

# Yıldızlarda Neler Oluyor? Kırmızı Budak Yıldızların Evrimine İlişkin Çıkarımlar

Mutlu Yıldız<sup>\*</sup> 

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

Accepted: May 11, 2022. Revised: May 9, 2022. Received: April 4, 2022.

## Özet

Astronominin büyük veri çağı bu alandaki tüm araştırmacıları kendilerini şanslı hissettirecek kadar bol ve kaliteli veri sağlamaktadır. Gezegen, gökada ve karadelik araştırmaları yıldız astrofiziği için hem önemli veriler hem de yeni problemler sunmaktadır. Binlerce kırmızı dev (RG) ve kırmızı budak (RC) yıldızın astrometrik, asterosismik, tayf ve fotometrik hassas verileri kullanılarak temel parametreleri hesaplanabilir. Bu çalışmada, RC yıldızlarının asterosismik ve astrometrik yoldan hesapladığımız kütle ve yarıçaplarını hem birbirleriyle hem de önceden hesapladığımız kırmızı devlerin değerleriyle kıyasladık. Bu kıyaslamadan, RG ile RC evreleri arasındaki geçiş sürecinde ortalama  $0,1 M_{\odot}$  kadar kütle kaybettiği anlaşıldı. RC yıldızlarının menşei hakkında da çok önemli sonuçlar ortaya çıktı. Kütleleri  $1,5 M_{\odot}$ 'ten büyük yıldızların çok az bir kısmının RG bölgesinden geçerek bulunduğu konuma ulaştığı ortaya kondu.

## Abstract

The big data age of astronomy provides high quality and huge amount of data that makes all researchers in this field feel lucky. Planet, galaxy, and black hole studies present both data and new problems for stellar astrophysicists. Fundamental parameters of thousands of red giant (RG) and red clump (RC) stars can be calculated using their precise astrometric, asteroseismic, spectral and photometric data. In this study, we compute and compare the masses and radii of the RC stars, which we calculated from the asteroseismic and astrometric methods. We also compare fundamental properties of RCs with the values of RGs we calculated before. From this comparison, we deduce that an average of  $0.1 M_{\odot}$  mass is lost during the transition from the RG to the RC phase. There are also very important implications about the origin of RC stars. Few of the stars with a mass greater than  $1.5 M_{\odot}$  reach their current location by passing through the RG region.

**Anahtar Kelimeler:** stars:distance – stars:evolution – stars:fundamental parameters – stars:interiors – stars:late-type – stars:oscillations

## 1 Giriş

Yıldızlar çok geniş bir araştırma alanı. Bu alan gittikçe de genişliyor. Astronominin büyük veri çağını yaşıyoruz, her bakımdan, her yanıyla, özellikle atmosfer dışı uzay görevleri sayesinde muhteşem bir veri sağanağı var. Bu verilerin hepsini bir potada birleştirmek gerekiyor. Özellikle GAIA paralaks verileri üzerine yapılan çalışmalar örnek çalışmalar olarak gösterilebilir. Bizim de bu kapsamda iki çalışmamız (Birinci Sürüm için Yıldız et al. (2017) ve İkinci Sürüm için Yıldız & Örtel (2021)) oldu ve devam edecek gibi görünüyor (Gaia Üçüncü Veri Sürüm için Yıldız 2022, hazırlanıyor). Bu çalışmada özellikle kırmızı budak (red clump) yıldızlarının temel özelliklerini GAIA DR2 verileri (Brown et al. 2018) ile hesaplayıp kırmızı devler için Yıldız & Örtel (2021) tarafından elde edilen sonuçlarla kıyaslayarak özellikle kütle kaybına ve evrim süreçlerine ilişkin sonuçlar elde etmeyi amaçlıyoruz.

Genel olarak astrofizikte gerçekten baş döndürücü gelişmeler oluyor. Bu gelişmeler yıldız astrofiziğinde de doğal olarak yaşanıyor. Çoklu veri çağı en somut bir şekilde, yıldızların uzaklığı (GAIA, Brown et al. 2018), tayf (APOGEE, Abolfathi et al. 2018), ışıkölçüm (2MASS, Skrutskie et al. 2006) ve asterosismik (Kepler, Borucki et al. 2010; Sullivan et al. 2015) verilerinde kendini gösteriyor. Özellikle yıldızların kütle

ve yarıçaplarının belirlenmesi konusunda çok önemli ilerlemeler sağlandı. Bu konu üzerinde ayrıntılı bir şekilde duracağız.

GAIA'nın paralaksını ölçtüğü APOKASC-2 (Pinsonneault et al. 2018) yıldızlarının arasında uzaklığı 10 kiloparsek'i bulan yıldızlar var, bu gökada ölçeğinde önemli bir derinlik. Kepler verilerine göre Güneş benzeri titreşim yapan kırmızı yıldızların listelendiği APOKASC-2 kataloğunda, ayrıntılı analizi mümkün kılan yeterli veri sunulmaktadır. Bu yıldızların yaklaşık 3500'ü kırmızı dev (RG) ve 2700'ü kırmızı budak (RC, red clump) yıldızlarıdır. Bu çalışmada kırmızı budakların asterosismik, astrometrik, fotometrik ve tayf verilerini kullanarak temel özelliklerini hesaplayacağız.

Kepler verilerinden toplamda yaklaşık 10000 tane yıldızın asterosismik parametreleri (Pinsonneault et al. 2018; Kallinger 2019) elde edilmiş durumda. Bu parametrelerin hangileri olduğu üzerinde duracağız. TESS verilerine dayalı olarak 158000 tane yıldızın asterosismik verileri yayınlandı (Hon et al. 2021). Bunlar muhteşem sonuçlar gerçekten. Bunları analiz edebilecek kabiliyete kavuşmamız gerekiyor ve bu yıldızların tek tek modellerinin yapılması çok zaman alan bir yol olur. Dolayısıyla modellemeyi daha fazlasının yapılması gerekir.

Asterosismoloji konusunda bazı temel bilgileri hatırlamakta yarar var. Eğer geri çağırıcı kuvvet basınç kuvveti ise titreşim p-kipli (p-mod) olarak adlandırılır. Güneş'te gözlenen titreşimler esas olarak p-kipli titreşimlidir. Eğer geri çağırıcı kuvvet kütleçekim kuvveti ise titreşimin kipine g-kipli denir. Beyaz

\* mutlu.yildiz@ege.edu.tr

cücelerde gözlenen titreşimler esas olarak g-kipli titreşimlerdir. Bu iki kiplin karması olan karma kipler (mixed modes) özellikle kırmızı devlerde ve sıcak alt devlerde gözlenmektedir.

Güneş benzeri titreşim yapan yıldızların güç tayfindan başlıca asteroseismik parametreleri belirlemek mümkündür. Frekanslar esas olarak kipleri belirleyen düğüm sayılarına bağlıdır. Basit fiziksel titreşimlerde de bu durum geçerlidir. Örneğin iki ucu sabit sicim için, çeşitli kipler vardır ve bu kipler düğüm sayıları ile betimlenir. Yıldızları, küresel yapılar oldukları için,  $r$ ,  $\theta$  ve  $\phi$  küresel koordinatlarında inceleyebiliriz.

Radyal doğrultudaki düğüm sayıları  $n$ ;  $\theta$  yönündeki düğüm sayıları  $l$ ;  $\phi$  düzlemindeki düğüm sayıları ise  $m$  ile gösterilir. Frekanslar ( $\nu_{nl}$ ) esas olarak  $l$ 'nin ve  $n$ 'nin fonksiyonudur.  $\Delta\nu$ 'yu birim frekans değeri olarak ele alırsak, özellikle  $n$ 'nin büyük değerleri için,

$$\nu_{nl} = \left(n + \frac{l}{2} + \alpha_n\right)\Delta\nu \quad (1)$$

$\alpha_n$  yüzey koşulları ile ilgili bir parametredir.  $\Delta\nu$  aynı dereceye sahip ardışık mertebeli ( $n$ ) kiplerin frekansları arasındaki farktır ve titreşim frekansları arasındaki büyük ayrılma olarak adlandırılır. Burada iki önemli nokta üzerinde durmakta yarar var.

- İster fotometrik ister tayf gözlemi olsun, gözlemsel olarak güneş benzer titreşim yapan yıldızlarda ortalama yoğunluğun karekökü ile doğru orantılı (Tassoul 1980; Christensen-Dalsgaard 1993) olan  $\Delta\nu$ 'yu saptayabiliyoruz.
- Titreşimlerin genlikleri belli bir frekans ( $\nu_{\max}$ ) değerinde maksimum oluyor.

Bu son derece önemli çünkü Brown et al. (1991) Öncü (Procyon) yıldızı için yaptıkları çalışmada, bu frekansın akustik kesme (cut-off) frekansı ile orantılı olduğunu ve oradan kütleçekim ivmesini ( $g$ ) bulabileceğimizi ifade ediyor:

$$\nu_{\max} \propto \frac{g}{\sqrt{T_{\text{eff}}}} \quad (2)$$

Burada  $T_{\text{eff}}$  etkin sıcaklıktır.

Uzay projelerinin ana lokomotifleri özellikle gezegen ve gökada (veya ekstra gökada) çalışmalarıdır. CoRoT (Baglin et al. 2006) olsun, Kepler (Borucki et al. 2010) olsun, bu görevler asteroseismolojinin dev adımlar atmasını sağladı ama bunlar aslında gezegen projeleridir. Dolayısıyla, gezegen ile yıldızı çok da ayırt etmek gerekir, iki alanı bir bilmekte yarar var. Gökada çalışmaları da öyle.

Bu makale aşağıdaki gibi düzenlenmiştir. §2'de yıldızların genel özellikleri, yapıları, evrimi ve bunları etkileyen unsurlar irdelenmiştir. §3'te, yıldız astrofizikinde güncel gelişmeler sunulmaktadır. §4'te kırmızı budakların temel özelliklerini belirlemek için kullanılan yöntemler verilmiştir. §5 sonuçlara ve sonuçların karşılaştırılmasına ayrılmıştır. Son olarak, §6'da sonuçlar ve değerlendirmeler yer almaktadır.

## 2 Yıldızlar Nasıl cisimlerdir?

Yıldızların evrimini anlamak ve anlatmak için Hertzsprung–Russell (HR) diyagramına başvurulur. HR diyagramında çok sayıda değişen yıldız türü var. Son yıllarda muazzam değişen yıldız keşfi söz konusu. Özellikle güneş benzeri titreşim yapan yıldızlar sayıca büyük bir üstünlüğe sahip, en bereketlileri onlar. 10 bine yakın yıldızdan söz ediyoruz ve bunlarda ses hızında hareket eden dalgalar kaydedildiği için en azından ortalama yoğunluğa ilişkin ciddi bir bilgi veriyor ve

$\nu_{\max}$ 'ı da eğer elde edebiliyorsak, kütle çekim ivmesiyle orantılı olduğundan, kütle ve yarıçapın belirlenmesi açısından önemli araçlara kavuşmuş oluyoruz.

Yıldızlar HR diyagramına sağ üst köşeden girer, Hayashi izi boyunca çöker ve diyagonal bir hat olan anakola ulaşırlar. Ezer & Cameron (1965, 1967)'un öncü çalışmalarına kadar yıldızların diyagramın alt kısmından yükselerek anakola oturduğu sanılıyordu. Bu bakımdan Ezer ve Cameron'un araştırmaları özel bir öneme sahiptir.

Yıldızlar muazzam enerjinin üretildiği ve nakledildiği muazzam yapılar. Dört yapı denklemi yıldız yapısını tasvir eder:

- En başta, kuvvet dengesini sayabiliriz. Yıldızlar dengede mi değil mi bazen kafa karıştırıcı bir durum oluyor. Güneş dengede diyoruz fakat çok aktif olduğu dönemler oluyor. Bu aktifliğin aslında pek önemi yok. Dengede değilse bile, değişen bir yıldız olduğunu düşünerek, değişimler denge civarında gerçekleşir. Geniş zamanda değişimlerin ortalamasını aldığımızda denge halini elde ederiz. Belki, Sefeyidler gibi yıldızlar için dengegenin neresi olduğunu iyi tespit etmek zor olabilir, onların durumu belki biraz uğraştırıcı. Geriye kalan yıldızlar, güneş benzeri titreşim yapan yıldızlar gibi, söz konusu olduğu zaman milyonda bir değişimden söz ediyoruz. Denge durumundan uzaklaşma adeta yok gibidir. Kuvvet dengesi sağlanıyor, kütle çekimle basınç kuvvetleri birbirini dengeliyor esas olarak.
- Kütlenin sürekliliği bir diğer yapı denklemidir.
- Isıl denge, bir katmanda nükleer yoldan üretilen enerjinin o katmanı terk ettiğini, ısıyı ısıtmadığını ifade eder.
- Sıcaklık gradyeni enerji aktarımına ilişkin bilgi veriyor.

İşimalı (radiative) ortamdaki sıcaklık gradyeni denkleminde saydamsızlık (opasite) dediğimiz parametre var. Saydamsızlık fotonla enerji taşınımına gösterilen direnci ifade eder. Dolayısıyla çok önemli, özellikle işimalı zarfa sahip olan yıldızların yarıçapını esas olarak bu parametre belirler. Bu etki olmasa yıldızlar çok çok küçük cisimler olurlardı. Tabi ki nükleer tepkimelerin hızlarını hesaplamak lazım. Bir de hal denklemi var. Bunlar mikro fiziği ilgilendiren konular ve bunlar için atomik özelliği, fotonu, ışınma süreçlerini çok iyi incelemeliyiz.

Yıldızların yapısı ve evrimine baktığımız zaman bizim en kolay hesapladığımız şeylerden birisi ışınma gücü. Işınma gücü bir çok parametreye bağlı. İşimizi bir bakıma çok zorlaştırıyor bu durum. Bu zorlaştırmaya rağmen, eğer onu çözebilirsek o da başlı başına bir tanı aracı oluyor. Kütle, ağır element bolluğu ( $Z$ ), He (ya da H), yaş, manyetik alan ve dönme ışınma gücü üzerinde etkilidir. Kütle kaybı miktarı da ışınma gücünü etkileyen faktörler arasında sayılabilir. Elbette, bu faktörler yarıçap üzerinde de etkilidir. Konvektif zarflı yıldızlar için konvektif parametrenin de belirlenmesi gerekir. Konveksiyon basit olarak karışım uzunluğu kuramı yaklaşımıyla hesaplanır. Bu parametreleri ne kadar iyi belirleyebilirsek doğayı, gökleri o kadar iyi anlayabiliriz.

Bir yıldız modeli yaptığımızda gözlemlerle tam bir uyum beklemeyiz. Çünkü, bir niceliği hesaplayabilmek için birçok varsayım yapıyoruz. Hesapladığımızı gözlemlerle kıyasladığımızda farklılıklar olması çok doğaldır. Eğer hesapladığımız nicelikler arasında sistemli farklar var ise, hangisinin neden kaynaklandığını tespit edilebilirsek çözüm üretme şansımız olur. Konveksiyonun hesaplanması hem özek açısından hem zarf açısından çok önemli bir sorun. Dahası, konvektif fırlatma (overshooting), yarı konveksiyon (semi-convection) gibi yan unsurlar da var. Konveksiyon denilince bu etkiler de kastedilir.

Dönme, açısal momentum, başlı başına bir alan (bkz. §3.3.1). Gelişmeler olmasına rağmen, bu alanda maalesef yeterince ilerleme sağlanamadı. Manyetik alan, buna bir şekilde dönme eşlik ediyor, bir başka önemli alan. Karışım işlemlerini son zamanlarda tartışmaya başladık. Yayılmayı ise birkaç on yıldır yıldız modellerinde uyguluyoruz. Difüzyon ve tabii ki saydamsızlık hesabının çok iyi yapılması gerekir ve şu anda o noktada olup olmadığımız biraz tartışma konusu.

Hidrostatik dengedeki büyük kütleli bir yıldızla küçük kütleli bir yıldız kıyaslayacak olursak, ilkinde basınç esas olarak ideal gaz denkleminin uyarı, ikincisinde parçacıkların birbirinin alanına girmesinden dolayı, ideal gaz denkleminin uzaklaşır. Sıcaklığın yüksek ve yoğunluğun düşük olduğu ideal ortamda, parçacıkların alanı yoktur ve sadece çarpışırlar. Küçük kütleli yıldızlarda, parçacıklar, aralarındaki mesafe kısaldığı için, birbirinin alanından etkilenir. Uç durumdaki karasal gezegenlerde ise parçacıklar alana hapis olarak kafesler oluştururlar.

### 3 Yıldız astrofizikinde güncel gelişmeler

#### 3.1 Gökada birleşmeleri

Çok hassas ölçümler yaptığımız zaman, yaşı iyi belirleme şansımız var. Yaş, özellikle gökada üzerine yapılan araştırmalar için önemli. GAIA verilerinin analizi çok önemli sonuçlar ortaya çıkardı. Bizim gökadamızın birçok birleşmiş cüce gökadanın olduğu sonucu ortaya çıkıyor (Koppelman et al. 2019). Gaia Sausage ya da Gaia Encaladus gibi yapılar var. Son zamanlarda Kraken, Tamos, Saquoia gibi gökadamızın içerisinde cüce gökadanın izlerini ya da enkazı olduğunu düşündüğümüz yapılardan (streams) söz ediliyor. Bu birleşmelerin ne zaman olduğu önemli. Gaia Sausage 8-11 milyar yıl gibi bir zamana işaret ediyor. Sismik çalışmalar da bunu destekler nitelikte.

#### 3.2 Karadelik üreten yıldızlar

Karadelik adayı yıldızlardan bahsetmeye başladık. Tartışmalı yanları olsa da, özellikle Ligo (Aasi et al. 2015) ve Virgo (Acerese et al. 2015) gözlemlerinden, karadeliklerin birleşmeleri sonucunda üretilen sinyaller tespit ediliyor. Kütleçekim dalgalarından karadeliklerin birleşmeden önceki tahmini kütleleri hesaplanıyor. Yüksek kütle boşluğu denilen bir boşluk var. Bu boşluk kuramsal çalışmalarda tespit edilmiş. Çok büyük kütleli yıldızlar karadelik üretirler ama 50 ile 130  $M_{\odot}$  arasında kütleyle sahip olan yıldızlar karadelik üretmezler (Tagawa et al. 2021). Alt ve üst sınırlar, aşağı yukarı gidip gelebiliyor. Bu boşluğun çok basit bir açıklaması var. Çok sıcak olduğu için ortamda enerjisi çok yüksek fotonlar var. Çok büyük kütleli yıldızlar söz konusu olduğu için bu fotonlardan elektron pozitron çifti üretiliyor. Buradan da nötrino ve karşıt nötrino üretiliyor. Nötrinolar üretildiği zaman yıldız çok kolayca terk ediyorlar. Bu yıldızın çökmesine neden oluyor. Bu çökmenin sonucunda oksijen tutuşuyor. Oksijen yakımı sonucu ortaya çıkan enerji, yıldız bir bütün olarak dağıtmaya yetecek kadar yüksek bir enerji. Dolayısıyla ortada bir karadelik bırakmaması gerek. O yüzden kütle boşluğu oluşuyor.

Fakat Ligo ve Virgo'ya bakacak olursak bu aralıkta kütleler var, GW190521 için toplam kütle 142  $M_{\odot}$  bulunmuş (Palmese & Conselice 2021). Birleşen yıldızların kütlelerinin nasıl paylaştırılacağı ayrı bir iş ama bileşenlerden en az birisi bu aralığa düşer. Dolayısıyla, bu bakımdan boşluk ihlal edilmiş olur. Bu boşluğa düşen 8-9 tane adaydan bahsediliyor. Dolayısıyla bunlar karadelik adayı yıldızlar, bizim bilmediğimiz

daha önce hiç tartışmadığımız yıldızlar gündeme gelmiş oluyor. Bu karadelikler nasıl oluştu? Karanlık madde, karanlık madde yok oluşu, rastgele birleşmeler, alternatif nükleer tepkimeler ve başka ısıtma sistemleri gibi etkilerle açıklayan alternatif yaklaşımlar var. Dolayısıyla, karadelik çalışmaları da yıldız astrofizikine bir başka alan açmaya başladı.

#### 3.3 Asterosismolojinin yıldız astrofizikine katkıları

Özellikle CoRoT, Kepler ve TESS uzay görevleri hem yeni tür zonklayan yıldızların keşfi hem de çok sayıda yıldızın zonklama verilerinin elde edilmesi bakımından eşsiz roller üstlendi. Sayıları artanlar arasında  $\gamma$  Dor yıldızları da var. Onlar da karma özellikler gösteriyor. İbanoğlu et al. (2018) ile Li et al. (2020) katalogları bu yıldızların başlıca özelliklerini sunmaktadır. Yavaşça zonklayan B yıldızları (SPB) var, çok revaçta. Güneş benzeri titreşim yapan yıldızların bereketinin yanı sıra, bunlar da özellikle  $\beta$  Cep'lerle birlikte ilgi çekmeye başladı. SPB'ler anakol etrafındaki yıldızlardır. Birçok çift yıldızın SPB özelliği gösterdiği bilinmektedir (örneğin DI Her).  $\beta$  Cep'ler de, anakol civarında yer alan ilginç yıldızlar. Kepler verileri onların sayısını artırdı. Hibrit B yıldızları hem p-hem g-kipinde titreşimler gösteriyor.  $\delta$  Scuti'ler uzay görevleri öncesinde en yaygın gözlenen zonklayan yıldızların başında geliyordu. CoRoT da çok sayıda  $\delta$  Scuti yıldızı keşfetti ve bazılarında sayıları 200-400'ü bulan frekans tespit etti.

Henüz yeterince araştırılmamış yarı-ayık çift yıldızlardaki zonklayanlar çok özel yıldızlardır. Kütle transferi yaparken zonklamalar görünüyor (Soydugan et al. 2008; Mkrtchian et al. 2018). Bu sistemlerde, titreşim frekanslarından yola çıkarak kütle transferine ilişkin sonuçlar elde etmenin mümkün olup olmadığı merak konusudur. Aktarılan kütle miktarıyla ve kütlelenin kattığı enerji ile zonklamanın frekans ve genliği arasında ilişkiler araştırılabilir. Güneş benzeri titreşim yapan yıldızlarda ise en çığır açıcı şeyler saklı.

##### 3.3.1 Dönme, manyetik alan ve kimyasal tuhaflık

Bizim bilmediğimiz ve merak ettiğimiz sorunlara asterosismik gelişmeler çok güzel yanıtlar veriyor, açıklamalar sağlıyor. Bu yanıtlar arasında dönme de var. Kepler verilerinden, yıldızların derinliğe bağlı diferansiyel dönme yaptığı keşfedildi (Aerts 2021). Hem devlerde hem alt devlerde hem de anakol yıldızlarında katı cismin dışında bir dönme söz konusu. Belki, kırmızı budaklar (red clumps) katı cisim gibi dönmeye biraz daha yakın. Özeği zarfından 10 kat kadar daha hızlı dönen yıldızlar var. Eksen dönmesinden yola çıkarak, PV Cas örten çifti için Yıldız (2005) tarafından elde edilen dönme profili bu sonuçla çok uyumlu. Tüm gözlemsel verileri fit eden modele göre yüzeyin hemen altında çok ince bir katman yavaş dönüyor, yüzeyin biraz altında çok hızlı bir dönme var. PV Cas, fotometrik olarak Ap benzeri değişimler gösteriyor. Dolayısıyla bu diferansiyel dönme, kimyasal tuhaflık, manyetik alan çok iç içe geçmiş gibi görünüyor.

Yeni gelişen alanlardan birisi de, asterosismik yöntemlerle manyetik alan araştırmalarıdır. Asterosismik verilerden radyatif özekte manyetik alan ölçümü için yöntemler ve uygulamalar geliştiriliyor. Bu konuda çok güzel çalışmalar var (bkz. Bugnet et al. 2021).

Kimyasal tuhaf yıldızlar astrofizikinin en güzel araştırma alanlarından birisi. Ap türü tuhaf yıldızlar fotometrik değişimler gösterirken tayf çizgilerinde de değişimler olup olmadığı merak konusu olmuştu. Kızıllık & Wood (1967) bu

konuyu aydınlatma amacıyla 13 kimyasal tuhaf yıldızın Balmer çizgilerini incelemiş ve zamanla çizgilerin değiştiğini keşfetmişler. Bu çalışmayı, olguların farklı gözlem ve tekniklerle incelenmesi açısından örnek bir çalışma olarak nitelendirebiliriz.

### 3.3.2 Yavaşça dönen B yıldızlarında iç karışım

Son yıllarda, yıldızlarda iç karışım üzerine çok fazla araştırma yapılmaya başladı (Pedersen et al. 2021; Aerts 2021). Yavaşça dönen B yıldızlarının (SPB) içerisinde kimyasal bileşimin nasıl bir profil gösterdiği asterosismik yöntemlerle ortaya çıkarılıyor. Elde edilen profiller birbirine neredeyse hiç benzemiyor, birbirinden çok farklı karışım katsayıları elde ediliyor.

### 3.3.3 Kabuk yakma

Yakın zamanda kabuk yakma süreciyle ilgili çok güzel bir gelişme ortaya çıktı. Hidrojen kabuk yakma sürecinde, kabuğun üstü ile altı zıt evrede davranıyor. Bu olgu kabuk yakma yasası olarak adlandırılıyor. Üst kısım çöküyorsa alt taraf genişliyor veya tersi. Bir çeşit ayna özelliği gösteriyor. Bu yasanın ihlal edildiği bir durumun olup olmadığı merak ediliyordu. Hekker et al. (2020) yaptıkları çalışmada, kırmızı devler bölgesinde ışımaya gücü çıkıntısının (luminosity bump) olduğu zamanda yasanın işlemediğini gösterdiler.

### 3.3.4 Kütleleri hassas belirlenmiş 12 Boo bileşenlerinin modelleri

12 Boo çift sistemi yıldızların yapı ve evriminin test edilmesi için çok uygun bir sistemdir. TESS gözlemi yapıldı ve asterosismik verileri elde edildi (Ball ve ark., hazırlanıyor). Biz de bu sistemi henüz inceledik, bileşenlerin modellerini yaptık. Konacki et al. (2010) dikine hız ve girişimölçer verilerinden bileşen kütlelerini çok hassas bir şekilde tespit etmişler. 12 Boo A için, binde 2 seviyesinde bir hatayla,  $M = 1,4109 M_{\odot}$  bulunmuş. Güneş de dahil, belki de hiçbir yıldızın modeli gözlemlere bu kadar uyum sağlamamış görünüyor. Aynı şey ikinci bileşenin kütlesi için de söz konusu. Konacki et al. (2010) başka çift yıldızların kütlelerini de benzer hassaslıkla elde etmişler. O sistemlerin de asterosismik verilerinin elde edilip analizlerinin yapılması çok yararlı olacaktır.

## 4 Kırmızı devlerin ve budakların temel özelliklerini belirlemek için kullanılan yöntemler

### 4.1 Astrometrik yöntem

Yıldızların astrometrik yoldan (paralaksı kullanarak) yarıçapını belirleyebiliriz. Bunun için gerekli olan gözlemsel nicelikler, parlaklık (V veya K), uzaklık, kütleçekim ivmesi  $g$ ,  $T_{\text{eff}}$ . Ayrıca, bolometrik düzeltme (BC) ve yıldızlararası sönmükleştirme etkisinin de ( $A_V$ ) belirlenmesi gerekir. Yıldızların uzaklığını ve  $K$ 'yı kullanarak, mutlak parlaklığını ve ışımaya gücünü ( $L_{\pi}$ ) hesaplayabiliriz. Bolometrik düzeltmeyi MESA'nın renk- $T_{\text{eff}}$  izokronlar ve yıldız evrim izleri tablolarından (MIST; Paxton et al. 2011, 2013; Choi et al. 2016) elde ediyoruz. Yıldızların yarıçapı ( $R_{\pi}$ )

$$R_{\pi} = \frac{L_{\pi}}{\sqrt{4\pi\sigma T_{\text{eff}}^4}} \quad (3)$$

eşitliğinden elde edilebilir, burada  $\sigma$  Stefan-Boltzmann sabitidir.  $R_{\pi}$  ve (daha hassas belirlenen) asterosismik yoldan elde edilen kütleçekim ivmesini kullanarak yıldızların kütlelerini ( $M_{\pi}$ ) de

hesaplayabiliriz:

$$\frac{M_{\pi}}{M_{\odot}} = \frac{g/g_{\odot}}{(T_{\text{eff}}/T_{\text{eff}\odot})^4} 10^{-[V-A_V+5(1-\log d_{\pi})+BC-M_{\text{bol}\odot}]/2,5} \quad (4)$$

Altı denklemleri birleştirdiğimizde kütle için tek bir açıklama elde ediyoruz. Böylece, iki farklı yoldan kütle hesaplayabiliriz.

V-bandı için yıldızlararası sönmükleştirme, yani  $A_V$ , Schlafly & Finkbeiner (2011) tarafından yeniden kalibre edildiği gibi, Schlegel et al. (1998) elde edilen  $E(B-V)$ 'den hesaplanır:  $A_V = 3,1E(B-V)$ . K parlaklığı için sönmükleştirme katsayısı,  $A_K = 0,287E(B-V)$  ilişkisinden (Fulton & Petigura 2018) buluyoruz.

### 4.2 Asterosismik yöntem

Yıldızların asterosismik yoldan da kütle ve yarıçapını hesaplıyoruz. Maksimum genişliğin frekansı  $\nu_{\text{max}}$ ,  $g/\sqrt{T_{\text{eff}}}$  ile; frekanslar arasındaki büyük ayrılma  $\Delta\nu$ , yoğunluğun karakökü ile orantılı olduğunu yukarıda belirtmiştik. Bu asterosismik nicelikleri güneş değerleri ile bölersek kalibre etmiş oluruz. Buradan da, kütle ve yarıçap için klasik asterosismik ölçekleme ilişkilerini buluruz (Chaplin et al. 2011):

$$\frac{R_{\text{sca}}}{R_{\odot}} = \frac{(\nu_{\text{max}}/\nu_{\text{max}\odot})}{(\Delta\nu/\Delta\nu_{\odot})^2} \left( \frac{T_{\text{eff}}}{T_{\text{eff}\odot}} \right)^{1/2} \quad (5)$$

$$\frac{M_{\text{sca}}}{M_{\odot}} = \frac{(\nu_{\text{max}}/\nu_{\text{max}\odot})^3}{(\Delta\nu/\Delta\nu_{\odot})^4} \left( \frac{T_{\text{eff}}}{T_{\text{eff}\odot}} \right)^{3/2} \quad (6)$$

Bu ilişkiler tüm yıldızlar için geçerli mi? Büyük ihtimalle değil çünkü ışık küresi Güneş'ten çok sıcak ve çok soğuk yıldızların atmosferleri çok farklıdır ve bu durum titreşim frekanslarını etkiler. Daha genel ölçekleme ilişkilerini nasıl yazabiliriz? Yıldızdan yıldıza değişen bir  $f_{\Delta\nu}$  parametresi (White et al. 2011; Sharma et al. 2016; Yıldız et al. 2016) ve  $f_{\nu_{\text{max}}}$  parametresi tanımlayabiliriz. Atmosfer, kimyasal bileşim veya iyonlaşma durumundaki farklılıklardan kaynaklanan belirsizlikleri, bu parametreler temsil eder. Bu durumda yarıçap ve kütle yeniden yazabiliriz. 2016 yılında yaptığımız çalışmada (Yıldız et al. 2016),  $f_{\Delta\nu}$ 'nın adyabatik üsse (adiabatic exponent, compressibility) nasıl bağlı olduğunu gösterdik. Daha genel bir sonuç Sharma et al. (2016) tarafından elde edilmiş. Yaptıkları çalışmada çok sayıda modelden  $f_{\Delta\nu}$ 'yu veren bir program hazırlamışlar. Bu sonuçlara göre,  $f_{\Delta\nu}$ ,  $Z$  ve  $T_{\text{eff}}$ 'in fonksiyonu. Yarıçap ve kütle için düzeltilmiş ölçekleme ilişkileri aşağıdaki gibi olur:

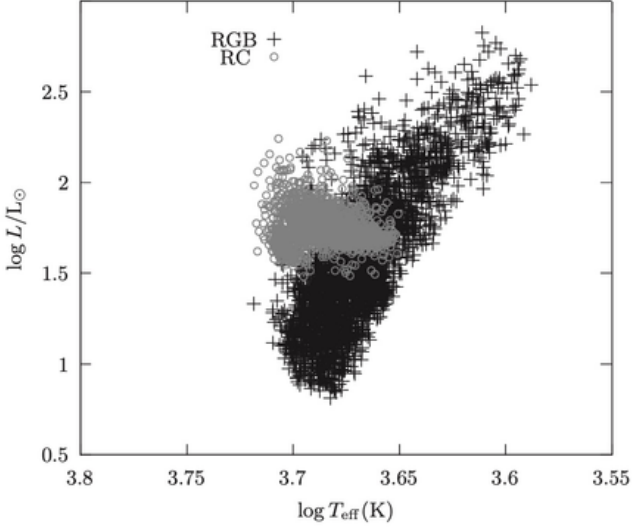
$$\frac{R_{\text{sca}}}{R_{\odot}} = \frac{(\nu_{\text{max}}/\nu_{\text{max}\odot})}{(\Delta\nu/\Delta\nu_{\odot})^2} \left( \frac{T_{\text{eff}}}{T_{\text{eff}\odot}} \right)^{1/2} \frac{f_{\Delta\nu}^2}{f_{\nu_{\text{max}}}} \quad (7)$$

$$\frac{M_{\text{sca}}}{M_{\odot}} = \frac{(\nu_{\text{max}}/\nu_{\text{max}\odot})^3}{(\Delta\nu/\Delta\nu_{\odot})^4} \left( \frac{T_{\text{eff}}}{T_{\text{eff}\odot}} \right)^{3/2} \frac{f_{\Delta\nu}^4}{f_{\nu_{\text{max}}}^3} \quad (8)$$

Bir önemli belirsizlik de paralakstan gelir (Lindgren et al. 2018; Leung & Bovy 2019). Brown et al. (2018) astrometrik belirsizliklerin düşük tahmin edilmiş olabileceğini belirtmektedir.  $\Delta\pi$ 'yi gerçek paralaksla ölçülen paralaks arasındaki fark olarak alırsak, Yıldız & Örtel (2021) bu üç parametre arasında bir ilişki olduğunu gösterdi:

$$f_{\nu_{\text{max}}} = f_{\Delta\nu}^2 (1 - \Delta\pi d_{\pi}) \frac{R_{\text{sca}}}{R_{\pi}} \quad (9)$$

Bu çok iyi bir fırsat oluşturuyor.  $f_{\Delta\nu}$ 'yu Sharma et al. (2016)'nın yöntemiyle hesaplırsak, yukarıdaki denklem  $f_{\nu_{\text{max}}}$



**Şekil 1.** APOKASC-2 kataloğunda verileri sunulan RC'ler (gri çemper) ve RG'ler (+) için HR diyagramı. RG'lerin büyük kısmı  $\log(L/L_{\odot})=0,8-2,8$  ve  $\log(T_{\text{eff}}(K))=3,6-3,7$  aralıklarında yer alırken, RC'ler için aralıklar daralmakta ve  $\log(L/L_{\odot})=1,5-2,0$  ve  $\log(T_{\text{eff}}(K))=3,65-3,7$  olmaktadır.

ile  $\Delta\pi$  arasındaki ilişkiyi ifade eder. İki yoldan yarıçapı hesaplayıp birbiriyle kıyasladığımızda bu belirsizlik parametreleri için açıklamalar elde edebiliriz.

Şekil 1'de, incelediğimiz kırmızı dev ve kırmızı budak yıldızları HR diyagramında gösterilmiştir. APOKASC-2 kataloğunda RG'lerin sayısı yaklaşık 3500, RC'lerinki ise 2700 kadardır.

Işıma gücü çıkıntısının (luminosity bump) doğada karşılığı var mı? Evet var, HR diyagramında o bölgede yıldız yoğunluğu çok daha fazla. Yaklaşık 4570 K'e denk geliyor. Kabuk yakma burada mola veriyor. Işıma gücü maksimum olup, tekrar minimuma gelene kadar burada kabuk yakma yasası çalışmıyor. O sürede, yıldız komple çöküyor. Kabuğun altı ve üstü zit davranışını terk ediyor.

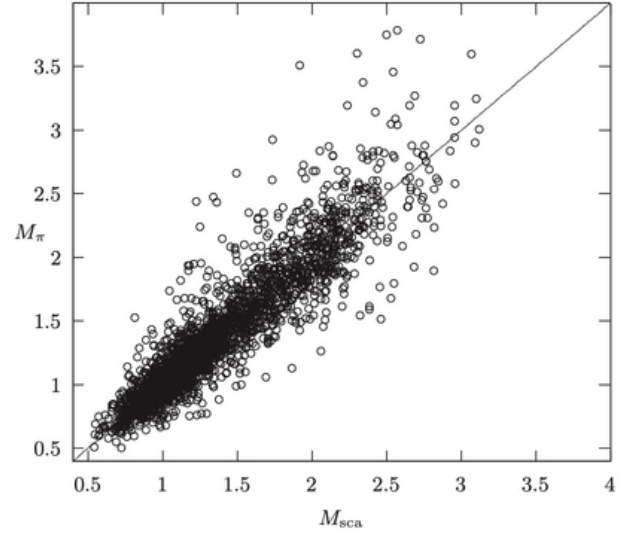
Denklem 7'de verilen  $R_{\text{sca}}$ 'yı  $f_{\nu \text{ max}} = 1$  olarak hesaplayıp  $R_{\pi}$  ile kıyaslayarak, bu iki yarıçap değerinin tüm yıldızlar için birbirine eşit olması gerekir. Bu koşulu sağlayan  $f_{\nu \text{ max}}$  ve  $\Delta\pi$ 'nin değerlerini bulabiliriz.

Eğer  $f_{\nu \text{ max}}$  tüm yıldızlar için tek bir değerli ise, ortalama bir değer olduğunu varsayarsak, RG yıldızlarının GAIA DR2 verileri ve K parlaklığı için  $f_{\nu \text{ max}} = 1,003$  ve  $\Delta\pi = -0,0473$  mas bulunur (Yıldız & Örtel 2021). Bu değerlerle elde edilen  $M_{\text{sca}}$  değerleri APOKASC-2'de verilen kütlelerle çok iyi bir uyum içerisindedir.

## 5 Kırmızı budakların temel özellikleri ve kırmızı devlerle farkları

Aynı yöntemi uygulayarak RC yıldızları için  $f_{\nu \text{ max}} = 1,01883$  ve  $\Delta\pi = -0,04784$  mas değerlerini buluyoruz. İkinci veri sürümüyle (GAIA DR2), RC'ler için düzeltilmiş  $M_{\text{sca}}$  ve  $M_{\pi}$  Şekil 2'de çizilmiştir. Bir saçılma olmakla birlikte, çok iyi bir uyum olduğunu, yıldızların büyük çoğunluğunun  $M_{\text{sca}} = M_{\pi}$  çizgisi üzerinde toplandığını görüyoruz.

Şekil 3'te RC'lerin  $M_{\text{sca}}$ 'sı için histogramı çizilmiştir. 0,5 ile 3,0  $M_{\odot}$  aralığında değerler bulunmakla birlikte en fazla



**Şekil 2.** RC'lerin  $M_{\text{sca}}$ 'ya karşı  $M_{\pi}$  grafiği. Her iki kütle de düzeltilmiş küttedir.  $M_{\text{sca}}$  Denklem 8'den,  $M_{\pi}$  ise düzeltilmiş paralkstan hesaplanmıştır. Saçılmalar olmakla birlikte, iki kütle arasında iyi bir uyum vardır. Kütlelerin büyük kısmı 0,7 ile 2,5  $M_{\odot}$  aralığında yer almaktadır.

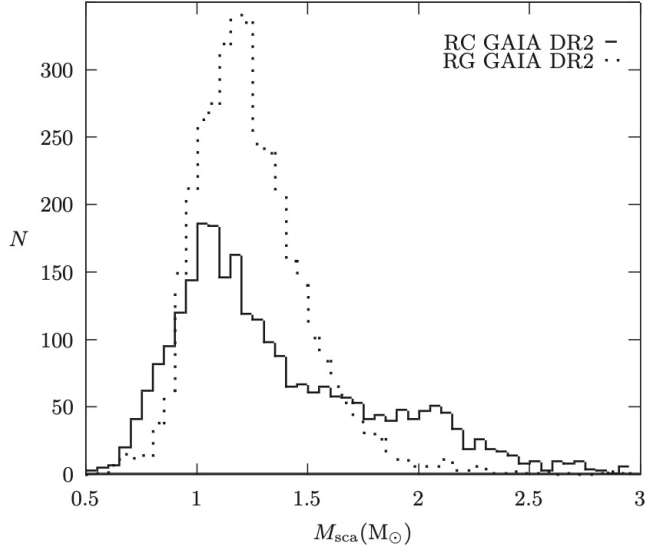
yıldızın bulunduğu aralık 0,9–1,2  $M_{\odot}$  olmakta ve dağılım 1,0 ile 1,1  $M_{\odot}$  civarında maksimuma ulaşmaktadır. İlk baktığımızda iki dağılım birbiriyle pek ilişkili değilmiş gibi görünüyor. Şöyle bir yol izleyebiliriz: 1) bunların yıldız sayıları farklı olduğu için maksimumlarını çakıştırabiliriz, böylece bir çeşit normalize yapmış oluruz. 2) Kırmızı devler çizgisinin daha sağda olması dikkat çekiyor. Demek ki, özellikle merkez kısma bakacak olursak, kırmızı devler daha büyük kütle tarafında yer alıyor. Dolayısıyla, orada da bir kaydırma yapmamız gerekir.

RC ve RG eğrilerini dikey eksende kaydığımızda, karşılaştığımız durum Şekil 4'te çizilmiştir. RG ve RC'lerin maksimum değerlerini eşitlemek için yıldız sayısı (N) sırasıyla 2658 ve 4855'e bölünmüştür. Yatay ekseninde ise sadece RC'lerin eğrisi 0,1  $M_{\odot}$  sağa kaydırılmaktadır. Bu durumda aslında tek bir dağılım ortaya çıkıyor, özellikle  $M < 1,5 M_{\odot}$  için. Bu uyumdan, yıldız evrimine ışık tutacak çok net bir kütle kayıp miktarı çıkmaktadır. Kütleli  $M < 1,5 M_{\odot}$  olan RC yıldızları, RG evresinden bulunduğu noktaya evrilinceye kadar 0,1  $M_{\odot}$  kadar kütle kaybetmiştir. Şu andaki kütleli, 1,2  $M_{\odot}$  ise RG evresindeki ortalama kütleli 1,3  $M_{\odot}$  kadardır.

Şekil 4, RG evresinden RC'ye geçişte kütle kayıp miktarının yanı sıra, RC'lerin menşei hakkında da çok önemli bir sonuç ortaya koymaktadır. Kütleli 1,8  $M_{\odot}$ 'ten büyük RG'lerin sayısı çok azdır. Aynı kütle aralığında çok sayıda RC var. RC'lerin sayısı  $M = 2 M_{\odot}$  civarında yerel maksimuma ulaşmaktadır. Demek ki, bu büyük kütleli RC yıldızları, buldukları konuma ya kırmızı devler bölgesine uğramadan (HR diyagramında sol taraftan ya da yukarıdan olabilir) gelmekte ya da kırmızı devler bölgesini çok hızlıca geçmiş olmalıdır. Kütleli 1,5 <  $M < 2 M_{\odot}$  aralığında olan RC yıldızlarının bir kısmı, yaklaşık yarısı, RG bölgesinden gelirken geriye kalanı RG bölgesine uğramadan (veya çok kısa süre bulunmuşlar) gelmişler.

## 6 Sonuçlar ve Değerlendirmeler

GAIA, Kepler, 2MASS, APOGEE verileri hem yıldızların tek tek yapı ve evrimini hem de binlerce yıldızın dağılım



**Şekil 3.** RC'lerin  $M_{sca}$ 'sı (sürekli çizgi) için histogram. Kıyaslamak için RG'lerin dağılımı da verilmiştir (kesikli çizgi). RC'lerin dağılımı  $1,0-1,1 M_{\odot}$ , RG'lerinki ise  $1,15-1,25 M_{\odot}$  aralığında maksimum olmaktadır.

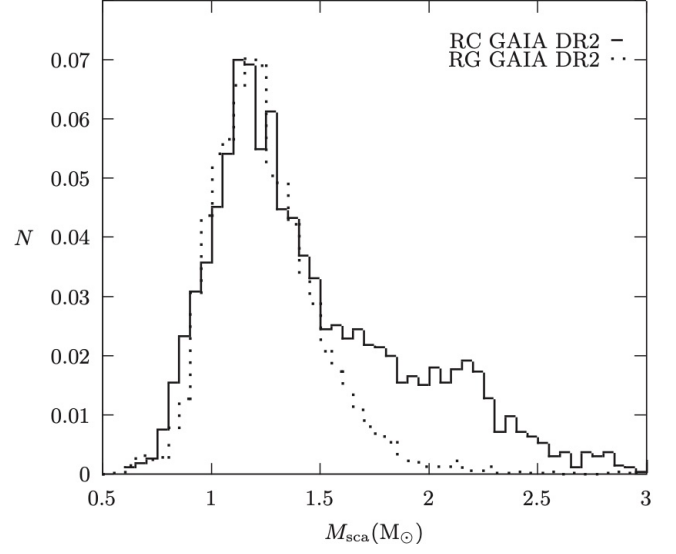
özelliklerini araştırmak için çok uygun. Yıldız astrofiziği büyük veri çağında hem nicel hem de nitel olarak çok büyük bir gelişme göstermektedir. Karadelik, gökada ve gezegen araştırmaları, yıldız astrofiziğinde yeni alanlara kapı aralıyor. Bu alanlar yeni problemler ortaya koymakta ve yeni çözümler bulmamızın önünü açmaktadır.

Asterosismoloji hem çok sayıda yıldız araştırmamıza fırsat sağlamakta hem de elde ettiğimiz yıldız parametrelerinin hassasiyetini çok yükseltmektedir. Özellikle güneş benzeri titreşim yapan yıldızlar bu bakımdan çok önem arz etmektedir. Binlerce RC ve RG yıldızının bu tür titreşimleri kaydedilmiş ve asterosismik parametreleri APOKASC-2 kataloğunda belirlenmiştir. RG ve RC yıldızlarının kütle dahil bir çok parametresini iki farklı yoldan hesaplayabiliyoruz. GAIA DR2 paralaksı kullanılarak RC'lerin özelliklerini hesapladık ve Yıldız & Örtel (2021) tarafından elde edilen RG özellikleri ile kıyasladık.

Bu kıyaslamadan çok önemli iki sonuç çıkarıyoruz: 1) Kütle  $1,5 M_{\odot}$ 'ten daha küçük kütleli yıldızlar için, RG evresi ile RC evresi arasında  $0,1 M_{\odot}$  kadar ortalama bir kütle farkı var. Bu kayıp kütle miktarı, bu aralıkta hemen hemen kütlede bağımsızdır ve kütle kayıp teorilerinin test edilmesinde çok yararlı olabilir. 2) Kütle  $1,5 < M < 2 M_{\odot}$  arasında olan RC'lerin yarısı RG bölgesinden gelirken geriye kalanı RG bölgesine uğramadan bulunduğu noktaya gelmiş olmalıdır. Kütle  $M > 2 M_{\odot}$  olan RC'lerin ise tamamı RG bölgesine hiç uğramamışlar gibi görünüyor.

#### Kaynaklar

- Aasi J. ve ark. 2015, *Class. Quantum Grav.*, 32, 074001  
 Abolfathi B., Aguado D. S., Aguilar G., et al. 2018, *ApJS*, 235, 42  
 Acernese F. ve ark. 2015, *Class. Quantum Grav.*, 32, 024001  
 Aerts C. 2021, *Rev. Mod. Phys.* 93, 015001  
 Baglin A., Michel E., Auvergne M., COROT Team 2006, in Fridlund M., Baglin A., Lochard J., Conroy L., eds, *ESA Special Publication Vol. 1306*, p. 33



**Şekil 4.** RC (sürekli çizgi) ve RG'ler (kesikli çizgi) için normalize edilmiş kütle dağılımları. RC'lerin kütleleri  $0,1 M_{\odot}$  artırılarak çizilmiştir.  $M < 1,5 M_{\odot}$  için iki dağılım mükemmel uyum içindedir. Bu şekilden çıkan çok önemli diğer bir sonuç ise, kütle  $1,8 M_{\odot}$ 'ten büyük RG pek yokken, bu kütle aralığında çok sayıda RC'nin bulunmasıdır (metne bakınız).

- Borucki W. J., Koch D., Basri G. ve ark. 2010, *Science*, 327, 977  
 Brown T. M., Gilliland R. L., Noyes R. W., Ramsey L. W. 1991, *ApJ*, 368, 599  
 Brown A. G. A., et al. (Gaia Collaboration), 2018, *A&A*, 616, A1  
 Bugnet L. ve ark. 2021, *A&A*, 650, 53  
 Chaplin W. ve ark. 2011, *Science*, 332, 213  
 Choi J., Dotter A., Conroy C., Cantiello M., Paxton B., Johnson B. D. 2016, *ApJ*, 823, 102  
 Christensen-Dalsgaard J. 1993, in *ASP Conf. Ser. 42, GONG 1992. Seismic Investigation of the Sun and Stars*, ed. T. M. Brown (San Francisco, CA: ASP), 347  
 Ezer D., Cameron A. G. W. 1965, *Can. J. Phys.*, 43, 1497  
 Ezer D., Cameron A. G. W. 1967, *Can. J. Phys.*, 45, 3429  
 Fulton B. J., Petigura E. A. 2018, *AJ*, 156, 264  
 Hekker S. ve ark. 2020, *MNRAS*, 492, 5940  
 Hon M. ve ark. 2021, *ApJ*, 919, 131  
 İbanoglu C., Çakırlı Ö., Sipahi E. 2018, *NewA*, 62, 70  
 Kallinger T. 2019, *arXiv:1906.09428v1*  
 Kızıllırmak A., Wood H. J. 1967, *AJ*, 72, 727  
 Konacki M. ve ark. 2010, *ApJ*, 719, 1293  
 Koppelman H. H. ve ark. 2019, *A&A*, 625, 5  
 Leung H. W. and Bovy J. 2019, *MNRAS*, 489, 2079  
 Li G. ve ark. 2020, *MNRAS*, 491, 3586  
 Lindegren L. et al. 2018, *A&A*, 616, A2  
 Mkrтчian, D. E. ve ark. 2018, *MNRAS*, 475, 4745  
 Palmese A., Conselice C. J. 2021, *PRvL*, 126, A181103  
 Paxton B., Bildsten L., Dotter A., Herwig F., Lesaffre P., Timmes F. 2011, *ApJS*, 192, 39  
 Paxton B., Cantiello M., Arras P. ve ark. 2013, *ApJS*, 208, 49  
 Pedersen M. G. ve ark. 2021, *NatAs*, 5, 715  
 Pinsonneault M. H., Elsworth Y. P., Tayar J. 2018, *ApJS*, 239, 32  
 Schlafly E. F., Finkbeiner D. P. 2011, *ApJ*, 737, 103  
 Schlegel D. J., Finkbeiner D. P., Davis, M. 1998, *ApJ*, 500, 525  
 Sharma S., Stello D., Bland-Hawthorn J. ve ark. 2016, *ApJ*, 822, 15  
 Skrutskie M. F., Cutri R. M., Stiening, R., et al., 2006, *AJ*, 131, 1163  
 Soyduğan E. et al., 2008, *CoAst*, 157, 379  
 Sullivan P. W. et al., 2015, *ApJ*, 809, 77

- Tagawa H. ve ark., 2021, ApJ, 908, 194  
Tassoul, M., 1980, ApJS, 43, 469  
White, T. R. et al., 2011, ApJ, 743, 161  
Yıldız M., 2005, MNRAS, 363, 967  
Yıldız M., Çelik Orhan Z., Kayhan C., 2016, MNRAS, 462, 1577  
Yıldız M., Çelik Orhan Z., Örtel S., Roth M., 2017, MNRAS, 470,  
25  
Yıldız M., Örtel S., 2021, MNRAS, 489, 1753

**Access:**

M22-0318: [Turkish J.A&A](#) — Vol.3, Issue 3.