplanması ile ilişkili olarak ısınma ve soğumadaki geçici değişkenlik, çiftin yörünge bakış doğrultusuna göre gerçekleşen değişimleri modelleme sırasındaki belirsizlikleri arttıran diğer faktörlerdir. Sion (2012) CV'lerdeki WD sıcaklıkları bilinen ~ 50 CV'nin (polar, cüce nova, nova benzeri) yörünge dönemi ile değişimleri incelendiğinde belli alt türlere WD sıcaklıklarının diğer türlerden belirgin şekilde birbirinden ayrıldığı görülmektedir, örneğin cüce novaların 15 000 K sıcaklığı civarında toplandığını belirlenmiştir. Bu sonuçlar daha önce Szkody et al. (2002) ve Gänsicke et al. (2005) HST ile elde edilen sonuçlarına benzer şekildedir. Manyetik ve manyetik olmayan CV'lerdeki WD sıcaklıkları kütle aktarımını sürdüren çekimsel ışma mekanizması ile belirlenen kütle kayıp miktarları ile uyumlu olacak şekilde olduğu görülmüştür. Dönem boşluğunun altındaki CV'lerdeki WD'ler, 15 000–20 000 K aralığında ve elde edilen kütle kayıp miktarları çekimsel dalgalar ile salınandan daha büyük değerlere sahip oldukları belirlenmiştir. Bunlara ek olarak aynı yörünge dönemine sahip, manyetik CV'lerdeki WD'ler, manyetik olmayan CV'lerdeki WD'lerden daha soğuk görünmektedir. Bu sonuç MCV'lerin ortalama kütle kayıp miktarlarının, manyetik olmayan sistemlerden daha az olduğunu göstermektedir. Bu durumun ikinci yıldızın manyetik rüzgarlarının baskılanması sonucunda olduğu önerilmektedir. Dönem boşluğunun üstünde, yüzey sıcaklıklarının, daha büyük kütle kayıp miktarları ile ilişkili olarak daha büyük ayrışmalar yaptığı belirlenmiştir.

Pala et al. (2017) CV'lerdeki WD etkin sıcaklıkları belirlemek için HST ile elde edilen tayf gözlemlerini kullanarak sadece manyetik olmayan 45 CV üzerine çalışmıştır. Manyetik olmayan CV'lerin seçilmesinin nedeni son dönemlerde manyetik CV'lerin, evrim yollarının manyetik frenlemenin baskınlanması ile ilişkili olarak manyetik olmayanlardan farklı olabileceğine ilişkin çalışmaların yer almasıdır (Webbink & Wickramasinghe 2002; Araujo-Betancor et al. 2005; Ferrario et al. 2015). Bu çalışmada elde edilen $T_{wd} - P_{orb}$ ve $\dot{M} - P_{orb}$ dağılımları günümüz CV populasyon modelleri ile karşılaştırıldığında dönem boşluğunun üstündeki CV'lerin WD sıcaklıkları ortalama 23 000 K, dönem boşluğunun altındaki WD sıcaklıkları ortalama 15 000 K olarak belirlenmiştir. Elde ettikleri evrimsel modeller standart CV evrim modeli ile uyumlu olarak dönem boşluğunun üstündeki kütle kayıp miktarlarının, dönem boşluğunun altındaki kütle kayıp miktarlarından on kat daha büyük olduğunu göstermektedir. Özellikle kısa dönemli CV'lerde sistemler burada da çekimsel ışımadan beklenenden daha büyük kütle transfer miktarlarını olduğunu göstermektedir. Sion (2012) sonuçlarına benzer olarak dönem boşluğunun üstündeki sistemlerin sıcaklıkları, altındaki sistemlere göre daha geniş sapsmalar göstermektedir.

Wijnen et al. (2015), hem nova çevrimleri boyunca hem de CV-öncesi dönemde ısıl zaman ölçeğindeki kütle transferi süresince beyaz cüce kütleindeki artışın CV evrimindeki etkisini incelediklerinde her ikisinin de tek WD kütleleri ile CV'lerdeki WD'lerin kütleleri arasındaki farkı açıklamada etkili olmadığını belirlemişlerdir. Bu konudaki alternatif açıklamalar sistemden ek açısal momentum kayıplarının olması ve nova patlamaları süresince asimetric kütle atımının, düşük kütleli beyaz cüceye sahip CV'lerde karasız kütle transferlerine yol açması ile de açıklanabileceği önerilmektedir. Hillman et al. (2015) yalnızca büyük kütle kayıp miktarlarına sahip büyük kütleli CV'lerdeki WD kütlelerinin arttığını önermektedir. Ancak McAllister et al. (2019) dönem boşluğuna altındaki ve üstündeki sistemlerdeki ortalama WD kütlelerini karşılaştırarak CV'lerdeki WD kütlelerinde herhangi bir artış olmadığını bulmuştur. Hillman et al. (2016) bir çok nova çevriminden sonra yarı-kararlı Helyum yanmasının, CV'lerdeki WD'nin Chandeseckhar limitine ulaşmasına yol açabileceğini önermektedir. Ancak CV'lerdeki WD'nin kütlesine ilişkin bu problemler hala tartışılmaktadır.

4 Sonuçlar

Bu çalışmada CV'lerdeki kütle transferinin hem bileşen yıldızlar hem de sistemin evrimi açısından gözlemsel ve teorik çalışmalar göz önünde bulundurularak uzun dönemli etkileri farklı bir çok çalışma ile ortaya konarak bu süreçlerin anlaşılması katkıda bulunulmaya çalışılmıştır. Ancak yine de CV'lerdeki madde transferi ile hem beyaz cüce hem de kırmızı yıldızın parametreleri üzerindeki karmaşık etkileşimleri anlayabilmek için optik bölge dışındaki tüm dalgaboyu aralıklarında ama özellikle de kırmızı öte ve yüksek enerjili UV/X-ışın bölgelerinde yapılacak yüksek duyarlılıklı tayfsal ve fotometrik gözlemlere ihtiyaç duyduğu görülmektedir. Bu tür gözlemler ile iyi analiz edilerek belirlenen yeni CV'lerden elde edilecek parametreler ile kütle, açısal momentum ve enerji transferine sistemin tepkisini anlamak açısından önemli gözlemsel veriler sağlayacaktır.

Kaynaklar

Araujo-Betancor S., Gänsicke B. T., Long K. S., Beuermann K., de Martino D., Sion E. M., Szkody P., 2005, *ApJ*, 622, 589
Baraffe I., Kolb U., 2000, *MNRAS*, 318, 354

Belloni D., Schreiber M. R., Zorotovic M., Hkiewicz K., Hurley J. R., Giersz M., Lagos F., 2018, *MNRAS*, 478, 5626
Belloni D., Schreiber M. R., Pala A. F., Gänsicke B. T., Zorotovic M., Rodrigues C. V., 2020, *MNRAS*, 491, 5717
Chabrier G., Gallardo J., Baraffe I., 2007, *A&A*, 472, L17
Charbonneau P., MacGregor K. B., 1997, *ApJ*, 486, 502
Cropper M., 1990, *Space Science Reviews*, 54, 195
Donati J. F., et al., 2008, *MNRAS*, 390, 545
Durney B. R., Latour J., 1978, *Geophysical and Astrophysical Fluid Dynamics*, 9, 241, *ADS*
Ferrario L., de Martino D., Gänsicke B. T., 2015, *Space Sci. Rev.*, 191, 111
Gänsicke B. T., 2000, *Reviews in Modern Astronomy*, 13, 151, *ADS*
Gänsicke B. T., Szkody P., Howell S. B., Sion E. M., 2005, *ApJ*, 629, 451
Gänsicke B. T., et al., 2009, *MNRAS*, 397, 2170
Hellier C., 2001, *Cataclysmic Variable Stars*. Springer
Hernández Santisteban J. V., Knigge C., Pretorius M. L., Sullivan M., Warner B., 2018, *MNRAS*, 473, 3241
Hillman Y., Prialnik D., Kovetz A., Shara M. M., 2015, *MNRAS*, 446, 1924
Hillman Y., Prialnik D., Kovetz A., Shara M. M., 2016, *ApJ*, 819, 168
Howell S. B., 2001, *PASJ*, 53, 675
Howell S. B., Nelson L. A., Rappaport S., 2001, *ApJ*, 550, 897
Kalomeni B., Nelson L., Rappaport S., Molnar M., Quintin J., Yakut K., 2016, *ApJ*, 833, 83
Kawka A., et al., 2021, *MNRAS*, 507, L30
Kepler S. O., Kleinman S. J., Nitta A., Koester D., Castanheira B. G., Giovannini O., Costa A. F. M., Althaus L., 2007, *MNRAS*, 375, 1315
Knigge C., 2006, *MNRAS*, 373, 484
Knigge C., Baraffe I., Patterson J., 2011, *ApJS*, 194, 28
Koester D., 1979, *A&A*, 72, 376, *ADS*
Kolb U., Baraffe I., 1999, *MNRAS*, 309, 1034
Liebert J., Bergeron P., Holberg J. B., 2005, *ApJS*, 156, 47
Littlefair S. P., Dhillon V. S., Marsh T. R., Gänsicke B. T., Southworth J., Baraffe I., Watson C. A., Copperwheat C., 2008, *MNRAS*, 388, 1582
Livio M., Pringle J. E., 1994, *ApJ*, 427, 956
MacGregor K. B., Charbonneau P., 1997, *ApJ*, 486, 484
McAllister M., et al., 2019, *MNRAS*, 486, 5535
McDermott P. N., Taam R. E., 1989, *ApJ*, 342, 1019
Meintjes P. J., 2004, *MNRAS*, 352, 416
Morin J., Donati J. F., Petit P., Delfosse X., Forveille T., Jardine M. M., 2010, *MNRAS*, 407, 2269
Paczynski B., 1976, in Eggleton P., Mitton S., Whelan J., eds, *Symposium sponsored by the International Astronomical Union Vol. 73, Structure and Evolution of Close Binary Systems*. p. 75
Paczynski B., Sienkiewicz R., 1981, *ApJ*, 248, L27
Pala A. F., et al., 2017, *MNRAS*, 466, 2855
Pala A. F., et al., 2019, *MNRAS*, 483, 1080
Patterson J., 1984, *ApJS*, 54, 443
Patterson J., 1998, *PASP*, 110, 1132
Pretorius M. L., Knigge C., Schwope A. D., 2013, *MNRAS*, 432, 570
Prialnik D., Kovetz A., 1995, *ApJ*, 445, 789
Rappaport S., Verbunt F., Joss P. C., 1983, *ApJ*, 275, 713
Reiners A., Basri G., 2008, *ApJ*, 684, 1390
Reiners A., Basri G., 2009, *A&A*, 496, 787
Reiners A., Basri G., 2010, *ApJ*, 710, 924
Ritter H., 1987, *Mem. Soc. Astron. Italiana*, 58, 133, *ADS*
Ritter H., Kolb U., 2003, *VizieR Online Data Catalog*, p. V/113A, *ADS*
Ritter H., Kolb U., 2011, *VizieR Online Data Catalog*, p. B/cb, *ADS*
Schreiber M. R., Zorotovic M., Wijnen T. P. G., 2016, *MNRAS*, 455, L16
Seward F. D., Charles P. A., 2010, *Exploring the X-ray Universe*. Cambridge University Press

- Sion E. M., 2012, *Journal of Astronomy and Space Sciences*, 29, 169
Sion E. M., Gänsicke B. T., Long K. S., Szkody P., Knigge C., Hubeny I., deMartino D., Godon P., 2008, *ApJ*, 681, 543
Spruit H. C., Ritter H., 1983, *A&A*, 124, 267, [ADS](#)
Szkody P., Gänsicke B. T., Sion E. M., Howell S. B., 2002, *ApJ*, 574, 950
Taam R. E., Flannery B. P., Faulkner J., 1980, *ApJ*, 239, 1017
Townsend D. M., Bildsten L., 2004, *ApJ*, 600, 390
Verbunt F., Zwaan C., 1981, *A&A*, 100, L7, [ADS](#)
Warner B., 1973, *MNRAS*, 162, 189
Warner B., 2003, *Cataclysmic Variable Stars*. Cambridge University Press, [doi:10.1017/CBO9780511586491](https://doi.org/10.1017/CBO9780511586491)
Webbink R. F., Wickramasinghe D. T., 2002, *MNRAS*, 335, 1
Weber E. J., Davis Leverett J., 1967, *ApJ*, 148, 217
Wijnen T. P. G., Zorotovic M., Schreiber M. R., 2015, *A&A*, 577, A143
Willems B., Kolb U., Sandquist E. L., Taam R. E., Dubus G., 2005, *ApJ*, 635, 1263

Access:

M22-0314: [Turkish J.A&A](#) — Vol.3, Issue 3.