

**ANKARA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**ALTCÜCE B YILDIZLARININ ZONKLAMA ÖZELLİKLERİ**

**Murat UZUNDAĞ**

**ASTRONOMİ VE UZAY BİLİMLERİ ANABİLİM DALI**

**ANKARA  
2018**

**Her hakkı saklıdır**

## TEZ ONAYI

Murat UZUNDAĞ tarafından hazırlanan “Altcüce B Yıldızlarının Zonklama Özellikleri” adlı tez çalışması 12/01/2018 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Astronomi ve Uzay Bilimleri Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

**Danışman :** Yard. Doç. Dr. Özgür BAŞTÜRK



**Eş Danışman :** Doç. Dr. Andrzej BARAN



**Jüri Üyeleri :**

**Başkan :** Doç. Dr. Nesibe ÖZEL

Erciyes Üniversitesi Astronomi ve Uzay Bilimleri Anabilim Dalı



**Üye :** Doç. Dr. Aslı ELMASLI AKÇAR

Ankara Üniversitesi Astronomi ve Uzay Bilimleri Anabilim Dalı



**Üye :** Yard. Doç. Dr. Özgür BAŞTÜRK

Ankara Üniversitesi Astronomi ve Uzay Bilimleri Anabilim Dalı



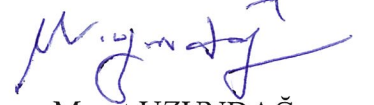
**Yukarıdaki sonucu onaylıyorum.**

**Prof. Dr. Atila YETİŞEMİYEN**  
Enstitü Müdürü

## ETİK

Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez içindeki bütün bilgilerin doğru ve tam olduğunu, bilgilerin üretilmesi aşamasında bilimsel etiğe uygun davrandığımı, yararlandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi beyan ederim.

12/01/2018



Murat UZUNDAĞ

# ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

## ALTCÜCE B YILDIZLARININ ZONKLAMA ÖZELLİKLERİ

Murat UZUNDAĞ

Ankara Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Astronomi ve Uzay Bilimleri Anabilim Dalı

Danışman: Yard. Doç. Dr. Özgür BAŞTÜRK  
Eş Danışman: Doç. Dr. Andrzej BARAN

Bu yüksek lisans tez çalışmasında B tayf türünden zonklayan yıldızların genel zonklama karakteristikleri ortaya konulmuştur. Kepler Uzay Teleskobu sayesinde yapılan kesintisiz, uzun dönemli ve yüksek çözünürlüklü gözlemler sayesinde sdBV değişenlerinin zonklama analizlerinin nasıl yapıldığı aktarılmıştır. KIC 10001893 sdBV değişen yıldızında asterosismolojik yöntemler kullanılarak bulunan zonklama modları irdelenmiştir. Modlar tayin edildikten sonra iç yapıya dair bilgi veren eşel diyagramları ve indirgenmiş dönem diyagramlarının nasıl elde edildiği ifade edilmiştir. Ayrıca, yıldızda keşfedilen tuzaklanmış modlara ilişkin bir tartışma da sunulmuştur.

**Ocak 2018, 64 sayfa**

**Anahtar Kelimeler:** Zonklama, Asterosismoloji, B tayf türünden zonklama yapan altcücüler

## **ABSTRACT**

Master Thesis

### **PULSATION PROPERTIES OF SUBDWARF B STARS**

Murat UZUNDAĞ

Ankara University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Astronomy and Space Sciences

Supervisor: Asst. Prof. Özgür BAŞTÜRK  
Co-Supervisor: Assoc. Prof. Andrzej BARAN

General pulsation characteristics of subdwarf B type variable stars have been presented within this thesis study. Kepler Space Telescope allowed us to get long-term, uninterrupted and photometrically precise data on a high duty cycle. The pulsation modes have been identified for KIC 10001893, a V1093 Her type sdBV star, using asteroseismological methods. Echelle diagrams and reduced period diagram, which provide clues to the interior structure of the star, have been discussed following the discussion for the mode identification procedure. The discovered trapped modes within the star have also been presented in detail.

**October, 2018, 64 pages**

**Key Words:** Stellar Pulsations, Oscillations, Asteroseismology, sdBV

## TEŞEKKÜR

Tez çalışmam boyunca bilgilerini ve tecrübelerini paylaşan ve de çalışmamı sabırla okuyarak son haline gelmesini sağlayan danışmanım Yrd. Doç. Dr. Özgür BAŞTÜRK'e (Ankara Üniversitesi, Astronomi ve Uzay Bilimleri Anabilim Dalı),

Bu konuyla tanışmamı sağlayan, bana bu alanla ilgili çok değerli bilgiler veren ve çalışmalarımız boyunca özverisini hiçbir zaman esirgemeyen Doç. Dr. Andrzej BARAN'a (Pedagogical University, Faculty of Physics and Astronomy),

Hoş sohbetiyle ufkumu açan Doç. Dr. Jurek KRZESINSKI'ye (Pedagogical University, Faculty of Physics and Astronomy),

Krakov daki eğitim hayatım boyunca bana yardımcı olan Prof. Dr. Staszek ZOLA'ya (Jagiellonian University, Faculty of Physics, Astronomy and Applied Computer Science),

Gözlemsel astronomi dersi boyunca benim için uzun mesailer harcayan Doç. Dr. Wacław WANIĄK'a (Jagiellonian University, Faculty of Physics, Astronomy and Applied Computer Science),

Hayata dair bir çok bakış açısı kazandığım yakın dostum Astronom Tolga TORĖUT'a,

Her zaman yanımda olan ve beni destekleyen, bana harika bir ortam hazırlayan Annem Fatma UZUNDAĞ'a, Babam Eyyüp UZUNDAĞ'a ve Ablam Dilek UZUNDAĞ 'a,

İçtenlikle teşekkür ederim.

Murat UZUNDAĞ

Ankara, Ocak 2018

## İÇİNDEKİLER

### TEZ ONAY SAYFASI

ETİK.....	i
ÖZET.....	ii
ABSTRACT .....	iii
TEŞEKKÜR .....	iv
SİMGELER DİZİNİ .....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	x
1. GİRİŞ .....	1
1.1 B Tayf Türünden Altcüce (sdB) Yıldızları .....	1
1.2 B Tayf Türünden Altcüce Yıldızların Evrimi .....	4
1.3 sdB Yıldızlarının Oluşumu.....	7
1.4 B Tayf Türünden Zonklayan Altcüce (sdBV) Yıldızları .....	11
1.5 Pulsasyon Modlarının Belirlenmesi.....	18
1.6 Frekans Ayrışması .....	22
1.6.1 Dönmenin etkisiyle modların frekansta ayrışması.....	23
1.7 Modların Dönemde Ayrışması.....	24
1.8 Eşel Diyagramları.....	26
1.9 Pulsasyon Modlarının Tuzaklanması.....	27
2. GÖZLEMLER ve VERİ İNDİRGEME .....	29
2.1 Kepler Uzay Teleskobu.....	29
2.2 KIC 10001893 .....	32
3. ANALİZ ve YÖNTEM .....	36
3.1 Fotometrik Veri.....	36
3.2 Fourier Analizi .....	38
3.2.1 KIC 10001893 yıldızının zonklama frekansları.....	42
3.2.2 KIC 10001893'te belirlenen p-modları .....	43
3.2.3 KIC 10001893'te belirlenen g-modları.....	44
3.3 Zonklama Modlarının Tayini .....	46

<b>3.3.1 KIC 10001893 yıldızı için zonklama modlarının tayini ile ulaşılan sonuçlar .....</b>	<b>48</b>
<b>3.4 Gözlemsel Eşel Diyagramları.....</b>	<b>52</b>
<b>3.5 İndirgenmiş Dönem Diyagramları .....</b>	<b>54</b>
<b>4. TARTIşMA ve SONUÇ .....</b>	<b>58</b>
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>60</b>
<b>ÖZGEÇMİş.....</b>	<b>64</b>





## SİMGELER DİZİNİ

Å	Angström
$\lambda$	Dalgaboyu
K	Kelvin
$L_{\odot}$	Güneşin ışınım gücü, $3.84 \times 10^{33}$ erg/sn
$M_{\odot}$	Güneş kütlesi, $1.99 \times 10^{33}$ gr
R	Yarıçap
$R_{\odot}$	Güneş yarıçapı, $6.96 \times 10^5$ km
$\alpha$	Saçaçıklık
$\delta$	Dikaçıklık
RV	Dikine hız
$\log g$	Yüzey çekim ivmesi
t	Zaman
m	Kadir; parlaklık birimi
S/N	Sinyal gürültü oranı
R	Tayfsal çözünürlük

### Kısaltmalar

CCD	Charge Couple Device
BJD	Barisentrik Julian günü
KIC	Kepler Input Catalog
Q	Kepler'in 3 aylık gözlem sezonu
SC	Kepler'in kısa poz (Short Cadence) veri türü
LC	Kepler'in uzun poz (Long Cadence) veri türü
$f$	Frekans

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1 Yatay kolun en uç kısmında (EHB) yer alan B tayf türünden altcücelerin (sdB- sdBV) Hertzsprung-Russell Diyagramı üzerindeki pozisyonları (Heber 2016).....	3
Şekil 1.2 B tayf türünden altcüce içeren çift yıldız sistemlerinin yörünge dağılımları (Heber 2009).....	5
Şekil 1.3 Şu ana kadar sdB etrafında keşfedilen yıldızaltı cisimlerin bulunma yöntemlerine göre sınıflandırılması (Silvotti vd. 2014).....	6
Şekil 1.4 Kütle oranı 1.2 – 1.5'ten küçük olan sistemlerde kararlı kütle aktarımıyla sdB oluşumu (Podsiadlowski 2008) .....	7
Şekil 1.5 Kütle oranı 1.2 – 1.5'ten küçük olan, sdB içeren sistemlerde evrim şeması.....	9
Şekil 1.6 Kütle oranı 1.2 – 1.5'ten büyük olan sistemler için evrim şeması.....	10
Şekil 1.7 Zonklama gösteren ilk keşif EC 14026-2647 yıldızının genlik-frekans diyagramındaki zonklama sinyali 7.5 mHz Killkenny vd. (1997).....	12
Şekil 1.8 g-modu ve p-modu zonklamalar gösteren bazı sdB yıldızlarının ışık eğrileri (Fontaine vd. 2003) .....	13
Şekil 1.9 sdBV yıldızları için çizilen H-R diyagramı (Heber 2016).....	14
Şekil 1.10 SdBV yıldızları için teorik olarak hesaplanan kararsızlık kuşağı (Charpinet vd. 2011) .....	16
Şekil 1.11 Frekansa karşılık toplam düğüm sayısının çizildiği yayılım diyagramı (Aerts vd. 2010). .....	19
Şekil 1.12 $l = 3$ modları için pulsasyon geometrisi (Aerts vd. 2010).. .....	20
Şekil 1.13 Şekil de artan $l$ derecesi ile modların algılanma ihtimali (S) (Aerts vd. 2010). Mod derecesi $l$ arttıkça modların birbirini sönmleme ihtimali de artmaktadır.....	21
Şekil 1.14 $l = 2$ modları için $m$ 'nin alacağı değerler genlik-frekans diyagramı (Baran vd. 2012) .....	24
Şekil 1.15 KIC 2991403 yıldızı için elde edilen genlik-periyod diyagramı (Baran & Winans 2012). Diyagramda $l = 1$ ve 2 değerleri için dönemdeki ayrışmalar görülmektedir. ....	26
Şekil 1.16 EPIC 21179126 yıldızı için elde edilen eşel diyagramı (Baran vd. 2017). Mavi ile gösterilen noktalar $l=1$ modudur. ....	27

Şekil 2.1 Kepler Uzay Teleskobu'nun fotometrik sistemi ve dedektör dizisi (Koch vd. 2010) .....	29
Şekil 3.1 KIC 10001893 sdBV yıldızının sadece bir çeyreği kapsayan ışık eğrisi.....	38
Şekil 3.2 KIC 10001893 sdBV yıldızının genlik-frekans diyagramı.....	43
Şekil 3.3 KIC 10001893 sdBV yıldızının genlik-frekans diyagramındaki p-modları .....	44
Şekil 3.4 KIC 10001893 sdBV yıldızının genlik-frekans diyagramındaki g-modları .....	45
Şekil 3.5 KIC 10001893'ün genlik-dönem diyagramında belirlenen zonklama modları .....	510
Şekil 3.6 KIC 10001893'ün döneme karşılık ( $n$ ) modlarının değişimi.....	52
Şekil 3.7 KIC 10001893 yıldızı için elde edilen $l=1$ eşel diyaramı .....	53
Şekil 3.8 KIC 10001893 yıldızı için elde edilen $l=2$ eşel diyaramı .....	54
Şekil 3.9 KIC 10553698 yıldızı için elde edilmiş indirgenmiş dönem diyagramı (Óstensen vd. 2014) .....	56
Şekil 3.10 KIC 10001893 yıldızı için elde edilmiş indirgenmiş dönem diyagramı.....	57

## ÇİZELGELER DİZİNİ

- Çizelge 3.1 KIC 1001893'ün Fourier dönüşümü sonrası bulunan zonklama frekansları ve bu frekanslar üzerinden belirlenen zonklama modları. Tuzaklanan modlar “t” harfi ile gösterilmektedir. .... 39
- Çizelge 3.2 V1093 Her karakterine sahip yıldızlardaki modlarda dönemde ayrışma miktarları (Reed vd. 2012) ..... 48
- Çizelge 3.3 Kepler Uzay Teleskobu ile gözlenen sdBV'lerin dönme dönemleri (Reed vd. 2015)..... 49



# 1. GİRİŞ

## 1.1 B Tayf Türünden Altcüce (sdB) Yıldızları

B tayf türünden altcüce (sdB) gözlemleri yaklaşık yetmiş yıl önce başlamıştır. İlk sdB yıldızı Humason ve Zwicky (1947) tarafından Kuzey Galaktik Kutbu civarında bulunan Hyades takım yıldızı içerisinde keşfedilmiştir. Luyten (1953) bu ilk keşife ek olarak 70 tane sönük mavi cisim eklemiştir. Bulunan bu 70 cismin tayfsal gözlemleri sonucu kimyasal bolluğu ortaya konmuştur. Kimyasal olarak tuhaf (ing. peculiar) olan bu cisimlerin uzay hızları (ing. proper motions) da hesaplanmış ve Luyten (1951) tarafından verilmiştir.

Bu sönük cisimlerden daha çok sayıda keşfetmek üzere birçok fotometrik tarama projesi (ing. survey) planlanmıştır. Feige (1958) yayınladığı katalogda gökadanın halo bölgesine ait 114 tane sönük mavi cisim ortaya koymuştur. Bu cisimlerin uzay hızlarının oldukça yüksek olduğu farkedilmiştir. Ayrıca, bu cisimlere ilişkin sınıflandırma da ışınım sınıflarına ve tayf türlerine atıfla sdO ve sdB olarak yapılmıştır (Feige 1958).

Altcüce yıldızların görünen parlaklıklarının düşük olması (10 ile 17 kadir), gözlemsel açıdan bu cisimlerin sınıflandırmasını oldukça zorlaştırmaktadır. Bu nedenle cisimlerin gözlemsel özelliklerinin ortaya konulması için 1986'ya kadar beklemek zorunda kalınmıştır. Gelişen gözlem araçlarıyla beraber yine birçok tarama projesi (ing. survey) geliştirilmiştir. Bu projelerden Palomar-Green Survey (Green vd. 1986) o güne dek elde edilememiş bir büyük resim ortaya koymuştur. Bu proje kapsamında yapılan gözlemlerle, olması gerekenden sönük ve sıcak bu yıldızlardan Kuzey Galaktik Yarımkürede 1874 adet keşfedilmiştir. Keşfedilen bu cisimlerin çoğunun (%40) hidrojen zengin atmosfere sahip sdB ve sdO yıldızları olduğu bulunmuştur. Aynı çalışmada B tayf türüne ait altcücelerin gökadanın halo populasyonundan ziyade galaksinin eski disk (ing. old disk) kısmına ait olduğunu ifade edilmiştir. Gökadanın diskine ait bu yıldızların gözlemleri Kitt Peak-Downes tarama gözlemleri kapsamında Downes (1986) tarafından sunulmuştur. Bu gözlemlerde 60 tane altcüce türünden yıldız

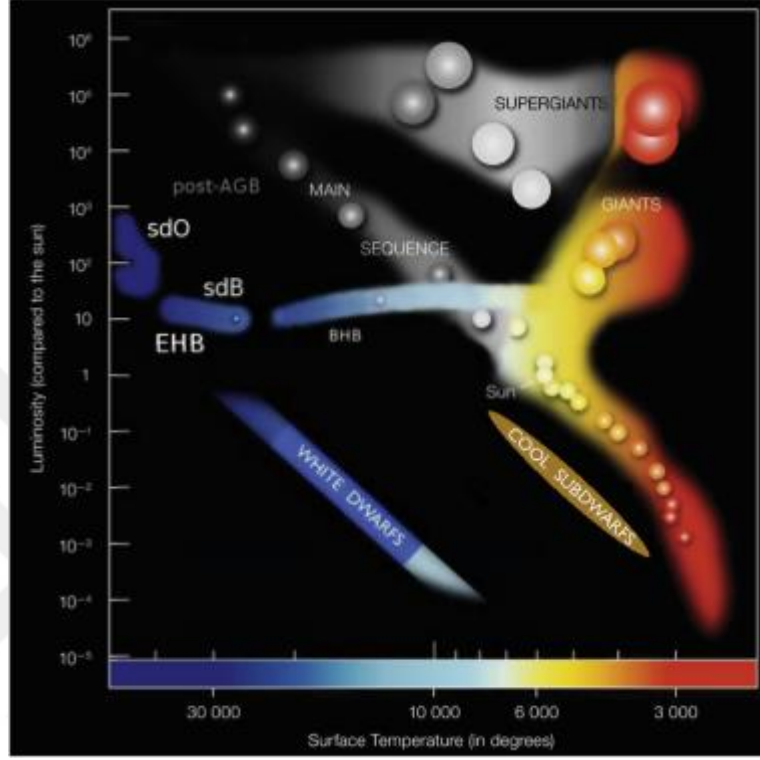
keşfedilmiştir. Bu 60 yıldızdan 40 tanesi sdB, 20 tanesi ise sdO yıldızı olarak sınıflandırılmıştır. Ekip ayrıca keşfedilen bu yıldızlar için uzay yoğunluğu da hesaplamış bulunan bu sonuçlar sdO yıldızları için  $7 \times 10^{-7} \text{ pc}^{-3}$ , sdB yıldızları içinse  $2 \times 10^{-6} \text{ pc}^{-3}$  olarak beklentilerin üstünde ortaya çıkmıştır.

Daha sonra, modern dedektörlerin, teleskopların ve modern astronomik hesaplama tekniklerinin gelişmesiyle beraber Hagen vd. (1995), Wisotzki vd. (1996), Stobie vd. (1997) ve Micaelian vd. (2007) birçok altcüce yıldızı keşfetmişlerdir. Óstensen (2006) tarafından yapılan çalışmada o güne dek gözlemlenmiş olan tüm cisimler sınıflandırılmış ve toplamda 2500 cisim listelenmiştir. Son olarak Geier vd. (2017) yaptığı çalışmada bugüne kadar gözlemlenmiş tüm cisimleri kataloglamış ve toplamda 5613 sıcak altcüce yıldız belirlenmiştir.

Edinburgh-Cape (Stobie vd. 1997) tarama gözlemleri bu cisimlerin gözlemsel özelliklerinin farklı bir yanının keşfedilmesi bakımından ayrı bir öneme sahiptir. Bu tarama gözlemlerinde Stobie vd. (1997) bu yıldızlara ait ışık eğrilerinde o güne kadar keşfedilmemiş dönemli davranışlar gözlemlemiştir.

Tayf türü B olan sıcak altcüce (sdB) yıldızları merkezinde helyum yakan cisimler olarak tanımlanmaktadır (Heber 2016). Bu yıldızlar Hertzsprung-Russell (H-R) diyagramında yatay kol ile beyaz küce soğuma (ing. cooling) kolu arasında bulunan ve Renk-Renk diyagramlarında buldukları nokta itibari ile yatay kolun uç kısmındaki (ing. Extreme Horizontal Branch) yıldızlar olarak belirtilen alana ait yıldızlardır (Heber 2016). Yıldızların H-R diyagramındaki konumları şekil 1.1'de gösterilmektedir. Şu ana kadar gözlemlenmiş etkin sıcaklıkları ( $T_{\text{eff}}$ ) 20000 K ile 40000 K arasındadır. Kütle değerleri tipik değer  $0.5 M_{\odot}$  civarında iken, çapları  $0.15$  ile  $0.35 R_{\odot}$  arasında değişmektedir. Bu parametrelerden hareketle, bu yıldızların yoğun cisimler oldukları söylenebilir. Yüzey çekim ivmeleri ( $\log g$ ) kabaca 5 ile 6.5 (cgs) arasında değişmektedir. SdB yıldızlarının helyum yakan çekirdeğinin etrafını saran çok ince bir hidrojen katmanı ( $M_{\text{zarf}} < 0.02M$ ) bulunmaktadır. Böylesine küçük bir zarf kütlesi, sdB yıldızının atasının (ing. progenitor) asimptotik dev koluna (ing. Asymptotic Giant Branch, AGB) çıkmasına

müsade etmez. Dolayısıyla, çekirdekte helyumun tükenmesiyle beraber, sdB yıldızı doğrudan beyaz cüce soğuma (ing. cooling) koluna gidecektir.



Şekil 1.1 Yatay kolun en uç kısmında (EHB) yer alan B tayf türünden altcücelerin (sdB-sdBV) Hertzsprung-Russell Diyagramı üzerindeki pozisyonları (Heber 2016)

Yatay kolun en uç kısmında bulunan (EHB) yıldızları kimyasal olarak tuhaf (ing. peculiar) yıldızlardır. Yıldızlar güneş benzeri bolluğa uymayan (ing. non-solar abundance pattern) metal bolluğu değerlerine sahiptirler Yıldızların tayflarında oldukça kompleks yapılar gözlenmektedir. Tayflarında kuvvetli  $H_{\beta}$  ve  $H_{\gamma}$  ve helyum çizgilerinin yanısıra oldukça kompleks yapılar da gözlenmektedir. Bu ağır metallerin varlığını açıklamak için birçok kompleks model önerilmiştir (Heber 2016). Bu elementlerin gözleniyor olmasının sebepleri, radyatif kaldırma kuvveti (ing. radiative levitation), kütle çekimle çekirdeğe doğru çökme, zayıf yıldız rüzgarları ve difüzyon (ing. stellar diffusion) olarak düşünülmektedir (Charpinet vd. 2007, Reed vd. 2010 ve Heber 2016). Bu noktada bu tip elementlerin gözleniyor olması oldukça önemlidir. Çünkü bu tür

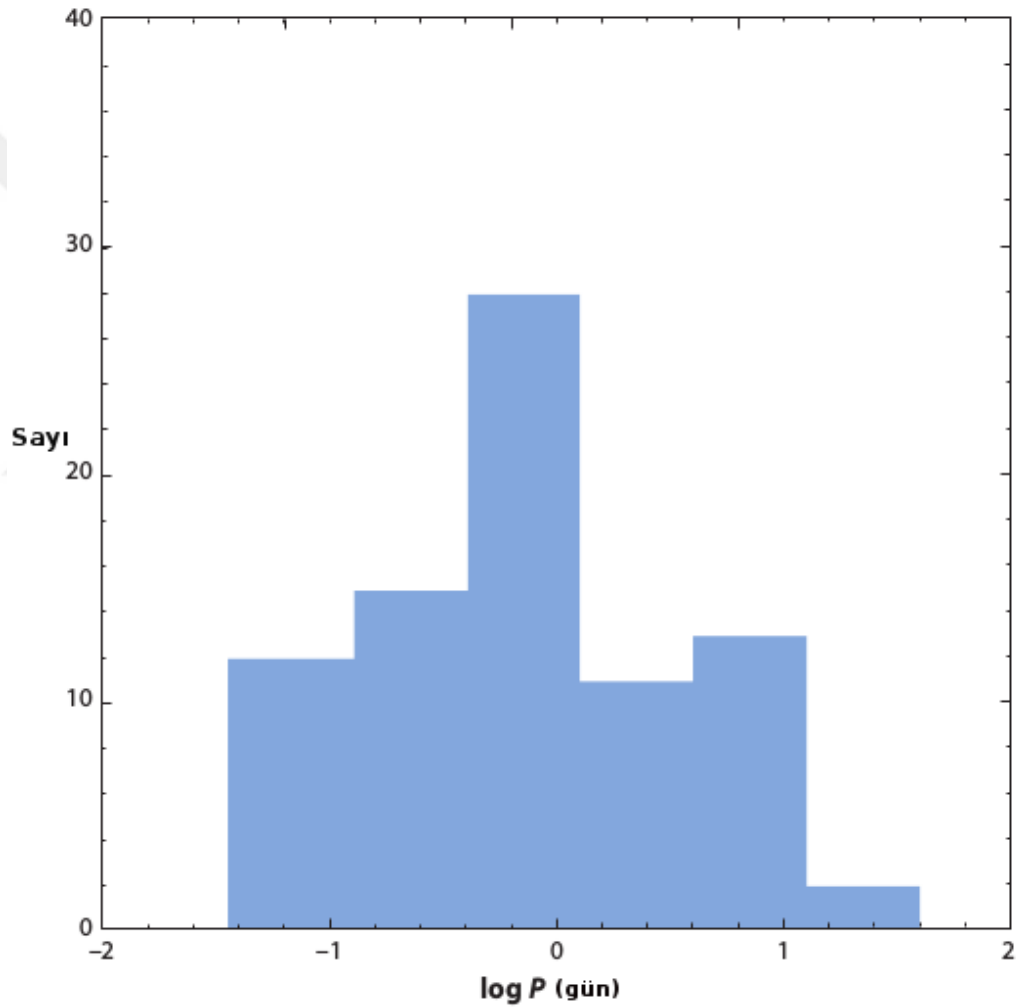
elementlerin özellikle demir grubu elementlerinin yıldız içerisinde bir alanda birikiyor olması donukluğun (ing. opacity) artmasına neden olmaktadır. SdB yıldızlarının özelinde düşünüldüğünde zonklamanın (pulsasyonun) kaynağı bu tip demir grubuna ait ağır elementlerin kısmi iyonizasyon bölgeleridir. Bu bölgelerde  $\kappa$ -mekanizmasına benzer bir mekanizma çalışmakta, ancak kaynağı ağır metallerin kısmi iyonizasyonu olduğu için mekanizma Z-mekanizması (ing. Z-bump) olarak adlandırılmaktadır.

## 1.2 B Tayf Türünden Altcüce Yıldızların Evrimi

B tayf türüne ait yıldızların evrimi hala tam olarak anlaşılabilmiş değildir. Birçok senaryo bu yıldızların evrim süreçlerini anlamak için geliştirilmektedir. Gözlemsel olarak bulunan sdB'lerin en az %50'sinin çift yıldız sistemlerinin üyesi olması, bu yıldızların evrimsel süreçlerinde geçirdikleri fiziksel süreçleri anlamak adına önemli gözükmektedir. SdB yıldızlarının gözlenen yoldaşları yıldızaltı cisimler (kahverengi cüceler ve gezegenler), farklı tayf türüne ait anakol yıldızları, beyaz cüceler ve hatta nötron yıldızları ve karadelikler olabilir. Dolayısıyla, çift sistemlerin evrimini anlamak, B tayf türüne ait bir altcücenin evrimini anlamak açısından oldukça kritik gözükmektedir. Bulunan sistemler gözlemsel limitler nedeniyle genelde kısa dönemli çiftlerdir. Kısa dönemli bu çift sistemlerin büyük çoğunluğu bir sdB ve sdO türü altcüce ile geç tayf türünden bir cüce (dM) yıldızından oluşan tek çizgili sistemlerdir (Kilkenny 1978 ve Menzies & Marang 1986). Ayrıca, beyaz cüce (WD) + sdB sistemleri de gözlenmiştir (örn. Koen vd. 1998). SdB barındıran çift yıldız popülasyonunun belirlenmesi amacıyla birçok tarama gözlemleri yapılmıştır. Maxted vd. (2001) yatay kolun en uç kısmına (EHB) ait 36 cisimden 21'inin kısa dönemli çift yıldız sistemi olduğunu keşfetmiştir. Copperwheat vd. (2011) B tayf türüne ait altcüce yıldızların yaklaşık %50'sinin çift sistemin üyesi olduğunu göstermiştir. Ayrıca, bu gözlemlerde sdB'lerin yoldaşlarının çoğunluğu beyaz cüce olarak bulunmuştur. Geier vd. (2011)'de yaptığı çalışmada 89 tane sdB içeren çift yıldız sistemi ortaya koymuştur. Bulunan bu sistemlerin dönemlerinin 0.07 gün ile 27.8 gün arasında değiştiği gözlenmiştir. Two Micron All Sky Survey (2MASS) tarama gözlemleri sonucu sdB barındıran çift



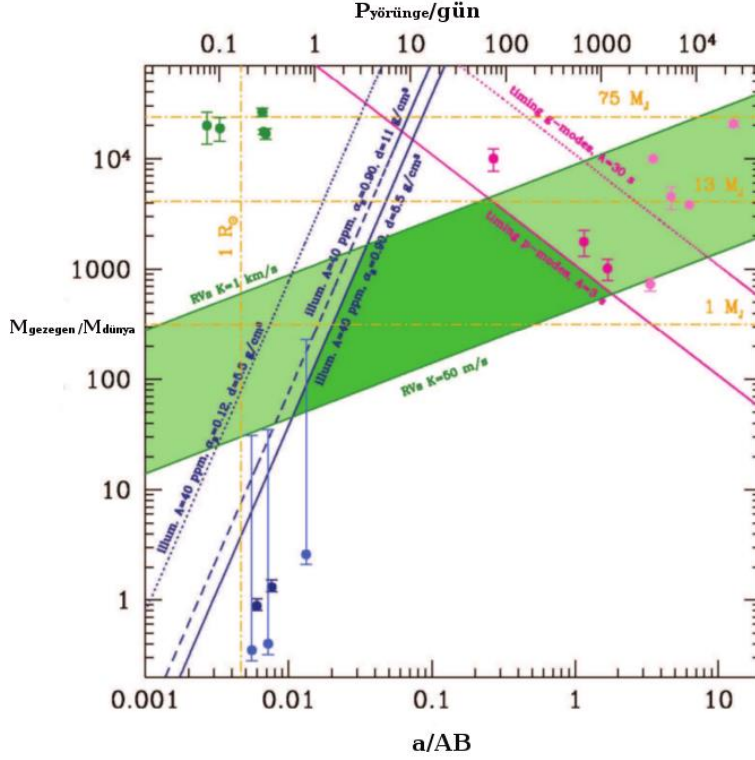
sistemlerdeki diğer bileşenin A0 ile M2 arasında değişen tayf türlerine sahip olabildiği belirlenmiştir (Reed ve Stiening 2004). Ek olarak, Óstensen ve Van Winckel (2012) dönemleri 500 ile 1200 gün arasında değişen oldukça uzun dönemli sdB ve anakol yıldızlarından oluşan 8 tane sistem keşfetmişlerdir. Gözlenen bu uzun dönemli sistemler, istatistiksel bir bütünlük oluşturulması açısından oldukça önemlidir. Heber (2009) yılında bu sdB'lere ait gözlemsel değerleri içeren bir histogram sunmuştur (Şekil 1.2). Bu histogramda sdB içeren 81 çift sistem bulunmaktadır.



Şekil 1.2 B tayf türünden altcüce içeren çift yıldız sistemlerinin yörünge dağılımları (Heber 2009)

Kepler Uzay Teleskobu ile gözlenen 19 tane sdB yıldızının büyük bölümü de çift sistemler içinde yer almaktadır. Bulunan cisimlerin 4 tanesi sdBV+Md çift sistemi iken,

3 tanesi sdBV+WD çiftleridir. İki tane zonklayan B tayf türüne ait altcücenin (sdBV) etrafında ise 5 tane büyüklük bakımından dünya benzeri gezegenler bulunmuştur. Ötegezegen içeren bu iki cisimden biri olan KIC 10001893 yıldızının zonklama özellikleri bu tez çalışmasında yer almaktadır. Şu ana kadar 14 tane B tayf türünden altcüce yıldızın etrafında 18 tane yıldızaltı cisim (yakın ve kütleli gezegenler veya kahverengi cüce) olduğu saptanmıştır. Bulunan bu yıldızaltı cisimlerin yörünge büyüklüklerine karşılık kütleleri, keşif yöntemleri ile birlikte şekil 1.3'te gösterilmektedir. Bulunan bu cisimler, bulunma yöntemlerine göre üç gruba ayrılmıştır. İlk gruba ait cisimlerin (8 tane) yörünge dönemleri 3.2 yıl ile 16 yıl arasındayken, kütleleri 2 ile 40  $M_{\text{jup}}$  arasında değişmektedir. İkinci gruba ait 5 cisim ise Kepler Uzay Teleskobu gözlemleri sayesinde bulunmuştur. Bulunan bu cisimlerin hepsi dünya benzeridir ve çok yakın yörüngelerde (5.3 ile 19 saat) dolanmaktadırlar. Diğer 5 kahverengi cüce adayı ise 1.8 ile 7 saat arasında değişen kısa yörünge dönemine sahiptir.



Şekil 1.3 Şu ana kadar sdB etrafında keşfedilen yıldızaltı cisimlerin bulunma yöntemlerine göre sınıflandırılması (Silvotti vd. 2014)

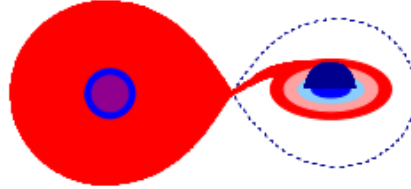
### 1.3 sdB Yıldızlarının Oluşumu

B tayf türüne ait bir altcüce yıldızın oluşabilmesi için üç evrim senaryosu önerilmiştir (Han vd. 2002, 2003). Önerilen kanalların ilki bir çift yıldız sisteminde kütle aktarımının kararlı gerçekleştiği (ing. Stable Roche Lobe Overflow, RLOF) sdB oluşum senaryosudur. Bu senaryoya göre sistemde erken evrimleşen anakol yıldızı kırmızı dev koluna tırmandığında Roche şişimini doldurur ve bileşenine yavaş ve kararlı bir şekilde kütle aktarmaya başlar. Madde aktarılan cisim, aktarılan bu maddeyi kararlı bir şekilde biriktirebilir. Madde aktarımı gerçekleşirken cisimler birbirinden uzaklaşır ve sonucunda oluşan sistemin bileşenleri sdB ve anakol yıldızı olarak kendilerini gösterir. Bu sistemlerin yörünge dönemleri 10 ile 500 gün arasındadır ( Şekil 1.4).

**Kararlı kütle aktarımla Oluşum (RLOF)**

**Kütle oranı < 1.2-1.5**

**Kırmızı Devin Roche Şişimini Doldurup Kararlı Bir Şekilde Madde Aktarmaya Başladığı Durum**



**Uzun Dönemli sdB + MS/SG Çifti**



**$P_{yörünge} = 10-500$  gün**

**$M_{sdB} = 0.3-0.49M_{Güneş}$**

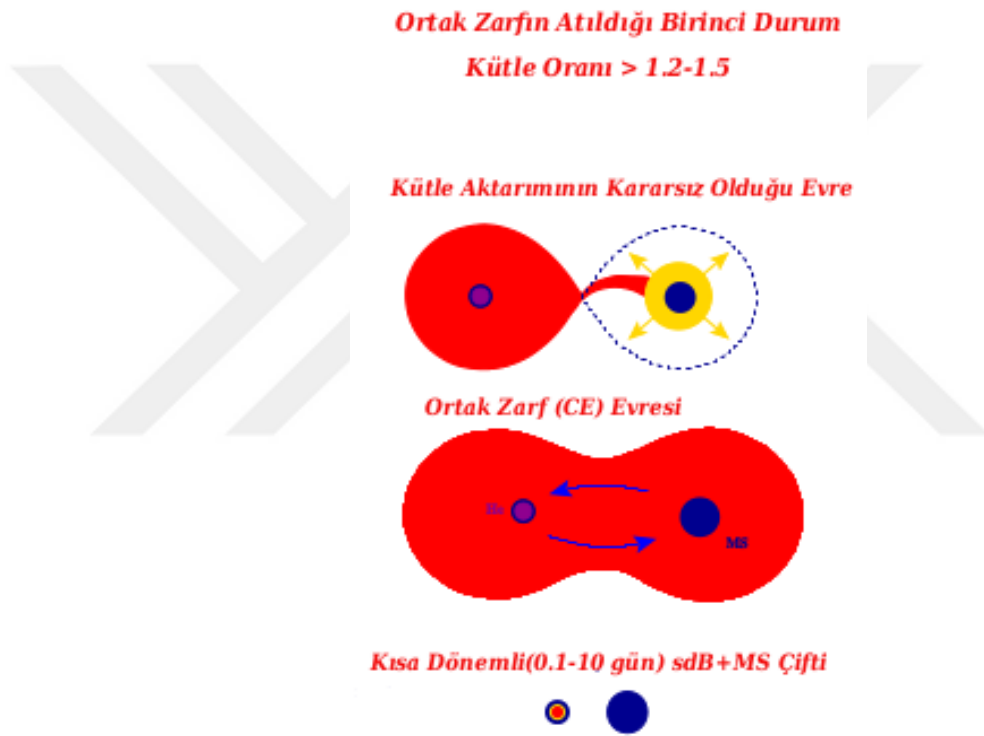
Şekil 1.4 Kütle oranı 1.2 – 1.5'ten küçük olan sistemlerde kararlı kütle aktarımla sdB oluşumu (Podsiadlowski 2008)

Önerilen ikinci senaryo ise bir çift yıldız sistemindeki ortak zarf evresidir. Bu senaryo ortak zarfın atıldığı birinci durum (ing. The First Common Envelope Ejection Channel) ve ortak zarfın atıldığı ikinci durum (ing. The Second Common Envelope Ejection Channel) olarak iki alt gruba ayrılmaktadır (Han vd. 2002,2003) (Şekil 1.5 ve 1.6). Kanalların ikiye ayrılma durumu madde aktarılan cismin türüne ve dolayısıyla kütle oranına ( $q$ ) bağlıdır. Bu iki alt kanalda da kütle aktarılan cisim sıkışık (kompakt) olduğu için kütleli kararlı bir şekilde biriktiremez ve ortak zarf oluşur. Ortak zarfın atıldığı birinci duruma göre, erken evrimleşen bileşen kütlelerini kararlı bir şekilde diğer bileşene transfer ettikten sonra, kütle biriktiren bileşen de hızla evrimleşebilir; zira bileşenlerin kütleleri birbirine yakındır. Bu durumda sonradan evrimleşen bileşen Roche şişimini doldurup kütlelerini kaybetmeye başlar. Kaybedilen bu kütle diğer bileşen tarafından kararlı bir şekilde biriktirilemez; çünkü bu bileşen önce evrimleşen, başlangıçtaki ana bileşenden geriye kalan Chandrasekhar kütle limitinde bir beyaz cücedir ve kütle biriktiremez. Kaybedilen kütle bu nedenle bir ortak zarf oluşturur. Bu zarftaki gazla sürtünme nedeniyle açısal momentumunu kaybeden iki yıldız birbirine yaklaşmaya başlar ve açısal momentum kazanan zarf atılır. Sonuçta helyumca zengin bir beyaz cüce ile bir sdB yıldızından oluşan, kısa yörünge dönemli bir çift sistem kalır (Podsiadlowski 2008)

Ortak zarfın atıldığı ikinci durumda ise kütlesi diğerine göre daha büyük olduğu için önce evrimleşen bileşenin Roche şişiminden taşan kütle ortak zarfı oluşturur. Diğer bileşen kütle biriktiremediği için çok az değişime uğrar. Ancak her iki bileşen ortak zarftaki gazla sürtünme nedeniyle açısal momentumlarını kaybedip birbirlerine yaklaşır. Kaybedilen açısal momentumun transfer edildiği ortak zarf bu şekilde atılır ve sonuç olarak geiye bir sdB yıldızı ile bir anakol yıldızından oluşan kısa yörünge dönemli (0.1 – 10 gün) bir çift sistem kalır. Bu kanaldan gelen sdB yıldızının kütlesi  $0.46 M_{\odot}$  civarında olacaktır (Han vd. 2003).

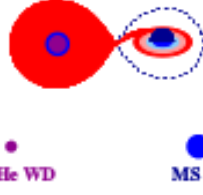
Önerilen üçüncü kanala göre ise iki helyumca zengin beyaz cücenin birleşmesi senaryosu ortaya atılmıştır (Uzundağ 2017b). Bu kanal tek keşfedilen sdB'lerin evrim

sürecini açıklamak adına önem ihtiva etmektedir. Bu noktada gözlemsel olarak sdB'lerin kabaca %50'lik kısmının tek olarak gözleniyor olması, evrim süreci açısından açık bir problem olarak karşımıza çıkmaktadır. B tayf türünden tek bir altcücenin oluşması için konveksiyonun, yıldız rüzgarlarının ve yıldızaltı cisimlerle olan etkileşimin de dahil edildiği gibi birçok karışık senaryolar önerilmiştir (Uzundağ 2017b). Fakat bu senaryolar için tatmin edici kanıtlar hala elde edilememiştir ve bu anlamda gözlenecek herbir sdB'nin değeri vardır.



Şekil 1.5 Kütle oranı 1.2 – 1.5'ten küçük olan, sdB içeren sistemlerde evrim şeması

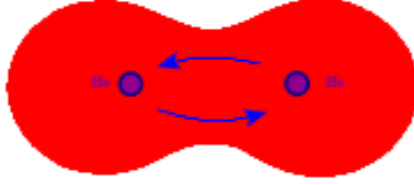
**Ortak Zarfın Atıldığı İkinci Durum**  
**Kütle Oranı < 1.2-1.5**



**Kütle Aktarımının Kararsız Olduğu Durum**



**Ortak Zarf Evresi**



**Kısa Dönemli (0.1-10 gün) sdB + He-WD Çifti**

Şekil 1.6. Kütle oranı 1.2 – 1.5'ten büyük olan sistemler için evrim şeması

Son yıllarda uzay teleskopları (örn. Kepler ve CoRoT) sayesinde bu yıldız türüne ait önemli bilgiler elde edilmektedir. Uzun süreli ve yüksek çözünürlüklü gözlemler bu yıldızlara ait analizlerin başarısında önemli rol oynamaktadır. Yeni kuramsal yaklaşımlar bu yıldız türüne adapte edilmektedir. Asterosismoloji alanında geliştirilen kuramsal ve gözlemsel araçlar, sdB yıldızlarının daha iyi anlaşılabilmesine yardımcı olmaktadır.

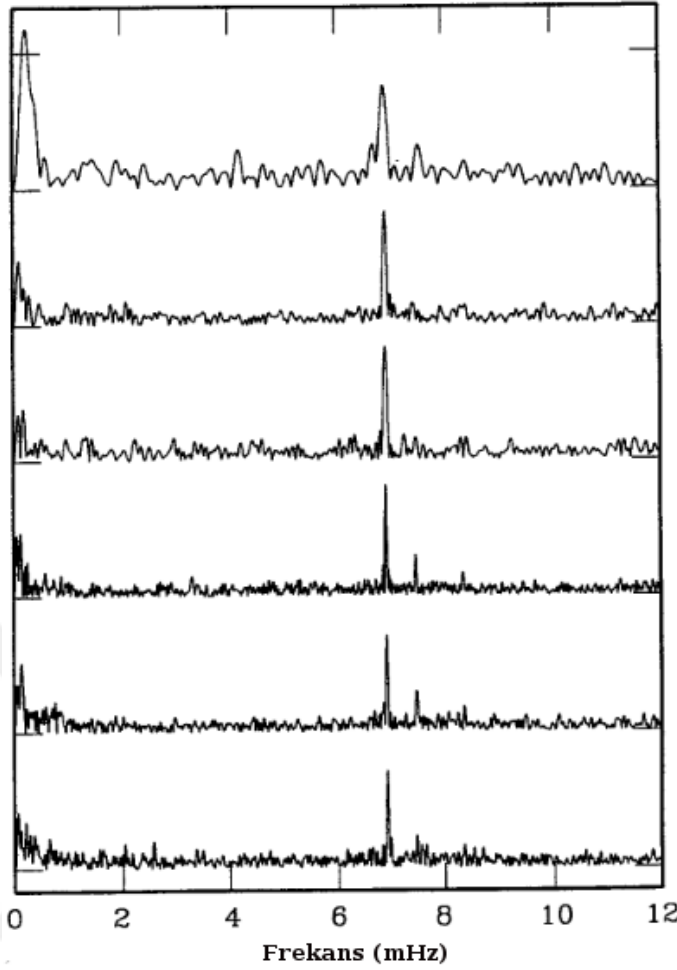
Bu çalışmada Kepler Uzay Teleskobu ile gözlenmiş pulsasyon yapan sdB yıldızlarının genel özellikleri ortaya konmaya çalışılacaktır. Tez çalışmasında temel gözlemsel veri olarak Kepler ile 3 yıl boyunca (Q6-Q17.2) gözlenmiş olan KIC 10001893 zonklayan

sdBV yıldızının verileri kullanılmıştır. Asterosismolojik yöntemler kullanılarak ile bulunan zonklama modları, dönme dönemleri, eşel diyagramları ve mod tuzaklanması gibi özelliklerin ne anlama geldiği, nasıl elde edildiği detaylı bir şekilde ele alınacaktır.

#### **1.4 B Tayf Türünden Zonklayan Altcüce (sdBV) Yıldızları**

Zonklayan yıldızlar iç yapı çalışmaları için çok önemlidir. H-R diyagramında bugüne kadar birçok yıldız türü bu özelliği ile gözlenmiştir. Yıldızların zonklama mekanizmalarının çözülmesi, başlıca kütle ve yaş olmak üzere temel yıldız parametrelerinin, bulunması adına oldukça önemlidir. Bugüne kadar birçok zonklama karakterine sahip yıldız türü keşfedilmiştir ve hala da keşfedilmeye devam edilmektedir. Şekil 1.1'de zonklayan yıldızlara ait H-R diyagramı ve bu tezin konusu olan B tayf türünden zonklayan altcücelerin yeri belirtilmektedir.

B tayf türünden altcüceler için en büyük gelişme 1997 yılında, bu yıldızların ışık eğrisinde periyodik değişimlerin keşfedilmesi sayesinde yaşanmıştır (Şekil 1.7) (Killkenny vd. 1997). EC 14026-2647 yıldızının ışık eğrisinde göstermiş olduğu hızlı değişimler sayesinde, bu yıldız türü için yeni bir alan açılmıştır. Ayrıca, isimlendirmelerinde değişen (ing. Variable) olduklarından hareketle sdBV kısaltması kullanılmaya başlanmıştır. Bu sayede sdBV'lere ait iç yapı analizleri gözlemsel açıdan da başlamıştır.

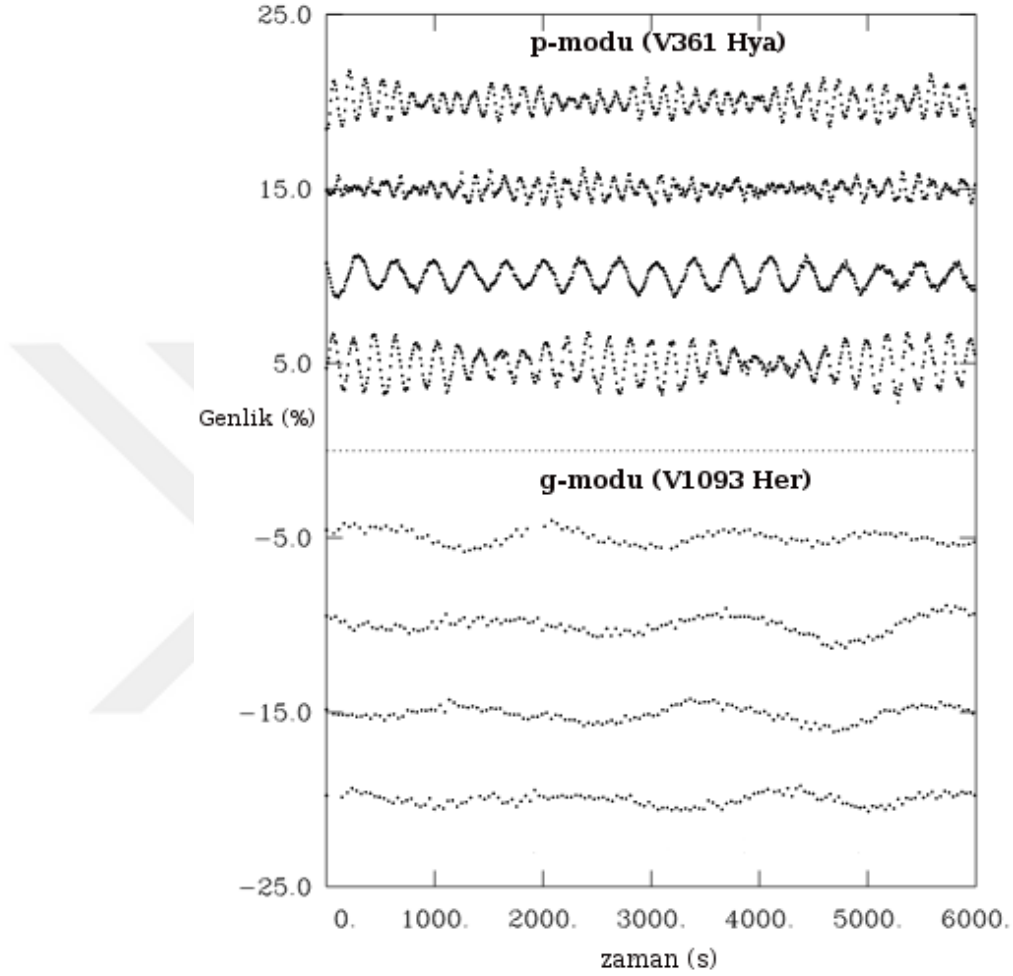


Şekil 1.7 Zonklama gösteren ilk keşif EC 14026-2647 yıldızının genlik-frekans diyagramındaki zonklama sinyali 7.5 mHz Killkenny vd. (1997)

SdBV'ler zonklama karakterine göre uzun ve kısa dönemli değişenler olarak iki alt gruba ayrılırlar. Kısa dönemli değişen türlere V361 Hya ismi verilirken, uzun dönemli değişenlerine V1093 Her ismi verilmektedir. Bu isimlendirmeler ışık eğrisinde bu tür değişimlerin gözlemlendiği ilk yıldızlar olan prototip cisimlerin isminden ileri gelmektedir. V361 Hya değişenlerinin genlik-frekans diyagramlarında p-modu baskınken, V1093 Hya değişenlerinin genlik-frekans diyagramında g-modu baskındır. V361 Hya değişenlerinde gözlenen zonklamaların frekansları 2000  $\mu\text{Hz}$ 'den büyük iken, V1093 Her değişenlerinin zonklama frekansları genelde 1000  $\mu\text{Hz}$ 'den küçüktür. İlk grubun prototipi (V361 Hya) Killkenny vd. (1997) tarafından keşfedilirken, V1093 Her değişeni Green vd. (2003) tarafından keşfedilmiştir. Her iki türün ışık eğrilerindeki



değişim şekil 1.8’de gösterilmektedir. Şekilde de görüldüğü gibi V361 Hya türü değişenlerin parlaklık değişimlerindeki genlik, V1093 Her değişenlerine göre oldukça yüksektir.

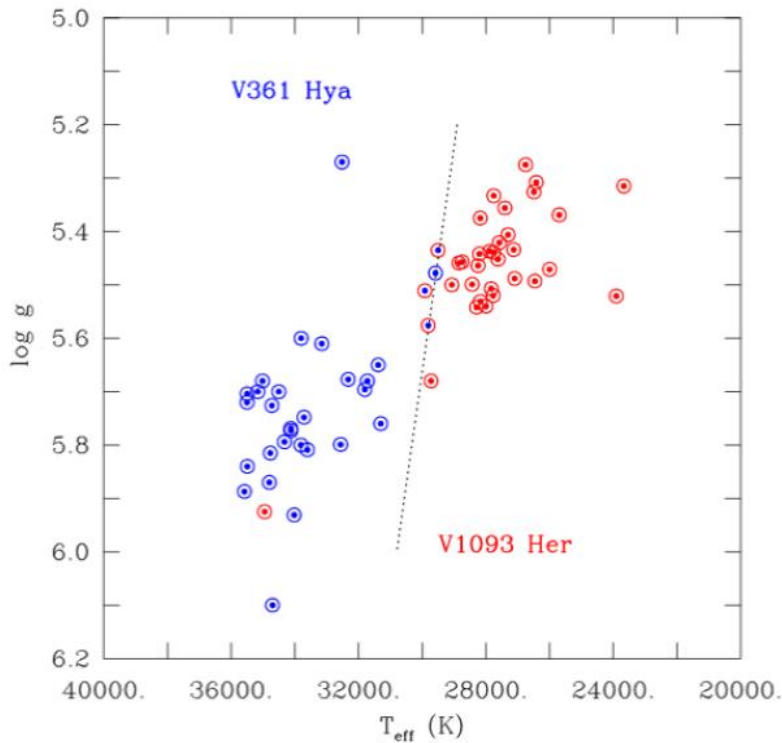


Şekil 1.8 g-modu ve p-modu zonklamalar gösteren bazı sdB yıldızlarının ışık eğrileri (Fontaine vd. 2003)

Verilen ilk dört ışık eğrisi p-modu zonklama özelliği gösteren PG 1047+003, PG 0014+067, Feige 48 ve KPD 2109+4401 yıldızlarına aittir. Aşağıda kalan diğer dört cisim ise g-modu zonklama karakterine sahip PG 1716+426(R bandı), PG 0850+170(R bandı), PG 1338+481(B bandı) ve PG 1739+489(V bandı) yıldızlarına aittir

Bazı sdBV yıldızlarının genlik-frekans diyagramları hem p hem de g modlarını sergilemektedir. Bu tip yıldızlara hibrid zonklayıcılar (ing. hybrid pulsators) denmektedir. Baran vd. (2005) ve Schuh vd. (2006) bu türe ait yıldızların olabileceğini ilk kez yer gözlemleri ile göstermişlerdir. Bu tip yıldızlara DW Lyn yıldızları ismi de verilmektedir.

SdBV yıldızları sıcaklık parametresine bağlı olarak da birbirinden farklılık göstermektedir. Kısa döneme sahip V361 Hya yıldızlarının sıcaklıkları 28000K ile 35000K arasında değişirken, uzun dönemli V1093 Her yıldızları biraz daha soğuk olup 24000K ile 30000K arasında değişen etkin sıcaklıklara sahiptirler. Ayrıca, V361 Hya türü yıldızların yüzey çekim ivmeleri, V1093 Hya türüne oranla daha düşüktür (Şekil 1.9). Aynı diyagramda hibrid zonklama özelliğine sahip DW Lyn türüne bakıldığında, bu tip yıldızlar iki türün arasında yer almakta ve sıcaklıkları 28000K ile 32000K arasında, yüzey çekim ivmesi ise 5.2 ile 6 (cgs) arasında değişmektedir.

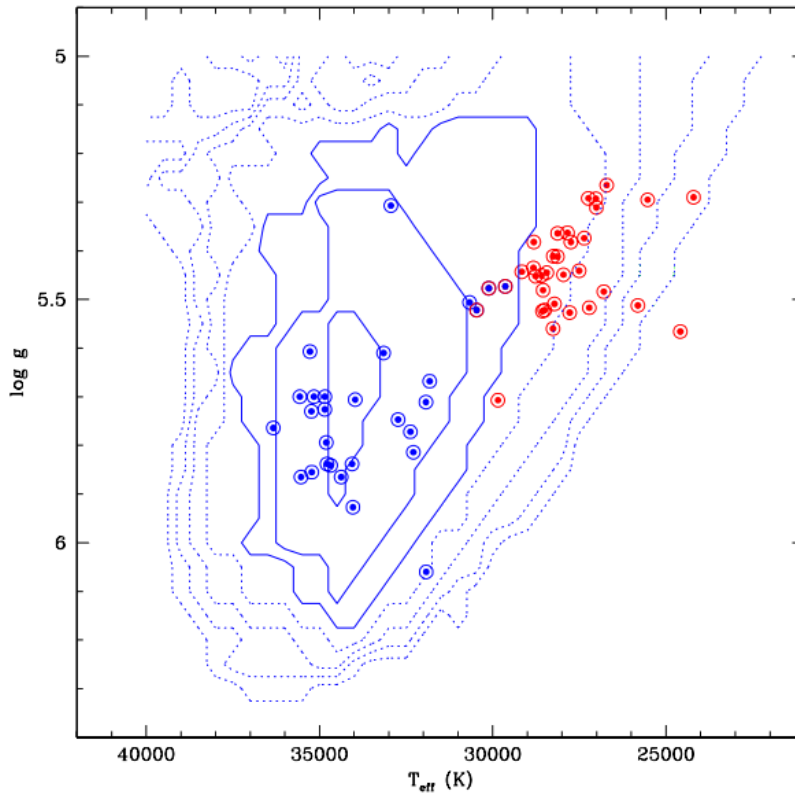


Şekil 1.9 SdBV yıldızları için çizilen H-R diyagramı (Heber 2016)

Şu ana kadar birçok sdBV yıldızı yerden gözlenmiştir. Fakat, yer gözlemleri atmosferik etkiler ve sadece geceleri gözlem yapılabilmesi dolayısıyla bu yıldızlara ait gözlemsel özellikleri ortaya koymak açısından yeterli ve güvenilir olmamaktadır. SdBV'lerin nispeten düşük parlaklığa sahip olmaları (10 - 17 kadir) ve ışık değişimlerinin hızlı olması, bu yıldızların zonklama özelliklerinin yer gözlemleriyle ortaya konmasını zorlaştırmaktadır. Hızlı ışık değişimlerine sahip olmaları, zaman çözünürlüğünün çok yüksek olmasını ve dolayısıyla büyük teleskoplarla uzun süreli gözlemleri gerektirmektedir. Teleskobun çapı büyük olsa dahi, gün ışığında yerden gözlem yapılamıyor olması bu çözünürlük değerini düşürmektedir. Dolayısıyla bu yıldızlara ait yüksek zaman çözünürlüklü, kesintisiz ve hassas fotometrik veriler asterosismolojik çalışmalar için oldukça önemlidir. Fakat, bu tür gözlemsel zorluklar sdBV yıldızları için hesaplanan kararsızlık kuşağının gözlemsel olarak belirlenmesinde problemlere neden olmaktadır. Bu kuşağı belirlemek, yıldızın zonklayıp zonklamadığını derin analizler yapmadan da söylemek anlamına gelmektedir. Bu kuşağı gözlemsel açıdan belirlemek için birçok çalışma yapılmıştır ve bunların bir bölümü nispeten de olsa başarılı olmuştur (Heber 2016). Bu çalışmalardan bir tanesi Óstensen vd. (2010) tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada gözlem ekibi 300 tane B tayf türünden altcüce yıldızı gözlemiştir ve bu yıldızlardan yalnızca %10'unun kısa dönemli V361 Hya türü zonklama yapan yıldızların kararsızlık kuşağına düştüğünü hesaplamıştır. Bu noktada V361 Hya türü zonklama karakterine sahip yıldızların yerden yakalamanın nispeten daha kolay olduğunu not etmek gerekir. Daha uzun döneme sahip V1093 Her zonklama karakterine sahip yıldızları gözlemek çok daha fazla gözlem süresi gerektirdiği için yüksek çözünürlüklü veri elde etmek zordur. Sonuç olarak gözlemsel açıdan bu yıldızlar için net bir kararsızlık kuşağı (ing. instability strip) belirlemek şu an için çok daha fazla çalışılması ve gözlemsel veri elde edilmesi gereken bir konudur.

Kepler Uzay Teleskobu sayesinde birçok uzun dönemli değişim gösteren V1093 Her türü yıldızlar gözlenmiştir. Ayrıca, her iki modun bulunduğu (p ve g modlar) birçok yıldız keşfedilmiştir. Kepler'le gözlenen hemen her yıldızın hibrid (melez) karakterine sahip olduğu anlaşılmıştır. Hibrid (melez) zonklama özelliği göstermesine rağmen, genlik-frekans diyagramları bir mod tarafından oldukça baskın olarak görülmektedir.

Teorik olarak yapılan kararsızlık kuşağı hesaplamalarına bakıldığında, V361 Hya zonklama karakteri gösteren yıldızlar için bu alan iyi bir şekilde Charpinet vd. (2007,2011) tarafından ortaya konmuştur (Şekil 1.10). Fakat, bu noktada kararsızlık kuşağı için hesaplanan değerlerle, gözlenen değerler arasında farklılıklar görülmektedir. V361 Hya türü yıldızlar için çok büyük bir farklılık olmasa da, V1093 Hya türü için ciddi sapmalar söz konusudur. Bu sapmaların sebeplerine bakıldığında, birincisi uzun dönemli yıldızlar için yer gözlemleri yok denecek kadar az ve test etme açısından ciddi bir problem olarak kalmaktadır. İkincisi, Kepler'le gözlenen yıldızlara bakıldığında V361 Hya türü yıldızların sayısı çok azdır. Bu noktada bu tür için kararsızlık kuşağı iyi hesaplanamamış olabilir. V1093 Her türü yıldızlar Kepler Uzay Teleskobu sayesinde ortaya iyi bir şekilde konulmaktadır. Fakat, bu yıldızlar için de teorik hesaplamalarla karşılaştırıldığında uyumsuzlukların olduğu görülmektedir. Bu noktada teorisyenlerin g modlarını üretmek için daha fazla ağır metal içeren modeller hesaplamaları gerektiği öngörülmüştür (Heber 2016).



Şekil 1.10 sdBV yıldızları için teorik olarak hesaplanan kararsızlık kuşağı (Charpinet vd. 2011)

Teorik açıdan bu yıldızların zonklamalarına ilişkin ilk hesaplar Charpinet vd. (1996) tarafından ortaya konulmuştur. Yapılan hesaplamalar bu yıldızların radyal ve radyal olmayan modlarda zonklamaları gerektiğini öngörmüştür. Bu hesaplamalar V361 Hya türü kısa dönemli zonklama özelliği gösteren yıldızlar için ortaya konmuştur. Bu yıldızlar için zonklamaların görülmesini sağlayan fiziksel sürecin donukluk kaynaklı  $\kappa$ -mekanizması olması gerektiği anlaşılmıştır. Yıldızda demir grubu tarafından zenginleşen yerel bir bölgede (kısmi iyonizasyon bölgesi) donukluğun artması sebebiyle, p-modlarının uyartılması (ing. excite) gerektiği hesaplanmıştır. Ayrıca, yıldız fotosferinin hemen altındaki katmanlarda (ing. sub-photospheric layers) difüzyon mekanizması etkili olmalıdır ki p-modlarını uyartacak mekanizma ortaya çıkabilsin. Bu mekanizma ağır metal kısmi iyonizasyon mekanizması (ing. Z-bump) olarak adlandırılmaktadır.

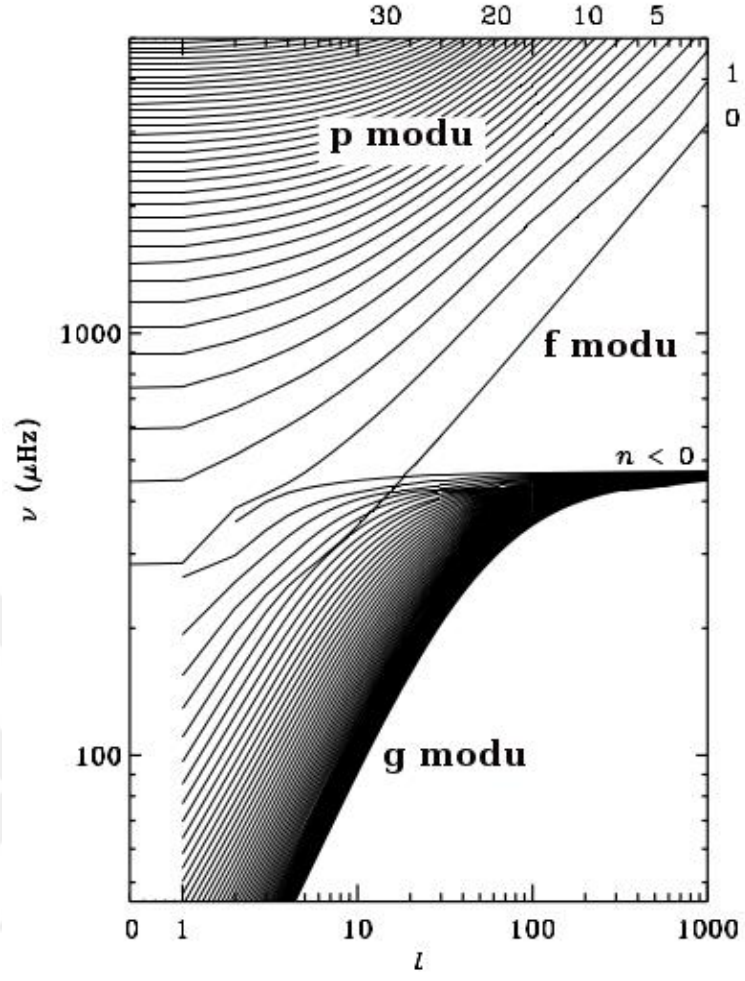
Uzun döneme sahip g modu zonklayıcıları (V1093 Her türü) içinse ilk teorik hesaplama Fontaine vd. (2003) tarafından ortaya konmuştur. İlk yıldızlardaki modların üretildiği mekanizmanın benzeri g modu karakterine sahip yıldızlar için de uygulanmıştır. İki çalışmada da kısmi iyonizasyon ( $\kappa$ ) mekanizmasının geçerli olması gerektiği ortaya atılmıştır. Bu mekanizma sayesinde üretilen iyonizasyon bölgesinde demir grubu elementlerle artan donukluk, bu modların salınmasında da etkili olmaktadır. Bu her iki çalışma da göstermiştir ki sdBV yıldızlarında düşük dereceli hem radyal hem de radyal olmayan modlar bulunabilmektedir.

Bu teorik çalışmalarla beraber birçok başarılı çalışma yapılmıştır. Bu uygulamalar sayesinde sdBV yıldızlarına ait iç yapı çalışmaları büyük bir başarı ile ortaya konulmuştur (Koen vd. 1999; Charpinet vd. 2000,2011; Van Grootel vd. 2013).

## 1.5. Pulsasyon Modlarının Belirlenmesi

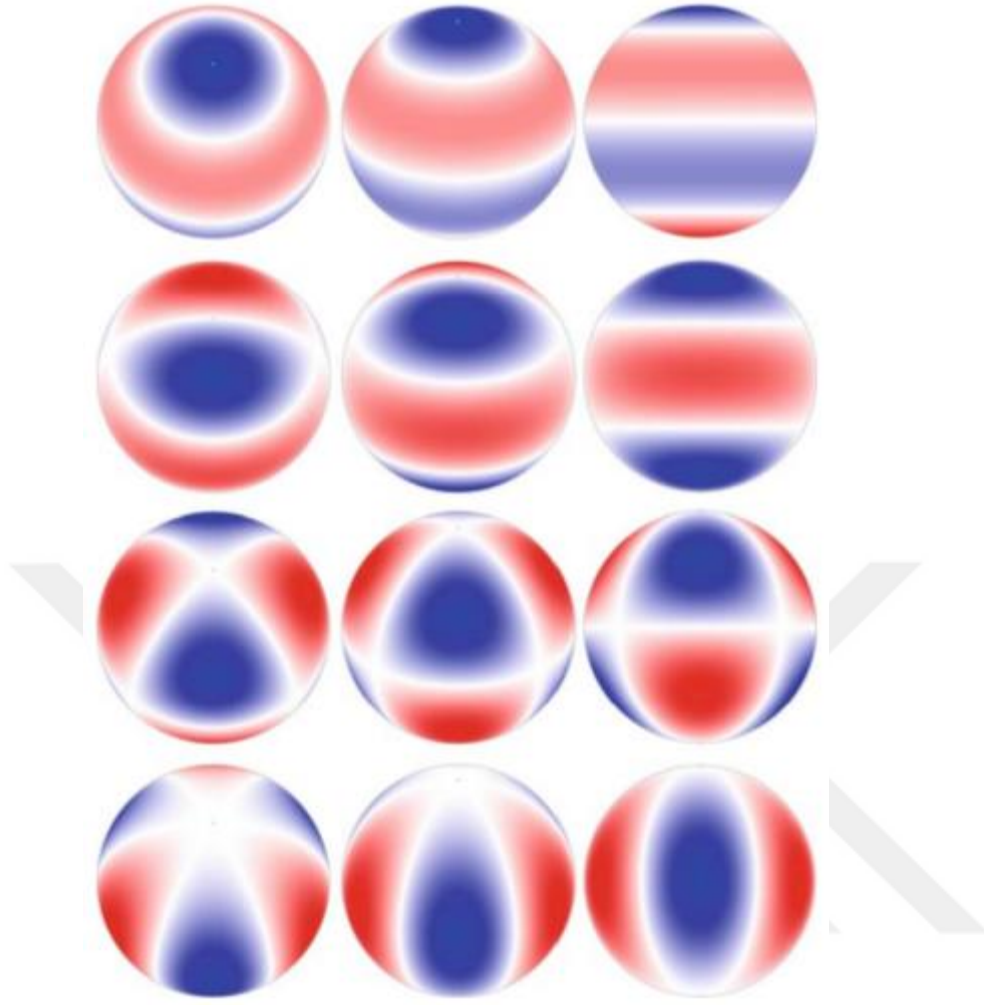
sdBV değişenlerinde basınç (p) ve çekim (g) modları gözlenmektedir. p modlarının uyarılmasını sağlayan kuvvet basınçtır ve bu modlara basınç (ing. pressure) modları denmektedir. Bu modlar tıpkı akustik (ses) dalgalar gibi boyuna (ing. longitudinal) yayılan dalgalardır. Çekim (ing. gravity) modlarının yayılmasını sağlayan kuvvet ise kaldırma kuvvetidir (ing. buoyancy force) ve bu dalgalar yıldız içerisinde enine (ing. transverse) yayılmaktadır. Çekim modları g yıldızın iç katmanlarında salınırken, basınç modları p yıldızın yüzeye yakın katmanlarında görülmektedir. Ayrıca, yıldızlarda bu iki mod arasında salınan bir de f modu (ing. Fundamental mode) vardır (Aerts vd. 2010). Bu modlara dair yayılım diyagramı şekil 1.11’de gösterilmektedir. Yıldızlara dair gözlemsel olarak elde edilen modlar, yıldızların farklı katmanlarına dair bilgi vermesi açısından oldukça önemlidir. Bu noktada hibrid dediğimiz hem g hem de p modlarının gözlendiği yıldızlar, her iki katmana ilişkin bilgi vermesi açısından önem ihtiva etmektedir. Kepler teleskobu ile yapılan gözlemler sdBV’lerde salınan her iki modun da algılanması bakımından çok önemli bilgiler sunmuştur (Bölüm 2.1).

Basınç ve çekim modlarının algılanmasının ardından yapılan en önemli iş yıldızın pulsasyon geometrisinin çözülmesidir. Yıldızın içinde salınan çekim ve basınç modları yüzeyde bir geometri oluşturmaktadır. Bu oluşan geometri 3 farklı parametre ile ifade edilmemektedir. Bu parametreler radyal düğüm sayıları ( $n$ ), toplam yüzey düğüm sayısı ( $l$ ) ve azimut derece sayısı ( $m$ )’dir. Radyal düğüm sayıları ( $n$ ) yıldız merkezi ile yüzeyi arasında salınan enine dalgalardır. Bu geometri şekil 1.12’de gösterilmektedir.



Şekil 1.11 Frekansa karşılık toplam düğüm sayısının çizildiği yayılım diyagramı (Aerts vd. 2010)

Diyagramda p modları için frekans arttıkça  $n$  ve  $l$ 'nin de arttığı görülmektedir. g modları için ise frekans azaldıkça  $n$ 'nin ve  $l$ 'nin arttığı görülmektedir.



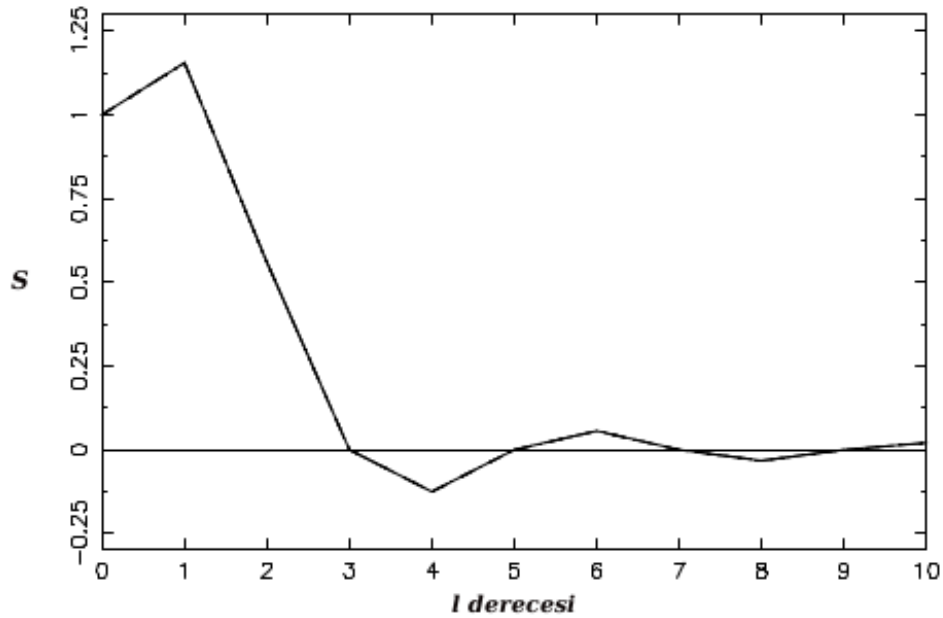
Şekil 1.12  $l = 3$  modları için pulsasyon geometrisi (Aerts vd. 2010).

Farklı zonklama açlarına denk gelen pulsasyon geometrisi  $30^\circ$ ,  $60^\circ$  and  $90^\circ$  için soldan sağa doğru verilmektedir. Yüzeydeki düğümler beyaz renk ile gösterilirken, kırmızılar gözlemciden uzaklaşan, mavilerin ise gözlemciye yaklaşan zonklama modlarını temsil etmektedir. En yukarıdaki geometri için  $l = 3$ ,  $m = 0$ 'dır. İkinci satırda  $l = 3$ ,  $m = 1$  iken, üçüncü satırda  $l = 3$ ,  $m = 2$ 'dir. En son satırda ise  $l = 3$ ,  $m = 3$ 'tür.

Verilen bu parametrelere göre yıldızın radyal ya da radyal olmayacak bir şekilde zonklama yaptığı anlaşılabilir. Radyal zonklamada yıldız zonklama yaparken küresel simetrisini bozamaz. Bu türde zonklayan yıldızlara temel modda zonklayan yıldızlar olarak da adlandırılır. Bu tür yıldızlara RR Lyrae ve zonklama yapan Cepheid değişenleri örnek olarak gösterilebilir. Bu yıldızlar için yüzeydeki toplam düğüm sayısı  $l = 0$ 'dır.  $l$ 'nin  $0$ 'dan büyük olduğu her koşulda yıldız küresel simetriden sapıyor demektir. Temel modda zonklama mekanizmasında yıldız genişler ve büzülür, parlaklığı artar ve azalır



bu tekrarlayan bir hareket olarak yıldızın ışık eğrisine yansır. Bu ışık eğrisi Fourier dönüşümü altında (Bölüm 3.2) yıldızın genlik-frekans diyagramına yansır.  $sdBV$ 'ler için genelde yüzeydeki toplam düğüm sayısını belirten  $l$  sıfırdan büyüktür ve dolayısıyla zonklama modlarını tayin etmek temel modda zonklama yapan değişen yıldızlara göre çok daha zordur. Tayfsal olarak modların algılanması da mümkündür. Fakat bu yöntem asterosismolojik olarak çok verimli değildir. Güneş dışında yıldızların yüzeyini çözümleyebildiğimiz başka kaynak yoktur. Yıldızlar nokta kaynak oldukları için yüzey çözümlenmeleri konusunda oldukça zorluk çekilmektedir. Bu noktada en iyi yöntem Doppler görüntüleme (ing. Doppler imaging) yöntemidir. Fakat bu yöntemle Güneş dışında diğer yıldızların yüzey analizlerini yapmak için çok yüksek çözünürlüklü tayfsal gözlemler gerekmektedir. Dolayısıyla, diğer yıldızlar için yüzeydeki modları algılamak için uygulanabilecek en iyi yöntem uzun dönemli fotometrik gözlemlerdir. Fakat buradaki diğer bir zorluk ise modların birbirlerini yok etmesi (ing. mode cancellation) olgusudur. Mod derecesi  $l$  arttıkça modların birbirini sönümlemesi çok daha olasıdır ve dolayısıyla algılanması (çözümlemesi) bir o kadar zordur (Aerts vd. 2010) (Şekil 1.13).



Şekil 1.13 Şekil de artan  $l$  derecesi ile modların algılanma ihtimali ( $S$ ) (Aerts vd. 2010)

Mod derecesi  $l$  arttıkça modların birbirini sönümleme ihtimali de artmaktadır.

Pulsasyon yapan B tayf türünden altcüceleri modelleyebilmek için, bu parametreleri belirlemek oldukça önemlidir. Bu noktada, pulsasyon modlarının belirlenmesi kritik bir öneme sahiptir. Yıldıza ait temel parametreleri elde etmek için (kütle, yaş), bu modların algılanması ve modellere dahil edilmesi gerekmektedir. Bu modların belirlenmesi içinse uzun süreli yüksek çözünürlüklü verilerin elde edilmesi gerekmektedir. sdBV'ler için bu tür verilerin yerden elde edilebilmesi oldukça zordur. Bu yüzden uzay teleskopları ile yapılacak gözlemler bu alan için oldukça önemlidir.

## 1.6 Frekans Ayrışması

Pulsasyon geometrisi  $n$ ,  $l$  ve  $m$  modları ile belirlenmektedir. Bu parametrelerden toplam düğüm sayısı  $l$  ve azimut derecesi  $m$  yıldızın dönmesine bağlı olarak değişebilmektedir. Dönmenin etkisi modların genlik-frekans diyagramında ayrışmasına neden olmaktadır. Frekanslar arasındaki bu ayrışmadan yola çıkılarak yıldızların hem çekirdeğinin hem de zarfının dönme dönemleri hesaplanabilmektedir. Dönme hızlarının hesaplanabilmesi için yıldızın pulsasyon açısı ile gözlemcinin bakış doğrultusunun kesişiyor olması gerekmektedir. Diğer önemli nokta ise her iki katmanın dönme hızlarının hesaplanabilmesi için hem  $g$  hem de  $p$  modlarının algılanması yani yıldızların hibrid olması gerekmektedir. Ayrıca, bu modların genlik-frekans diyagramındaki ayrışmasının görülebilmesi için uzun dönemli, yüksek çözünürlüklü gözlemlerin elde edilmesi gerekmektedir. Son olarak yıldızın dönme dönemi, gözlenen sürenin içerisinde kalmalıdır ki bu oran elde edilebilsin. Bu noktada Kepler ile yapılan uzun dönemli gözlemler büyük önem taşımaktadır.

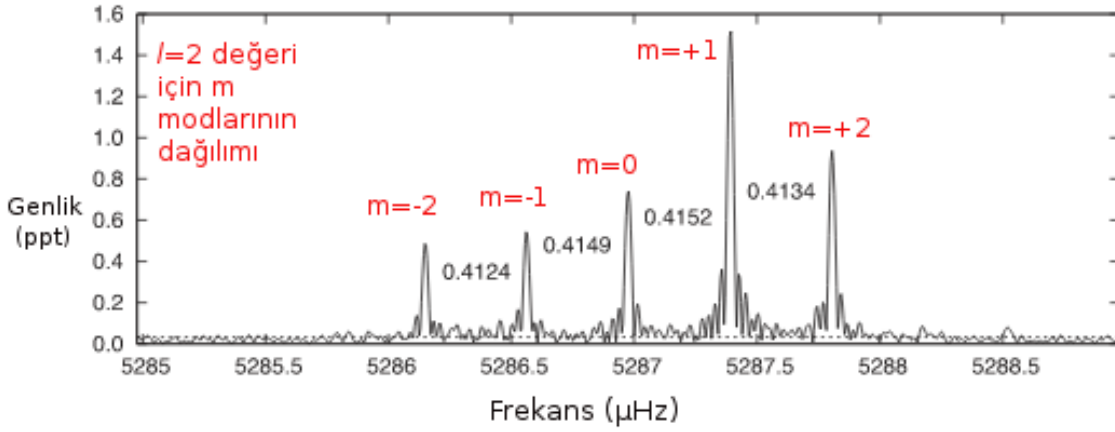
### 1.6.1 Dönmenin etkisiyle modların frekansta ayrışması

Radyal olmayan, yüzeydeki toplam düğüm sayısını temsil eden  $l$  modu, dönmenin etkisiyle genlik-frekans diyagramında farklı  $m$  değerleri için  $2l+1$  tane mod kadar ayrışmaktadırlar. Bu ayrışma miktarı Eşitlik (1.1)'den direkt olarak çıkarılabilmektedir.

$$v_{n,l,m} = v_{n,l,0} + \Delta v_{n,l,m} = v_{n,l,0} + m \frac{1 - C_{n,l}}{P_{\text{rot}}} \quad (1.1)$$

Burada  $\Delta_{n,l,m}$  dönmenin etkisiyle genlik-frekans diyagramındaki ayrışmayı vermektedir.  $P_{\text{rot}}$  yıldızın dönme dönemidir.  $C_{n,l}$  ise Ledoux sabitidir. Bu sabit  $p$  modları için sıfıra yakinken,  $g$  modları için  $l$ 'ye  $(l(l+1))^{-1}$  ile bağlıdır (Charpinet vd. 2002).

Dönme döneminin yanı sıra en önemli husus mod tayinin doğru bir şekilde yapılıyor olmasıdır. Genlik-frekans diyagramında elde edilen  $m$  değerleri için toplam düğüm sayısının elde ediliyor olması önemlidir. Şekil 1.14'te KIC 10139564 yıldızına ait  $l = 2$  modu ve dönmeye bağlı olarak  $m$  modlarının  $2l+1$  adet moda ayrışması gösterilmektedir.



Şekil 1.14  $l = 2$  modları için  $m$ 'nin alacağı değerler genlik-frekans diyagramı (Baran vd. 2012)

### 1.7 Modların Dönemde Ayrışması

Asimtotik limit  $n \gg l$  olduğundan dolayı, sıralı radyal  $n$  modları, genlik-periyod diyagramında sıralı bir şekilde dizilebilir (Reed vd. 2011). Yani yıldız  $n$  modlarına bağlı olarak zonklama yaparken yüzeyde  $l$  modlarını dizayn edebilir ve yıldızda fiziksel olarak yaşanan bu süreç genlik-periyod diyagramında kendini gösterir. Modları belirlemek için kullanılan bu yöntem sadece  $g$  modları için mod belirlenirken kullanılabilir çünkü verilen asimtotik limit sadece  $g$  modları için geçerlidir. Verilen radyal modlar  $n$  ve toplam düğüm sayısı  $l$  için zonklama periyodu 1.2'deki gibi olacaktır.

$$P_{l,n} = \frac{P_0}{\sqrt{l(l+1)}}n + \epsilon_l$$

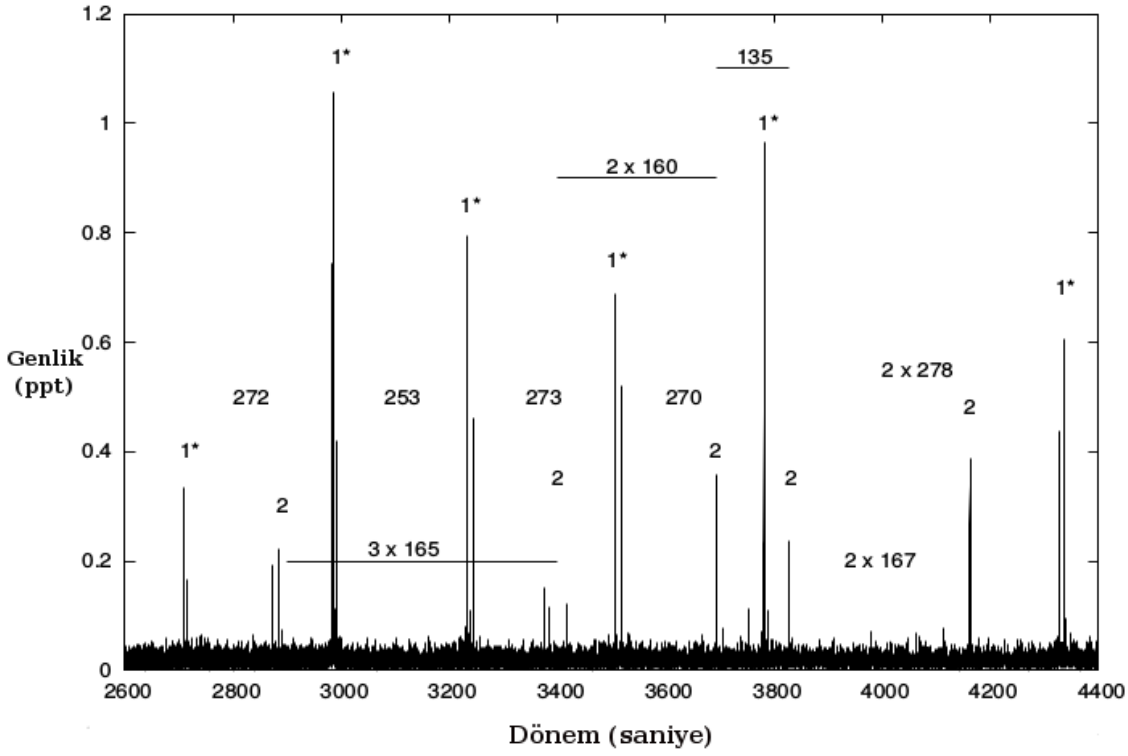
(1.2)

Eşitlikte  $P_0$  temel modda zonklamanın periyodunu vermektedir.  $\epsilon_l$  Unno sabitidir (Unno vd. 1979). İki temel modda zonklama için dönemde ayırışma miktarı ise Eşitlik (1.3)'de verilmektedir.

$$P_l = P_{l,n+1} - P_{l,n} = \frac{P_0}{\sqrt{l(l+1)}} \quad (1.3)$$

İki mod arasındaki oran  $l=1$  ve  $l=2$  için  $1/\sqrt{3}$ 'e eşittir.  $l=2$  ve  $l=3$  arasındaki oran ise  $1/\sqrt{2}$ 'ye eşit olacaktır. Modların birbirini sönmülmesi (ing. cancellation effect) düşük  $l$  modları için az olacağı için,  $l \leq 3$  durumlarını gözlemek çok daha olasıdır.

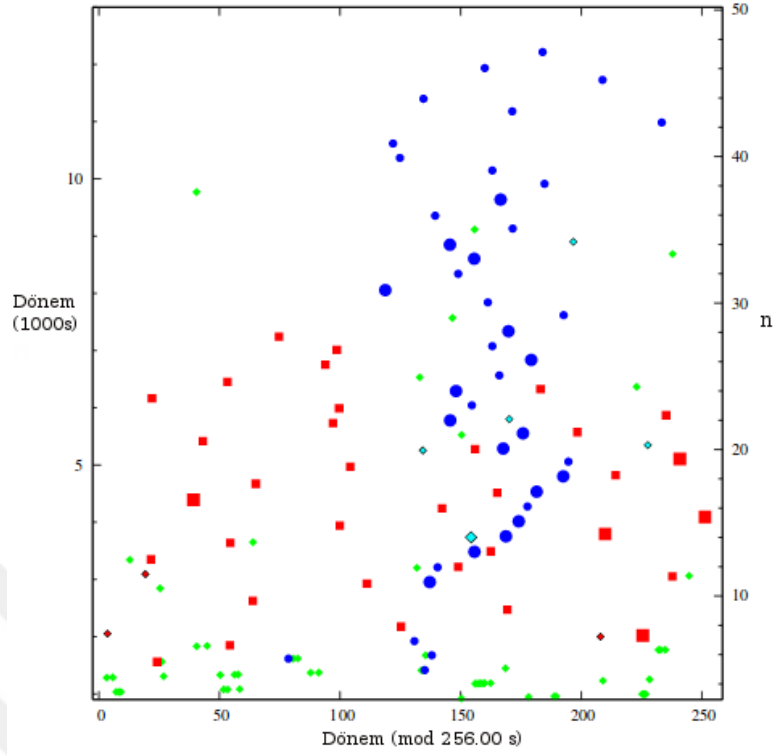
Teorik olarak beklenen ayırışma değeri  $l=1$  için 250 saniye civarındadır. İki mod arasındaki orandan  $l=2$  modu için beklenen ayırışma değeri 150 saniye civarında olacakken,  $l=3$  için 100 saniye olacaktır. Fakat bu değerler teorik olarak beklenirken, gözlemsel olarak bu değerler değişiklik göstermektedir. İki zonklama piki arasındaki değişim bazı sdBV'ler için daha yüksekken, bazıları için daha düşük çıkmaktadır. SdBV'lerin iç yapısı kimyasal olarak homojen olmadığı için modlar arası kaymaların olması doğaldır (Baran 2012). Bu kaymalar iç yapıya dair önemli bilgiler vermektedir (Bölüm 1.8-1.9).



Şekil 1.15 KIC 2991403 yıldızı için elde edilen genlik-periyod diyagramı (Baran & Winans 2012). Diyagramda  $l = 1$  ve 2 değerleri için dönemdeki ayrışmalar görülmektedir.

### 1.8 Eşel Diyagramları

Eşel diyagramları yıldızın iç yapısına dair bilgi vermesi açısından önemlidir. Bu diyagramlarda  $l$  modlarının döneme bağlı olarak nasıl değiştiği, radyal modların ( $n$ ) bir fonksiyonu olarak verilmektedir. Şekil 1.16'da EPIC 21179126 sdBV yıldızı için elde edilmiş  $l=1$  diyagramı gösterilmektedir (Baran vd. 2017). B tayf türünden zonklama yapan altçüce yıldızlarının iç yapısı kimyasal olarak yarıçapa bağlı olarak değişim göstermektedir. Bu değişim (ing. gradient) modların kaymasına kimi zaman ise tuzaklanmasına neden olmaktadır. Bu kaymalar eşel diyagramında direkt olarak görülebilmektedir. Bu kaymaların radyal modlara göre değişimi yine bu diyagramlarda görülmektedir.



Şekil 1.16 EPIC 21179126 yıldızı için elde edilen eşel diyagramı (Baran vd. 2017).

Mavi ile gösterilen noktalar  $l=1$  modudur.

### 1.9 Pulsasyon Modlarının Tuzaklanması

B tayf türünden altcüce yıldızlar helyumu, karbon ve oksijene çeviren bir çekirdeğe sahiptir. Bu çekirdeğin üzerinde ise helyumca zengin radyatif bir manto vardır. Bu iki bölge arasında keskin bir sınır olmamasına rağmen, atomların iyonize durumda olduğu bir geçiş (ing. transition zone) bölgesi bulunmaktadır. Bu bölge C-O/He geçiş bölgesi olarak bilinir (Charpinet vd. 2000). Helyumca zengin radyatif bölgenin üzerinde ise hidrojenca zengin ince bir zarf bulunmaktadır. Bu iki katmanın arasında yine bir geçiş He/H bölgesi bulunmaktadır (Charpinet vd. 2000). Bu geçiş bölgelerinde zonklama modları (dalgalar) yayılamazlar. Bu olguya mod tuzaklanması (ing. mode trapping) adı verilir. İki geçiş bölgesi arasında zonklama dalgalarının yayılabildiği (ing. propagation) bölgeye ise zonklama modlarının yayılabildiği bölge (ing. resonant cavity) denir. Bu

bölgede zonklama modları yayılır ve bu gözlemsel olarak modların dönemde ayrışması olarak bilinir. Yayılan bu dalgalar geçiş bölgelerine denk geldiğinde ise sönümlenmeler ya da dalgaların üst üste binerek birbirini güçlendirdiği süreçler görülebilir (Reed vd. 2014). Dalgaların tuzaklandığı gözlemsel olarak indirgenmiş dönem diyagramlarında (ing.reduced period diagram) görülebilir (Bölüm 3.5).

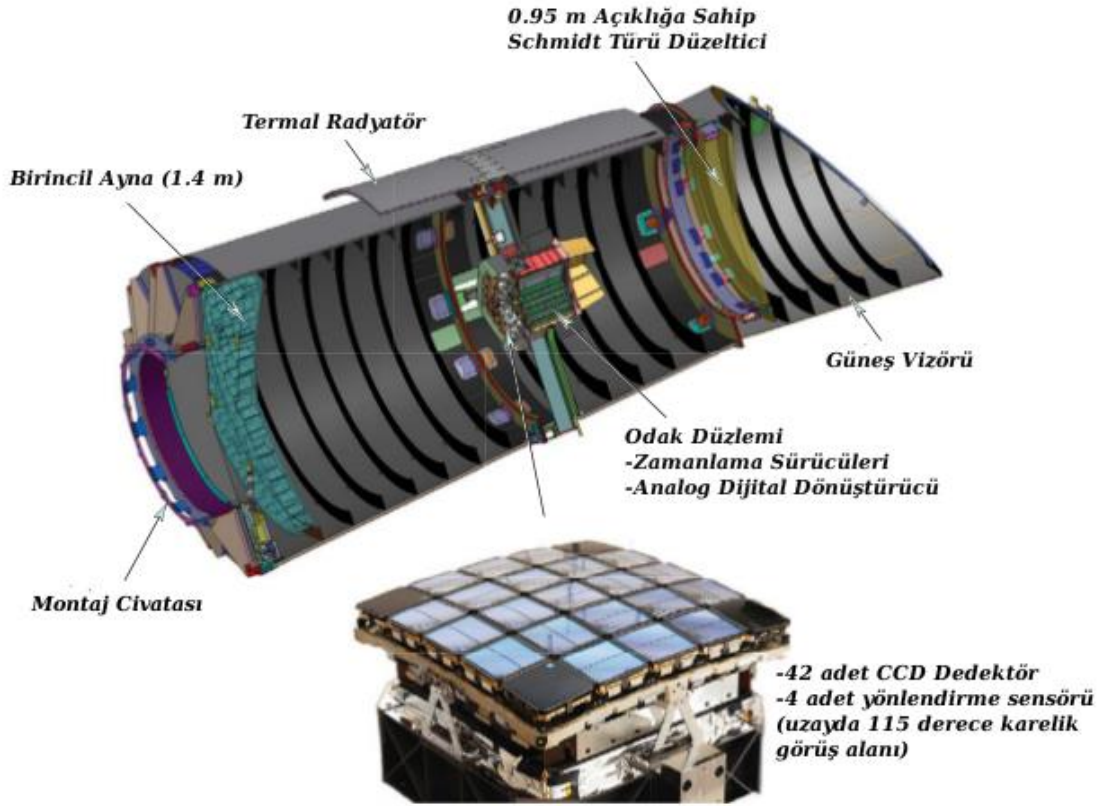




## 2. GÖZLEMLER ve VERİ İNDİRGE ME

### 2.1 Kepler Uzay Teleskobu

Kepler Uzay Teleskobu ötegezegen keşfi ve karakterizasyonu amaçlarıyla 6 Mart 2009 tarihinde NASA tarafından uzaya fırlatılmıştır (Borucki vd. 2010 ve Koch vd. 2010). Kepler 0.95m çapında Schmidt türü bir teleskop ile geniş bantta ışık ölçüm gözlemleri gerçekleştirmektedir. Odak düzleminde 42 adet CCD dedektör bulunmaktadır ve bu dedektör dizisi uzayda 115 derece karelik geniş bir alanı görmektedir. Teleskoba gelen ışık 1.4 metrelik aynadan yansıtılarak odak düzlemi merkezinde toplanması sağlanmaktadır (Şekil 2.1). Kepler Cygnus ve Lyra takım yıldızlarının arasındaki bir alanı sürekli olarak gözlemektedir. Bu alandaki yaklaşık 150000 yıldızı eş zamanlı olarak 2009 ile 2013 arasında, dört yıl boyunca gözlemiştir.



Şekil 2.1. Kepler Uzay Teleskobu'nun fotometrik sistemi ve dedektör dizisi (Koch vd. 2010)

Kepler için belirlenen ilk görev geçiş (ing. transit) yöntemiyle ötegezegen keşfidir. Ötegezegenler bağlı oldukları yıldızların önlerinden geçerken yıldızın parlaklığında çok küçük bir düşme yaratmaktadır. Bu düşüşün miktarı ötegezegenin büyüklüğü ve yıldızından olan uzaklığı hakkında bilgi vermektedir. Bu bilgiyi elde edebilmek için çok yüksek fotometrik hassasiyet ve uzun süreli gözlemler gerekmektedir. Güneş'ten başka yıldızların etrafında dolanan, dünya büyüklüğünde ve yörünge parametrelerinde bir ötegezegenin Güneş benzeri bir yıldızın önünden geçme ihtimali %0.5 olarak hesaplanmıştır (Winn 2010). Bu nedenle çok sayıda ötegezegen keşfetmek için ötegezegen barındırabilecek çok sayıda yıldızın aynı anda gözlenmesi stratejisi izlenmiştir.

Asterosismolojik gözlemlerin gerektirdiği gözlemsel koşullarla, ötegezegen keşfi için gerekli gözlemsel koşullar çok benzemektedir. Bu noktadaki tek farklılık pozlama süresidir (ing. integration times). Kepler iki farklı modda gözlem yapabilmektedir. Kısa poz süreli (ing. short cadence, SC) gözlemler 58.85 saniyeyi kapsarken, uzun poz süreli (ing. long cadence, LC) gözlemler 30 dakikalık bir sürede görüntü oluşturmaktadır. Ötegezegen keşfi için uzun poz süreli 30 dakikalık LC modu kullanılırken, asterosismolojik çalışmalar için kısa poz süreli 1 dakikalık SC modu kullanılmaktadır. Asterosismolojide Güneş benzeri yıldızlar için kısa süreli salınımları (ing. solar-like oscillations) yüksek hassasiyette gözleyebilmek ve salınım modlarını birbirinden ayırtedebilmek için yüksek zaman çözünürlüklü (tipik olarak 5 dakikadan kısa), kesintisiz ve uzun süreli gözlemlere ihtiyaç duyulmaktadır.

Asterosismolojik olarak yapılan gözlemlerde de geniş alana bakılarak birçok yıldız gözlemek, onların zonklama türünü ortaya koymak ve karakterize etmek adına oldukça önemlidir. Ayrıca, asterosismoloji yöntemi kullanılarak yapılan zonklama analizleri sayesinde, yıldızın kütlesi ve yaşı gibi temel parametrelerinin elde edilmesi hedeflenmektedir. Bu parametreler doğru ve hassas bir şekilde ortaya konulduğunda, sistemde bulunan ötegezegenlere ait temel parametreler de doğru ve hassas bir şekilde hesaplanabilmektedir. Asterosismoloji sayesinde hesaplanan bu temel parametrelerin

kesinliği, diğer yöntemlerle karşılaştırıldığında (tayfsal gözlemler) oldukça yüksektir (Schuh 2010).

Teorik olarak beklenen zonklama modları, yüksek fotometrik çözünürlük sayesinde gözlemsel olarak da kendilerini göstermektedirler. Yıldız içindeki salınımların yayılma hızı asterosismolojik yöntemler sayesinde zonklayan yıldızlarda ölçülebilmektedir. Herhangi fiziksel bir nedenden kaynaklı yayılma hızının ölçülebiliyor olması yıldızın iç yapısına dair önemli bilgiler vermektedir. Bu bilgilerin en önemlileri, salınının yayıldığı ortamın sıcaklığı, kimyasal kompozisyonu ve yoğunluğudur. Genlik-frekans diyagramında elde edilen piklerin (sinyallerin) dönemindeki ve genliklerindeki değişimler (ing. distortions) yıldızın dönme dönemi ve manyetik alanı hakkında da bilgiler içermektedir. Bu nedenlerle elde edilen frekansların dikkatle incelenmesi gerekmektedir. Bu yolla elde edilecek bilgiler zonklama yapan yıldızların iç yapısına dair bilgi vermesi ve bunların teorik modellerle test edilebiliyor olması bakımından oldukça değerlidir (Christensen-Dalsgaard vd. 2007).

Kepler Uzay Teleskobu ile yapılan ilk gözlemlerde 48 tane B tayf türünden altcüce (sdB) yıldız keşfedilmiştir. Bu yıldızlardan 14 tanesinin zonklama yaptığı, dolayısıyla sdBV oldukları ortaya konmuştur. Zonklama yapan bu yıldızlardan yalnızca bir tanesinin kısa dönemli p-modu zonklama (V361 Hya türü) karakterine sahip olduğu görülmüştür (Reed vd. 2012). Diğer 13 yıldızın uzun dönemli g-modu zonklama (V1093 Her türü) karakterine sahip olduğu değerlendirmesi yapılmıştır (Baran vd. 2011 ve Reed vd. 2011).

Kepler'in sürekli olarak aynı yöne bakmasını sağlayan 4 tekerleğinden 2 tanesinin 2013 yılı içerisinde bozulmasının ardından ilk görevi sonlandırılmış ve K2 görevi olarak bilinen yeni bir proje adıyla gözlemlerine başlamıştır. K2 gözlemleriyle beraber, Kepler toplamda 40 tane sdBV yıldızı keşfetmiştir. Bu gözlemlerden 7 tane sdBV yıldızının çift yıldız sisteminde olduğu görülmüştür. Bu sistemlerin 4 tanesi sdBV + dM (M tayf

türünden cüce anakol yıldızı) çiftiyken, 3 tanesi sdBV + WD (beyaz cüce) çiftidir. Ayrıca, iki tane sdBV yıldızının etrafında 5 adet dünya büyüklüğünde ötegezegen keşfedilmiştir (Charpinet vd. 2011 ve Silvotti vd. 2014). Sonuç olarak Kepler ve CoRoT gibi uzay teleskopları sayesinde sdBV yıldızlarının hem içyapısına dair önemli bulgular hem de bu yıldızları barındıran sistemlerin anlaşılmasına dair büyük gelişmeler yaşanmıştır.

Kepler tarafından üç sene boyunca gözlenmiş olan KIC 10001893 sdBV değişenine ait analizler sayesinde, yıldızın zonklama karakteri ortaya konmuştur. Ayrıca, asterosismolojik yöntemler kullanılarak, yıldızın zonklama modları bulunmuştur. Bu modlarla beraber yıldızın eşel diyagramları ve indirgenmiş dönem diyagramı elde edilmiştir.

## **2.2 KIC 10001893**

KIC 10001893 yıldızı hem p, hem de g-modu karakterine (V1093 Her türü) sahip hibrid bir sdBV yıldızdır. Yıldız Kepler Uzay Teleskobu için belirlenen ilk proje (Q3.1) dahilinde gözlenmiştir (Baran vd. 2011 ve Óstensen vd. 2011). Baran vd. (2011) KIC 10001893 sdBV yıldızını diğer 4 sdBV yıldızı ile birlikte asterosismoloji tarama projesi (ing. asteroseismology survey phase) kapsamında analiz etmiştir. Söz konusu çalışmada zaman serisi analizleri (ing. time series analysis) yöntemi kullanılarak bir aylık (Q3.1) Kepler verisi analiz edilmiştir. Genlik-frekans diyagramı elde edilmeden önce ekip veriyi Fourier analizine tabi tutmak için hazır bir hale getirmiştir. Daha sonra yinelemeli temizleme işlemi (ing. iterative pre-whitening procedure) kullanılarak zonklama frekansları ortaya konmuştur. Aynı adımlar Uzundağ vd. (2017) çalışmasında da izlenmiştir. Fakat Uzundağ vd. (2017) ilk çalışmaya oranla çok daha uzun bir gözlemsel süreye yayılan (3 yıl) bir veriyi analiz etmiştir. İlk çalışma sadece Q3.1 verisini içermekteyken, Uzundağ vd. (2017) Q6 ile Q17.2 verileri kapsayacak şekilde bir çalışma yapmıştır. Kepler verisi alınırken gözlemler çeyreklik (ing. quarter, Q) olarak

parçalara bölünmektedir ve her bir çeyrek 3 aylık (90 gün) veri içermektedir. KIC 10001893 için yapılan önceki çalışmalarda yıldızın etrafında dolanan ya da yıldızın etrafında dolandığı yoldaş bir yıldıza, zonklama frekanslarının analizleri sırasında rastlanmamıştır. Dolayısıyla yıldızın tek bir yıldız olduğu değerlendirilmiştir. Baran vd. (2011) yaptığı analizde yıldızın hibrid yapısının soru işareti olarak kaldığını, ek gözlemler sayesinde yıldızın hibrid yapısının ortaya koyulabileceğini öngörmüştür. Bu çalışmada yıldızın hem g- hem de p-modlarında zonklayan hibrid bir doğaya sahip olduğunu göstermiştir. Diğer bir deyişle, bir aylık veri p-modlarını çözmek için yeterli çözünürlüğe sahip değilken, 36 aylık verinin bu bölgedeki zonklama modlarını çözmek için yeterli çözünürlüğe sahip olduğu görülmüştür. Bu çalışmada frekans çözünürlüğünü  $\Delta f = 0.016 \mu\text{Hz}$  bulurken, Baran vd. (2011) frekans çözünürlüğünü  $\Delta f = 0.33 \mu\text{Hz}$  bulmuştur. Bu çalışmadaki çözünürlük, Baran vd. (2011) yapılan çalışmaya göre 20 kat daha yüksektir. Ayrıca, sinyal/gürültü oranı (ing. signal to noise level) ilk çalışmaya oranla çok daha yüksektir çünkü alınan nokta sayısı arttıkça verideki gürültü seviyesi düşmektedir (Eşitlik 2.1).

$$N = \sqrt{\frac{\pi}{n}} \delta_{RMS} \quad (2.1)$$

Burada  $N$  gürültü değeri,  $n$  foton sayısına eşittir.  $\pi$  ve  $\delta_{RMS}$  ise sabittir.

Birçok gözlemsel problemin olmasına rağmen, 27 tane zonklama frekansı çözümlenebilmiştir (Baran vd. 2011). Baran vd. (2011) genlik-frekans diyagramında 2 tane dönmeyle frekansların ayrıştığını ve üçlü-frekans (ing. triplets) olabileceğini öne sürmüşlerdir. Fakat bu çalışmadaki çok yüksek çözünürlüğe rağmen bu üçlü-frekans setinin tartışmaya açık olduğunu ve hatta frekanslar için belirlenen eşik değeri (ing. significance level)  $5\sigma$  alındığında bu frekans setinin gözlenemediğini ortaya koymuştur. Reed vd. (2011) modların dönemde ayrışması (ing. asymptotic period spacing) yöntemini kullanarak yaptığı analizlerde 13 tane asimtotik sıra (ing. Asymptotic

sequence) bulunmuştur. Yapılan çalışmada dönemler arasındaki ortalama ayrışma değeri  $P_{\text{ort};l=1}=268.53$  saniye iken,  $P_{\text{ort};l=2}=154.74$  saniye olarak bulunmuştur. Bu değerler daha fazla mod bulunarak yapılan çalışmamızda bulunan sonuçlarla uyuşmaktadır.

KIC 10001893 yıldızının Kepler parlaklığı  $K_p=15.85$  kadirdir (Baran vd.2011, Óstensen vd.2011, Reed vd. 2011 ve Silvotti vd. 2011). Tayfsal olarak yıldız yerden birçok teleskop ile gözlenmiştir. Bu teleskoplar William Herschel, the Nordic Optical Teleskobu (NOT) ve 2.1 metrelik çapa sahip San Pedro Martir teleskoplarıdır. Bu teleskoplar sayesinde yıldızın dikine hız değişimleri hesaplanmaya çalışılmıştır (Silvotti vd. 2014). Ayrıca, yıldıza ait temel parametrelerin bulunabilmesi için Bok Teleskobu kullanılmıştır. LTE ve NLTE gibi tayfsal yöntemler kullanılarak yıldızın etkin sıcaklığı, yüzey çekim ivmesi ve kimyasal element bolluk değerleri hesaplanmıştır. Hesaplamalara göre bu parametreler sırasıyla  $T_{\text{eff}} = 27,500 \pm 500$  K,  $\log g = 5.35 \pm 0.05$  (cgs) ve  $\log(N_{\text{He}}/N_{\text{H}}) = -2.95 \pm 0.04$  dex bulunmuştur (Silvotti vd. 2014). Bu parametre değerleri altında bakıldığında yıldız g-modu kararsızlık kuşağının içerisine düşmektedir (bakınız, Şekil 1.9). Yıldızın hesaplanan temel parametreleri gereği H-R Diyagramın'nda bulunduğu konum, zonklama karakteriyle uyuşmaktadır.

Silvotti vd. (2014) yıldızın genlik-frekans diyagramında çok düşük frekans bölgesinde ( $< 60 \mu\text{Hz}$ ) 3 tane sinyal keşfetmiştir. Bu çalışmada da olduğu gibi aynı gün sayısını içeren veri kullanılmıştır (Q6-Q17.2). Bulunan bu üç sinyalin genlik-frekans diyagramındaki yeri yıldız için beklenen zonklama modlarının ötesindedir. Diğer bir deyişle bu bölge bu tür yıldızlardan zonklama beklenmeyecek kesilim frekansının (ing. *Cut-off frequency*) ötesindedir. Kesilim frekansının ötesinde genlik-frekans diyagramında zonklama sinyali gözlenmesi beklenmez çünkü yıldızın yapısı bu noktada zonklama yapacak fiziksel süreçleri karşılayamaz. Yayılan dalgaların salındığı limit (yani bir dalganın gidip geldiği süre), bu frekans değerlerinin çok üstünde olmalıdır. Dolayısıyla, görülen bu üç sinyalin g-modları ile açıklanabilme ihtimali ortadan kalkmaktadır. Başka bir ihtimal üzerinde duran Silvotti vd. (2014), bu üç pike yıldıza çok yakın bir yörüngede dolanan dünya büyüklüğünde geçiş göstermeyen üç gezegenin

sebeup olabileceğini öngörmüştür. Gezegeuler o kadar yakın olmalıdır ki yıldızla beraber eş dönme yapabilsinler ve yıldız etrafında attıkları her turda yıldızın ışınımına gösterdikleri evreye bağılı olarak yansıma kaynaklı ek bir ışınım ekleyerek aydınlatma (ing. illumination) yaratsınlar. Bu yaratılan ek ışınım ise elde edilen genlik-frekans diyagramında kendini ek sinyaller olarak göstermektedir. Hesaplanan değerlere göre bulunan gezegeulerin dönemleri oldukça kısadır ( $P_1 = 5.273$ ,  $P_2 = 7.807$  ve  $P_3 = 19.48$  saat).



### 3. ANALİZ ve YÖNTEM

SdB türü zonklayıcılar için en ideal ışık ölçüm verisi yüksek duyarlılığı, kesintisiz ve uzun süreli olması nedenleriyle Kepler Uzay Teleskobu ile kısa poz süresi (ing. Short cadence) modunda elde edilen fotometrik veriler olarak gözükmektedir. Gerek Kepler verisinin asterosismolojik analizlere hazır hale getirilmesi, gerekse de bir sdBV yıldızının asterosismolojik analizini örneklemek açısından Uzundağ vd. (2017) tarafından çalışılan KIC 10001893 yıldızı örnek seçilmiş ve bu bölümde bu bölümde bu yıldızla ilişkin veri indirgeme ve analiz adımlarına yer verilmiştir.

#### 3.1 Fotometrik Veri

KIC 10001893 Kepler Uzay Teleskobu ile uzun bir süre gözlenmiştir. Gözlemler 24 Haziran 2010'da başlamıştır ve 11 Mayıs 2013 tarihinde son bulmuştur. Bu veriler Q3.1 ile Q17.2 çeyreklik dönemleri kapsamaktadır. Gözlemler "Barbara A. Mikulski Archive for Space Telescopes" (MAST)<sup>1</sup> arşivinden indirilmiştir. İki farklı poz süresi modunda (SC ve LC) elde edilen tüm bu gözlemler (veriler) kullanıma açık bir şekilde arşivde bulunabilir. Biz bu çalışmada kısa poz süreli (SC) modunu kullandık. Bu modda yapılan gözlemlerde dedektör 9 adet 6.02 saniyelik veri almaktadır ve her bir veri aralığında 0.52 saniyelik yazma süresi vardır. Toplamda bu süre 58.85 saniyelik bir çözünürlüğe (ing. resolution) denk gelmektedir. Bir uzun pozlama süresi (LC) 270 tane pozlama (ing. exposures) süresini içermektedir ve bu da 30 dakikalık bir çözünürlüğe denk gelmektedir. Kepler'le alınan veriler maksimum bir ayı içerecek şekilde dünyadaki depolama merkezine iletilmektedir, çünkü Kepler'in üzerindeki (onboard) depolama alanı bu süreçten fazlasını muhafaza edememektedir. Uzaydan gelen veri dünyaya yüksek kazançlı antenler (ing. high-gain antenna) vasıtasıyla iletilir. Depolanan bu verilerin dünyaya iletimi sırasında her ay bir günlük boşluk oluşmaktadır. Ek olarak, Kepler her üç ayda bir döndürülmektedir. Uzay aracının bu hareketiyle beraber güneşten



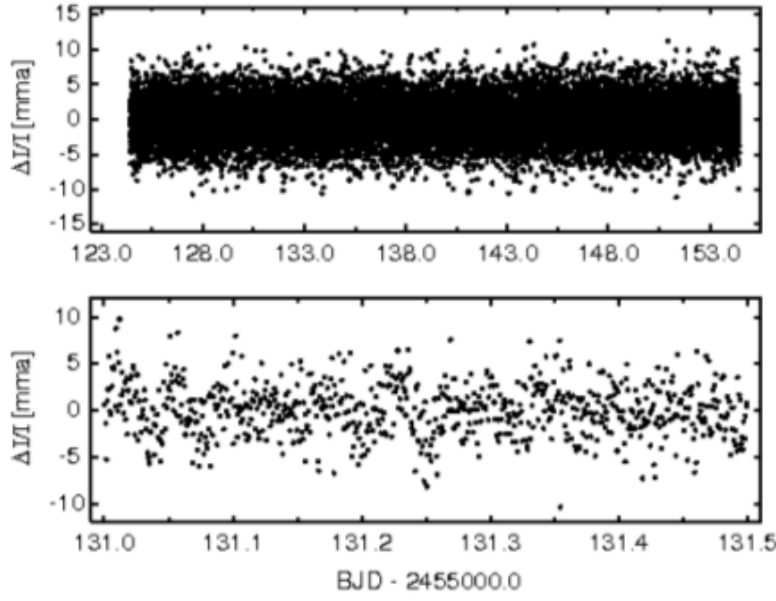
gelen ışınları depolaması sağlanmaktadır. Bu hareket süresince termal kontroller de gerçekleştirilir. Yanısıra, verilerde bu hareketlerin sağladığı boşluklara ek başka boşluklara da rastlanabilir. Bu ek boşluklar depolanan verilerin korunması nedeni ile oluşmaktadır ve bu sürece koruma modu (ing. safety mode) ismi verilmektedir.

SC modu sayesinde genlik-frekans diyagramında hem g- hem de p-modlarının kapsanması amaçlanmıştır. Kısa poz süreli mod sayesinde daha yüksek Nyquist frekansı elde edilmiştir (Eşitlik 3.1).

$$f_{Nyquist} = \frac{1}{2\Delta t} \quad (3.1)$$

Eşitlikte  $\Delta t$  poz süresidir. Kepler Teleskobu için bu değer 58.85 saniyeye eşittir. Sonuç olarak SC modu kullanıldığında, genlik-frekans diyagramı 0'dan 8496  $\mu\text{Hz}$ 'e kadar uzanan bir aralık kapsamış olur ve bu sayede de g- ve p-modlarını içeren bir genlik-frekans diyagramı elde edilir (Şekil 3.2).

MAST veritabanında bulunan veriler farklı şekillerde indirilebilir. Genelde asterosismolojik veriler için kullanılan verinin türü fotometrik verinin sadece görelî akıya dönüştürüldüğü ve ötegezegen araştırmasının sonrasında yapıldığı (ing. Pre-Search Data Conditioning, PDC) modudur. Bu veri elde edildikten sonra, öncelikle akı değerleri sistematik hatalardan arındırılır. Daha sonra diğer yıldızlardan gelen ek akı değerleri (ing. contamination) çıkarılır. Bu işlemlerden sonra ise veri  $4\sigma$  değerine göre kesilir, bu değer dışındaki tüm noktalar silinir. Bu işlem her bir çeyreklik (Q) için ayrı ayrı yapılır. Son adımda ise tüm çeyreklikler birleştirilir. Bu sayede veri Fourier dönüşümüne hazır bir hale getirilmiş olur. KIC 10001893 için örnek ışık eğrisi şekil 3.1'de gösterilmektedir.



Şekil 3.1 KIC 10001893 sdBV yıldızının sadece bir çeyreği kapsayan ışık eğrisi

### 3.2 Fourier Analizi

Zonklama frekanslarının belirlenebilmesi için Fourier dönüşümü kullanılmaktadır. Bu dönüşüm uygulandıktan sonra genlik-frekans diyagramı elde edilir. Bu dönüşümü yaparken lineer olmayan en küçük kareler yöntemi (ing. nonlinear least square method) kullanılmaktadır. Bulunan tüm sinyaller ( $A_i \sin(\omega_i t + \Phi_i)$ ) dalga formatına göre fit edilmektedir. Bulunan frekanslar fit edildikten sonra bulunan piklere yinelemeli temizleme işlemi (ing. iterative pre-whitening prosedürü) uygulanmaktadır. Fakat sinyal profilleri oldukça kompleks olduğu için bu işlem tatmin edici bir şekilde uygulanamamaktadır. Dolayısıyla, baskın olan frekanslar görsel olarak çıkarılmaktadır. Bu işlem tamamlandıktan sonra sinyallerin hangisinin gerçekten yıldızın zonklama karakterine ait olup olmadığını belirlemek için bir limit belirlenmektedir. Bu limit değeri üzerindeki tüm sinyaller yıldızın zonklama karakterine aittir. Bu limit değeri belirlemek için öncelikle çıkarılan sinyaller sonrasında, genlik-frekans diyagramından ortalama bir değer bulunur ve bu değer 5 ile çarpılarak ortalamanın  $5\sigma$ 'lık saçılma aralığı belirlenir (Baran vd. 2015a). Bu değer sinyal/gürültü (S/N) oranına denk gelmektedir ve KIC10001893 yıldızı için 0.02 ppt değerine eşittir. KIC 10001893 için bu değer

üzerinde 110 tane istatistiksel olarak anlamlı (ing. statistically significant) sinyal bulunmuştur. Bu 110 frekanstan yalnızca 6 tanesi p-modu iken, diğer kalan büyük çoğunluk g-moduna aittir. Frekansların 2000  $\mu\text{Hz}$ 'den küçük olduğu bölge için g-modlarının salındığı, 2000  $\mu\text{Hz}$ 'den büyük bölgeler içinse p-modlarının salındığı varsayımı yapılmaktadır (Baran 2012, Baran vd. 2017). Bu varsayımın kaba olduğunu belirtmek gerekmektedir. Teorik modeller modların salındığı bölgeleri net bir şekilde ortaya koyamamaktadır. Gözlemsel olarak modlar arasındaki ayırım gözükse de, tam olarak hangi frekansa denk geldiği hesaplanamamaktadır.

Genlik-frekans diyagramı için çözünürlük (ing. resolution) değeri de hesaplanmaktadır. Çözünürlük değeri elde edilen verinin uzunluğu ile ters oratılıdır ve bu değer  $\Delta f = 1.5/T$  denkleminde hesaplanır (Baran 2012). KIC10001893 yıldızı 1051 gün boyunca Kepler Teleskobu ile gözlenmiştir ve frekans çözünürlüğü 0.0162  $\mu\text{Hz}$  bulunmuştur. Bulunan zonklama frekanslarının hepsi çizelge 3.1'de gösterilmektedir.

Çizelge 3.1 KIC 1001893'ün Fourier dönüşümü sonrası bulunan zonklama frekansları ve bu frekanslar üzerinden belirlenen zonklama modları.

No	Frekans [ $\mu\text{Hz}$ ]	Dönem [s]	Genlik [ppt]	<i>l</i>	<i>n</i>
$f_1$	76.45610	13079.4	0.026		
$f_2$	77.52959	12898.3	0.098		
$f_3$	78.45598	12746.0	0.029		
$f_4$	79.71621	12544.5	0.023		
$f_5$	81.97998	12198.1	0.040		
$f_6$	83.93838	11913.5	0.021		
$f_7$	87.36142	11446.7	0.024		
$f_8$	89.08844	11224.8	0.048		
$f_9$	91.74985	10899.2	0.024		
$f_{10}$	96.93867	10315.8	0.056		
$f_{11}$	98.98050	10103.0	0.020		
$f_{12}$	102.17218	9787.4	0.027	1	36
$f_{13}$	105.01995	9522.0	0.031	1	35
$f_{14}$	107.83350	9269.3	0.031		

Çizelge 3.1 KIC 1001893'ün Fourier dönüşümü sonrası bulunan zonklama frekansları ve bu frekanslar üzerinden belirlenen zonklama modları. (Devam)

$f_{15}$	108.18998	9243.0	0.036	1	34
$f_{16}$	111.64452	8957.0	0.023		
$f_{17}$	114.41647	8740.0	0.062		
$f_{18}$	114.71047	8717.6	0.038	1	32
$f_{19}$	116.91257	8553.4	0.060		
$f_{20}$	118.33339	8450.7	0.032	1	31
$f_{21}$	120.49499	8299.1	0.022		
$f_{22}$	122.07627	8191.6	0.019	1	30
$f_{23}$	123.88963	8071.7	0.023		
$f_{24}$	125.85581	7945.6	0.048	1	29
$f_{25}$	126.89067	7880.8	0.034	1	t
$f_{26}$	130.55000	7659.9	0.041	1	28
$f_{27}$	132.47489	7548.6	0.033		
$f_{28}$	135.32898	7389.4	0.098	1	27
$f_{29}$	140.52048	7116.4	0.223	1	26
$f_{30}$	141.47473	7068.4	0.029		
$f_{31}$	145.73647	6861.7	0.036		
$f_{32}$	146.10057	6844.6	0.088	1	25
$f_{33}$	152.06118	6576.3	0.098	1	24
$f_{34}$	155.96730	6411.6	0.028		
$f_{35}$	158.08277	6325.8	0.204	1	23
$f_{36}$	160.05890	6247.7	0.048	1	t
$f_{37}$	163.05499	6132.9	0.033		
$f_{38}$	164.99199	6060.9	0.069		
$f_{39}$	165.39587	6046.1	0.123	1	22
$f_{40}$	166.21235	6016.4	0.045		
$f_{41}$	172.45839	5798.5	0.063		
$f_{42}$	172.72052	5789.7	0.413	1	21
$f_{43}$	173.19016	5774.0	0.057		
$f_{44}$	176.67844	5660.0	0.034		
$f_{45}$	178.79492	5593.0	0.021		
$f_{46}$	180.55430	5538.5	0.065	1	20
$f_{47}$	181.94388	5496.2	0.039	2	35

Çizelge 3.1 KIC 1001893'ün Fourier dönüşümü sonrası bulunan zonklama frekansları ve bu frekanslar üzerinden belirlenen zonklama modları. (Devam)

$f_{48}$	187.26591	5340.0	0.019	2	34
$f_{49}$	189.09310	5288.4	0.076	1	19
$f_{50}$	192.71535	5189.0	0.033	2	33
$f_{51}$	196.41734	5091.2	0.036		
$f_{52}$	199.11196	5022.3	0.770	1	18
$f_{53}$	201.17486	4970.8	0.034	1	t
$f_{54}$	204.69571	4885.3	0.097	2	31
$f_{55}$	210.68155	4746.5	0.793	1	17
$f_{56}$	211.18878	4735.1	0.040	2	30
$f_{57}$	217.75580	4592.3	0.025	2	29
$f_{58}$	219.40891	4557.7	0.046	2	t
$f_{59}$	224.71910	4450.0	0.054	1	16
$f_{60}$	225.89681	4426.8	0.027	2	28
$f_{61}$	234.17558	4270.3	0.066	2	27
$f_{62}$	238.98288	4184.4	0.091	1	15
$f_{63}$	243.14335	4112.8	0.052	2	26
$f_{64}$	252.79336	3955.8	0.129	2	25
$f_{65}$	255.16713	3919.0	0.236	1	14
$f_{66}$	262.97796	3802.6	0.602	2	24
$f_{67}$	273.33606	3658.5	0.086	2	23
$f_{68}$	274.30326	3645.6	1.162	1	13
$f_{69}$	276.35760	3618.5	0.053	2	t
$f_{70}$	286.00028	3496.5	0.186	2	22
$f_{71}$	298.59659	3349.0	0.051	2	21
$f_{72}$	298.66794	3348.2	0.270	1	12
$f_{73}$	312.06116	3204.5	0.039	2	20
$f_{74}$	323.98107	3086.6	0.902	1	11
$f_{75}$	326.78670	3060.1	0.053	2	19
$f_{76}$	359.68635	2780.2	0.565	1	10
$f_{77}$	391.37411	2555.1	0.546	1	9
$f_{78}$	426.03953	2347.2	0.062		
$f_{79}$	440.50922	2270.1	0.105	1	8
$f_{80}$	496.15480	2015.5	0.026	1	7
$f_{81}$	605.36352	1651.9	0.040		

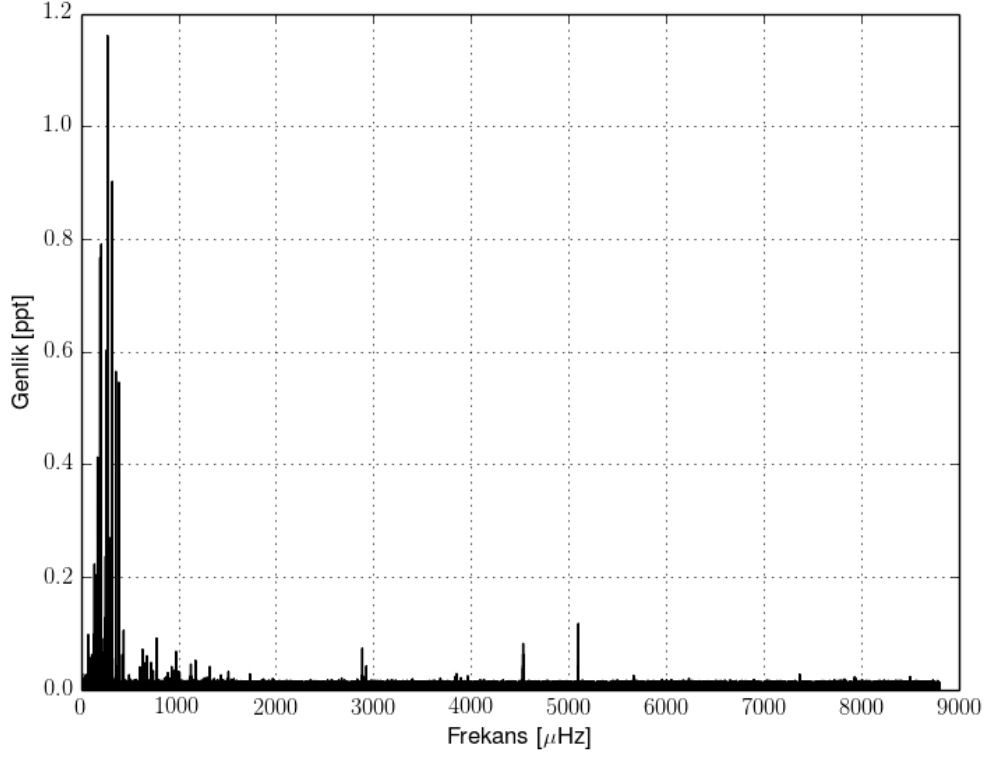
Çizelge 3.1 KIC 1001893'ün Fourier dönüşümü sonrası bulunan zonklama frekansları ve bu frekanslar üzerinden belirlenen zonklama modları. (Devam)

$f_{82}$	633.75372	1577.9	0.072		
$f_{83}$	660.89485	1513.1	0.048		
$f_{84}$	679.02492	1472.7	0.060		
$f_{85}$	721.03251	1386.9	0.049		
$f_{86}$	742.05995	1347.6	0.034		
$f_{87}$	777.84691	1285.6	0.091		
$f_{88}$	883.93883	1131.3	0.022		
$f_{89}$	892.29945	1120.7	0.030		
$f_{90}$	924.72720	1081.4	0.021		
$f_{91}$	930.92533	1074.2	0.041		
$f_{92}$	943.66330	1059.7	0.026		
$f_{93}$	966.09023	1035.1	0.035		
$f_{94}$	977.51710	1023.0	0.068		
$f_{95}$	1004.52034	995.5	0.032		
$f_{96}$	1013.17122	987.0	0.030		
$f_{97}$	1128.41345	886.2	0.045		
$f_{98}$	1175.77895	850.5	0.052		
$f_{99}$	1267.58778	788.9	0.021		
$f_{100}$	1294.66597	772.4	0.022		
$f_{101}$	1321.87706	756.5	0.041		
$f_{102}$	1435.75017	696.5	0.026		
$f_{103}$	1513.31719	660.8	0.032		
$f_{104}$	1734.30454	576.6	0.028		
$f_{105}$	2884.33804	346.7	0.073		
$f_{106}$	2898.55072	345.0	0.023		
$f_{107}$	2925.68753	341.8	0.042		
$f_{108}$	3834.35582	260.8	0.023		
$f_{109}$	3849.11470	259.8	0.028		
$f_{110}$	3897.11613	256.6	0.021		

### 3.2.1 KIC10001893 yıldızının zonklama frekansları

KIC 10001893 sdBV yıldızı Kepler Uzay Teleskobu ile 1051 gün boyunca gözlenmiştir. Kesintisiz uzun dönemli ve yüksek çözünürlüklü bu gözlemler sayesinde

modların tayini bu yıldız için doğru ve hassas bir şekilde yapılabilir hale gelmiştir. Fourier dönüşümü sonrasında elde edilen genlik-frekans diyagramı şekil 3.2’de gösterilmektedir. Toplamda ise 110 zonklama frekansı keşfedilmiştir (Çizelge 3.1).

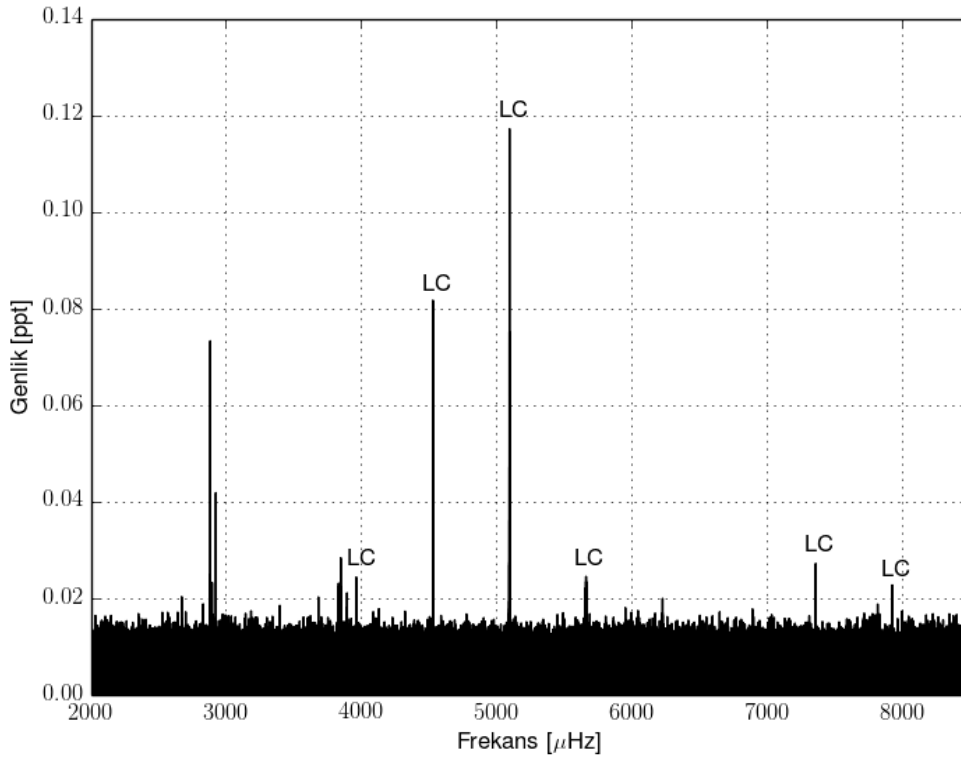


Şekil 3.2 KIC 10001893 sdBV yıldızının genlik-frekans diyagramı

### 3.2.2 KIC 10001893’te belirlenen p-modları

KIC 10001893 sdBV yıldızı için 6 tane p-modu keşfedilmiştir. Genlik-frekans diyagramında basınç modları (p) bölgesi nispeten çok daha az pik içermektedir. Bulunan sinyaller (pikler) 2880 ile 3900  $\mu\text{Hz}$  arasına sıkışmaktadır (Şekil 3.3). Bu bölgede bulunan en büyük genlik 0.07 ppt değerine sahiptir. Bu bölgede zonklama sinyalleri dışında teleskop kaynaklı ek sinyaller de görülmektedir. Bu piklerin görülme nedeni Kepler’de bulunan uzun süreli pozlamanın (LC) modunun okuma gürültüsüdür. Bu etki Baran (2013) tarafından karakterize edilmiş olup, bu yıldızın genlik-frekans diyagramında belirlenmiştir ve şekil 3.3’te LC sembolü ile gösterilmektedir. Bu bölge

yıldızın direkt olarak zarf karakterini belli etmektedir. Eğer frekansta ayrışma değeri elde edilebilseydi zarfa dair dönme dönemi hesaplanabilirdi. Fakat zonklama açısının bakış açısı ile çakışmaması nedeniyle  $P_{zarf}$  hesaplanamamıştır. Ayrıca, asimtotik limit basınç modlarında geçerli olmadığı için, bu bölge için mod tayini modların dönemde ayrışması yöntemi kullanılarak yapılamamıştır.



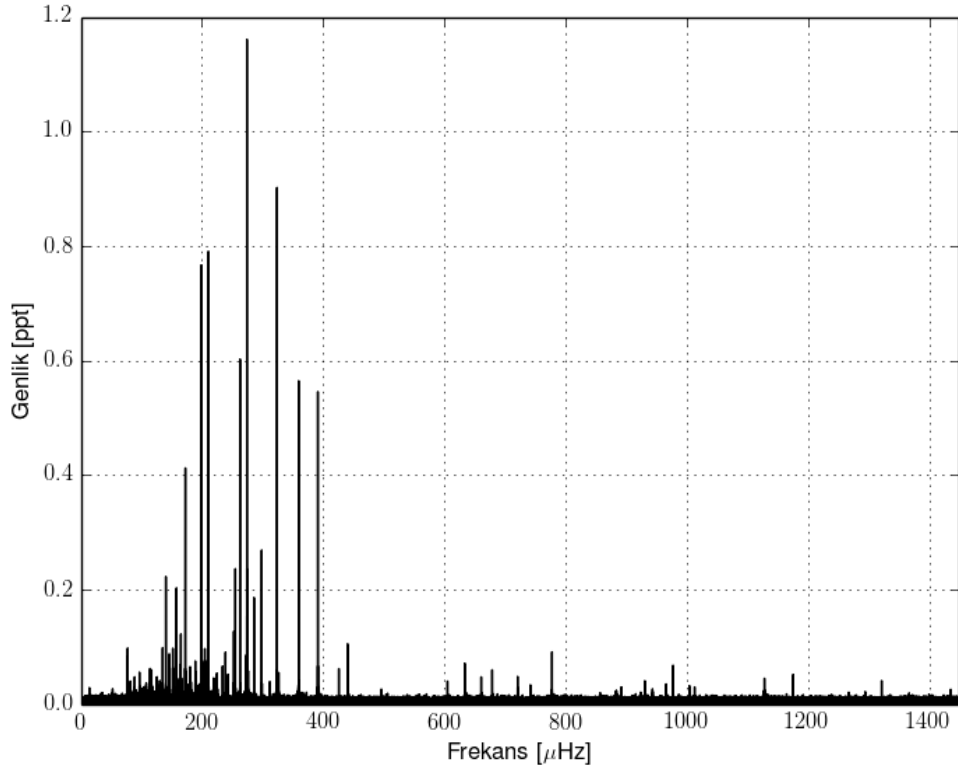
Şekil 3.3 KIC 10001893 sdBV yıldızının genlik-frekans diyagramındaki p-modları

### 3.2.3 KIC 10001893'te belirlenen g-modları

Genlik-frekans diyagramında KIC10001893 yıldızı toplamda 104 tane g-modu göstermektedir. Bulunan frekansların hepsi şekil 3.4'te verilmiştir. Bu bölge bulunan zonklama sinyalleri açısından oldukça zengin olup, yüksek genlik değerlerine sahiptir. Genlik değerleri p-modu bölgesine kıyasla ortalamada %200 daha büyüktür. Yüksek genlikli frekanslar kendilerini 400  $\mu\text{Hz}$ 'in altında göstermektedirler. Bulunan zonklama frekanslarının hemen hepsi 500  $\mu\text{Hz}$ 'in altındadır. Genlik-frekans diyagramında 500  $\mu\text{Hz}$  ile 2000  $\mu\text{Hz}$  arasında düşük genlikli sinyaller de görülmektedir. Bu bölgeye



genlik-frekans diyagramında geçiş bölgesi (ing. transition region) ismi verilmektedir. Bu bölgede asimtotik limit bozulmaktadır. Bu bölge için hem g- hem de p-modlarının olabileceği düşünülmektedir (Baran 2012). Fakat bu modların görülebilir hale gelmesi için gözlem sürelerinin daha da artırılması gerekmektedir ve bu sayede tespit edilebilen modların sayısı da artar. Ayrıca, g-modu bölgesi için teleskop kaynaklı sinyaller de görülmektedir. Fakat bu etki modların tayin edilmesi sürecinde herhangi bir zorluk çıkarmamaktadır. Bu ek pikler 566.43  $\mu\text{Hz}$  ve bu değerin katları olan zonklama sinyallerine oranla daha yüksek genliğe sahip birkaç adet okuma gürültüsü kaynaklı sinyallerdir. Çekim modları (g) bölgesi yıldızın iç katmanlarına dair bilgi sunmaktadır. Yıldızın iç katmanlarının dönme dönemleri bu modlar ve bu modların dönme ile ayrışması belirlenerek ortaya konulabilmektedir. Fakat bunun için zonklama ekseninin gözlemcinin bakış doğrultusuna dik düzlemde olması gerekmektedir. KIC 10001893 yıldızının çok düşük zonklama açısına sahip olması bu ihtimali ortadan kaldırmaktadır. Bu açı Silvotti vd. (2014) tarafından hesaplanmış ve maksimum  $3^\circ$  civarında olması gerektiği ortaya konmuştur.



Şekil 3.4 KIC 10001893 sdBV yıldızının genlik-frekans diyagramındaki g-modları

### 3.3 Zonklama Modlarının Tayini

Zonklama frekansları belirlendikten sonra model oluşturabilmek için modların  $(n,l,m)$  belirlenmesi önemlidir. Genlik-frekans ya da genlik-dönem diyagramlarındaki her bir sinyal (pik), radyal düğüm sayısı ( $n$ ), toplam yüzey düğüm sayısı ( $l$ ) ve azimut derece sayısı ( $m$ ) taşımaktadır. Bu parametreler serbest parametre olarak da düşünülebilir. İndirgenen her bir serbest parametre sayesinde daha iyi modellerin yapılabilmesi hedeflenmektedir (Baran 2012). Zonklama yapan sdBV'lerde modları belirleyebilmek için iki temel yöntem kullanılmaktadır. Bu yöntemlerden ilki dönmenin etkisiyle modların frekansta ayrışması (ing. rotational multiplets) (Baran 2012) iken, diğeri modların dönemde ayrışmasıdır (ing. asymptotic period spacing) (Reed vd. 2011). Zonklama modlarının belirlenmesi yıldızın kütle, yaş gibi temel parametrelerini ortaya koymak açısından oldukça önemlidir. Ayrıca, genlik-frekans diyagramındaki p-modu bölgesi veya g-modu bölgesine göre yıldızın içerisinde farklı bölgeye düşen kütle değerleri hem zarf hem de iç bölgeler için hesaplama imkanı sağlamaktadır (Aerts vd. 2010). Ek olarak, yıldızın farklı bölgeleri için (zarf, çekirdek) dönme dönemleri de bu sayede ayrı ayrı hesaplanabilmektedir. Tüm bunları yapabilmek için mümkün olan en fazla sayıda modun belirlenmesi gerekmektedir. Bunu da yapabilmek için kesintiye uğramamış, uzun süreli ve yüksek çözünürlüklü verilere ihtiyaç duyulmaktadır.

Yerden yapılan gözlemlerle modların belirlenmesi oldukça nadir gerçekleştirilebilmiştir (Baran 2012). sdBV'ler oldukça sönük (ing. intrinsically faint), hızlı zonklama dönemlerine sahip, alanda ve kümelerde az sayıda bulunan yıldızlardır (Óstensen 2010). Yerden yapılan gözlemler sdBV'ler için tatmin edici veriler sağlamamaktadır. Başlıca sebep kesintisiz gözlem yapılamıyor olmasıdır ve dolayısıyla bu durum genlik-frekans diyagramında yüksek oranda gürültüye neden olmaktadır. Ayrıca, yerden yapılan gözlemler dönemli aralıklara (kesintilere) sahip olduğundan ötürü, Fourier dönüşümü sonrası sahte pikler (ing. aliases) genlik-frekans diyagramında kendilerini göstermektedirler. Bu ise gerçek sinyalleri, sahtelerinden ayırmak adına ek bir zorluk çıkarmaktadır. Bu noktada modların belirlenmesinde yapılabilecek yanlış

değerlendirmeler, model aşamasında yanlış sonuçların elde edilmesine neden olabilmektedir.

Kepler Uzay Teleskobu sonrası, özellikle son 6 yılda sdBV'ler için kayda değer birçok önemli gelişme yaşanmıştır. Kepler'in sağlamış olduğu kesintisiz ve yüksek çözünürlüklü fotometrik veriler sayesinde, yerden hiçbir zaman elde edilememiş, önemli olgular keşfedilebilmiştir. Bu olgular modların frekansta ayrışması (ing. Rotational multiplets) (Baran 2012), modların dönemde ayrışması (ing. asymptotic period spacing) (Reed vd. 2011), Doppler parlaması (ing. Doppler beaming ya da Doppler boosting) (Telting vd. 2012) ve modların tuzaklanması (ing. mode trapping) (Óstensen vd. 2014) olarak özetlenebilmektedir. Kepler öncesi dönemde bu olgular gözlemsel olarak ortaya koyulamamıştır. Uzun dönemli kesintisiz gözlemler sayesinde, modlar ortaya konabilmektedir ve dolayısıyla sdBV değişenlerinin yapısına dair modeller geliştirebilmektedir (Reed vd. 2016). Radyal düğüm sayısı  $n > 10$  olduğu durumlar g-modları için ortaya konabilmiştir ve dolayısıyla asimtotik limit gözlemsel olarak genlik-dönem diyagramında görülür bir hale gelmiştir. Bu sayede modların dönemde ayrışması (ing. asymptotic period spacing) yöntemi gözlemsel olarak kullanılabilir bir hale gelmiştir. KIC 10001893 yıldızı için bu yöntem kullanılarak 32 tane  $l=1$  modu, 18 tane  $l=2$  modu ortaya konmuştur.

sdBV yıldızları  $T_{eff}$ - $\log g$  diyagramında çok dar bir alana sıkışmaktadır. Dolayısıyla, dönemde ayrışma miktarlarının benzer olması beklenmektedir (Reed vd. 2012). Kepler Teleskobu ile gözlenen diğer 13 sdBV yıldızı için bu değerlere bakıldığında bu benzerlik görülmektedir (Çizelge 3.2). En uzun dönemde ayrışma miktarına sahip yıldız KIC 10553698 ile beraber KIC 10001893 yıldızdır. Diğer bir deyişle, zonklama modlarının yayıldığı hacim (ing. resonant cavity) en büyük olan yıldızlar KIC 10001893 ve KIC 10553698 yıldızdır. Bu hacmin en küçük olduğu yıldız ise KIC 11179657 sdBV değişenidir (Çizelge 3.2).

Çizelge 3.2 V1093 Her karakterine sahip yıldızlardaki modlarda dönemde ayrışma miktarları (Reed vd. 2012)

KIC#	$P_{ort,l=1}$	$P_{ort,l=2}$
KIC 2697388	240.07 (0.27)	138.54 (0.16)
KIC 2991403	268.52 (0.74)	153.84 (1.19)
KIC 3527751	266.10 (0.38)	153.57 (0.12)
KIC 5807616	242.12 (0.62)	139.13 (0.38)
KIC 7664467	260.02 (0.77)	-
KIC 7668647	248.15 (0.44)	144.71 (0.57)
KIC 8302197	257.70 (0.56)	-
KIC 9472174	255.63 (0.30)	147.70 (0.69)
KIC 10001893	268.53 (0.61)	154.74 (0.34)
KIC 10553698	271.15 (0.54)	156.68 (0.31)
KIC 10670103	251.13 (0.31)	145.59 (0.26)
KIC 11179657	231.02 (0.02)	133.64 (0.40)
KIC 11558725	246.77 (0.58)	142.57 (0.14)

### 3.3.1 KIC10001893 Yıldızı İçin Zonklama Modlarının Tayini İle Ulaşılan Sonuçlar

KIC10001893 110 tane zonklama frekansı barındıran g-modları bakımından oldukça zengin bir yıldızdır. Bir sonraki aşama olarak zonklama frekanslarına karşılık gelen  $(n,l,m)$  modlarını belirlemek olmuştur. Bu modların belirlenmesi iç yapıya ilişkin bilgi vermeleri açısından oldukça önemlidir. Modları belirlemek için iki temel yöntem uygulanmaya çalışılmıştır. Fakat KIC10001893 genlik-frekans diyagramı birçok açıdan oldukça kompleks yapılar sergilemektedir. İlk göze çarpan özellik dönmenin etkisinin genlik-frekans diyagramında görülmemesidir. Dolayısıyla, zonklama frekanslarının azimut derecesi ( $m$ ) belirlenmemektedir. Azimut derecesi ( $m$ ), yıldızın dönme eksenini takip etmektedir. Bu şart sadece manyetik olarak güçlü yıldızlarda bozulmaktadır (örn. RoAp değişenleri). sdBV yıldızları manyetik olarak güçlü yıldızlar değildir ve  $m$  modlarının, yıldızın dönme eksenini takip ettiği düşünülür. Dolayısıyla, boylamsal  $m$  modlarının bulunması durumunda, bulunduğu katmana göre dönme dönemi bulunabilmektedir. Genlik-frekans diyagramında Kepler’le gözlenmiş diğer yıldızlara bakıldığında dönmenin modlar üzerindeki etkisi yaygın olarak karşımıza çıkarken, yalnızca iki yıldızda bu etki görülmemektedir (KIC8302197 ve KIC10001893). Dolayısıyla, modların tayin edilmesinde kullanılabilen dönmenin etkisiyle modların

frekansta ayrışması (ing. rotational multiplets) her iki yıldız için de kullanılamamaktadır. Ek olarak, farklı katmanlar için dönme dönemleri de ( $P_{dönme}$ ) hesaplanamamaktadır.

Genlik-frekans diyagramında ayrışmaların ve dolayısıyla azimut derecesinin ( $m$ ) algılanamamasının farklı sebepleri üzerinde durulmaktadır. Kepler’le uzun süre gözlenmiş olmalarına rağmen bu yıldızların dönme dönemleri, gözlendiği süreden çok daha uzun olabilir (Baran vd. 2015b, Uzundağ vd. 2017). Bu nedenle sürekli olarak  $m=0$  durumu gözleniyor olabilir. Fakat bu durumda yıldızların dönme dönemlerinin minimum  $P_{dönme} > 715$  gün olması gerekmektedir. Kepler ile diğer gözlenen yıldızların dönme dönemleri ortalama 40 gün civarındadır (Çizelge 3.3) ve bu süre oldukça uzun görünmektedir. Dolayısıyla bu argüman pek olası değildir.

Çizelge 3.3 Kepler Uzay Teleskobu ile gözlenen sdbV’lerin dönme dönemleri (Reed vd. 2015)

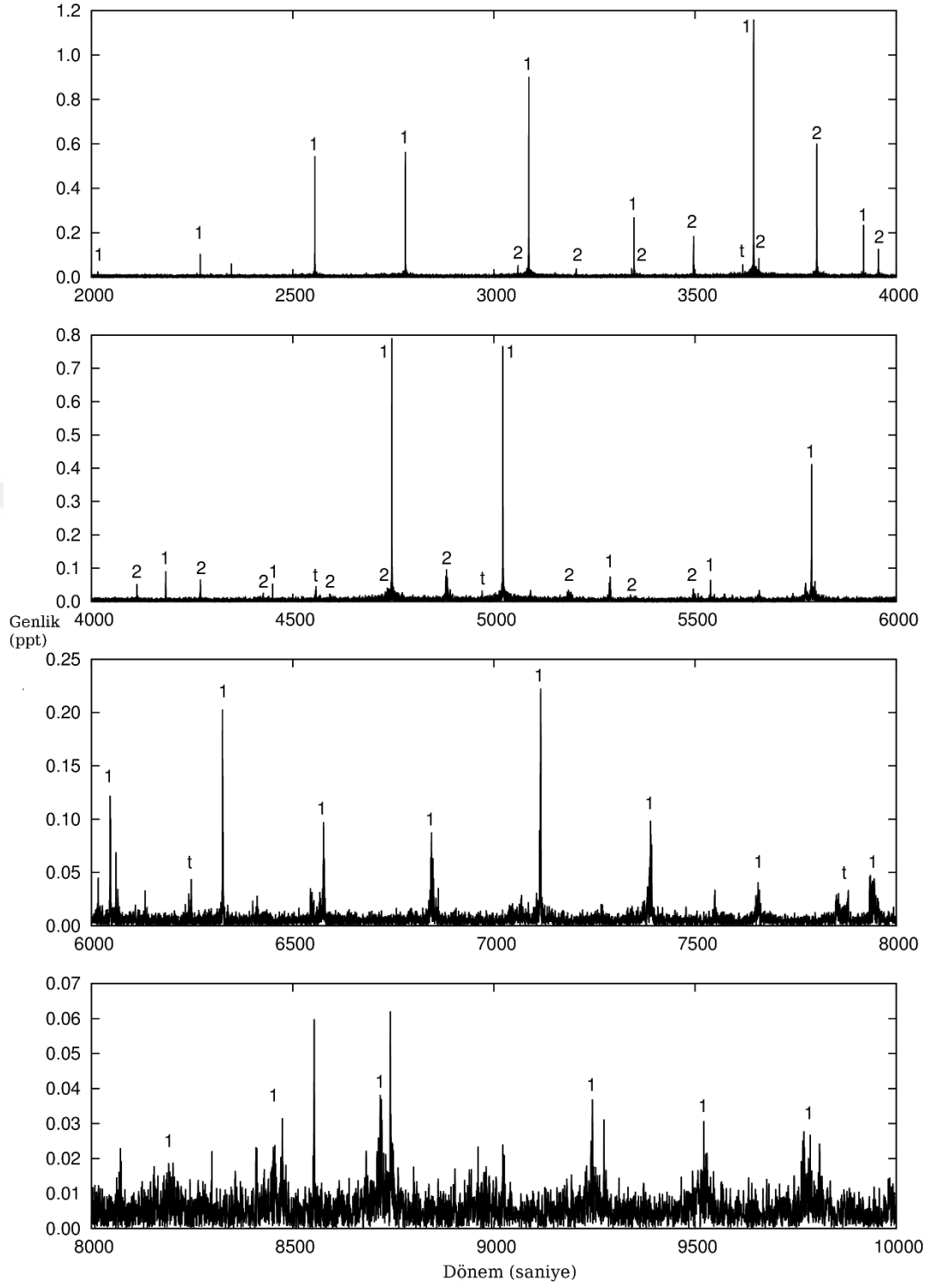
KIC#	$P_{dönme}$ [gün]	$P_{çift}$ [gün]
<b>KIC 2697388</b>	88 (8)	-
<b>KIC 2991403</b>	10.46	153.84 (1.19)
<b>KIC 3527751</b>	15.3(7)/42.6(3.4)	-
<b>KIC 5807616</b>	39.2	-
<b>KIC 7664467</b>	35.1 (6)	1.56
<b>KIC 7668647</b>	44.5 (3.5)	14.174(4)
<b>KIC 8302197</b>	> 2 yıl	-
<b>KIC 10001893</b>	> 715	-
<b>KIC 10553698</b>	42.9	3.387
<b>KIC 10670103</b>	88 (8)	-
<b>KIC 11179657</b>	7.2	0.39
<b>KIC 11558725</b>	45	10.05

İkinci sebep olarak yan piklerin (ing. off-side components) ( $m=-1$  ve  $m=+1$ ) zonklama mekanizması tarafından uyarılmıyor olabileceği üzerinde durulmaktadır (Baran vd. 2015b). Diğer bir deyişle zonklama mekanizması sadece  $m=0$  durumunu uyarıyor olabilir (Baran vd. 2015b, Uzundağ vd. 2017). Fakat, Kepler’le gözlenmiş zonklama yapan sdbV’lerin hemen hepsinde seçici uyarıtma mekanizması (ing. selective driving

mechanism) etkisi görülmemektedir. Ayrıca, istatistiksel olarak veri çok azdır ve 14 tane sdBV yıldızı için bu mekanizma kapsamlı bir şekilde ele alınamamaktadır. Dolayısıyla bu ihtimal de pek olası gözükmemektedir. En olası ihtimal olarak zonklama eksenini eğim açısının çok düşük olmasından dolayı azimutal derecelerin ( $m$ ) algılanamıyor olması gözükmemektedir. Zonklama eksenini eğim açısının çok düşük olması modların birbirini sönmeme (ing. partial cancellation) etkisini olağandan çok daha fazla artırıyor olabilir. Silvotti vd. (2014) KIC10001893 yıldızının gözlemcinin bakış doğrultusuna dik düzlemle ile yaptığı açının maksimum  $3.3^\circ$  olabileceğini ortaya koymuştur. Sonuç olarak bu ihtimallerin daha net bir şekilde ortaya koyulabilmesi için gözlenen yıldız sayısının artırılması gerekmektedir.

Modların belirlenebilmesi için uygulanabilecek bir diğer yöntem ise modların dönemde ayrışması yöntemidir. Modların  $l=1$  olduğu asimtotik dizinin frekans aralığı 102.17 - 496.15  $\mu\text{Hz}$  iken,  $l=2$  modları 181.94 - 326.78  $\mu\text{Hz}$  arasındadır. Ayrıca, asimtotik olarak sıralı devam eden modların bazılarının genlik-dönem diyagramında kayıp olduğu görülmektedir ve tuzaklanan bu modlar çizelge 3.1'de 't' sembolü ile gösterilmektedir. Bulunan tüm modlar da şekil 3.5'de gösterilmektedir.

Genlik-dönem diyagramlarından radyal modları ( $n$ ) direkt olarak belirlenememektedir. Modların yayılım diyagramında (Şekil 1.11) temel modda zonklama  $n=0$  durumunun hangi döneme ya da frekansa denk geldiği gözlemsel olarak ortaya konulamamaktadır. Bu modları bulmak için teorik olarak hesaplanan (Charpinet vd. 2000) değerlerden yola çıkılarak hesaplama yapılabilmektedir.  $l=1$  durumu için hesaplanan frekanslardaki radyal modlar  $n=7$ 'den  $n=36$ 'ya kadardır. Frekans arttıkça radyal nodların sayısı düşmektedir. Aynı davranış  $l=2$  durumu için de geçerlidir ve bu durum için belirlenen frekanslardaki radyal modlar  $n=19$ 'dan  $n=35$ 'e kadardır.

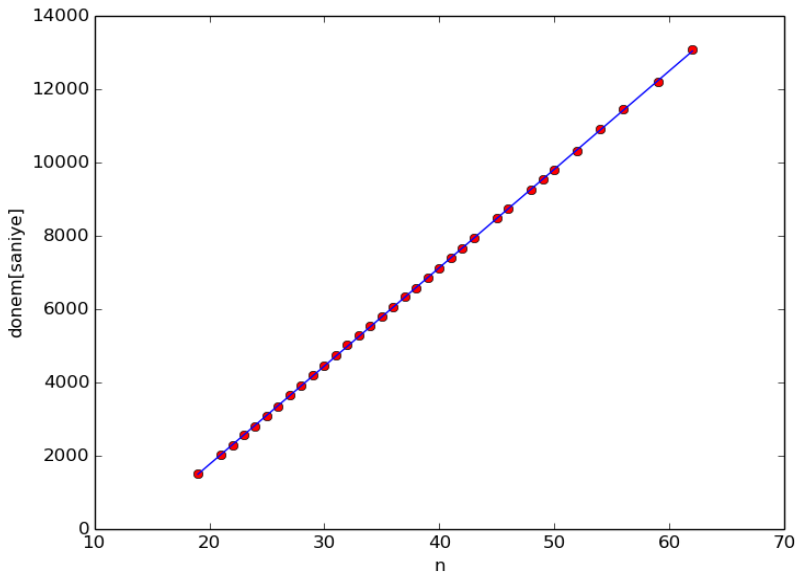


Şekil 3.5 KIC 1001893'ün genlik-dönem diyagramında belirlenen zonklama modları

### 3.4 Gözlemsel Eşel Diyagramları

Zonklama modları belirlendikten sonra modların döneme göre değişimine bakılmaktadır. Eşel diyagramları bu anlamda oldukça kullanışlı diyagramlardır. sdBV yıldızlarının iç yapısı kimyasal olarak homojen bir dağılım göstermemektedir (ing. chemically stratified). Kimyasal gradyent yerel basınç dalgalarının yayılım hızlarında değişime yol açmaktadır. Yıldız içerisindeki yerel yayılma hızlarındaki değişim, zonklama dönemlerinde ve dolayısıyla belirlenen zonklama modlarında değişimlere yol açmaktadır. Bu etki eşel diyagramları sayesinde görülmektedir. Bu etkiler düşük  $n$  değerlerinde kendilerini çok daha fazla gösterirken, yüksek  $n$  değerlerine gittikçe bu etki kaybolmaktadır (Charpinet vd. 2014).

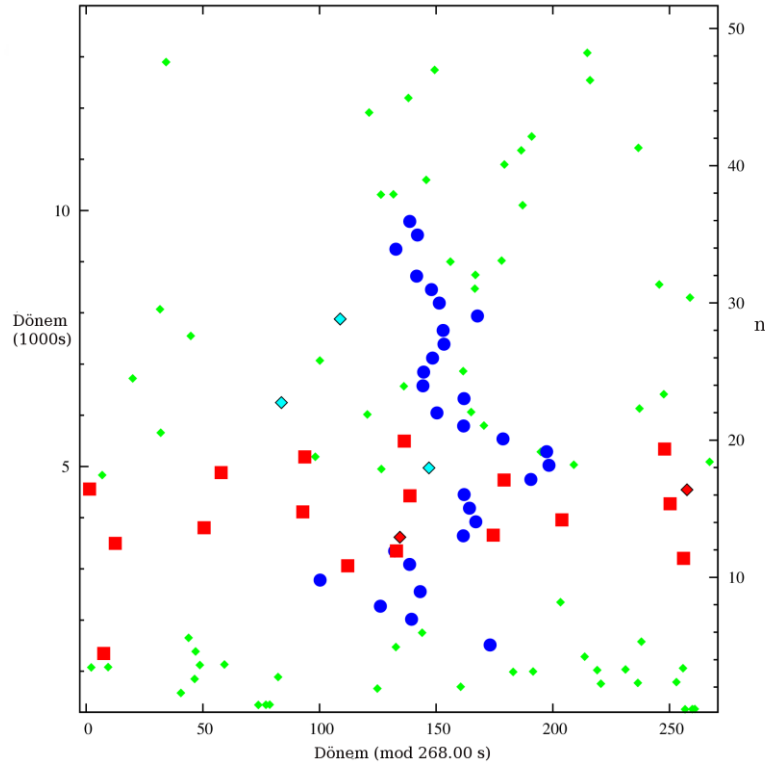
Eşel diyagramlarını oluşturmak için öncelikle modlar arası ayrışmaların ortalaması ( $P_{ort,l=1}$  ve  $P_{ort,l=2}$ ) bulunur.  $P_{ort,l=1}$  değerini bulmak için, döneme karşılık, radyal modlar ( $n$ ) çizdirilir (Şekil 3.6). Daha sonra belirlenen bu noktalara bir uyumlama (fit) yapılır. Uyumlanan doğrunun eğimi  $P_{ort,l=1}$  için dönemde ayrışmanın ortalama değeri olacaktır.  $P_{ort,l=1}$  için ortalama ayrışma değeri bulunduktan sonra iki mod arasındaki  $1/\sqrt{3}$ 'lük oran kullanılarak  $P_{ort,l=2}$  için de ortalama değer bulunur



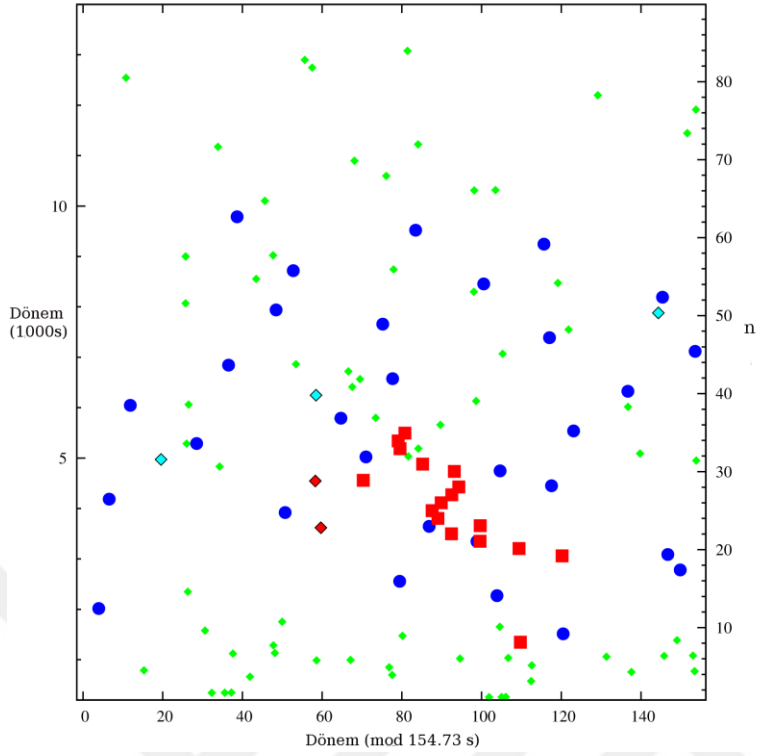
Şekil 3.6. KIC 10001893'ün döneme karşılık ( $n$ ) modlarının değişimi



KIC 10001893 için  $P_{\text{ort},l=1}=268.0 \pm 0.5$  saniyeye eşitken,  $P_{\text{ort},l=1}=153 \pm 0.4$  saniyeye eşittir. Son adımda bulunan ortalama ayrışma değerleri, modlara karşılık gelen dönem değerlerinden ardışık olarak çıkarılır. Bu işlem için Python programlama dilinin numpy modülünde yer alan modulo fonksiyonu kullanılmıştır (van der Walt vd. 2011). Bu işlem de yapıldıktan sonra  $l=1$  ve  $l=2$  için eşel diyagramları elde edilmiş olur (Şekil 3.7 ve 3.8). Normalde beklenmesi gereken modlar arası ayrışmanın sabit olmasıdır. Fakat yıldız içerisindeki kimyasal gradyent, yoğunluk farklılıklarına neden olmaktadır. Bulunan modlar beklenenden farklı olarak kaymalar göstermektedir. Bazı modlar ise tuzaklanmaktadır. Bu etkiler nedeniyle eşel diyagramlarında çengel bir yapı (ing. hook feature) görülmektedir. Bu çengel yapı düşük radyal mod ( $n$ ) değerlerinde kendini gösterirken, yüksek radyal mod ( $n$ ) değerlerine gidildiğinde yapı kaybolmaktadır. Kepler’le gözlenmiş diğer sdBV yıldızlarının eşel diyagramlarında da benzer yapılar görülmektedir (Baran ve Winans 2012, Óstensen vd. 2014, Foster vd. 2015, Baran vd. 2017). Charpinet vd. (2014) aynı yapının varlığını yaptığı teorik hesaplamalar sonucu göstermiştir.



Şekil 3.7 KIC 10001893 yıldızı için elde edilen  $l=1$  eşel diyagramı



Şekil 3.8 KIC 10001893 yıldızı için elde edilen  $l=2$  eşel diyagramı

### 3.5 İndirgenmiş Dönem Diyagramları

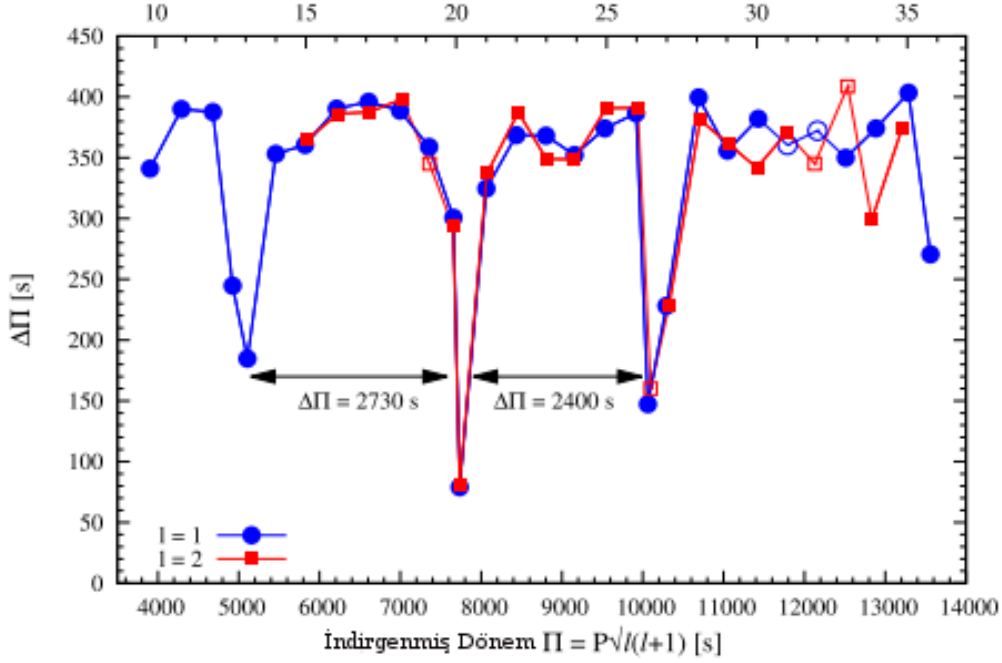
Zonklama modları  $(n, l, m)$  belirlendikten sonra iç yapıya dair diğer bir kullanışlı diyagram indirgenmiş dönem diyagramlarıdır (ing. reduced period diagram). Genlik-dönem diyagramında g-modu bölgesinde,  $500 \mu\text{Hz}$ 'e kadar olan bölgede  $l$  modları sıralı bir şekilde dizilmektedir. Teorik olarak ayrışma değerleri  $P_{l=1}$  için 250 saniye iken,  $P_{l=2}$  için 150 saniyeye eşittir. Kimyasal olarak yıldız içerisinde homojen üretilen zonklama modları bu ayrışma değerlerini takip etmektedir. Fakat gözlemsel olarak  $P_{l=1}$  arasındaki ayrışma miktarlarına bakıldığında birçok  $l$  modunda kayma olduğu görülmektedir ve hatta beklenen bazı modların genlik-dönem diyagramında kayıp olduğu belirlenmektedir. Benzer şekilde  $P_{l=1}$  için beklenen değer üzerinde sapmalar olduğu ve yine bazı modların genlik-dönem diyagramında görülmediği gözlenmiştir (Şekil 3.5). Charpinet vd. (2000) sdBV yıldızları için iki geçiş bölgesinin varlığını ortaya koymuştur ve bu geçiş bölgeleri nedeniyle modların tuzaklanması gerektiğini belirlemiştir. Ayrıca, sdBV yıldızlarının iç yapısı homojen bir yapı göstermemektedir.

Kimyasal olarak tabakalı (ing. stratified) yapı yoğunluk farklılıklarına neden olmaktadır ve bu da zonklama modlarının kaymasına sebebiyet vermektedir.

Gözlemsel olarak bu diyagram ilk kez Östensen vd. (2014) tarafından KIC 10553698 sdBV yıldızı için ortaya konmuştur (Şekil 3.9). Ortalama dönemde ayrışma değerleri ( $P_{ort,l=1}$ ) ve ( $P_{ort,l=2}$ ) bulunduktan sonra bu değerler  $\sqrt{l(l+1)}$  ile çarpılır ve indirgenmiş dönem ( $\pi$ ) bulunur.  $l=1$  için bu değer  $\pi = P_{ort,l=1}\sqrt{2}$ 'ye eşitken,  $l=2$  için  $\pi = P_{ort,l=2}\sqrt{6}$  'ya eşit olacaktır. İndirgenmiş döneme ( $\pi$ ) karşılık, bulunan dönem değerleri, radyal modların ( $n$ ) bir fonksiyonu olarak çizdirildiğinde indirgenmiş dönem diyagramları elde edilir.

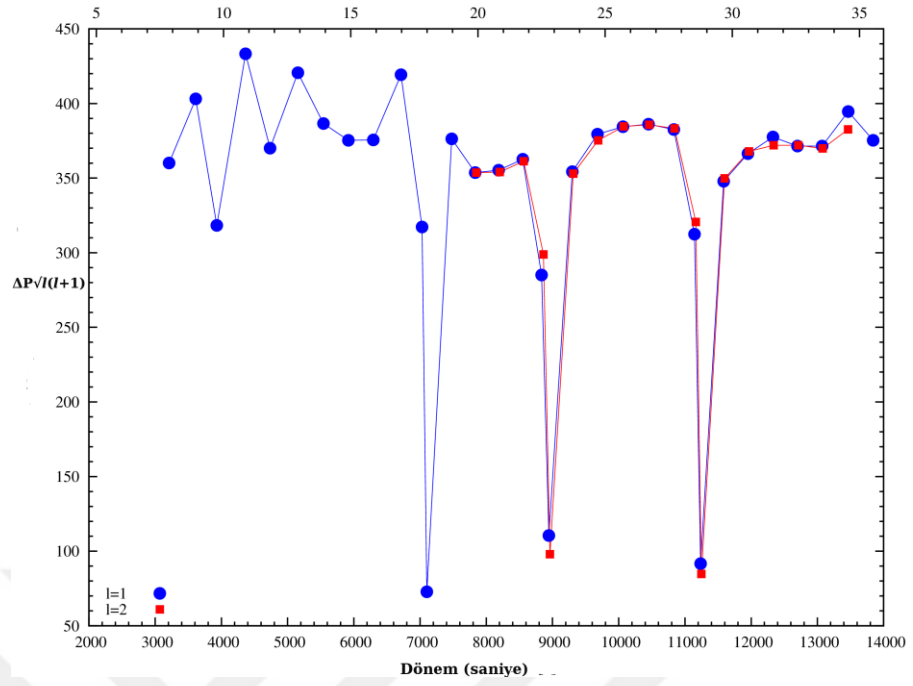
Yıldızın iç yapısının kimyasal olarak homojen dağıldığı bir model düşünüldüğünde, beklenen ( $\pi$ ) civarında düz bir yatay çizgidir. Fakat gözlemsel olarak elde edilmiş diyagramlarda, modlar  $\pi$  değerinin üzerinde ya da aşağısında sapmalar göstermektedir. Ayrıca, üç farklı bölgede keskin düşüşler görülmektedir. Bu bölgelere tuzaklanmış modlar (ing. trapped modes) denir. Tuzaklanmış modlar arasındaki ayrışma değerleri ( $\Delta\pi$ ) gözlemsel olarak ortaya konabilmektedir ve bu değerler teorik hesaplamalarla uyum göstermektedir. Ayrışma değerleri yıldız içindeki katman kalınlıklarının hesaplanması için kullanılabilir. Fakat bunu yapabilmek için daha detaylı modellerin ortaya konması gerekmektedir. Şu ana kadar detaylı bir model ortaya konulamamıştır.

Teorik olarak Charpinet vd. (2000) sdBV'ler için zonklama modlarının yayılamadığı iki geçiş bölgesinin varlığını ortaya koymuştur. Birinci bölge çekirdeğin hemen üzerinde CO/He geçiş bölgesi iken, diğeri yüzeye yakın He/H geçiş bölgesidir. Bu bölgeler zonklama modları için duvar oluşturmaktadır. Yayılan dalgalar bu bölgelere çarptığında ya birbirlerini yok etmektedir ya da birbirini güçlendirmektedir. Gözlemsel olarak bu etkiler indirgenmiş dönem diyagramlarında görülmektedir. Fakat gözlemsel olarak oluşturulan bu diyagramlar için henüz nicel hesaplamalar ortaya konamamıştır.



Şekil 3.9 KIC 10553698 yıldızı için elde edilmiş indirgenmiş dönem diyagramı (Óstensen vd. 2014)

Benzer diyagram KIC10001893 sdBV yıldızı için de oluşturulmuştur (Şekil 3.10). Radyal modda  $n=20$  ve 30 arası,  $l=1$  ve 2 sıralıları üst üste binmiştir. Bu mod tayinin bu bölge için doğru bir şekilde yapıldığının göstergesidir. Muhtemel üçüncü bir tuzaklanmış mod  $n=18$  civarında kendini göstermektedir. Fakat bu bölge sadece  $l=1$  modunu kapsadığı için güvenilirliği diğer iki tuzaklanmış modlara göre daha düşüktür. Fakat diğer yandan, tuzaklanmış modlar arası değerler  $\Delta\Pi=2000$  saniye civarındadır. Dolayısıyla, bu noktadan bakıldığında tuzaklanan modlar gözlemsel olarak ikna edici gözükmemektedir.



Şekil 3.10 KIC 10001893 yıldızı için elde edilmiş indirgenmiş dönem diyagramı

#### 4. TARTIŞMA ve SONUÇ

Kepler Uzay Teleskobu ile yapılan kesintisiz, uzun dönemli ve yüksek çözünürlüklü gözlemler sayesinde, B tayf türünden değişen (sdBV) yıldızlarının zonklama karakterine dair önemli bilgilere ulaşılmaktadır. Yerden yapılan gözlemlerle mukayese edildiğinde sdBV yıldızları daha açık olarak ortaya konmuş ve bu yıldızlar zonklama karakteristiklerine dayanarak alt gruplara ayrılabilmiştir. Uzun dönemli (V1093 Her türü) sdBV değişenlerinin genlik-frekans diyagramında 100'ün üzerinde zonklama frekansı, bu gözlemler sayesinde ortaya konulmaktadır. Bu sayede asterosismolojik yöntemler kullanılarak, g-modlarına dair mod çözümlemesi hassas bir şekilde ortaya konulabilmektedir. Aynı şekilde kısa zonklama dönemli sdBV (V361 Hya) yıldızlarının da mod tayinleri çok daha fazla zonklama frekansına dayanılarak yapılabilmektedir. Bu değişen türünün p-mod çözümlemeleri de ortaya konabilmektedir. Kepler'in sağladığı en önemli katkılardan bir diğeri ise melez (hibrid) zonklama karakterine sahip yıldızları da gözlenebilir hale getirmesidir. Hibrid sdB zonklayıcıları, yıldızın hem zarf hem de iç yapısına dair bilgilere ulaşılması açısından oldukça önemli nesnelere sahiptir. Bu yıldızların dönme dönemleri hem çekirdek hem de zarf için ayrı ayrı hesaplanabilmektedir. Ayrıca, p- ve g-modları hibrid yıldızlar için çözülebilmektedir.

KIC 10001893 yıldızı Kepler tarafından yaklaşık 3 sene boyunca gözlenmiştir. Bu gözlemler sayesinde yıldızın melez (hibrid) zonklama karakteri ortaya konmuştur. Bulunan 110 tane frekans için asterosismolojik yöntemler kullanılarak mod tayini gerçekleştirilebilmiştir. Dönemde ayrışma yöntemi kullanılarak 32 tane  $l=1$  modu belirlenirken, 18 tane  $l=2$  modu bulunmuştur. Yıldızın zonklama açısının çok düşük, kutup merkezli (ing. pole-on oriented) olması nedeniyle modların frekansta ayrışması yöntemi kullanılamamıştır. Bu yöntem ile bulunabilecek modlar ortaya konulamamıştır. Kepler'le gözlenmiş 19 sdBV yıldızından biri olan KIC 10001893 yıldızı, KIC 8302197 ile birlikte, bu anlamda ikinci bir örnek olmuştur. Toplamda bulunan 50 adet zonklama modu ile yıldızın genlik-frekans diyagramında saptanan frekansların %49'u için mod tayini yapılabilmektedir. Bu çözümlemeler sayesinde yıldızın iç yapısına dair önemli bulgular elde edilmiştir. Bu bulgulardan biri  $l=1$  ve  $l=2$  için ortaya konan eşel diyagramlarıdır. Bu sayede, toplam düğüm sayısının ( $l$ ), radyal modların ( $n$ ) bir

fonksiyonu olarak, dönemle değişimine bakılmıştır. Kepler ile gözlenen diğer yıldızların eşel diyagramı ile karşılaştırıldığında, çengel yapının (ing. hook feature) yaygın bir davranış olarak görüldüğü anlaşılmıştır (Baran ve Winans 2012, Óstensen vd. 2014, Foster vd. 2015, Baran vd. 2017, Uzundağ vd. 2017). Bu noktada yıldıza dair geliştirilecek olan modellerin, bu davranışın fiziksel açıklamasının yapılmasında oldukça önemli olacağı vurgulanmıştır.

Genlik-dönem diyagramlarında algılanamayan sinyallerin olduğu anlaşılmıştır ve bunun nedenleri üzerinde durulmuştur. Azimut derecesinin ( $m$ ) algılanamıyor olmasının sebebi, yıldızın bakış doğrultusuna göre yaptığı açı olarak gözükmektedir. Fakat beklenen bazı toplam düğüm sayılarının ( $l$ ), asimtotik sıra içerisinde kayıp olduğu görülmüştür. Ayrıca, modlar arasındaki dönemde ayrışma değerlerinin hemen hepsinin kaydığı ve birkaç tanesinin de tuzaklandığı anlaşılmıştır. Modlar arasındaki bu kaymalar eşel diyagramlarında da gösterilmiştir. Tuzaklanan modlar ise indirgenmiş dönem diyagramında (ing. reduced period diagram) ortaya konulmuştur. Tuzaklanan modların yıldız içerisindeki geçiş bölgelerine karşılık geldiği düşünülmektedir (Uzundağ vd. 2017). Tuzaklanan modlar arasındaki ayrışma değerleri, bu katmanların kalınlığı hakkında bilgi vermektedir (Charpinet vd. 2000, Charpinet vd. 2014). Tuzaklanan modlar arasındaki ayrışma değerleri gözlemsel açıdan ortaya konabilmiştir. Fakat model kurulmadığından ötürü yıldızın hidrojen katman kalınlığı hesaplanmamıştır. Bu noktada tuzaklanan modların bulunması kurulacak olan modellerin daha net bir şekilde ortaya konması açısından önem ihtiva etmektedir. KIC 10001893 sdBV değişeni için kurulacak modellerin, bu tip diyagramlarla karşılaştırılarak temel parametrelerinin ortaya konması oldukça önemlidir. Bu sayede kurulacak modellerle, yıldızın çekirdek ve zarf kütleleri asterosismolojik yöntemler kullanılarak ayrı ayrı ortaya koyulmaya çalışılacaktır. Ayrıca, konvektif katmanın bulunan modları nasıl etkilediği önümüzdeki yıllarda bu çalışmaların ışığında gerçekleştirilmeye çalışılacaktır. Asterosismolojik yöntemlerle bulunan diğer bir parametre ise yıldızın yaşdır. sdBV türü değişenler için bu parametreyi ortaya koymak oldukça problemlidir (Schindler vd. 2016). Konvektif hareket bu parametrenin belirlenmesinde zorluk çıkarmaktadır. Gözlemsel olarak ortaya konan diyagramların, teorik çalışmalara bu noktada yardım etmesi hedeflenmiştir.

## KAYNAKLAR

- Aerts, C., Christensen-Dalsgaard, J., Kurtz W., 2010, Springer, Asteroseismology
- Baran, A., Pigulski, A., Koziel, D., 2005, MNRAS, 360, 737
- Baran, A. S. 2012, Acta Astron., 62, 179
- Baran, A. S. 2013, Acta Astron., 63, 203
- Baran, A. S., Kawaler, S. D., Reed, M. D., 2011, MNRAS, 414, 2871
- Baran, A. S., Koen, C. and Pokrzywka, B. 2015a, MNRAS, 448, L16
- Baran, A. S., Reed, M. D., Østensen, R. H., Telting, J. H., and Jeffery, C. S. 2017, A&A, 597, A95
- Baran, A. S., Telting, J. H., Nemeth, P., Bachulski, S., and Krzesinski, J. 2015b, A&A, 573, A52
- Baran, A. S. and Winans, A. 2012, Acta Astron., 62, 343
- Borucki, W. J., Koch, D., Basri, G. 2010, Science, 327, 977
- Charpinet, S., Brassard, P., Van Grootel, V. and Fontaine, G. 2014, in Astronomical Society of the Pacific Conference Series, Vol. 481, 6th Meeting on Hot Subdwarf Stars and Related Objects, ed. V. van Grootel, E. Green, G. Fontaine and S. Charpinet, 179
- Charpinet, S., Fontaine, G., Brassard, P. 2007, Communications in Asteroseismology, 150, 241
- Charpinet, S., Fontaine, G., Brassard, P. 1997, ApJ, 483, L123
- Charpinet, S., Fontaine, G., Brassard, P. and Dorman, B. 1996, ApJ, 471, L103
- Charpinet, S., Fontaine, G., Brassard, P. and Dorman, B. 2000, ApJS, 131, 223
- Charpinet, S., Van Grootel, V., Fontaine, G. 2011, A&A, 530, A3
- Christensen-Dalsgaard, J., Arentoft, T., Brown, T. M. 2007, Communications in Asteroseismology, 150, 350



- Copperwheat, C. M., Morales-Rueda, L., Marsh, T. R., Maxted, P. F. L. and Heber, U. 2011, MNRAS, 415, 1381
- Downes, R. A. 1986, ApJS, 61, 569
- Feige, J. 1958, ApJ, 128, 267
- Fontaine, G., Brassard, P., Charpinet, S. 2003, ApJ, 597, 518
- Foster, H. M., Reed, M. D., Telting, J. H., Østensen, R. H. and Baran, A. S. 2015, ApJ, 805, 94
- Geier, S., Hirsch, H., Tillich, A. 2011, A&A, 530, A28 Geier, S., Østensen, R. H., Nemeth, P. 2017, A&A, 600, A50
- Green, E. M., Fontaine, G., Reed, M. D. 2003, ApJ, 583, L31 Green, R. F., Schmidt, M. and Liebert, J. 1986, ApJS, 61, 305
- Hagen, H.-J., Groote, D., Engels, D., and Reimers, D. 1995, A&AS, 111, 195
- Han, Z., Podsiadlowski, P., Maxted, P. F. L. and Marsh, T. R. 2003, MNRAS, 341, 669
- Han, Z., Podsiadlowski, P., Maxted, P. F. L., Marsh, T. R. and Ivanova, N. 2002, MNRAS, 336, 449
- Heber, U. 2016, PASP, 128, 082001
- Humason, M. L. and Zwicky, F. 1947, ApJ105,85
- Kilkenny, D. 1978, The Observatory, 98, 207
- Kilkenny, D., Koen, C., O'Donoghue, D. and Stobie, R. S. 1997, MNRAS, 285, 640
- Koch, D. G., Borucki, W. J., Basri, G., et al. 2010, ApJ, 713, L79
- Koen, C., O'Donoghue, D., Pollacco, D. L. and Charpinet, S. 1999, MNRAS, 305, 28
- Koen, C., Orosz, J. A. and Wade, R. A. 1998, MNRAS, 300, 695
- Luyten, W. J. 1953, AJ, 58, 75
- Maxted, P. F. L., Heber, U., Marsh, T. R., and North, R. C. 2001, MNRAS, 326, 1391

- Menzies, J. W. and Marang, F. 1986, in IAU Symposium, Vol. 118, Instrumentation and Research Programmes for Small Telescopes, ed. J. B. Hearnshaw & P. L. Cottrell, 305
- Mickaelian, A. M., Nesci, R., Rossi, C. 2007, A&A, 464, 1177 Østensen, R. H. 2010, Astronomische Nachrichten, 331, 1026 Østensen, R. H., Oreiro, R., Solheim, J.-E. 2010, A&A, 513, A6
- Østensen, R. H., Silvotti, R., Charpinet, S. 2011, MNRAS, 414, 2860
- Østensen, R. H., Telting, J. H., Reed, M. D. 2014, A&A, 569, A15
- Østensen, R. H. and Van Winckel, H. 2012, in Astronomical Society of the Pacific Conference Series, Vol. 452, Fifth Meeting on Hot Subdwarf Stars and Related Objects, ed. D. Kilkenny, C. S. Jeffery, and C. Koen, 163
- Reed, M. D. 2016, IAU Focus Meeting, 29, 589
- Reed, M. D., Baran, A., Quint, A. C. 2011, MNRAS, 414, 2885
- Reed, M. D., Baran, A. S., Quint, A. C. 2012, in Astronomical Society of the Pacific Conference Series, Vol. 452, Fifth Meeting on Hot Subdwarf Stars and Related Objects, ed. D. Kilkenny, C. S. Jeffery and C. Koen, 185
- Reed, M. D. and Stiening, R. 2004, PASP, 116, 506
- Schindler, J.-T., Green, E. M. and Arnett, W. D. 2017, in European Physical Journal Web of Conferences, Vol. 160, European Physical Journal Web of Conferences, 04001
- Schuh, S. 2010, Astronomische Nachrichten, 331, 489
- Schuh, S., Huber, J., Dreizler, S. 2006, A&A, 445, L31
- Stéfan van der Walt, S. Chris Colbert and Gael Varoquaux. The NumPy Array: A Structure for Efficient Numerical Computation, Computing in Science & Engineering, 13, 22-30 (2011)
- Silvotti, R., Charpinet, S., Green, E.. 2014, A&A, 570, A130
- Stobie, R. S., Kilkenny, D., O'Donoghue, D. 1997, MNRAS, 287, 848
- Telting, J. H., Østensen, R. H. and Baran, A. S. 2012, A&A, 544, A1
- Unno, W., Osaki, Y., Ando, H., and Shibahashi, H. 1979, Nonradial oscillations of stars

Uzundag, M., Baran, A. S., Østensen, R. H., Reed, M., Telting, J. and Quick, B. 2017, MNRAS, 472, 700

Uzundag, M., Fen Bilimler Enstitüsü, Yüksek Lisans Semineri, 2017

Van Grootel, V., Charpinet, S., Brassard, P., Fontaine, G. and Green, E. M. 2013, A&A, 553, A97

Winn, J. N. 2010, ArXiv e-prints [[arXiv]1001.2010]

Wisotzki, L., Koehler, T., Grootte, D. and Reimers, D. 1996, A&AS, 115,227

Zhang, X. and Jeffery, C. S. 2012, MNRAS,



## ÖZGEÇMİŞ

### Kişisel Bilgileri

**Ad Soyadı** : Murat UZUNDAĞ  
**Doğum Yeri** : Sivas  
**Doğum Tarihi** : 13. 02. 1990  
**Yabancı Dili** : İngilizce

### Eğitim Bilgileri

**Lise** : Ankara Lisesi  
**Lisans** : A.Ü. Fen Fakültesi Astronomi ve Uzay Bilimleri (2009-2015)  
**Yüksek Lisans** : A.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Astronomi ve Uzay Bilimleri (2015-2017)  
Jagiellonian University Faculty of Physics, Astronomy and Applied Computer Science (2016/2017)

### Hakemli Dergi

**Uzundag, M.**, Baran, A. S., Østensen, R. H., et al. 2017, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 472, 700

### Bildiriler

**Uzundag, M.**, Baran, A. S., Østensen, R. H., Reed M., Telting J., Quick B., 2017, "Detection of three trapped modes in a pulsating subdwarf B star KIC 10001893", 8th Meeting of Hot Subdwarfs and Related Objects