

EJONS

Uluslararası Matematik, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Dergisi
International Journal on Mathematic, Engineering and Natural Sciences

Research Article

e-ISSN: 2602 - 4136

<https://doi.org/10.5281/zenodo.16877803>

V1817 Aql Örtlen Çift Yıldızının Çok renk Işık Ölçüm Analizi

Derya SÜRĞİT^{1,2}, Kubat KAYA^{1,2}, Emre TUNÇ^{1,2}, Furkan GÜNER^{1,2}

¹ Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Fen Fakültesi, Uzay Bilimleri ve Teknolojileri Bölümü, Çanakkale

² Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Astrofizik Araştırma Merkezi ve Ulupınar Gözlemevi, Çanakkale

Sorumlu Yazar Email: dsurgit@comu.edu.tr

Makale Tarihi

Geliş: 03.07.2025

Kabul: 28.07.2025

Anahtar Kelimeler

Örtlen Çift Yıldızlar,
Temel Parametreler,
V1817 Aql

Özet: Bu çalışmada V1817 Aql çift yıldızının *BVR* çok renk fotometrik gözlem verisinin analizi sunulmuştur. Sistemin fotometrik gözlem verisi 2024 gözlem sezonunda Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Astrofizik Araştırma Merkezi ve Ulupınar Gözlemevi'nde, MEADE LX200 model 30cm Cassegrain-Schmidt teleskobu ve bu teleskoba bağlı SBIG STL-1001E CCD kamera kullanılarak *BVR* filtrelerinde yapılmıştır. Sistemin *BVR* ışık eğrileri Wilson-Devinney kodu ile analiz edilmiştir. V1817 Aql'nin fotometrik kütle oranı 0.323 ± 0.006 olarak belirlenmiştir. Çift sistemin bileşenlerinin mutlak parametreleri tahmin edilmiştir. Buna göre, V1817 Aql çift sisteminin bileşenlerinin kütle ve yarıçap değerleri sırasıyla, $M_1 = 1.58 \pm 0.16 M_{\odot}$, $R_1 = 1.47 \pm 0.12 R_{\odot}$ ve $M_2 = 0.46 \pm 0.10 M_{\odot}$, $R_2 = 1.27 \pm 0.26 R_{\odot}$ olarak hesaplanmış ve bileşenlerin evrim durumu tartışılmıştır.

Multicolor Photometric Analysis of the Eclipsing Binary Star V1817 Aql

Article Info

Received: 03.07.2025

Accepted: 28.07.2025

Keywords

Eclipsing Binary
Stars,
Fundamental
Parameters,
V1817 Aql

Abstract: In this study, the analysis of the *BVR* multi-color photometric observation data of the V1817 Aql is presented. The photometric observation of the system were obtained during the 2024 observing season at the Çanakkale Onsekiz Mart University Astrophysics Research Center and Ulupınar Observatory using a MEADE LX200 model 30 cm Cassegrain-Schmidt telescope equipped with an SBIG STL-1001E CCD camera and *BVR* filters. The *BVR* light curves of the system were analyzed using the Wilson-Devinney code. The photometric mass ratio of V1817 Aql was determined to be 0.323 ± 0.006 . Accordingly, the mass and radius values of the components of the V1817 Aql binary system were derived to be $M_1 = 1.58 \pm 0.16 M_{\odot}$, $R_1 = 1.47 \pm 0.12 R_{\odot}$ and $M_2 = 0.46 \pm 0.10 M_{\odot}$, $R_2 = 1.27 \pm 0.26 R_{\odot}$ and the evolutionary status of the components has been discussed.

1. Giriş

Astrofizikte en önemli veri kaynaklarından biri olan örtlen çift yıldızlar, yıldızların kütle yarıçap vb. mutlak parametrelerin belirlenmesinde gökbilimciler için oldukça önemlidir. Örtlen çift yıldızlar üzerine yapılan çalışmalar, yıldız oluşum mekanizmaları, manyetik etkinlik, bileşenlerin kütle aktarımı veya kaybı, açısal momentum aktarımı veya kaybı ve bileşenlerin birinin veya tüm sistemin etrafında disk oluşumu mekanizmaları hakkında birçok konun aydınlanmasında oldukça önemlidir. Günümüzde gelişen teleskop ve gözlem teknikleriyle birlikte örtlen çift yıldızlar üzerine yapılan gözlem verileri, yıldız evriminin anlaşılması ve yeni teorilerin geliştirilmesinde oldukça önemlidir. Örtlen çift yıldızlar üzerine yapılan çalışmaların artmasıyla birlikte gökadaların evriminin ve yapısının bunun da ötesinde evrenin yapısının ve evriminin anlaşılmasında oldukça büyük katkı sağlayacaktır. Bu sebeple yer tabanlı fotometrik

gözlemler astrofizikçiler açısından oldukça büyük önem taşımaktadır. Bu amaç doğrultusunda bu çalışma kapsamında seçilen V1817 Aql çift yıldızının çok renk fotometrik gözlemlerinin yapılarak fiziksel parametrelerinin elde edilmesi ve evrim durumunun tartışılması hedeflenmiştir.

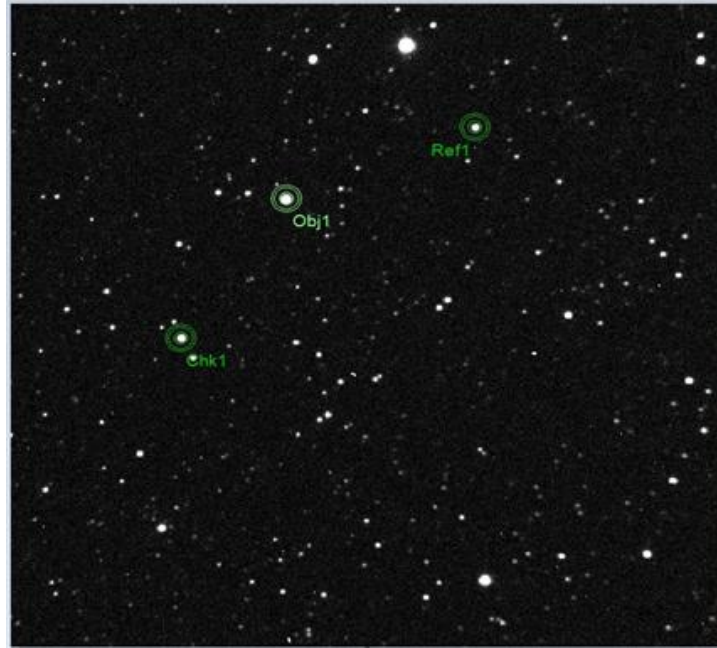
V1817 Aql (GSC 01071- 02642 = TYC 1071-2642-1, $V=9.68$ mag) ilk olarak “Henry Draper Catalogue and Extension” kataloğunda Cannon ve Pickering (1993) tarafından tayf türü A2 olarak listelenmiştir. Sistemin ilk fotometrik analizi Koppelman ve Wils (2004) tarafından yapılmış ve fiziksel parametreleri belirlenmiştir. Daha sonrasında V1817 Aql'nın içinde yer aldığı birçok çift yıldızın minimum zamanlarının belirlendiği katalog çalışması yapılmıştır (Hubscher, 2015; 2016). Sistem daha sonra ihmal edilmiş ve detaylı bir çalışma yapılmamıştır.

2. Fotometrik Gözlemler ve Veri İndirgemesi

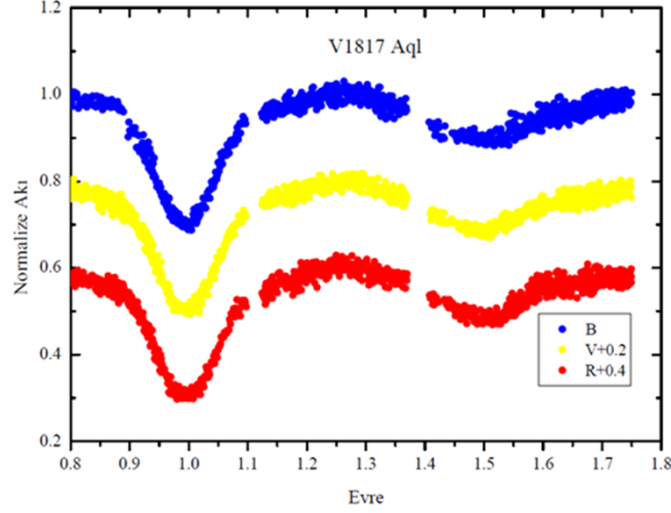
V1817 Aql çift yıldız sistemi, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Astrofizik Araştırma Merkezi ve Ulupınar Gözlemevi'nde 2024 gözlem sezonunda MEADE LX200 model 30cm Cassegrain-Schmidt teleskobu ve bu teleskoba bağlı SBIG STL-1001E CCD kamera kullanılarak *BVR* filtrelerinde fotometrik gözlemleri yapılmıştır. Gözlemlerde her gece için bias, dark ve flat görüntüsü 10'ar adet alınarak atmosferik ve elektronik etkilerden gözlem verisi arındırılmıştır. Elde edilen fotometrik gözlem verileri MaxIm DL5 yazılımı ile kalibrasyonları yapılmış ve fark fotometrisi yöntemiyle diferansiyel parlaklıklar elde edilirken mukayese ve denet yıldız olarak kameranın gördüğü alan içerisinde V1817 Aql çift yıldız sisteminin özelliklerine yakın 2 adet yıldız belirlenmiş ve bu yıldızlara ilişkin bilgiler Tablo1'de, CCD görüntüsü Şekil 1'de gösterilmiştir. 1817 Aql gözlem verilerinden elde edilen *BVR* çok renk ışık eğrisi Şekil 2'de verilmiştir.

Tablo 1. V1817 Aql çift sisteminin mukayese ve denet yıldız bilgileri

	TYC No.	RA	DEC	Parlaklık(kadir)
V1817 Aql	TYC 1071-2642-1	20 01 11.9181	+07 58 53.4564	9.68
Mukayese	TYC 1071-2369-1	20 00 54.2513	+07 56 08.0772	12.07
Denet	TYC 1071-2318-1	20 01 30.9430	+07 58 48.1482	10.58



Şekil 1. V1817 Aql yıldızına ait kalibre edilmiş CCD görüntüsü



Şekil 2. V1817 Aql'nın *BVR* filtrelerinde elde edilmiş ışık eğrileri

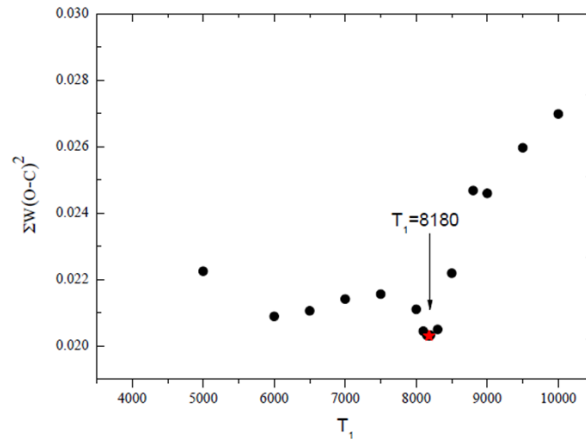
3. Fotometrik Analiz

V1817 Aql'nin 2024 gözlem sezonunda *BVR* çok renk filitrelerinde elde edilen ışık eğrileri Wilson-Devinney (W-D) yöntemi (Wilson ve Devinney, 1971) kullanılarak analiz edilmiştir. Analizin ilk aşamasında sistemin birinci bileşenin etkin sıcaklığı (T_1) farklı yöntemler kullanılarak tahmin edilmeye çalışılmıştır. İlk olarak SIMBAD veri tabanında verilen A2 tayf türüne göre Drilling ve Landolt (2000)'un anakol yıldızlarının tayf türü, renk ölçeği ve etkin sıcaklıkları kalibrasyonlarından yararlanarak birinci bileşenin etkin sıcaklığı 9000 K olarak belirlenmiştir. İkinci yöntem olarak SIMBAD veri tabanından yer alan *B* ve *V* parlaklık değerleri ve 2MASS veri tabanından alınan JHKs parlaklık değerlerine göre, Bilir ve ark. (2008)'nin ayırık çift sistemler için olan mutlak parlaklık kalibrasyonundan $(B-V)_0$ renk ölçeği değeri hesaplanarak, Pecaut ve Mamajek (2013)'ün kalibre edilmiş verilerinden sistemin sıcaklığı yaklaşık olarak 8180 K olarak belirlenmiştir. Ayrıca literatürde verilen GAIA DR2 (Gaia Collaboration, 2018) ve GAIA DR3 (Gaia Collaboration, 2023)'e göre sistemin baş bileşenin etkin sıcaklığı sırasıyla 8045 K ve 7924 K olarak kabul edilip bu farklı sıcaklık değerlerine göre çözüm arayışına gidilmiştir. Ancak sistemin literatürde belirtilen herhangi bir tayfsal çalışmasının bulunmaması ve tayf türünün bilinmemesi sebebiyle ışık eğrisi üzerinden WD yöntemi ile 5000-10000 K arasında sıcaklık taraması yapılmıştır. Özellikle de 8000 ile 8500 K arasında küçük adımlarla çözüm arayışına ve sıcaklık tahminine gidilmiştir. Artıkların karesinin ağırlıklı toplamlarının $[\Sigma W(O-C)^2]$ sıcaklığa göre değişimi sıralandığında en düşük $[\Sigma W(O-C)^2]$ sonucunu gösteren değer, birinci bileşen için çözümde sabit alınabilecek en uygun sıcaklık değerini vermiştir. Yapılan sıcaklık taraması sonuçları Şekil 3'te verilmiştir. Böylece V1817 Aql'nın baş bileşenin sıcaklığı 8180 ± 200 K olarak tahmin edilmiştir. Ayrıca Pecaut ve Mamajek (2013)'ün kalibre edilmiş verilerinden tahmin edilen sıcaklık değeri 8180 K ile uyumlu olduğu görülmüş ve bu değerinde sabit tutularak çözüm arayışına gidilmiştir. Analizler sırasında birinci bileşenin sıcaklığı, $T_1 > 7200$ K ve ikinci bileşenin sıcaklığı için $T_2 < 7200$ K olarak hesaplanmasından dolayı sistemin birinci bileşenin radyatif, ikinci bileşenin konvektif ışımaya yaptığı kabul edilmiştir. Dolayısıyla bileşenlerin çekim kararması katsayıları $g_1=1.0$, $g_2=0.32$ (Lucy, 1967) ve bolometrik albedoları $A_1=1.0$, $A_2=0.5$ (Rucinski, 1969) olarak kabul edilmiştir. Işık eğrisi analizlerinde, ikinci dereceden kenar kararma kanunu kullanılmış ve kenar kararma katsayıları Claret (2017)'den alınmıştır. Çözümlerde bileşen yıldızların çembersel bir yörüngede ($e=0$) senkronize olarak döndükleri ($F_1=F_2=1.0$) kabul edilmiştir. Analizler sırasında sistem hem MOD2 (ayırık) hem de MOD5 (yarı ayırık)'e göre çözüm yapılmış ve sistemin Algol

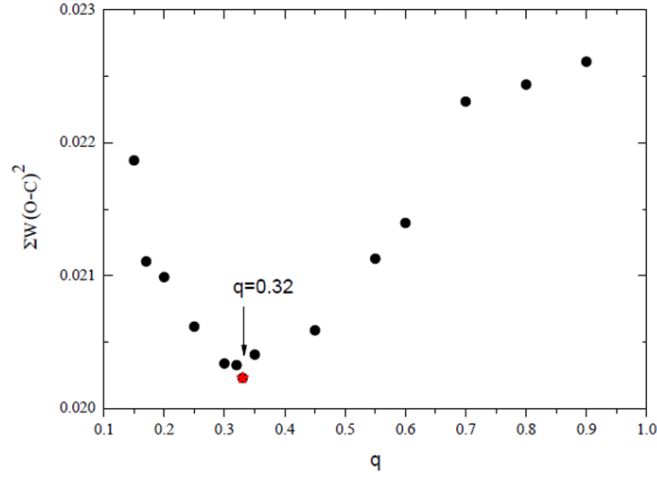
türü ayrık bir çift sistem olduğu ve MOD2'e göre en iyi çözümü verdiği görülmüştür. Analizler sırasında, evre kayması (ϕ) yörünge eğimi (i), ikinci bileşenin etkin sıcaklığı (T_2), birinci bileşenin potansiyeli (Ω_1), ikinci bileşenin potansiyeli (Ω_2), kütle oranı (q), birinci bileşenin ışıması (L_1) ve üçüncü ışık katkısı (l_3) serbest bırakılmıştır. Sistemin tayfsal kütle oranı olmadığı için çözümler sırasında ilk olarak kütle taraması yapılmıştır. Yapılan kütle taramasında çözüm fitlerinden elde edilen artıkların karelerinin toplamının $\sum(O-C)^2$ en küçük değeri için fotometrik kütle oranı belirlenmiştir. Kütle oranını değişen değerleri için çözümden elde edilen $\sum(O-C)^2$ değerlerini gösteren grafik Şekil 4'de verilmiştir. Kütle oranı $\sum(O-C)^2$ diyagramına bakıldığında, en küçük $\sum(O-C)^2$ değerine göre yaklaşık $q=0.32$ civarında en uygun değere ulaşılmıştır. Bu nedenle çözüm esnasında $q=0.32$ değerinde alınıp serbest parametre olarak bırakılmıştır. V1817 Aql'nın BVR filitrelerinde elde edilen çok renk ışık eğrileri ve çözüm sonucunda elde edilen teorik fitler ve Roche geometrisi Şekil 5'de gösterilmiştir. Ayrıca çok renk ışık eğrisinin fotometrik çözümü sonucunda elde edilen parametreler Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. V1817 Aql'nın BVR ışık eğrisi çözümünden elde edilen parametreleri

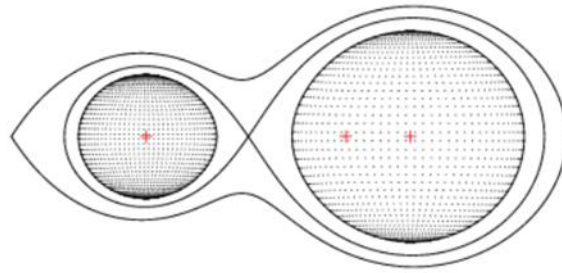
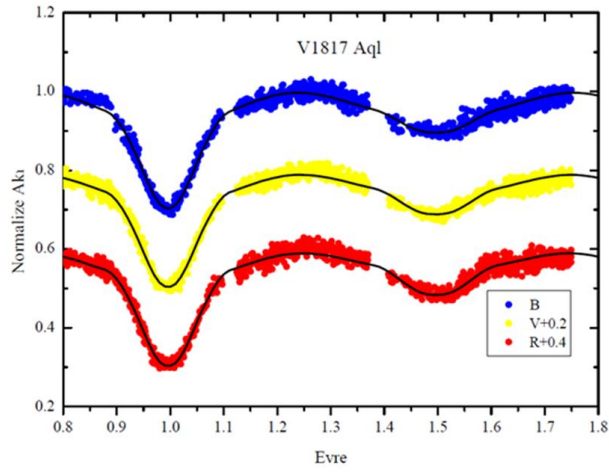
Parametre	Değer
$T_0(HJD)$	2452500.2785
$P(gün)$	0.78156381
$\Delta\phi$	-0.0038(± 0.0003)
$i(deg)$	80.38(± 0.34)
$T_1(K)$	8180
$T_2(K)$	5036(± 280)
$q_{corr}=M_2/M_1$	0.323(± 0.006)
Ω_1	2.805(± 0.014)
Ω_2	2.694(± 0.027)
$r_1(ortalama)$	0.416(± 0.017)
$r_2(ortalama)$	0.244(± 0.043)
$L_{1,B}$	0.709(± 0.233)
$L_{1,V}$	0.695(± 0.235)
$L_{1,R}$	0.703(± 0.245)
$L_{2,B}$	0.026(± 0.025)
$L_{2,V}$	0.048(± 0.025)
$L_{2,R}$	0.060(± 0.026)
$l_{3,B}$	0.264(± 0.017)
$l_{3,V}$	0.257(± 0.017)
$l_{3,R}$	0.237(± 0.018)



Şekil 3. V1817 Aql'nın sıcaklık taraması sonucu elde edilen sıcaklık (T_1) - $[\sum W(O-C)^2]$ diyagramı



Şekil 4. V1817 Aql'nın kütle taraması sonucu elde edilen kütle oranı (q) - $[\Sigma W(O-C)^2]$ diyagramı



Şekil 5. (üst panel) V1817 Aql'nın *BVR* ışık eğrileri ve teorik model fitleri. (alt panel) V1817 Aql'nın Roche geometrisi

4. Sonuçlar

Bu çalışma kapsamında seçilen V1817 Aql çift sisteminin çok renk fotometrik gözlemleri 2024 gözlem sezonu içerisinde MEADE LX200 model 30cm Cassegrain-Schmidt teleskobu ve bu teleskoba bağlı SBIG STL-1001E CCD kamera kullanılarak *BVR* filtrelerinde yapılmıştır. Sistemin elde edilen ışık eğrileri Wilson-Devinney yöntemi kullanılarak çözülmüş ve sisteme ait fotometrik model parametreleri hesaplanmıştır. V1817 Aql'nın çok renk ışık eğrilerinin çözülmesinde ilk adım olarak baş bileşenin etkin sıcaklığı belirlenmiştir. Sistemin baş bileşenin

sıcaklığının belirlenmesinde farklı yöntemler kullanılmış ve bu yöntemler detaylı bir şekilde Bölüm 3'te ayrıntılı olarak anlatılmıştır. Sistemin baş bileşeninin etkin sıcaklık tahmini yapıldıktan sonra literatürde V1817 Aql için yapılmış bir dikine hız çalışmasından belirlenen tayfsal kütle oranı bulunmadığı için ilk olarak sistem için kütle taraması yapılmıştır. Yapılan kütle taramasına göre V1817 Aql'nın kütle oranı 0.32 olarak belirlenmiş ve sistemin nihai fotometrik çözümü elde edilmiştir. Daha sonra V1817 Aql'nın Pecaut ve Mamajek (2013)'e göre tahmin edilen baş bileşeninin etkin sıcaklığı 8180 K göre kütlesi $M_1 \cong 2M_{\odot}$ olarak kabul edilerek fotometrik çözümden elde edilen kütle oranı kullanılarak sistemin ikinci bileşeninin kütlesi M_2 hesaplanmıştır. Kepler'in üçüncü yasasından yararlanarak bileşenler arası ortalama uzaklık (A) değeri elde edilmiştir. Fotometrik çözümden bulunan kesirsel yarıçaplar (r_1, r_2) kullanılarak bileşenlerin mutlak yarıçapları (R_1, R_2) bulunmuştur. Böylece bu değerlerden (kütle ve yarıçap değerleri) bileşenlerin yüzey çekim ivmeleri doğrudan hesaplanabilmiştir. Ayrıca fotometrik çözümden elde edilen etkin sıcaklık ve yarıçaplar kullanılarak; bileşenlerin bolometrik parlaklıkları (M_{bol}) ve ışıtmaları elde edilmiştir. Tablo 3'te verilen mutlak parametrelerin hesaplamasında Güneş'in etkin sıcaklığı, bolometrik düzeltmesi ve çekim ivmesi sırasıyla $T_{eff} = 5771.8(\pm 0.7)$ K, $M_{bol} = 4.7554(\pm 0.0004)$ mag, $BC = -0.107(\pm 0.02)$ mag and $g = 27423.2(\pm 7.9)$ cm/s² olarak alınmıştır (Pecaut ve Mamajek, 2013). Mutlak görsel parlaklık (M_V), bolometric düzeltme formülüyle (BC) değeri hesaplanmıştır. Burada bileşenlerin BC değerleri, Pecaut ve Mamajek (2013)'un mutlak parlaklık kalibrasyonundan bileşenlerin etkin sıcaklıklarına göre hesaplanmıştır. Son olarak fotometrik uzaklık değeri aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanmıştır:

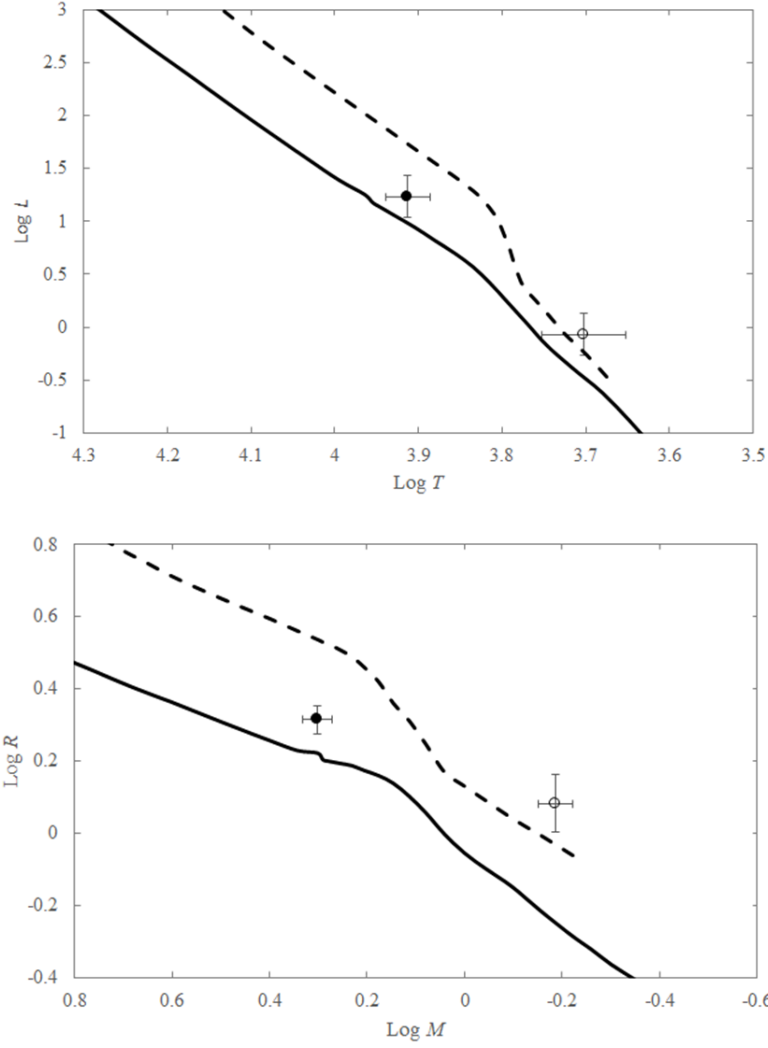
$$M_v = m_v + 5 - 5 \log(d) - A_v \quad (1)$$

Böylece V1817 Aql'nın hesaplanan mutlak parametreleri ve hataları sırasıyla Tablo 3'te verilmiştir. V1817 Aql'nın V renginde yıldızlararası renk sönümlenmesi için $A_v = 3.1 E_d (B-V)$ formülü kullanılarak yıldızlararası soğurma göz önüne alındığında, uzaklık modülünden V1817 Aql için uzaklık sırasıyla $364(\pm 4)$ pc olarak belirlenmiştir. GAIA DR3 (Gaia Collaboration, 2023) veri tabanından alınan paralaks değerine göre, V1817 Aql'nın uzaklığı 363 ± 3 pc olarak belirlenmiştir. V1817 Aql'nın hesaplanan mutlak parametrelerine göre evrim durumunu incelemek için Bressan ve ark. (2012)'nin evrim modelleri kullanıldı. Sistemin bileşen yıldızlarının $\log T - \log L$ diyagramındaki ve $\log M - \log R$ diyagramındaki konumları, sırasıyla, Şekil 6'da gösterilmektedir. Bu diyagramlara göre; V1817 Aql'nın birinci bileşeni, anakol bandı içerisinde yer alırken ikinci bileşen evrimleşmiş ve anakolu terk ettiği görülmektedir.

Tablo 3. V1817 Aql'nın mutlak parametreleri

Parameter	Birinci Bileşen	İkinci Bileşen
$M (M_{\odot})$	2.00(± 0.1)	0.65(± 0.03)
$R (R_{\odot})$	2.06(± 0.10)	1.21(± 0.22)
$A (R_{\odot})$		4.94(± 0.15)
$\log g$ (cgs)	4.11(± 0.05)	4.1(± 0.15)
T (K)	8180(± 500)	5036(± 280)
$L (L_{\odot})$	17.00(± 2.00)	0.85(± 0.24)
M_{bol} (mag)	1.67(± 0.29)	4.93(± 0.46)
M_V (mag)	1.65(± 0.29)	5.19(± 0.46)
V (mag)		9.68(± 0.02) ^a
M_V (sistem)		1.60(± 0.02)
d (pc)		364(± 4)
$d_{Gaia-DR3}$ (pc)		363 ± 3 ^b

a: SIMBAD, b: GAIA Collaboration (2023)



Şekil 6. (üst panel) V1817 Aql'nın bileşenlerinin etkin sıcaklık – ısıtma diyagramındaki konumları. (alt panel) V1817 Aql'nın bileşenlerinin kütle – yarıçap diyagramındaki konumları. V1817 Aql'in birinci ve ikinci bileşenleri sırasıyla içi dolu ve içi boş siyah daireler ile gösterilmektedir. Siyah düz çizgi ve kesikli siyah çizgiler, $Z = 0.019$ güneş metalliğinde ZAMS ve TAMS'ı temsil etmektedir.

Yazarların Katkı Beyanı

Yazarlar makaleye eşit katkıda bulduklarını, makalenin yayına hazır son halini gördüklerini/okuduklarını ve onayladıklarını beyan ederler.

Çıkar Çatışması Beyanı

Tüm yazarlar, bu çalışma için herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Teşekkür

Bu çalışma, TUBİTAK 2209 A (Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu) 1919B012318574 numarası ile desteklenmiştir.

Kaynaklar

Bilir, S., Ak, T., Soyduğan, E., Soyduğan, F., Yaz, E., Filiz A.N., Eker, Z., Demircan, O., Helvacı, M., 2008. New absolute magnitude calibrations for detached binaries. *Astronomische Nachrichten*, 329: 835.

- Bressan, A., Marigo, P., Girardi, L., Salasnich, B., DalCero, C., Rubele, S., Nanni, A., 2012. PARSEC: stellar tracks and isochrones with the padova and trieste stellar evolution code. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 427(1): 127-145.
- Brown, A.G., Vallenari, A., Prusti, T.J.D.B.J.H., De Bruijne, J.H., Babusiaux, C., Bailer-Jones, C. A., ... & Bertone, S., 2018. Gaia data release 2-summary of the contents and survey properties. *Astronomy & Astrophysics*, 616: A1.
- Cannon, A.J., Pickering, E.C., 1993. VizieR online data catalog: henry draper catalogue and extension (Cannon+ 1918-1924; ADC 1989). VizieR Online Data Catalog, 3135, III-135A.
- Claret, A., 2017. Limb and gravity-darkening coefficients for the TESS satellite at several metallicities, surface gravities, and microturbulent velocities. *Astronomy & Astrophysics*, 600: 6.
- Drilling, J.S., Landolt, A.U., Cox, A.N., 2000. Allen's Astrophysical Quantities. AIP Press/Springer, New York, USA.
- Gaia Collaboration, 2023. *Astronomy and Astrophysics*, 674, 22.
- Hubscher, J., 2015. BAV-Results of observations - Photoelectric Minima of Selected Eclipsing Binaries and Maxima of Pulsating Stars. Information Bulletin on Variable Stars, No. 6152, #1.
- Hubscher, J., 2016. BAV-Results of observations - Photoelectric Minima of Selected Eclipsing Binaries. Information Bulletin on Variable Stars, No. 6157, #1.
- Koppelman, M.D., Wils, P., 2004. New Eclipsing binary Systems: HD 189735 and HD 116274. *The Journal of the American Association of Variable Star Observers*, 32(1): 23-25.
- Lucy, L.B., 1967. Gravity-darkening for stars with convective envelopes. *Zeitschrift Für Astrophysik*, 65: 89.
- Pecaut, M.J., Mamajek, E.E., 2013. Intrinsic colors, temperatures, and bolometric corrections of pre-main-sequence stars. *Astrophysical Journal Supplement*, 208: 1-22.
- Ruciński, S.M., 1969. The proximity effects in close binary systems. II. the bolometric reflection effect for stars with deep convective envelopes. *Acta Astronomica*, 19: 245.
- SIMBAD Astronomical Database, 2025. (<http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/>), (Erişim Tarihi: 02.05.2025).
- Wilson, R.E., Devinney, R.J., 1971. Realization of accurate close-binary light curves: application to MR cygni. *Astrophysical Journal*, 166: 605.