

# Çok Büyük Kütleli Yıldızların Galaktik ve Küresel Kümelerdeki Kimyasal Yapıya Etkisi

Dolunay Koçak<sup>1,2</sup>  

<sup>1</sup> Ege Üniversitesi, Fen Fakültesi, Astronomi ve Uzay Bilimleri Bölümü, 35100, Bornova, İzmir, Türkiye

<sup>2</sup> Institute of Astronomy, University of Cambridge, Madingley Road, Cambridge CB3 0HA, UK

Accepted: March 17, 2025. Revised: March 17, 2025. Received: December 7, 2024.

## Özet

Çok büyük kütleli yıldızlar (ÇBK Y); orta kütleli kara deliklerin oluşumu, ağır elementlerin oluşumu, küresel kümelerde görülen çoklu popülasyonların açıklanması, galaksilerin kimyasal yapısının değişmesi, büyük kütleli yıldız evriminin kuramsal olarak anlaşılması, erken evrende büyük yapıların ve galaksilerin oluşumunun açıklanmasında önemli rol oynar. Bu çalışmada, MESA (Modules for Experiments in Stellar Astrophysics) yıldız evrim kodu kullanılarak, farklı başlangıç koşulları altında ÇBK Y'lerin oluşum ve evrimi üzerine modeller oluşturulmuştur. Elde edilen modellerde kütle toplanma miktarı  $0.03 M_{\odot} \text{ yıl}^{-1}$ , başlangıç metal bolluğu ise  $0.1 Z_{\odot}$  olarak kullanılmıştır. Oluşturulan modellerde, küresel kümelerde gözlemlenen çoklu popülasyonların kaynağı olduğu düşünülen çok büyük kütleli yıldızların merkezlerinde hidrojen yakma sürecinde, farklı başlangıç koşulları altında hangi elementlerin oluşabileceği incelenmiştir. Çalışmada hidrojen (H), helyum (He), karbon (C), azot (N), oksijen (O), neon (Ne), sodyum (Na), magnezyum (Mg) ve alüminyum (Al) elementlerinin zamanla nasıl evrimleştiği kuramsal olarak ele alınmıştır.

## Abstract

Super-massive stars (SMS) play an important role in the formation of intermediate-mass black holes, the formation of heavy elements, the explanation of multi-populations in globular clusters, the chemical structure of galaxies, the theoretical understanding of the evolution of massive stars, and the formation of massive structures and galaxies in the early Universe. In this study, the Modules for Experiments in Stellar Astrophysics (MESA) stellar evolution code was used to construct models of the formation and evolution of SMSs under different initial conditions. The models used a mass accretion rate of  $0.03 M_{\odot} \text{ yıl}^{-1}$  and an initial metallicity of  $0.1 Z_{\odot}$ . The models constructed investigate which elements can be formed under different initial conditions in the process of hydrogen burning in the cores of super massive stars, which is thought to be the source of the multiple populations observed in globular clusters. The study theoretically analyses the evolution of the elements Hydrogen (H), Helium (He), Carbon (C), Nitrogen (N), Oxygen (O), Neon (Ne), Sodium (Na), Magnesium (Mg) and Aluminium (Al) over time.

**Anahtar Kelimeler:** Supermassive stars – globular clusters – multiple stellar populations – intermediate-mass black hole

## 1 Giriş

Çok büyük kütleli yıldızlar (ÇBK Y), galaksilerin kimyasal evriminde ve küresel kümelerdeki çoklu yıldız popülasyonlarının oluşumunda önemli rol oynamaktadır. Bu yıldızlar,  $10^2 - 10^6 M_{\odot}$  arasında değişen kütleleriyle, galaksilerdeki element üretimi, dağılımı ve evrimini şekillendiren önemli süreçlere katkı sağlamaktadır. Küresel kümelerde gözlenen çoklu popülasyonların kaynağında, özellikle ÇBK Y'lerin belirleyici bir rol oynadığı düşünülmektedir (Bastian & Lardo 2018a). ÇBK Y'ler, evrimsel süreçleri boyunca, süpernova patlamaları ve yıldız rüzgarları gibi yüksek enerjili olaylar aracılığıyla ağır elementlerin üretilip ortama yayılmasına olanak tanır (Meynet ve diğ. 2006). Bu mekanizmalar, yalnızca küresel kümelerdeki kimyasal bileşimi değil, aynı zamanda galaksilerin geniş ölçekli kimyasal evrimini de etkilemektedir.

ÇBK Y'lar, evrimlerinin başlangıç aşamalarında çevrelerini yoğun ışınlam ve yıldız rüzgarları ile zenginleştirirken, son evrelerinde süpernova patlamaları yoluyla nükleer sentezden elde edilen ağır elementlerin çoğunu serbest bırakırlar.

Bu elementler, yeni yıldızların, gezegenlerin ve diğer gök cisimlerinin yapı taşlarını oluşturur. Küresel kümelerdeki çoklu popülasyonlar, ilk nesil yıldızların patlamalarıyla salınan bu elementlerin, sonraki nesil yıldızlarının kimyasal bileşimlerini nasıl şekillendirdiğine dair kritik bilgiler sunar (Decressin ve diğ. 2010; Prantzos ve diğ. 2007). Bu bağlamda, küresel kümelerdeki çoklu popülasyonların varlığı, bu kümelerdeki yıldız evriminin eş zamanlı oluşmadığı ve kimyasal olarak homojen olmadığına göstergesi olarak kabul edilmektedir. James Webb Uzay Teleskobu (James Webb Space Telescope, JWST) ve benzeri özellikteki teleskopların sağladığı yüksek çözünürlüklü gözlemler ÇBK Y'lerin oluşum ve evrimlerinin araştırılmasında büyük önem taşımaktadır (Surace ve diğ. 2018). JWST, özellikle metalce fakir yıldızlar ve erken evrenin kimyasal izlerini gözlemleyerek, ÇBK Y'ların evrimi ve küresel kümelerdeki çoklu popülasyon oluşumu üzerindeki etkilerini daha derinlemesine incelemeye olanak tanıyacaktır. Bu tür gözlemler, küresel kümelerin yıldız oluşum süreçleri ve kimyasal evrimdeki rollerine ilişkin mevcut kuramları test edilmesini sağlayarak astrofizik kilit sorularına ışık tutması beklenmektedir.

\* E-Posta: dolunay.kocak@gmail.com

## 2 Küresel Kümelerdeki Çoklu Popülasyonlar

Küresel kümeler, galaksilerin ve evrenin oluşumu, kimyasal zenginleşme süreçleri ve dinamik yapıları hakkında kritik bilgiler sunmaları nedeniyle astrofizikte önemli bir role sahiptir. Özellikle, evrenin ilk birkaç milyar yılı ve sonrasında oluşmaları, erken evren koşullarında yıldız oluşum süreçlerini anlamamıza ışık tutma potansiyelleri bulunmaktadır. Bu yıldız kümeleri, evrenin erken dönemlerine ait kimyasal izleri taşıyan metalce fakir yıldız popülasyonlarına sahip olmaları nedeniyle, evrenin başlangıcındaki nükleosentez süreçleri ve kimyasal evrimin izlerini taşıyan kaynaklardır (Bastian & Lardo 2018a; Gratton ve diğ. 2012a). JWST gibi gelişmiş uzay temelli gözlem araçları, küresel kümelerdeki olası çok büyük kütleli yıldızların çevresel etkilerini ve bu yıldızların kümenin kimyasal yapısına katkılarını inceleme fırsatı sunar. Özellikle JWST'nin geniş kızılötesi gözlem kapasitesi, ÇBK'Y'lerin kısa ömürleri boyunca çevrelerindeki gaz ve toz ortamını nasıl etkilediklerini ve bu süreçlerin küresel kümenin genel kimyasal evrimine nasıl katkı sağladığını anlamamıza olanak tanıyabilir (Denissenkov & Hartwick 2014; Gardner ve diğ. 2006). Bunun yanı sıra, JWST'nin metalce fakir yıldızları ve erken dönem kimyasal izleri doğrudan gözlemele yeteneği, galaksilerin kimyasal zenginleşme süreçlerini ve çoklu popülasyon oluşum teorilerini test etmek için kritik bilgiler sağlayacaktır.

Küresel kümelerin homojen bir yapıya sahip olduğu ve tüm yıldızlarının tek bir yıldız oluşum sürecinde, aynı kimyasal bileşimle oluştuğu fikri, uzun yıllar boyunca kabul edilen görüşlerden biri olmuştur.  $\omega$  Cen küresel kümesindeki yıldızların çok çeşitli metalik özelliklere sahip olduğu 1970'li yılların başında fark edilip (Cannon & Stobie 1973; Freeman & Rodgers 1975) yapılan ilk fotometrik gözlemlerle beraber farklı yıldız popülasyonlarının varlığı ortaya konmuştur (Bedin ve diğ. 2004). Yapılan çalışmalarla beraber çoklu popülasyonların sadece kimyasal olarak değil, aynı zamanda fotometrik özelliklerle de ayrılabilceği gösterilmiştir (Bedin ve diğ. 2004; Piotto ve diğ. 2007). Yıldız popülasyonlarından bazılarında helyum bolluğunun beklenenden çok daha yüksek değerlere ulaştığı ( $Y \sim 0.38$ ) ve bu bolluğun ağır element artışı kaynaklı olmadığı anlaşılmıştır (Norris 2004; Piotto ve diğ. 2005). Bu tür helyum zenginleşmesi küresel kümelerdeki çoklu popülasyonların oluşum mekanizmalarına ilişkin önemli ipuçları sunmaktadır. Ayrıca, göreceli olarak hafif elementler (C, N, O, Na, Mg ve Al) arasındaki büyük bolluk değişimleri, bu kümelerdeki farklı yıldız popülasyonlarının kimyasal bileşimlerinin geniş bir aralıkta farklılık gösterdiğini ortaya koymuştur (Prantzos ve diğ. 2007). Bu farklılıklar, küresel kümelerdeki çoklu yıldız popülasyonlarının evrimsel süreçlerini ve kimyasal zenginleşmesini anlamada önemli bir rol oynamaktadır (Carretta ve diğ. 2009).

NGC 2808 küresel kümesi farklı evrim aşamasındaki yıldızları barındırması ve H-R diyagramında anakol ve yatay kolda birden fazla ayrılmanın gözlenmesi nedeniyle çoklu popülasyon çalışmalarında ideal laboratuvarlardan biridir. NGC 2808, oldukça düşük metal bolluğuna sahip bir küme olmasına rağmen, içerisindeki çoklu popülasyonlar farklı zamanlarda ve farklı kimyasal bolluklarda oluşmuş yıldızları barındırmaktadır (Milone ve diğ. 2015; Piotto ve diğ. 2007). Bu durum, evrenin erken dönemlerinde meydana gelen kimyasal zenginleşme ve yıldız oluşumu süreçlerini anlamamıza yardımcı olmakta ve kümeyi hem gözlemsel hem de teorik açıdan zengin bir kaynak haline getirmektedir (Milone ve diğ. 2019).

$\omega$  Cen ve diğer bazı küresel kümelerde, orta kütleli kara deliklerin varlığı uzun zamandır tartışma konularından biri olmuştur. Teorik olarak varlıkları tahmin edilen orta kütleli kara deliklerin doğrudan kanıtlanması açısından bir dönüm noktası olan çalışma yakın zamanda Häberle ve diğ. (2024) tarafından yapılmıştır. Bu çalışma ile kümedeki hızlı hareket eden yıldızların, kütlesi  $8200 M_{\odot}$  olan orta kütleli bir kara deliğin varlığının güçlü kanıtları sunulmuştur. Orta kütleli kara deliklerin, küresel kümelerin dinamik yapısı ve evrimsel tarihi üzerindeki etkileri, çoklu popülasyon oluşum teorilerine önemli bir katkı sağlamaktadır. NGC 2808 ve 47 Tucanae gibi küresel kümeler, orta kütleli kara deliklerin oluşumu ve evrimine ilişkin teorileri test etmek için ideal sistemler olarak öne çıkmaktadır. Bu tür araştırmalar, sadece çoklu popülasyonların kimyasal ve dinamik yapısını değil, aynı zamanda galaksi merkezlerindeki süper kütleli kara deliklerin oluşumuna ilişkin ipuçları da sunmaktadır (Gieles ve diğ. 2018).

## 3 Çok Büyük Kütleli Yıldızların Kimyasal Evrim Modelleri

Evrenin başlangıcından günümüze kadar, farklı fiziksel süreçlerle oluşan kimyasal elementlerin ve moleküllerin evrimi, astrofizik ve kozmoloji alanlarında güncel bir araştırma konusu olmaya devam etmektedir. Bugün gözlenen elementlerin kaynağı nedir sorusunun cevabı birçok oluşum senaryosu yaklaşımı ile yanıtlanabilmektedir. Büyük Patlama Nükleosentezi sürecinde, hidrojen, helyum ve az miktarda lityum gibi hafif elementlerin oluşumu, erken Evrenin kimyasal bileşiminin temelini oluşturmuştur (Kobayashi ve diğ. 2020). Bu başlangıç bileşimi, yıldızların oluşumu ve evrimiyle şekillenen daha ağır elementlerin sentezine zemin hazırlamıştır. Bu bağlamda, çok büyük kütleli yıldızlar, hem yıldızların evrimi hem de küresel kümelerde gözlenen çoklu popülasyonların oluşumu açısından kritik bir rol oynamaktadır. ÇBK'Y'ler, kısa ömürlü olmalarına rağmen çekirdeklerinde gerçekleşen nükleosentez süreçleriyle Evrenin kimyasal zenginleşmesine önemli katkılar sağlamışlardır (Hoyle & Fowler 1960). Bu yıldızların güçlü rüzgarları ve süpernova patlamaları, ağır elementlerin çevreye yayılmasını sağlarken, aynı zamanda ikinci nesil yıldızların kimyasal bileşimini şekillendiren gazın yeniden işlenmesine yol açmıştır (Bastian & Lardo 2018a; Renzini ve diğ. 2015).

Küresel kümelerde gözlemlenen çoklu yıldız popülasyonları, bu süreçlerin bir sonucu olarak görülebilir. İlk nesil yıldızlardan geriye kalan gaz ve yeni oluşan elementlerle zenginleşen malzeme, ikinci nesil yıldızların doğmasına olanak tanımıştır. Bu yıldız popülasyonlarının kimyasal ve fotometrik farklılıkları, çok büyük kütleli yıldızların etkisini yansıtan izler taşımaktadır. Özellikle helyum zenginleşmesi ve hafif elementlerin (örneğin, Na-O anti-korelasyonu) gözlemlenmesi, bu çoklu popülasyonların evrim senaryolarında ÇBK'Y'lerin rolüne işaret etmektedir (Decressin ve diğ. 2007; Carretta ve diğ. 2009). Bu nedenle, çok büyük kütleli yıldızlar, sadece Galaksinin ve Evrenin kimyasal zenginleşmesi değil, aynı zamanda küresel kümelerdeki çoklu popülasyonların oluşum mekanizmalarının anlaşılması açısından da merkezi bir konumdur. Yapılan çalışmalar ÇBK'Y'lerin kütlelerinin  $10^2 - 10^6 M_{\odot}$  aralığında kararlı olduklarını göstermektedir (Koçak 2023a,b; Hosokawa ve diğ. 2013). Böylesi geniş bir kütle aralığının olması yapılan evrim modellerinde bazı kısıtlamalar ve varsayımlar yapılmasını zorunlu kılmaktadır. Evrimlerine farklı başlangıç koşullarında başlayan yıldızlar evrimlerinin sonunda bu koşullara bağlı olarak farklı kütle ve kimyasal yapıya sahip nesneler bırakırlar.

ÇBKY'ler küresel kümelerin merkezinde bulunan orta kütleli kara deliklerin ve çok büyük kütleli kara deliklerin ata sistemleri olma potansiyellerine sahiptirler. Böylesi nesnelerin evrimlerinin son aşamalarında nasıl bir kara delik oluşturacağı halen tartışma konusudur. ÇBKY'lerin oluşumlarında ve evrimlerinin sonunda oluşturacağı kara delik, yıldızın başlangıç kütlesi, metal bolluğu, evrimi süresince kaybettiği kütle ve enerji ve açısal momentum aktarımı olmak üzere yıldızın iç yapı parametrelerine bağlıdır (Gieles ve diğ. 2018; Haemmerlé ve diğ. 2018; Koçak 2023a,b).

Bu çalışmada MESA (Paxton ve diğ. 2013, 2011) kodu kullanılarak elde edilen modellerin kütle toplama oranı  $0.03 M_{\odot} \text{ yıl}^{-1}$  ve metal bolluğu  $0.1 Z_{\odot}$  olarak alınmıştır. Yıldızın kütle kaybı oranları, Gieles ve diğ. (2018) tarafından önerilen değerlere göre belirlenmiştir. Farklı kimyasal ağlar kullanılarak yapılan modellerimizde, bazı element çiftleri arasında korelasyonlar ve anti-korelasyonlar tespit edilmiştir. Çalışma kapsamında seçilen fiziksel mekanizmalar ve uygulanan yöntemler, ÇBKY'lar için öngörülen kimyasal ve fiziksel parametrelere ulaşmayı mümkün kılmıştır. Modeller sırasında fiziksel süreçler gözönüne alınarak kimyasal ağlar amaca uygun şekilde seçilmiştir.

MESA yıldız evrim kodu kullanılarak yıldızın anakol aşamasındaki evrim sürecinde kimyasal bolluk oranlarının değişimi elde edilmiştir. Yapılan modellerin sonuçları Şekil 1'de gösterilmiştir. Yıldız anakol evriminde iken yapılan değişiklikler ile madde toplanması etkisi ile yıldızın kimyasal bolluğunun merkezde ve yüzeyde nasıl değiştiği incelenmiştir. Yıldızın madde toplamasının yıldızın kimyasal evrimine ne derece katkı sağladığı incelenmiştir. Şekil 1 yıldızın kütle toplama oranının  $0.03 M_{\odot} \text{ yıl}^{-1}$ , kimyasal bolluğunun  $0.1 Z_{\odot}$  ve madde toplanmasının 0.8 milyon yılda kesilerek anakol aşaması boyunca evrimine devam ettirilen model sonuçlarını göstermektedir. Ayrıntıları Koçak (2023a)'da verilen çalışmada yıldız 1.2 milyon yılda yıldızın sıcaklığı 70 MK üzerine çıkmaktadır. Bu sıcaklık değeri Şekil 1'de görülen elementler arasında korelasyonlar ve anti-korelasyonların oluşmasını sağlamıştır.

#### 4 Sonuçlar ve Tartışmalar

Çok büyük kütleli yıldızlar, hem küresel kümelerdeki çoklu popülasyonların oluşumunda hem de galaksilerin kimyasal zenginleşmesinde temel bir role sahiptir. Bu yıldızlar, nükleosentezle ürettikleri ağır elementleri yıldız rüzgarları ve süpernova patlamalarıyla çevrelerine yayarak hem küresel kümelerin kimyasal çeşitliliğini hem de galaksilerin kimyasal evrimini şekillendirir. ÇBKY'ların kimyasal ve dinamik katkılarını anlamak, galaksilerin ve Evrenin kimyasal yapısını çözmek için kritik öneme sahiptir.

Bu çalışmada, çok büyük kütleli yıldızların evrim süreçleri, MESA yıldız evrim kodu kullanılarak farklı başlangıç koşulları altında modellenmiş ve evrimin farklı aşamalarında kimyasal bollukların nasıl değiştiği incelenmiştir. Özellikle, ÇBKY'lerin kütle toplama oranlarının ve yıldızın madde toplamasının durdurularak evrimine devam ettirilmesi ile yıldızın merkezde ve yüzeydeki kimyasal bileşim üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Modeller, ÇBKY'lerin anakol aşamasında madde toplamasının kesilmesi durumunda bile kimyasal zenginleşmenin devam ettiğini ve bazı element çiftleri arasında belirgin korelasyonlar ve anti-korelasyonlar oluştuğunu göstermektedir. Çalışmada, He zenginleşmesi ve hafif element bolluk değişimleri gibi küresel kümelerde gözlenen özelliklerle uyumlu sonuçlar elde edilmiştir.

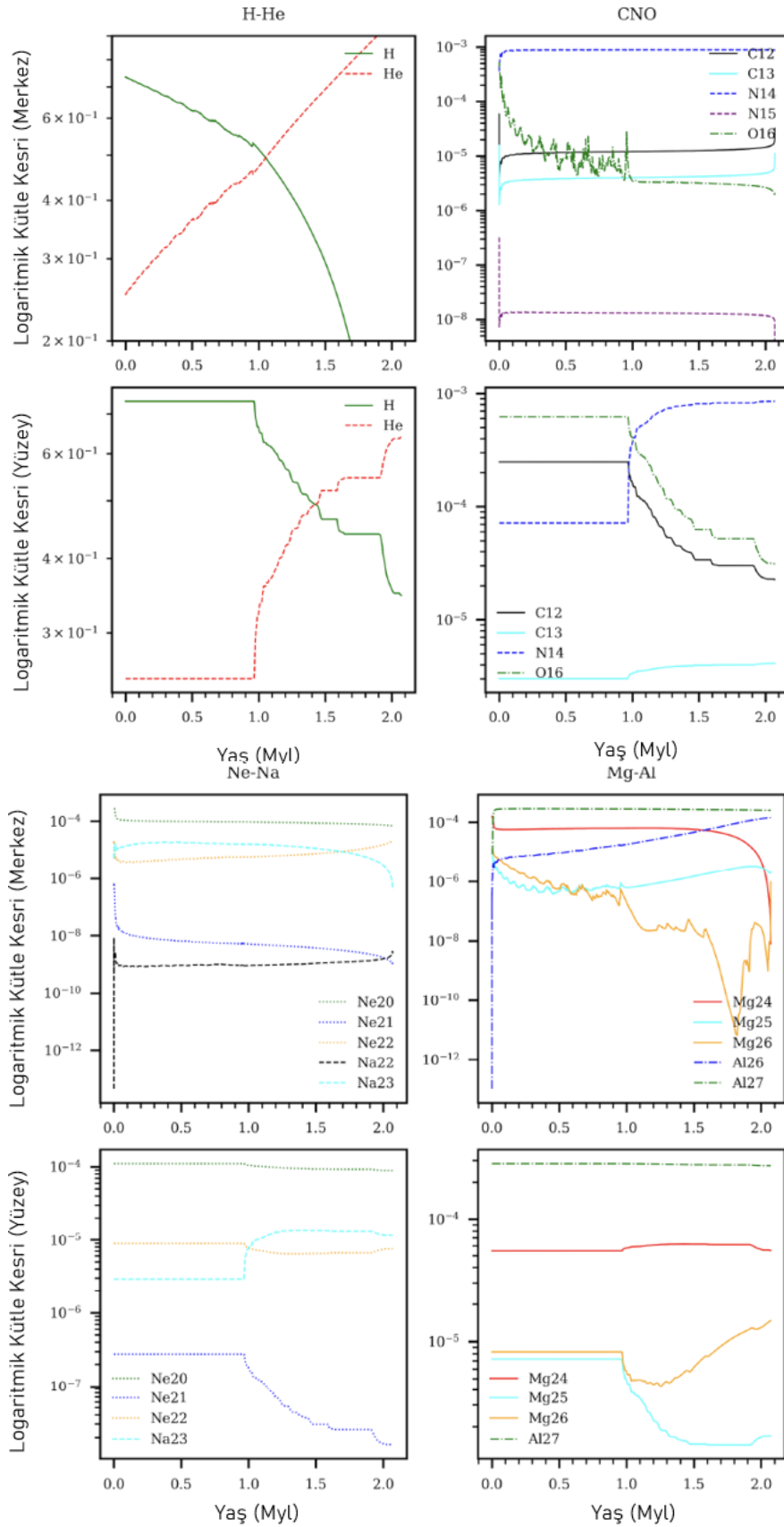
Bu durum, ÇBKY'lerin küresel kümelerdeki ikinci nesil yıldız popülasyonlarının kimyasal bileşiminin belirlenmesinde kritik bir rol oynadığına işaret etmektedir. Özellikle, Na-O ve Mg-Al anti-korelasyonu gibi nükleosentez süreçlerinin, ÇBKY'lerin kısa ömürlü ancak etkili kimyasal katkıları ile açıklanabileceği gösterilmiştir. Kütle toplama oranının başlangıçta yüksek olduğu ( $0.03 M_{\odot} \text{ yıl}^{-1}$ ) senaryolar, yıldızın çevresindeki gazın hızlı bir şekilde işlendiği ve ağır elementlerin yıldız çevresine yayıldığı koşulları temsil etmektedir. Bu durum, küresel kümelerdeki çoklu popülasyonların kimyasal olarak farklılık göstermesine katkıda bulunabilir. Bununla birlikte, madde toplama sürecinin erken durdurulması, yıldızın çekirdeğindeki nükleosentez süreçlerini sınırlasa da yüzeydeki kimyasal bollukları önemli ölçüde etkilemektedir.

Model sonuçları, ÇBKY'lerin sadece küresel kümelerdeki kimyasal bileşim üzerinde değil, aynı zamanda galaksilerin genel kimyasal evriminde de belirleyici bir rol oynayabileceğini desteklemektedir. Bu tür yıldızlar, erken evrende ağır element zenginleşmesinin ana kaynağı olabilir. Ayrıca, ÇBKY'lerin evrimi sırasında oluşan yoğun yıldız rüzgarları ve süpernova patlamaları, bu elementlerin çevredeki gaz bulutlarına karışmasını ve yeni yıldızların oluşumunda kullanılmasını sağlamaktadır.

Küresel kümeler, evrenin erken evrelerinde oluşmuş sistemler olmaları nedeniyle genellikle düşük metal bolluğuna sahip yıldızlardan meydana gelir (Gratton ve diğ. 2004). Düşük metal içeriği, yıldızların opasitelerini azaltarak metal açısından zengin yıldızlara kıyasla daha düşük kütle kaybına yol açar (Kudritzki & Puls 2000; Koçak 2023a). Bu durum, yıldızların kütlelerini daha etkin bir şekilde korumalarına olanak tanırken, aynı zamanda madde toplama süreçleri aracılığıyla çok büyük kütleli yıldızların oluşumuna katkıda bulunabilir. Düşük metal bolluğuna sahip yıldızların modellenmesinde genellikle  $0.1 Z_{\odot}$  değeri kullanılmaktadır.

Küresel kümeler ve erken nesil yıldız popülasyonları gibi sistemlerde gözlenen düşük metal içeriği, bu yıldızların oluştuğu ortam hakkında önemli bilgiler sunmaktadır. Özellikle küresel kümeler,  $[Fe/H] \leq -1.0$  seviyesinde metal bolluklarına sahiptir ve bu değer yaklaşık olarak  $Z \approx 0.1 Z_{\odot}$  ile ilişkilidir (Bromm & Larson 2004; Frebel & Norris 2015). Düşük metal oranı, yıldız iç yapısında daha yüksek çekirdek sıcaklıklarına ve daha zayıf kütle kayıplarına neden olmakta, dolayısıyla yıldızların evrimsel zaman ölçeklerini uzatmaktadır (Vink ve diğ. 2001; Meynet & Maeder 2002). Aynı zamanda, düşük opasite nedeniyle enerji taşınımı daha verimli hale gelmekte ve yıldız iç dinamikleri doğrudan etkilenmektedir (Maeder 2009). Küresel kümelerde gözlenen Na-O ve Mg-Al anti-korelasyonları, bu yıldızların sıcak çekirdeklerinde gerçekleşen hidrojen yanması süreçleriyle ilişkilendirilmektedir. Bu anomalileri açıklayabilen modeller genellikle  $0.1 Z_{\odot}$  metal bolluğunu gerektirmektedir (Gratton ve diğ. 2012b; Bastian & Lardo 2018b). Öte yandan, daha yüksek metal içeriği yıldız rüzgarlarını güçlendirerek kütle kaybını artırmakta ve yıldızların evrim sürelerini kısaltmaktadır; dolayısıyla kimyasal zenginleşme süreçleri de bu durumdan etkilenmektedir. Bu bağlamda,  $Z \approx 0.1 Z_{\odot}$  değeri, metalce fakir yıldızların evrimini ve küresel kümelerde gözlenen kimyasal bolluk oranlarını doğru bir şekilde modellemek için kritik bir parametre olarak değerlendirilmektedir.

Bu çalışmada kullanılan başlangıç parametreleri ve kimyasal ağlar, başlangıç parametrelerine getirilen sınırlamalarla beraber ÇBKY'lerin kimyasal evrimi için bir zemin oluşturmuştur. JWST gibi ileri düzey gözlem araçlarının



Şekil 1. Modellerin anol evresinde H-He, CNO, Ne-Na ve Mg-Al elementlerinin yıldız çekirdeğinde ve yüzeyindeki zamanla değişimi.

sağlayacağı yüksek çözünürlüklü tayfsal veriler, bu modellerin doğrulanması açısından kritik olacaktır. Çalışmada elde edilen kimyasal bolluk profilleri, küresel kümelerdeki çoklu popülasyonların detaylı incelemeleri ile karşılaştırılabilir. Özellikle, NGC 2808 ve  $\omega$  Cen gibi küresel kümelerde yapılan gözlemler, modellerdeki varsayımların test edilmesine olanak sağlayacaktır.

#### Teşekkür

Bu çalışma 117F188 ve 119F077 nolu TÜBİTAK projeleri ve TÜBİTAK-BİDEB 2219 ve 2218 (123C409) programları tarafından desteklenmiştir. Çalışmaya katkılarından dolayı Kadri Yakut, Corinne Charbonnel ve Tassos Fragos'a teşekkür ederim.

#### Kaynaklar

- Bastian N., Lardo C., 2018a, *ARA&A*, 56, 83  
 Bastian N., Lardo C., 2018b, *ARA&A*, 56, 83  
 Bedin L. R., Piotto G., Anderson J., Cassisi S., King I. R., Momany Y., Carraro G., 2004, *ApJ*, 605, L125  
 Bromm V., Larson R. B., 2004, *ARA&A*, 42, 79  
 Cannon R. D., Stobie R. S., 1973, *MNRAS*, 162, 207  
 Carretta E., ve diğ., 2009, *A&A*, 505, 117  
 Decressin T., Charbonnel C., Meynet G., 2007, *A&A*, 475, 859  
 Decressin T., Baumgardt H., Charbonnel C., Kroupa P., 2010, *A&A*, 516, A73  
 Denissenkov P. A., Hartwick F. D. A., 2014, *MNRAS*, 437, L21  
 Frebel A., Norris J. E., 2015, *ARA&A*, 53, 631  
 Freeman K. C., Rodgers A. W., 1975, *ApJ*, 201, L71  
 Gardner J. P., ve diğ., 2006, *Space Sci. Rev.*, 123, 485  
 Gieles M., ve diğ., 2018, *MNRAS*, 478, 2461  
 Gratton R., Sneden C., Carretta E., 2004, *ARA&A*, 42, 385  
 Gratton R. G., Carretta E., Bragaglia A., 2012a, *A&ARv*, 20, 50  
 Gratton R. G., Carretta E., Bragaglia A., 2012b, *A&ARv*, 20, 50  
 Häberle M., ve diğ., 2024, *Nature*, 631, 285  
 Haemmerlé L., Woods T. E., Klessen R. S., Heger A., Whalen D. J., 2018, *ApJ*, 853, L3  
 Hosokawa T., Yorke H. W., Inayoshi K., Omukai K., Yoshida N., 2013, *ApJ*, 778, 178  
 Hoyle F., Fowler W. A., 1960, *ApJ*, 132, 565  
 Kobayashi C., Karakas A. I., Lugaro M., 2020, *ApJ*, 900, 179  
 Koçak D., 2023a, PhD thesis, Ege University, Department of Astronomy and Space Sciences  
 Koçak D., 2023b, *Turkish Journal of Astronomy and Astrophysics*, 4, 138  
 Kudritzki R.-P., Puls J., 2000, *ARA&A*, 38, 613  
 Maeder A., 2009, Physics, Formation and Evolution of Rotating Stars. Springer, doi:10.1007/978-3-540-76949-1  
 Meynet G., Maeder A., 2002, *A&A*, 390, 561  
 Meynet G., Ekström S., Maeder A., 2006, *A&A*, 447, 623  
 Milone A. P., ve diğ., 2015, *ApJ*, 808, 51  
 Milone A. P., ve diğ., 2019, *MNRAS*, 484, 4046  
 Norris J. E., 2004, *ApJ*, 612, L25  
 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., 2005, *ApJ*, 621, 777  
 Piotto G., ve diğ., 2007, *ApJ*, 661, L53  
 Prantzos N., Charbonnel C., Iliadis C., 2007, *A&A*, 470, 179  
 Renzini A., ve diğ., 2015, *MNRAS*, 454, 4197  
 Surace M., ve diğ., 2018, *ApJ*, 869, L39  
 Vink J. S., de Koter A., Lamers H. J. G. L. M., 2001, *A&A*, 369, 574

#### Access:

M25-0346: *Turkish J.A&A* — Vol.6, Issue 3.