



Çok Büyük Kütleli Yıldızların Oluşumu ve Evrimi

Dolunay Koçak¹  

¹ Ege Üniversitesi, Fen Fakültesi, Astronomi ve Uzay Bilimleri Bölümü, 35100, Bornova, İzmir, Türkiye

Accepted: December 22, 2022. Revised: December 18, 2022. Received: November 13, 2022.

Özet

Çok büyük kütleli kara delikler ve orta kütleli kara deliklerin oluşum problemlerine ek olarak küresel kümelerde görülen çoklu yıldız popülasyonlarını açıklamak için çok büyük kütleli yıldızlar kritik bir rol oynar. Bu çalışmada da özellikle küresel kümelerdeki bu farklılığı açıklamak ve küresel kümelerdeki çift sistemleri daha iyi anlamak için çok büyük kütleli yıldızların oluşumu ve evrimine ilişkin yüksek çözünürlüklü evrim modelleri elde edilmiştir. Modeller sırasında, hedef sistemlerin evrimi doğrultusunda gerekli değişiklikler ve eklemeler yapılarak MESA (Modules for Experiments in Stellar Astrophysics) evrim kodu kullanılmıştır. Sistemlerin oluşumlarında farklı başlangıç kimyasal bolluk ve farklı toplanma oranları dikkate alınmıştır. Yeni elde edilen modellerde kütle toplanma oranı olarak 0.1 M_{\odot}/y , 0.3 M_{\odot}/y , 0.5 M_{\odot}/y , 1 M_{\odot}/y değerleri kullanılmıştır. Başlangıç metal bollukları ise Güneş bolluğu cinsinden 0.1 Z_{\odot} , 0.5 Z_{\odot} ve 1 Z_{\odot} olarak ele alınmıştır. Sonuçta elde edilen çok sayıda evrim modellerinin çıktıkları ZAMS (zero-age main sequence) ve TAMS (terminal-age main sequence) arasındaki süre dikkate alınarak çok büyük kütleli yıldızların Hertzsprung-Russell (H-R), Kütle-Yarıçap (M-R), Kütle-Sıcaklık (M-T) ve Kütle-Işıtma (M-L) değişimleri elde edilmiştir.

Abstract

In addition to the formation problems of supermassive and intermediate-mass black holes, supermassive stars play a crucial role in explaining the multiple star populations exhibited in globular clusters. In this study, high-resolution evolution models of the formation and evolution of supermassive stars (SMS) were obtained to explain this difference, especially in globular clusters and to understand the binary systems in globular clusters better. During the models, MESA (Modules for Experiments in Stellar Astrophysics) evolution code was used by doing changes and additions following the purpose. Different chemical abundances and different mass accretion rates were considered during the models. In the models obtained, mass accretion rates of 0.1 M_{\odot}/y , 0.3 M_{\odot}/y , 0.5 M_{\odot}/y , and 1 M_{\odot}/y with metal abundances of 0.1 Z_{\odot} , 0.5 Z_{\odot} and 1 Z_{\odot} were used. Considering the evolution between ZAMS and TAMS, the outputs of many models, the Hertzsprung-Russell (H-R), Mass-Radius (M-R), Mass-Temperature (M-T) and Mass-Luminosity (M-L) variations of the systems, were obtained.

Anahtar Kelimeler: supermassive stars – globular clusters – multiple star populations – intermediate-mass black hole – supermassive black hole

1 Giriş

Son yıllarda yapılan çalışmalar, çok büyük kütleli yıldızların (ÇBK Y) hem orta kütleli kara deliklerin (OKKD) hem de çok büyük kütleli kara deliklerin (ÇBK KD) oluşumlarında önemli rollerinin olabileceğini ortaya koymuştur (Shibata & Shapiro 2002; Begelman 2010; Inayoshi & Omukai 2012; Ferrara ve diğ. 2014; Mezcua 2017; Reinoso ve diğ. 2018; Koçak 2023). Buna ek olarak, küresel kümelerde görülen çoklu yıldız popülasyonlarının varlığının açıklanmasında da ÇBK Y etkisi olduğu da tartışılmıştır. Modern teleskopların kullanımı ile küresel kümelere ilişkin yapılan gözlemler yıldız popülasyonlarının eş zamanlı oluşmadığını ve kimyasal olarak homojen olmadığını göstermiştir. Böylece farklı popülasyonları açıklamak için ÇBK Y sistemleri potansiyel adaylardır.

ÇBK KD'lerin ve yıldız kütleli kara deliklerinin aksine, orta kütleli kara deliklerin oluşumu ve evrimi hakkında daha az bilgiye sahibiz. Özellikle orta kütleli kara delik gözlemlerinin sınırlı sayıda olması bundaki en önemli faktördür. Bununla birlikte, gelişen uzay konulu araştırmaların (örneğin James Webb Uzay Teleskobu; JWST) (Ilie ve diğ. 2012; Wang ve diğ.

2017; Surace ve diğ. 2018; Trinca ve diğ. 2022), hem Galaktik hem de galaksi-ötesi öneme sahip bu nesnelere hakkında çok daha fazla bilgi vermesi beklenmektedir. Gözlemsel verilerin olmaması nedeniyle, son yıllarda ÇBK Y'ların oluşum ve evrimlerine ilişkin çok sayıda evrim kodu geliştirilip teorik çalışmalar yapılmıştır. Yapılan modeller ÇBK Y'ların kütlelerinin 10^2 - $10^6 M_{\odot}$ aralığında olduğunu göstermektedir (Hosokawa ve diğ. 2012; Gieles ve diğ. 2018; Haemmerlé ve diğ. 2018a; Koçak 2023). Böylece geniş aralıkta kütlelerin olmasının ana nedeni başlangıç koşullarında kabul edilen farklı kimyasal bolluk oranları ve daha önemlisi kütle toplanma oranlarının farklılık göstermesidir.

Galaksimizdeki küresel kümelerin sayısı açık kümelere oranla çok daha azdır. Küresel kümelerde yıldız sayı yoğunluğunun fazla olması her bir yıldızın ayrı ayrı gözleme ve inceleme durumunu zorlaştırmaktadır. Özellikle küresel kümelerde bulunan çift yıldız sistemleri bize küresel kümeye ilişkin bilgiler sunma potansiyeline de sahiptir (Koçak ve diğ. 2020). ÇBK Y sistemlerine ilişkin yapılacak çalışmanın sonuçları böylece çift sistemlerin kimyasal yapısını anlamamızda da etkili olacaktır. Bu çalışmada, farklı kütlelere sahip ÇBK Y'ların nasıl oluştuğunu ve evrimleştiğini incelemek için farklı kimyasal bolluk ve toplanma oranlarına sahip yeni yıldız

* dolunay.kocak@gmail.com

evrim modelleri elde edilmiştir. ÇBKY sistemlerinin evrim sırasında maddenin toplanmasının önemi vurgulanmıştır. İkinci bölümde ÇBKY sistemleri hakkında genel bilgi verilmiş ve yapılan çalışmalar belirtilmiştir. Üçüncü bölümde yapılan evrim modelleri hakkında bilgi verilmiş ve sonrasında elde edilen sonuçlar tartışılmıştır.

2 Çok Büyük Kütleli Yıldızlar

ÇBKY'lar, kütleleri 10^6 - $10^9 M_{\odot}$ aralığında olan ÇBKKD'lerin ve kütleleri 10^2 - $10^6 M_{\odot}$ aralığında değişiklikler gösteren OKKD'lerin ataları olma potansiyeli nedeniyle astrofiziksel açıdan çok önemli cisimlerdir. Bu bağlamda, farklı başlangıç koşulları altında oluşumlarına başlayan ÇBKY'lar, evrimlerinin sonunda başlangıç koşullarına bağlı olarak farklı kütlelere sahip nesnelere arda bırakırlar (Iben 1963; Chandrasekhar 1964; Rees 1984; Volonteri 2010; Woods ve diğ. 2019). Ancak ÇBKY'ların evrimlerinin hangi aşamasında hangi fiziksel parametrelere sahip bir kara delik bırakacağı halen tartışma konusudur. ÇBKY'ların doğrudan çökme modeli, ÇBKKD'lerin oluşumu için uygun senaryolardan biridir ve daha önceki çalışmalar, böylesi yıldızların oluşumunu büyük kütle toplanma oranlarına (örneğin $\dot{M} > 1 M_{\odot}/\text{y}$) sahip modeller kullanarak açıklamanın mümkün olduğunu göstermiştir (Pancino ve diğ. 2010; Geisler ve diğ. 2012; Hosokawa ve diğ. 2013; Bragaglia ve diğ. 2014; Haemmerlé ve diğ. 2019). Doğal olarak, büyük toplanma oranlarına sahip modeller, ÇBKY'ların hem anakol evrimini hem de olası son durumunu belirler. Özellikle kimyasal bolluk, kütle toplanması ve kütle kaybı gibi farklı süreçler ÇBKY'ların evriminde önemli bir rol oynamaktadır.

Bu süreçlerin dışında diğer iç yapı parametreleri, özellikle MLT de bu nesnelere evriminde önemli rol oynar. ÇBKY'ların ilk oluşum aşaması henüz tam olarak bilinmemekle birlikte, böylesi yıldızların oluşumu için kabul edilen senaryo, oluşumları sırasında, bozulmamış çok büyük gaz bulutunun etrafından maddeyi hızla toplayarak büyük bir kütleyle ulaşmaları ve evrimlerinin sonunda çekimsel ışına kararsızlığı ile bir kara delik oluşturmak için çökmeleridir (Iben 1963; Chandrasekhar 1964; Hosokawa ve diğ. 2012, 2013; Schleicher ve diğ. 2013; Latif ve diğ. 2013; Inayoshi ve diğ. 2014; Becerra ve diğ. 2015; Haemmerlé ve diğ. 2018a,b; Gieles ve diğ. 2018).

ÇBKY'lar küresel kümelerin yaşamlarında ve kimyasal evriminde de kritik bir rol oynamaktadırlar. Küresel kümelerdeki farklı popülasyonlar üzerindeki fotometrik ve tayfsal gözlemler, bunların basit yıldız popülasyonlarının aksine, çoklu yıldız popülasyonları olduklarını göstermiştir (Piotto ve diğ. 2007; Carretta ve diğ. 2010; Piotto ve diğ. 2015; Milone ve diğ. 2015; Soto ve diğ. 2017; Mészáros ve diğ. 2020). Çoklu yıldız popülasyonları olarak adlandırılan popülasyonlar (Bedin ve diğ. 2004), küresel kümelerin tayf verilerinden elde edilen N, Na, He, Al, C, O ve Mg gibi elementlerin korelasyonu ve anti-korelasyonları sayesinde çok tuhaf kimyasal özellikler sergilemektedir (Gratton ve diğ. 2001; Prantzos ve diğ. 2007; Denissenkov & Hartwick 2014; Denissenkov ve diğ. 2015; Charbonnel 2016; Prantzos ve diğ. 2017; Bastian & Lardo 2018; Gieles ve diğ. 2018). Çoklu yıldız popülasyonları, yaşlı, metalce zengin Galaktik açık bir küme dışında (NGC 6791/ Berkeley 46), yalnızca küresel kümelerde gözlenen popülasyonlardır (Pancino ve diğ. 2010; Geisler ve diğ. 2012; Bragaglia ve diğ. 2014). Tahmin edilebileceği gibi, birinci nesil yıldızlar, ilk oluştuklarında küresel kümelerin kimyasal özelliklerini içerirken, ikinci nesil yıldızlar, birinci nesil yıldızlarla kirlenmiş malzemeleri içerir. Küresel kümelerin yaşı göz önüne alındığında birinci nesil

yıldızların sayısının az olduğu ve günümüzde küresel kümelerin çoğunun ikinci nesil yıldızları içerdiği söylenebilir (Charbonnel 2016; Bastian & Lardo 2018; Martins ve diğ. 2021).

3 Çok Büyük Kütleli Yıldızların Oluşumu ve Evrim Modelleri

Yıldız evrimi çalışmaları, tek yıldızların evrimlerinde başlangıç kütlelerine ve kimyasal yapılarına güçlü bir şekilde bağlı olduklarını bize göstermiştir (Koçak ve diğ. 2021). Ayrıca, yapılan çalışmalar, yıldızın iç yapısının, karışım uzunluğuna ve soğuk yıldız rüzgarları kaynaklı kütle kaybına (Meynet ve diğ. 1994; Vink 2022) büyük ölçüde bağlı olduğunu da göstermiştir. Yıldızın oluşumu sırasında maddenin toplanma oranı, yıldızın evriminde çok kritik bir rol oynar. Bu çalışmada da gösterdiğimiz üzere ÇBKY'ların oluşumu ve evrimi, öncelikle kütle toplanma hızına, kimyasal bileşime ve ayrıca enerji ve açısal momentum aktarımı gibi yıldızın diğer iç yapısına ilişkin fiziksel süreçlere kuvvetle bağlıdır.

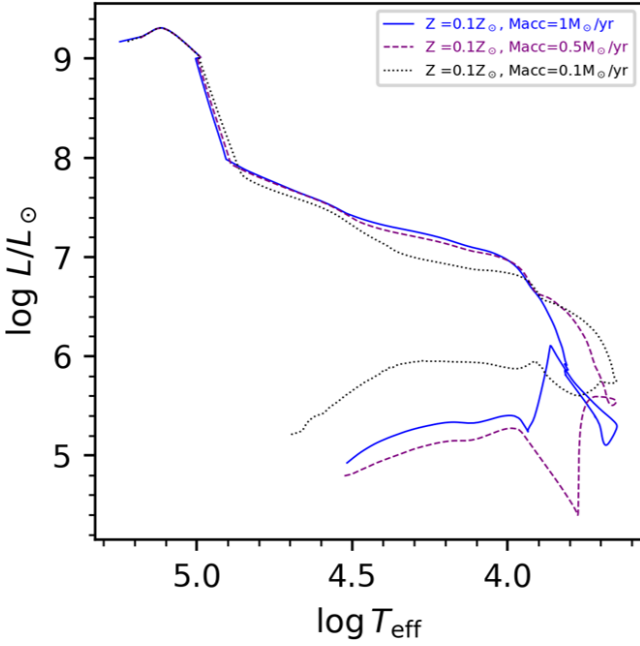
Bu çalışmada, farklı başlangıç kütleleri, kimyasal bolluklar, toplanma oranları ve farklı kütle kayıp mekanizmaları kullanılarak ZAMS ve TAMS arasında birçok model test edilmiştir. Yıldızın evrimi sırasında iç yapısında meydana gelen fiziksel süreçleri test etmenin en iyi yolu, onların sayısal modellerini yapmaktır. Bu çalışmada, MESA (Modules for Experiments in Stellar Astrophysics) yıldız evrim kodunu kullanarak ÇBKY'lara ilişkin evrim modelleri yapılmıştır (Paxton ve diğ. 2011, 2013).

Yeni elde ettiğimiz modellerde, 0.1, 0.3, 0.5, 1 M_{\odot}/y toplanma oranları ve 0.1, 0.5 ve 1 Z_{\odot} metal bollukları kullanılmıştır (Fragos ve diğ. 2023). Modellerin durma koşulunu merkezdeki hidrojen miktarının tükenmesiyle belirledik. Modellerde standart MLT kabul edildi ve "Cox" seçimi kullanıldı. "Dutch", "Vink" gibi farklı kütle kayıp mekanizmaları kullanarak yaptığımız modellere ek olarak Denklem 1'de verilen ve Gieles ve diğ. (2018) tarafından önerilen kütle kayıp oranı, MESA koduna eklenerek modeller yapıldı.

$$\dot{M}_{\text{ML}} = A \left(\frac{M_{\text{SMS}}}{100M_{\odot}} \right)^{\eta} \quad (1)$$

Çalışmada MESA evrim kodu kullanılarak farklı başlangıç koşulları altında çok sayıda evrim modeli denenmiştir. Kullanılan kütle kayıp mekanizması için 0.5, 0.75 ve 1 olmak üzere üç farklı η parametresi denenmiştir. Modellerimizde farklı kimyasal ağlar kullanılmış, bazı elementler için korelasyonlar ve anti-korelasyonlar elde edilmiştir. Kullanılan yöntemler ve seçilen mekanizmalar ile ÇBKY'lar için beklenen fiziksel ve kimyasal değerlere ulaşılmıştır.

Yapılan modeller sonucunda elde edilen veri setleri Python programı ile yazdığımız çizim rutinleri kullanılarak görselleştirilmiş ve sonuçlar Şekil 1 ve Şekil 2'de gösterilmiştir. Madde toplanma oranının yıldızın evriminde ne derece önemli olduğunu Şekil 1'de verilen H-R diyagramı göstermektedir. Elde edilen H-R diyagramında aynı kimyasal bollukta (0.1 Z_{\odot}) farklı kütle toplanma oranları (0.1 M_{\odot}/y , 0.5 M_{\odot}/y ve 1 M_{\odot}/y) kullanılmıştır. Şekil 1'de mavi düz çizgi toplanma oranının 1 M_{\odot}/y olduğu model, mor kesikli çizgi toplanma oranının 0.5 M_{\odot}/y olduğu ve son olarak noktali siyah ile gösterilen model toplanma oranının 0.1 M_{\odot}/y olan modeli göstermektedir. Elde edilen modeller sırasında yıldızla ilişkin nükleer, Kelvin-Helmholtz (K-H) ve dinamik zaman ölçekleri ve Denklem 2,3



Şekil 1. Farklı kimyasal başlangıç koşulları ve farklı madde toplanma oranı $0.1 M_{\odot}/\text{yr}$, $0.5 M_{\odot}/\text{yr}$, $1 M_{\odot}/\text{yr}$ olan modellerden elde edilen sonuçların H-R evrim diyagramında gösterimi.

ile verilen Γ_1 ve Γ_2 değerleri de hesaplanmış ve çizimleri elde edilmiştir.

$$\Gamma_1 = \left(\frac{\partial \ln P}{\partial \ln \rho} \right)_{\text{ad}} = - \left(\frac{\partial \ln P}{\partial \ln V_{\rho}} \right)_{\text{ad}} \quad (2)$$

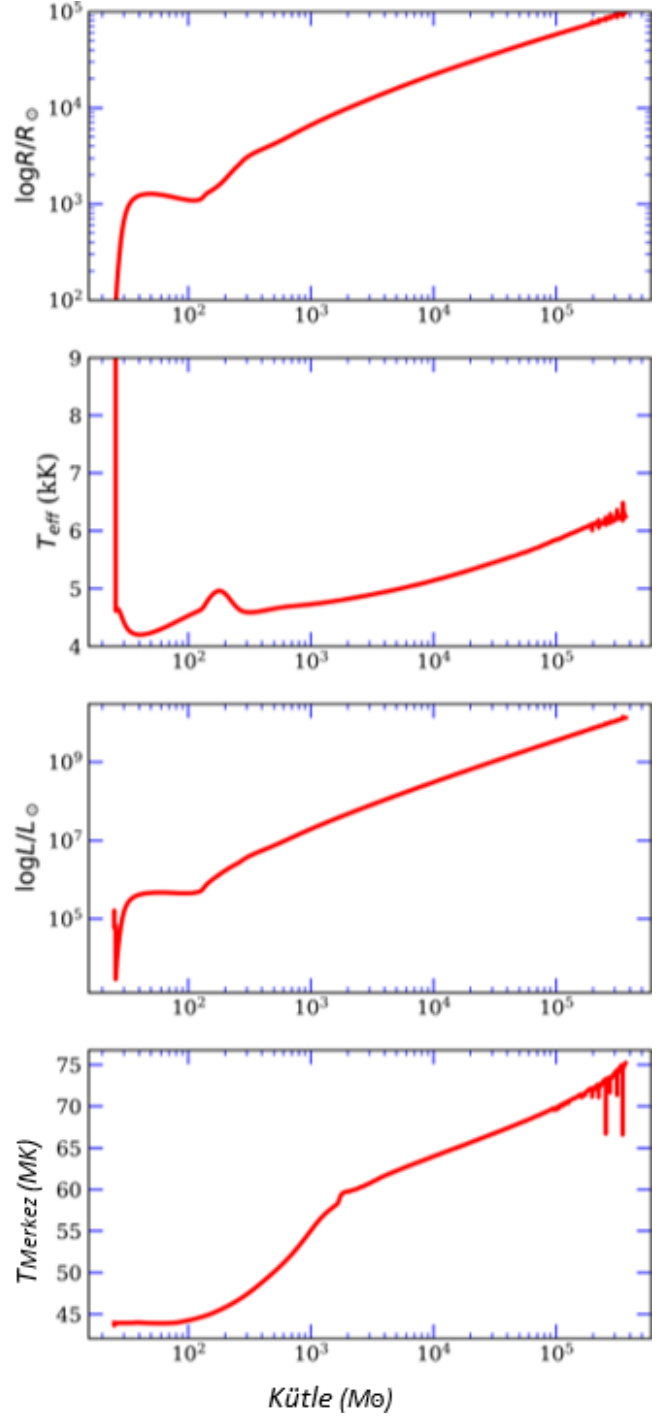
$$\Gamma_3 - 1 = \left(\frac{\partial \ln T}{\partial \ln \rho} \right)_{\text{ad}} = - \left(\frac{\partial \ln T}{\partial \ln V_{\rho}} \right)_{\text{ad}} \quad (3)$$

Denklem 2, 3 ile verilen adyabatik üsler bize yıldızın iç koşulları hakkında, birinci ve üçüncü adyabatik üsler bize basınç ve sıcaklığın nasıl etkili olduğu hakkında bilgi sunar. Bu sonuçlar doktora tez çalışmasının bir bölümü olarak detaylı bir şekilde Koçak (2023) çalışmasında sunulmuştur.

Şekil 2’de modellerin sonucunda elde edilen ÇBKY’ın sahip olduğu kütle miktarına göre yarıçap (R), yüzey sıcaklığı (T_{eff}) ışıma (L) ve merkezi sıcaklık (T_{Merkez}) değişimi gösterilmiştir. Elde edilen modeller sonucunda yıldızın yarıçapının $10^5 R_{\odot}$ civarına ulaştığı, ışımasının ise $10^5 M_{\odot}$ ’e ulaştığı saptanmıştır. ÇBKY’ın kütlelerinin $10^5 M_{\odot}$ olduğu mertebede merkezi sıcaklık 70 Milyon Kelvin (MK) üzerine çıkmaktadır. Bu sıcaklık küresel kümelerde görülen bazı element oluşumlarını açıklamak için yeterli miktarlardadır.

4 Sonuçlar ve Tartışmalar

Çok büyük kütleli yıldızların orta ve büyük kütleli kara deliklerin atası olma potansiyelinin yanısıra küresel kümelerdeki kimyasal tuhaflıkları açıklamak için iyi bir adaydır. Bu çalışmada, ÇBKKD’lerin atalarını oluşturan ve ilkel-küresel kümelerin erken evriminde önemli bir rol oynayan ÇBKY’ların MESA yıldız evrim kodunu kullanarak fiziksel ve kimyasal olarak evrimini inceledik. Çok büyük ve çok küçük kütlelerdeki madde toplanma oranlarında yıldızın modeli MESA kodu ile tamamlanamadı veya modelin bitmesi gereken zamandan çok daha önce tamamlandığı görülmüştür. Böylesi durumlarda da



Şekil 2. Yıldızın kütlelerinin, yarıçap, etkin sıcaklık, ışıma ve merkezi sıcaklığa göre değişimi.

beklenen kütle değerleri ve kimyasal element bolluk oranları elde edilemedi. En olası modelin, madde toplanma oranı $0.01 M_{\odot}/\text{yr}$ dan büyük olan modeller arasında olduğu tespit edildi. Burada tamamı verilememiş olmasına karşın elde edilen çok sayıda detaylı model sonuçları doktora tezinin bir bölümü olarak sunulmuştur (Koçak 2023).

Kütelleri $10^2 M_{\odot}$ ve $10^5 M_{\odot}$ arasında olan ÇBKY’ların evrimi ile ilgili literatürde çok sayıda çalışma olmasına rağmen

henüz gözlemler yeterince yapılamadığı için onların oluşumu ve evrimi hakkındaki bilgilerimiz sadece teorik modellere dayanmaktadır. JWST gibi yüksek çözünürlüklü teleskoplar ile elde edilecek yüksek kaliteli gözlem sonuçları, ÇBK Y'lara ilişkin henüz açıklanmamış problemlere ışık tutacaktır. Sonraki çalışmalarımızda JWST'den gelecek bulguları da eklemeyi planlamaktayız. Modellerimiz sonucunda yıldızın ulaştığı merkezi sıcaklıklarda magnezyum (Mg), alüminyum (Al) ve sodyum (Na) gibi elementlerin oluşumu göz önüne alındığında ^{26}Al elementinin bu sıcaklık civarında (75 MK) arttığı ^{24}Mg elementinin ise azaldığı tespit edilmiştir (Koçak 2023).

Teşekkür

Bu çalışma TÜBİTAK 117F188 ve 119F077 nolu projeler tarafından desteklenmektedir. TÜBİTAK 2211C, 2211A nolu burs programları ve COST CA16104 projesi desteğinden dolayı teşekkür ederim. Bilimsel ziyaret süresince desteklerinden dolayı Cenevre Gözlemevi (Université de Genève) çalışanlarına ve katkılarından dolayı Corinne Charbonnel ve Tassos Fragos'a teşekkür ederim.

Kaynaklar

- Bastian N., Lardo C., 2018, *ARA&A*, 56, 83
 Becerra F., Greif T. H., Springel V., Hernquist L. E., 2015, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 446, 2380
 Bedin L. R., Piotto G., Anderson J., Cassisi S., King I. R., Momany Y., Carraro G., 2004, *ApJ*, 605, L125
 Begelman M. C., 2010, *MNRAS*, 402, 673
 Bragaglia A., Sneden C., Carretta E., Gratton R. G., Lucatello S., Bernath P. F., Brooke J. S. A., Ram R. S., 2014, *ApJ*, 796, 68
 Carretta E., Bragaglia A., Gratton R. G., Recio-Blanco A., Lucatello S., D'Orazi V., Cassisi S., 2010, *A&A*, 516, A55
 Chandrasekhar S., 1964, *ApJ*, 140, 417
 Charbonnel C., 2016, in EAS Publications Series. pp 177–226 ([arXiv:1611.08855](https://arxiv.org/abs/1611.08855)), doi:10.1051/eas/1680006
 Denissenkov P. A., Hartwick F. D. A., 2014, *MNRAS*, 437, L21
 Denissenkov P. A., Vandenberg D. A., Hartwick F. D. A., Herwig F., Weiss A., Paxton B., 2015, *MNRAS*, 448, 3314
 Ferrara A., Salvadori S., Yue B., Schleicher D., 2014, *MNRAS*, 443, 2410
 Fragos T., ve diğ., 2023, *ApJS*, 264, 45
 Geisler D., Villanova S., Carraro G., Pilachowski C., Cummings J., Johnson C. I., Bresolin F., 2012, *ApJ*, 756, L40
 Gieles M., ve diğ., 2018, *MNRAS*, 478, 2461
 Gratton R. G., ve diğ., 2001, *A&A*, 369, 87
 Haemmerlé L., Woods T. E., Klessen R. S., Heger A., Whalen D. J., 2018a, *ApJ*, 853, L3
 Haemmerlé L., Woods T. E., Klessen R. S., Heger A., Whalen D. J., 2018b, *ApJ*, 853, L3
 Haemmerlé L., Meynet G., Mayer L., Klessen R. S., Woods T. E., Heger A., 2019, *A&A*, 632, L2
 Hosokawa T., Omukai K., Yorke H. W., 2012, *ApJ*, 756, 93
 Hosokawa T., Yorke H. W., Inayoshi K., Omukai K., Yoshida N., 2013, *ApJ*, 778, 178
 Iben Icko J., 1963, *ApJ*, 138, 1090
 Ilie C., Freese K., Valluri M., Iliev I. T., Shapiro P. R., 2012, *MNRAS*, 422, 2164
 Inayoshi K., Omukai K., 2012, *MNRAS*, 422, 2539
 Inayoshi K., Omukai K., Tasker E., 2014, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 445, L109
 Koçak D., 2023, PhD thesis, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi
 Koçak D., İçli T., Yakut K., 2020, *Contributions of the Astronomical Observatory Skalnaté Pleso*, 50, 508

- Koçak D., Yakut K., Southworth J., Eggleton P. P., İçli T., Tout C. A., Bloemen S., 2021, *ApJ*, 910, 111
 Latif M. A., Schleicher D. R. G., Schmidt W., Niemeyer J. C., 2013, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 436, 2989
 Martins F., Chantreau W., Charbonnel C., 2021, preprint, ([arXiv:2104.13988](https://arxiv.org/abs/2104.13988)), ADS
 Mészáros S., ve diğ., 2020, *MNRAS*, 492, 1641
 Meynet G., Maeder A., Schaller G., Schaerer D., Charbonnel C., 1994, *A&AS*, 103, 97, ADS
 Mezcuca M., 2017, *International Journal of Modern Physics D*, 26, 1730021
 Milone A. P., ve diğ., 2015, *ApJ*, 808, 51
 Pancino E., Rejkuba M., Zoccali M., Carrera R., 2010, *A&A*, 524, A44
 Paxton B., Bildsten L., Dotter A., Herwig F., Lesaffre P., Timmes F., 2011, *ApJS*, 192, 3
 Paxton B., ve diğ., 2013, *ApJS*, 208, 4
 Piotto G., ve diğ., 2007, *ApJ*, 661, L53
 Piotto G., ve diğ., 2015, *AJ*, 149, 91
 Prantzos N., Charbonnel C., Iliadis C., 2007, *A&A*, 470, 179
 Prantzos N., Charbonnel C., Iliadis C., 2017, *A&A*, 608, A28
 Rees M. J., 1984, *ARA&A*, 22, 471
 Reinoso B., Schleicher D. R. G., Fellhauer M., Klessen R. S., Boekholt T. C. N., 2018, *A&A*, 614, A14
 Schleicher D. R. G., Palla F., Ferrara A., Galli D., Latif M., 2013, *A&A*, 558, A59
 Shibata M., Shapiro S. L., 2002, *ApJ*, 572, L39
 Soto M., ve diğ., 2017, *AJ*, 153, 19
 Surace M., ve diğ., 2018, *ApJ*, 869, L39
 Trinca A., Schneider R., Maiolino R., Valiante R., Graziani L., Volonteri M., 2022, preprint, ([arXiv:2211.01389](https://arxiv.org/abs/2211.01389)), ADS
 Vink J. S., 2022, *ARA&A*, 60, 203
 Volonteri M., 2010, *A&ARv*, 18, 279
 Wang L., ve diğ., 2017, preprint, ([arXiv:1710.07005](https://arxiv.org/abs/1710.07005)), ADS
 Woods T. E., ve diğ., 2019, *Publ. Astron. Soc. Australia*, 36, e027
 Çokluk K. A., Koçak D., İçli T., Karaköse S., Üstündağ S., Yakut K., 2019, *MNRAS*, 488, 4520

Access:

M23-0362: *Turkish J.A&A* — Vol.4, Issue 3.