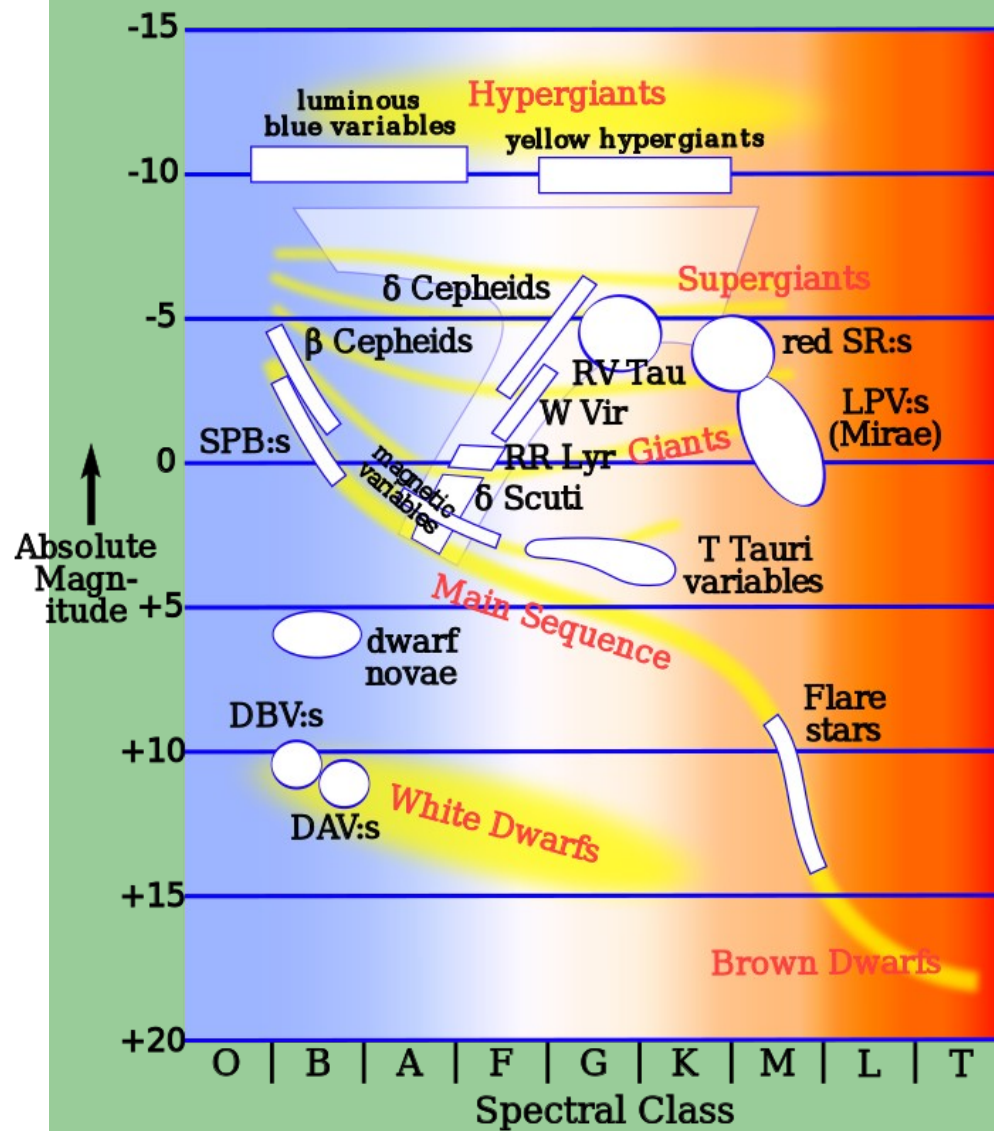
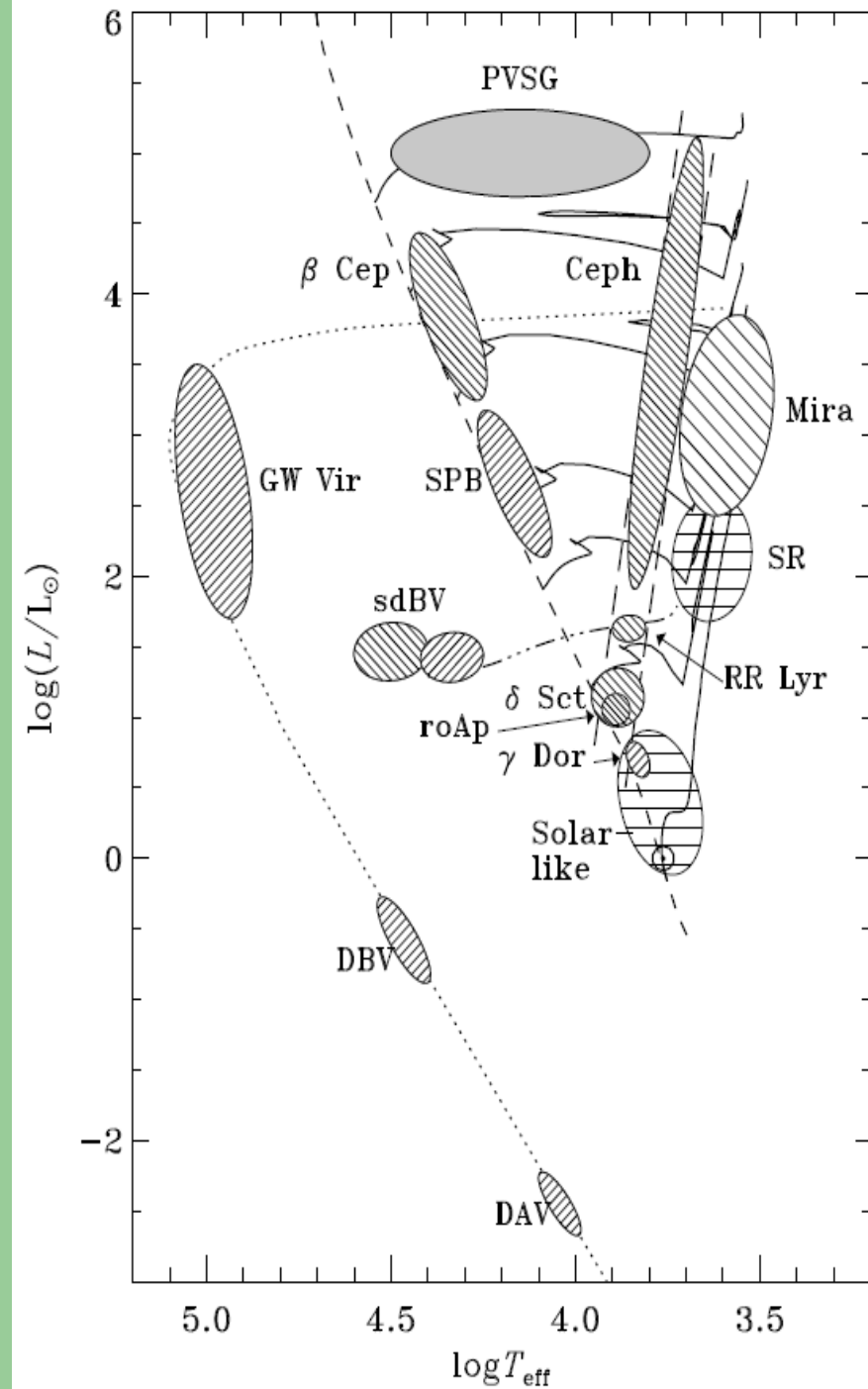


801.526 Asterosismoloji

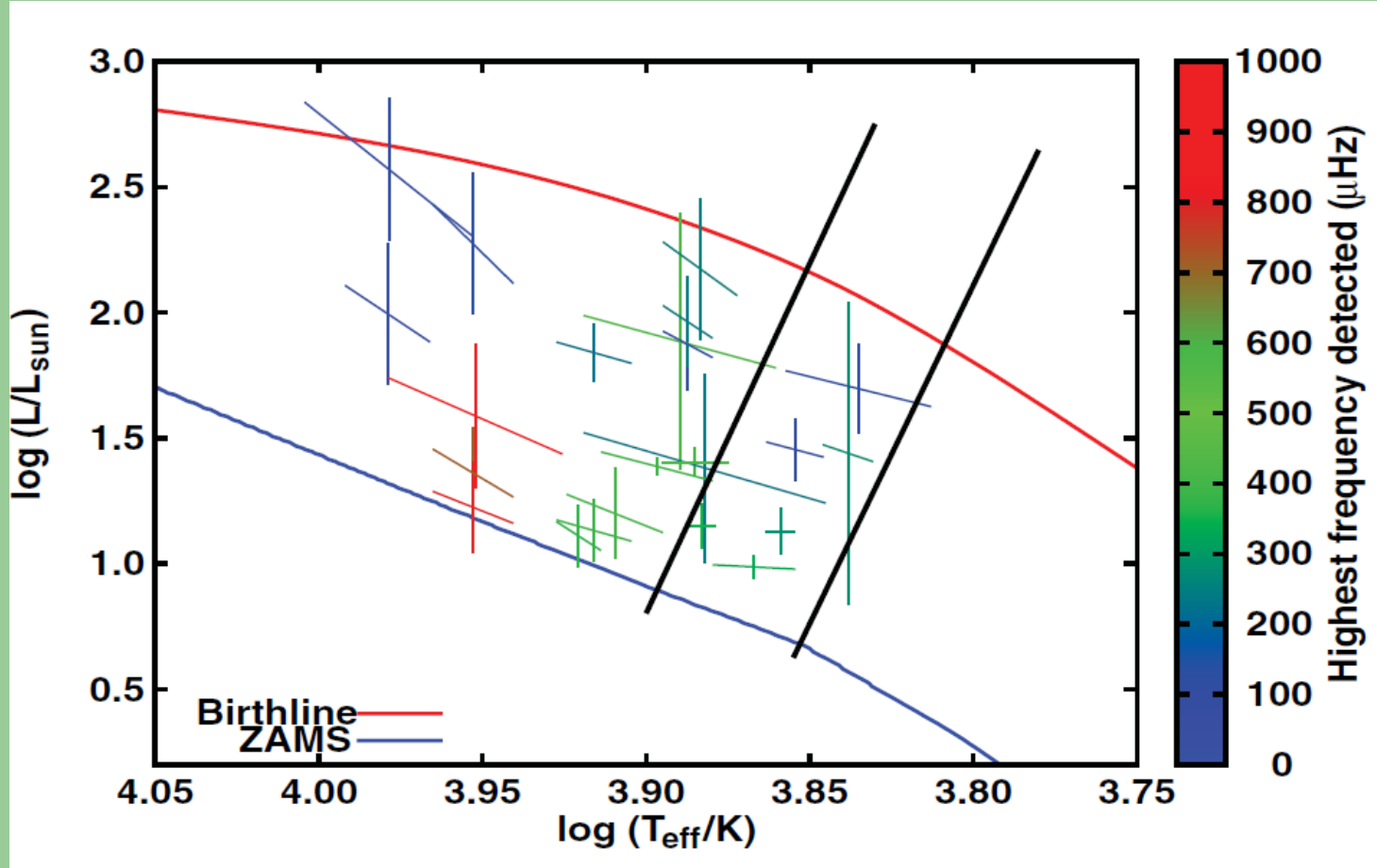
Ders 2a :
HR Diyagramı Üzerinde Zonklayan
Yıldızlar



Anakol Öncesi Yıldızlarda Zonklamalar (ing. Pulsating Pre-Main-Sequence Stars, PMS)

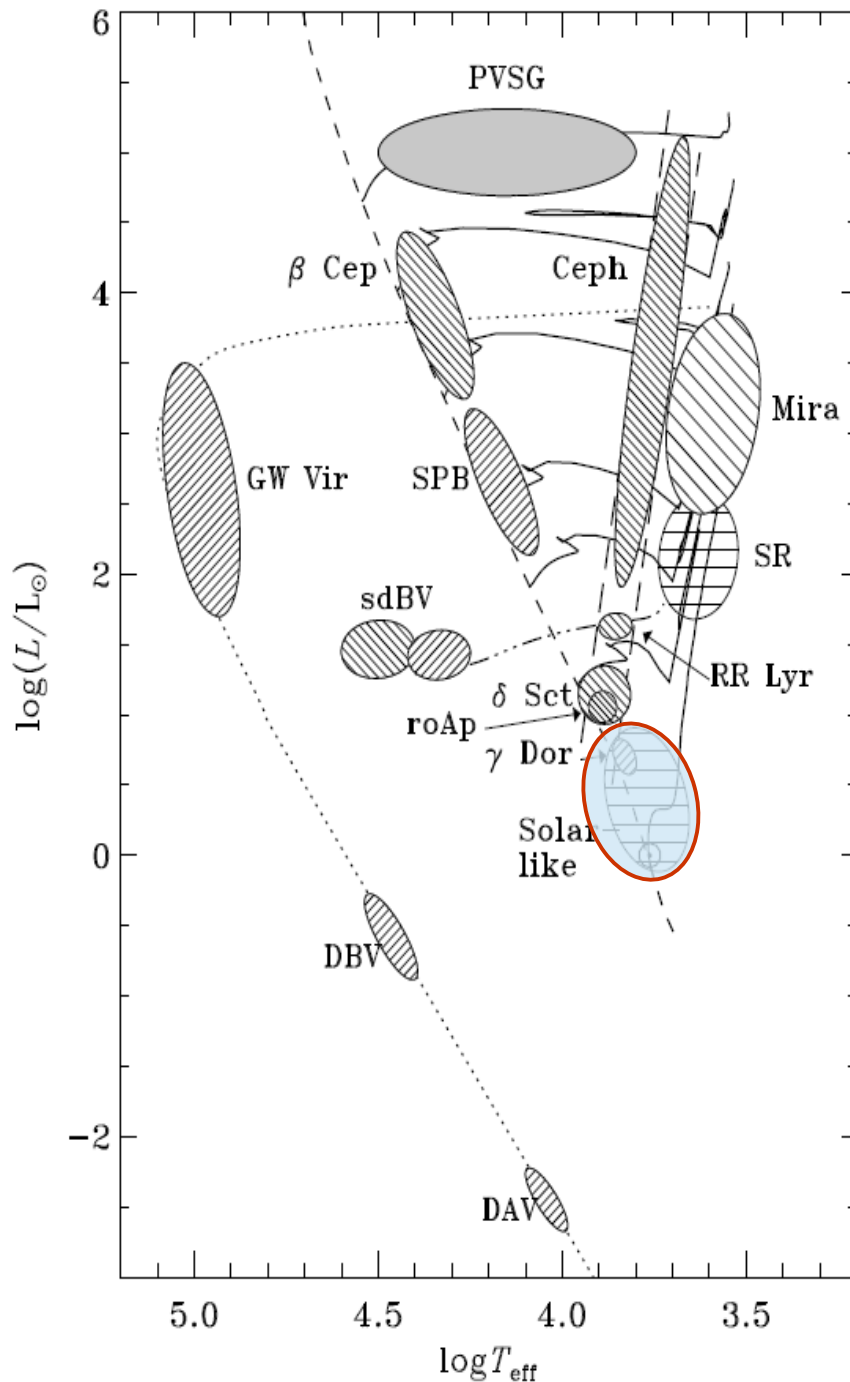
- ✓ Yeni doğan yıldızlar kütlelerine bağlı olarak **radyatif** (Herbig Ae/Be) ya da **konvektif** (T Tauri yıldızları) olarak büzülerek anakola doğru gelirken belirli bir kütle aralığında ($1.5 - 5 M_{\text{güneş}}$) olanlar kararsızlık kuşağının içinden geçerler.
- ✓ Bu sırada aktivite ve çevresel maddeyle etkileşimin yanı sıra zonklamalar nedeniyle de değişim gösterirler.
- ✓ **Dönemi 1.5 saat ile 7.5 saat** arasında değişen ve genelde temel modda salınımlar olarak gözlenen bu salınımların büyük bir bölümü δ Sct türü (%80) p-modu salınımlarıdır. Ayrıca γ Dor tipi g-modu salınımlar, δ Sct / γ Dor melezleri, hatta B-tayf türünden zonklayanlara dahi rastlanır (Casey vd. 2013).
- ✓ Hem radyal hem de radyal olmayan modlarda 18 dk – 5 saat arası dönemler ($5 - 80 \text{ gün}^{-1}$ frekansta) ile düzenli / düzensiz salınımlar gösterirler.
- ✓ Bu yıldızlardaki çevresel materyal: 1) Balmer serisi çizgilerde emisyon gözlenmesine 2) Spektral enerji dağılımında (SED) kızılötesi artığa 3) Periyodik olmayan disk-yıldız tutulmalarına yol açar (UX Ori türü değişenler).
- ✓ Ayrıca manyetik aktivite kaynaklı parlaklık, soğurma çizgileri üzerine binmiş salma yapıları, çizgi profili ve dikine hız değişimleri de gözlenir.
- ✓ Tüm bu değişimler (çevresel maddeyle etkileşim, manyetik etkinlik ve zonklama) gözlemlendiği çizgiler, neden oldukları salma ve profil asimetrisi özellikleri ile bu özelliklerin yanı sıra parlaklık değişimlerinin dönem ve genlikleri ile birbirlerinden ayrılabilir. Ayrıca ek (yüzey sıcaklık, renk değişimi gibi) gözlemsel bilgilerden de değişim kaynaklarının ayrıştırılmasında faydalanılır.

Anakol Öncesi Yıldızlarda Zonklamalar (ing. Pulsating Pre-Main-Sequence Stars, PMS)

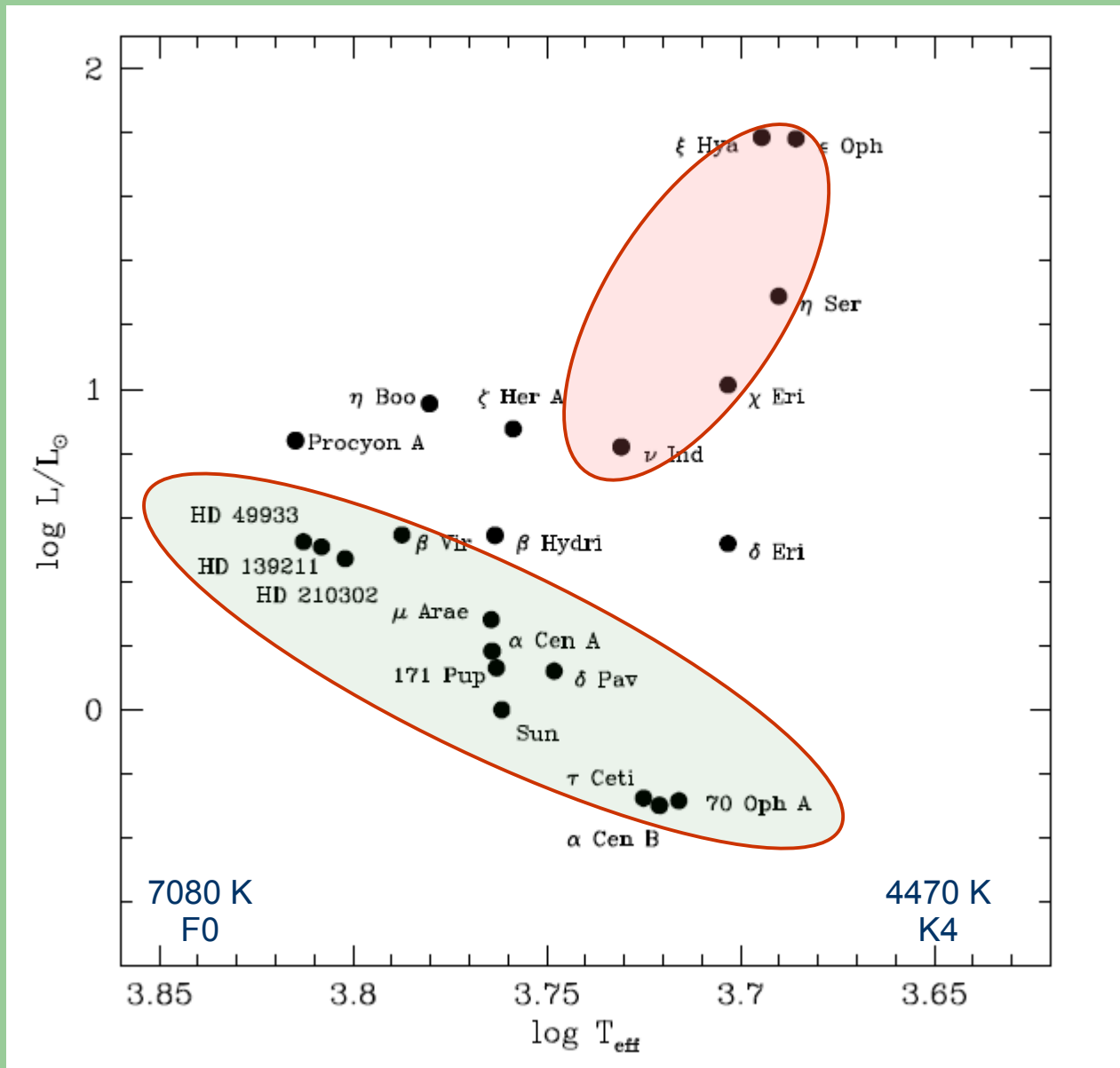


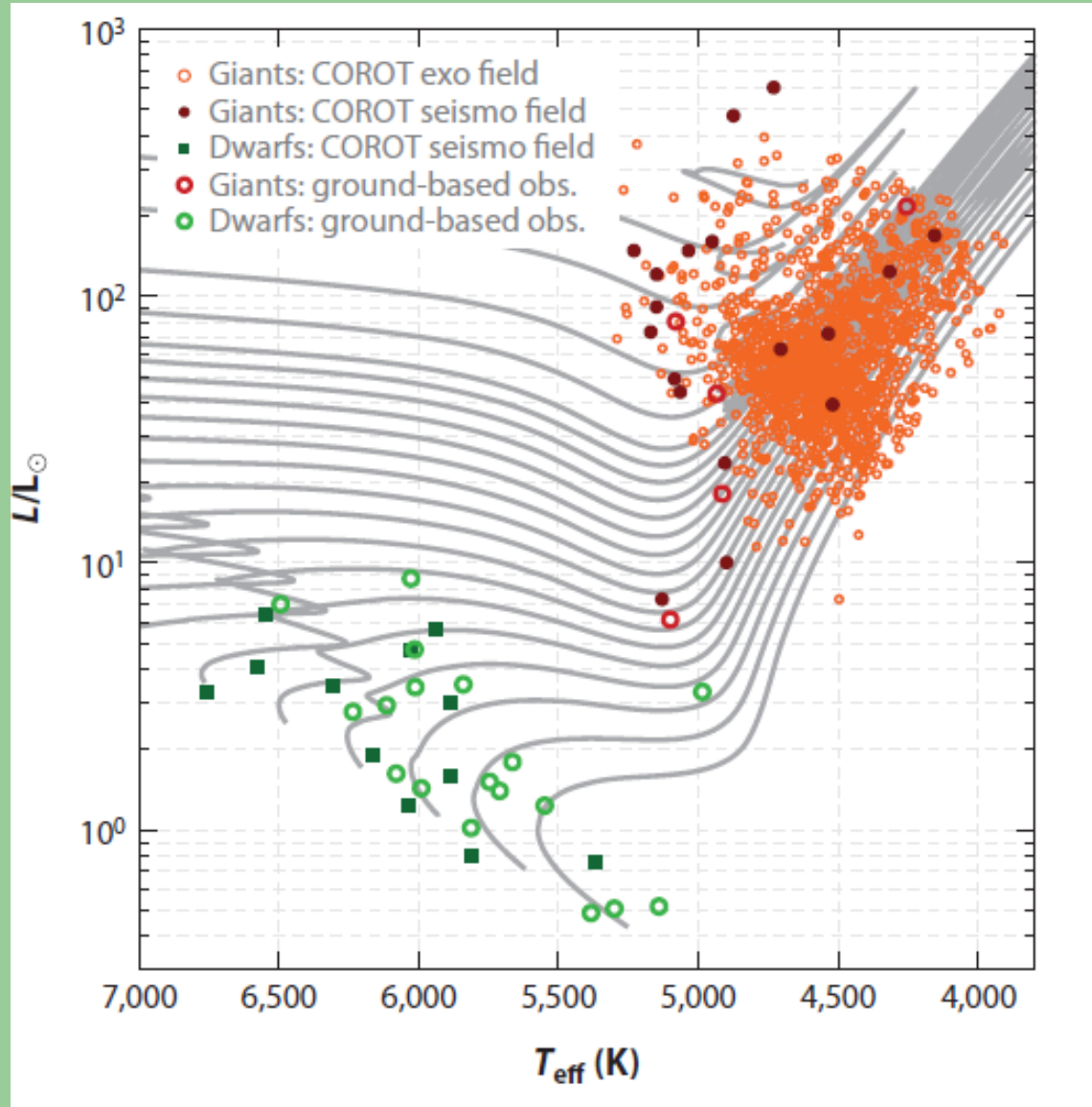
Anakol öncesi zonklamalar gösteren yıldızlar. Mavi ve Kırmızı eğriler sırasıyla ZAMS ve anakola girişi, siyah doğrular δ Sct kararsızlık kuşağını, yanda verilen renk skalası gözlenen zonklamaların frekansını göstermektedir (Casey vd. 2013).

Güneş-Benzeri Yıldızlarda Güneş-Benzeri Salınımlar

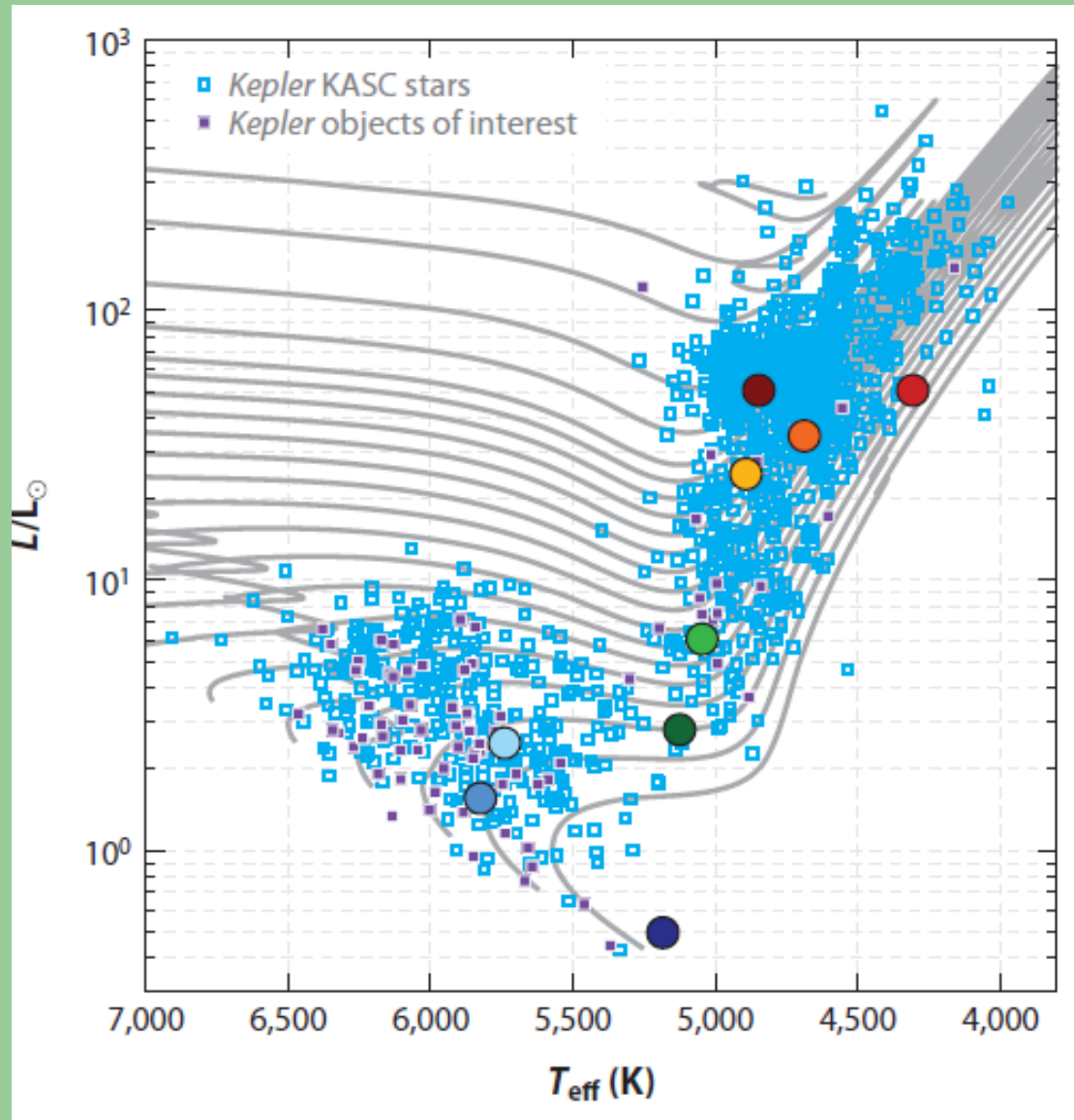


- ✓ **Salınım Dönemi (Period):** 3 – 15 dakika
- ✓ **Salınım Frekansı (Frequency):** 1 – 5 mHz
- ✓ **Fotometrik Genlik (Amplitude):** 1* ppm–8 ppm
- ✓ **Dikine Hız Genliği (RV Amp):** 1 cms^{-1} – 4 cms^{-1}
($\text{RV} \approx (L / M)^{0.8}$ (Samadi et al. 2005))
- ✓ **Salınım Kaynağı (Driver):** Yüzeye yakın konvektif hareketler (turbulent convective motions near the surface)
- ✓ **Kütle Aralığı:** $0.08 M_{\odot}^* - 1.6 M_{\odot}$ (Anakol), Kırmızı Devler
- ✓ Güneş'ten başka bir yıldızda ilk Güneş-benzeri salınımların tespiti α Cmi (Procyon, F5 IV) (Brown et al. 1991)
- ✓ Zonklama modlarının çözülebildiği ilk yıldız ise η Boo (G5 IV) (Kjeldsen et al. 1995, Kjeldsen et al. 2003, Carrier et al. 2005)
- ✓ Diğer öncü örnekler β Hyi (G2IV, Bedding et al. 2001), α Cen A (G2V*, Bouchy & Carrier 2001)

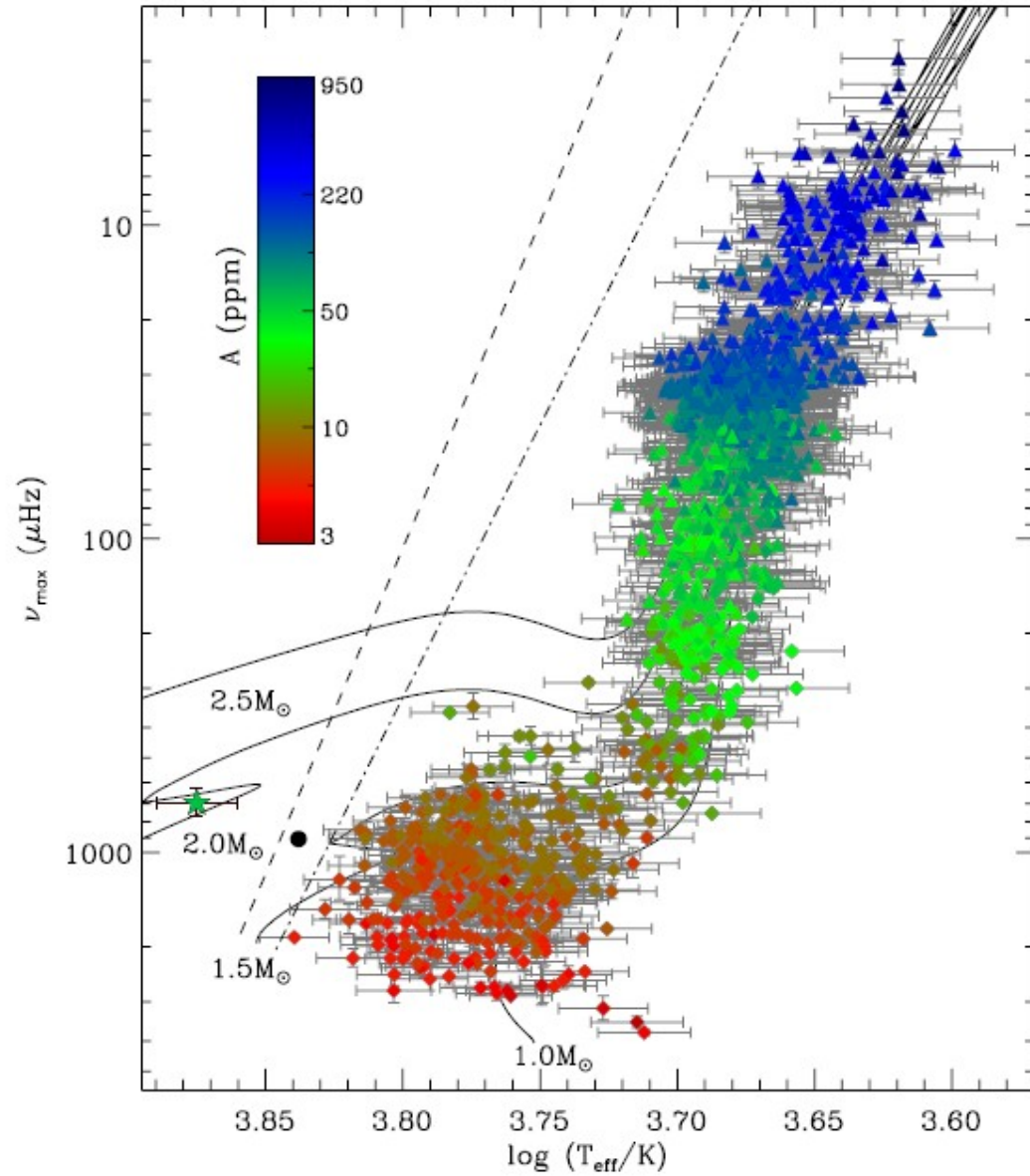




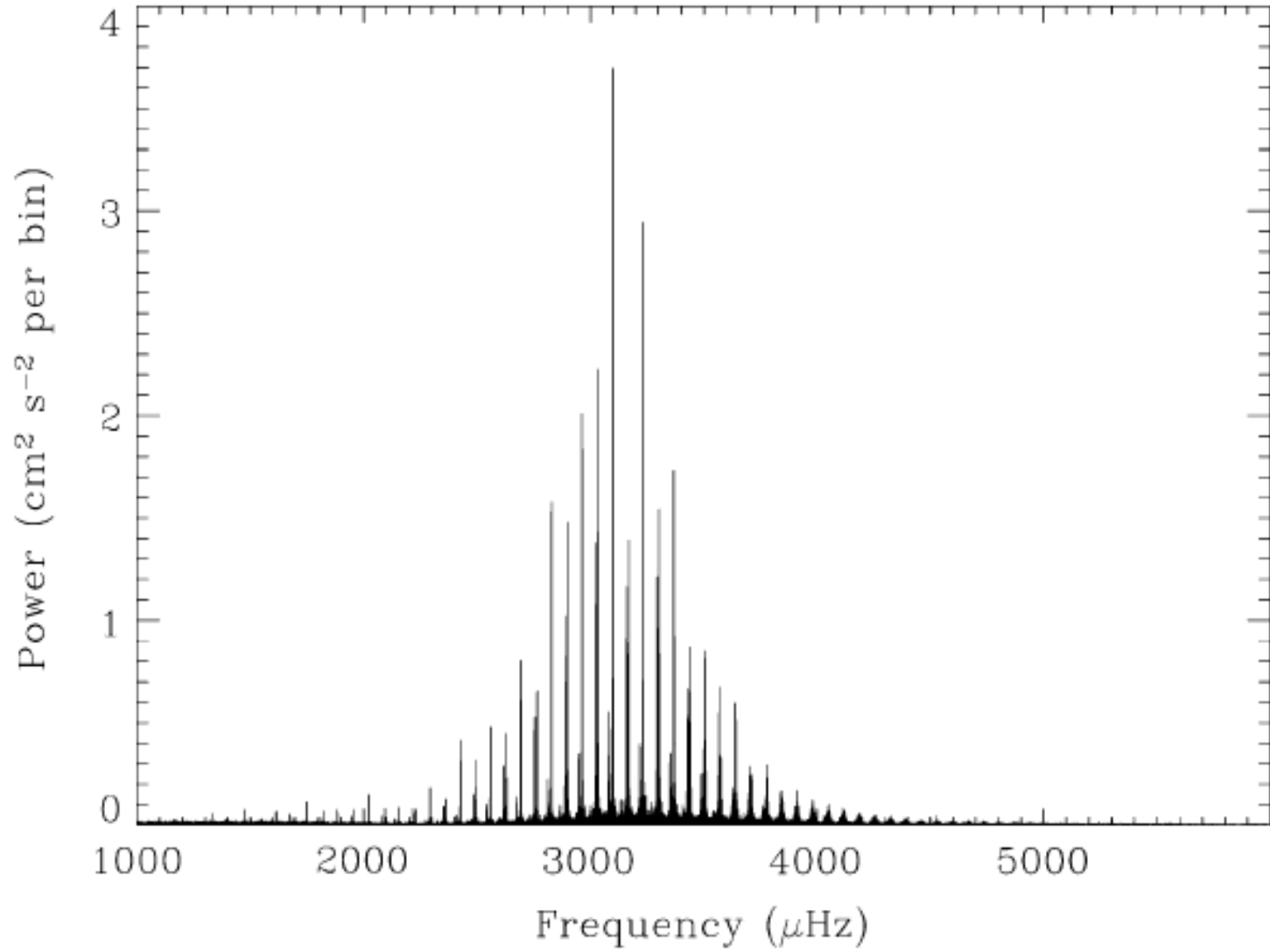
Yerden Gözlemler ve CoRoT Gözlemleriyle Güneş-Benzeri Salınımlar Gösterdiği Belirlenen Yıldızlar Chaplin & Miglio (2013),



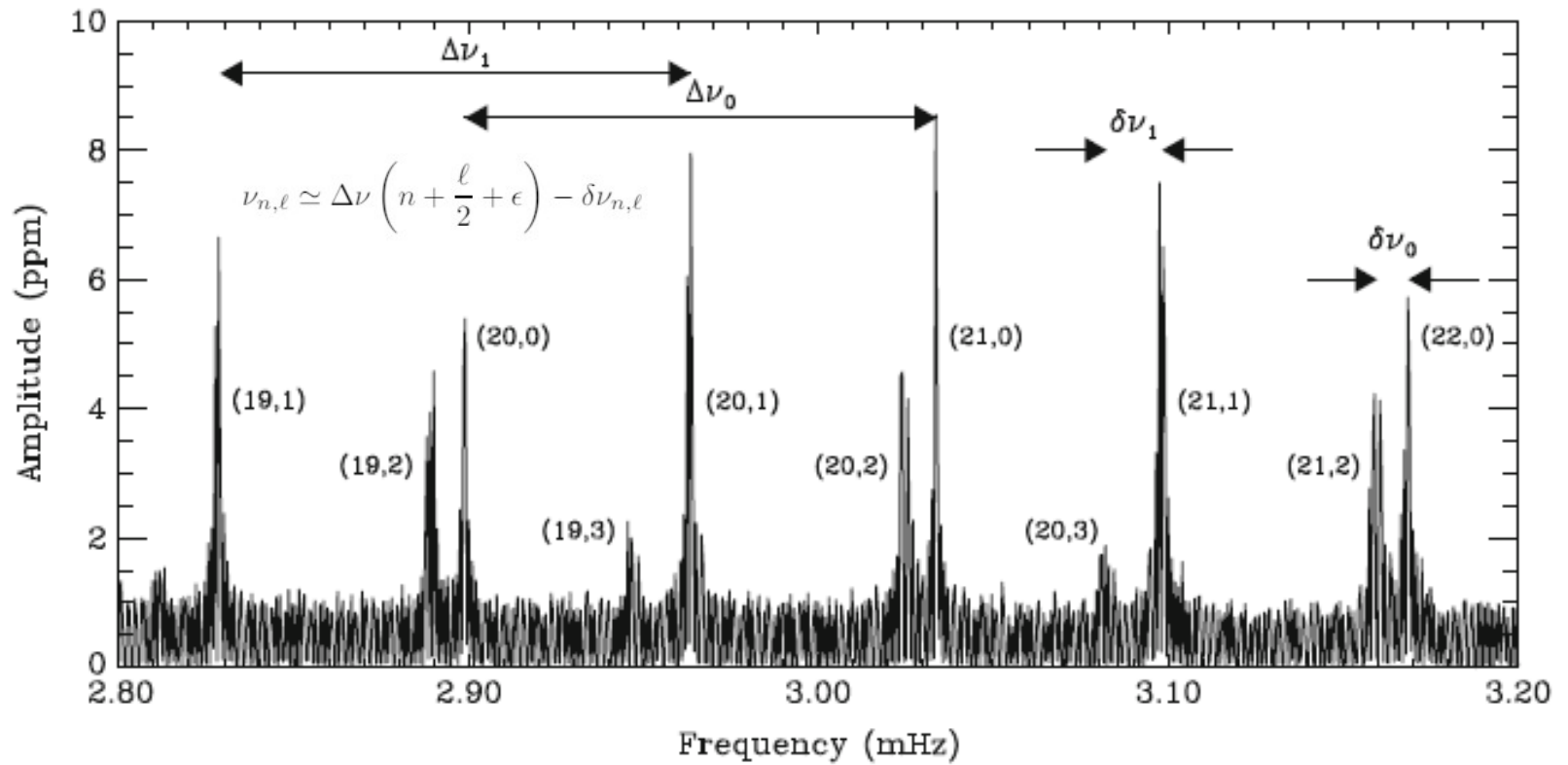
Yerden Gözlemler ve Kepler Gözlemleriyle Güneş-Benzeri Salınımlar Gösterdiği Belirlenen Yıldızlar Chaplin & Miglio (2013),



Kepler Gözlemleriyle Güneş-Benzeri Salınımların Çalışıldığı Yıldızlar.
Renk ölçeği değişim genliğini artan (kırmızıdan maviye) sırada
göstermektedir. Huber vd. (2011),



Güneş'in Birmingham Solar Oscillation Network (BiSON) Güneş teleskoplarıyla elde edilen Güç Spektrumu (© BiSON Team).



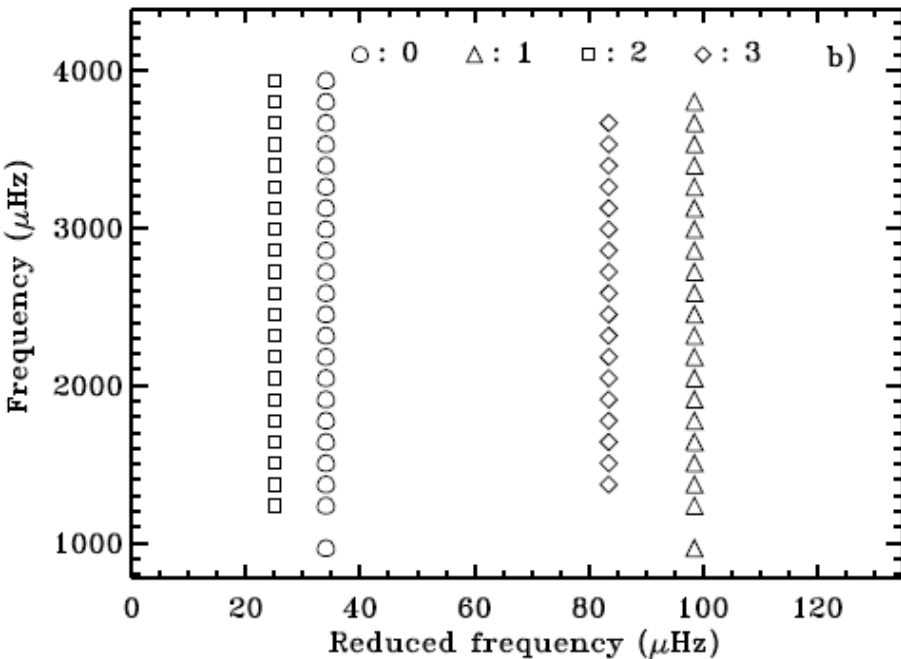
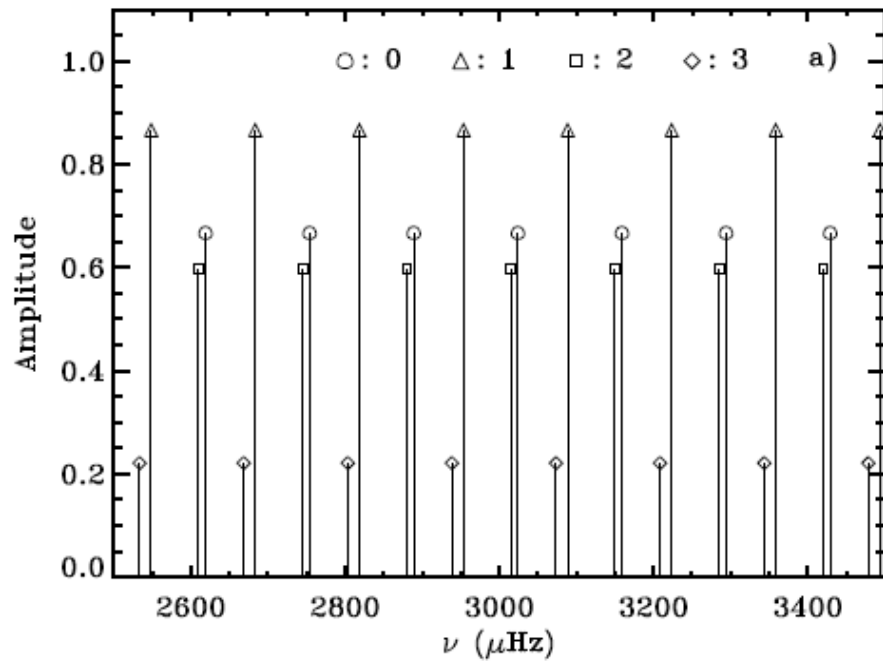
Güneş'in SOHO üzerindeki GOLF cihazıyla elde edilen Güç Spektrumu (© Golf Science Team).

Frekans Ayırması: Farklı üst tonlardan (radyal düğümlerin sayısı, n) iki salınım modu arasındaki frekans farkını tanımlamak için kullanılır.

Büyük Ayırma (Large Separation, $\Delta\nu$): Aralarında bir üst ton ($n-1, n$) fark bulunan (birbirini takip eden) aynı dereceden (l) iki farklı salınım modu arasındaki frekans farkıdır (Güneş için 135 μHz).

Küçük Ayırma (Small Separation, $\delta\nu$): Aralarında bir üst ton ($n-1, n$) ve iki derece ($l-2, l$) fark olan iki farklı salınım modu arasındaki frekans farkıdır (Güneş için 9 μHz).

Ayrışmalar arasındaki ilişki modun radyal üst tonunu, l modun derecesini, $\Delta\nu$ büyük, $\delta\nu$ küçük ayrışmayı göstermek üzere (ϵ evre terimidir) asimptotiktir. ($\nu_{n,l} = \Delta\nu (n + l/2 + \epsilon - \delta\nu_{n,l})$)



Ech lle diyagramları

Frekans spektrumunun

$$\Delta v_0 = \langle v_{nl} - v_{n-1l} \rangle_{nl}$$

 eklinde tanımlanan ortalama büyük ayrışma genişliğinde segmentlere ayrılıp  st te yapıştırılmasıyla oluşturulur.

Öncelikle frekans eksenini için uygun bir referans frekans seçilir (v_0). Daha sonra her bir v_{nl} frekansı Δv_0 ortalama büyük ayrışmasının cinsinden ifade edilir.

$$v_{nl} = v_0 + k\Delta v_0 + \check{u}_{nl}$$

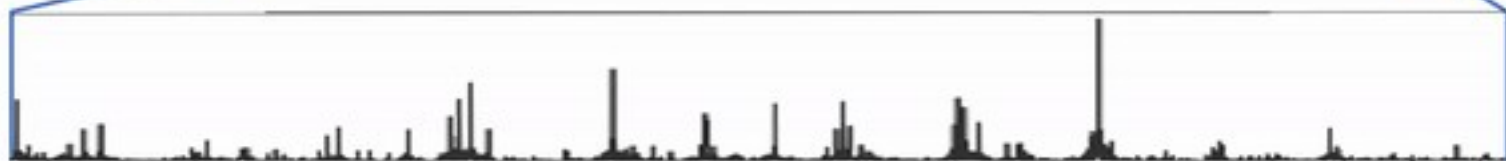
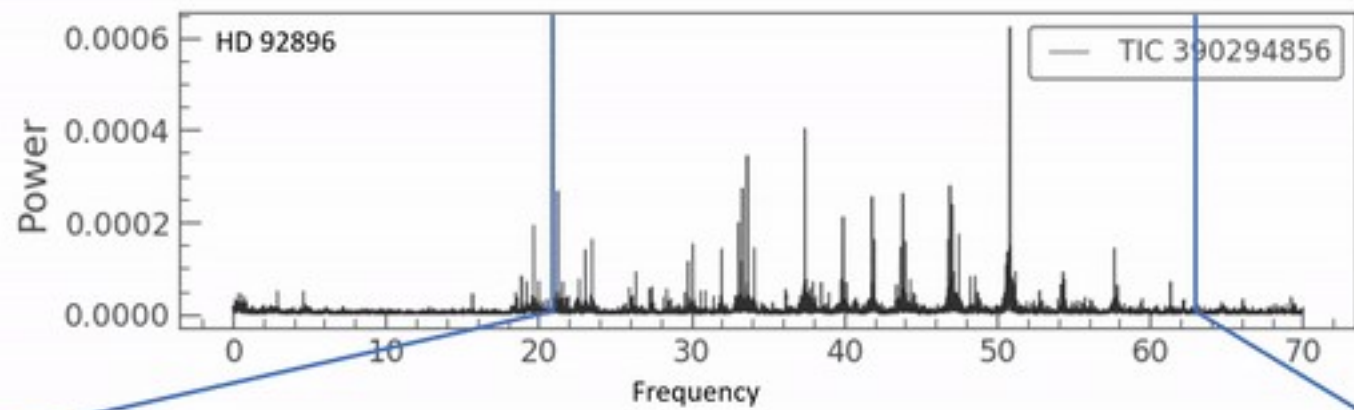
Daha sonra $\check{u}_{nl}$ (0 ile Δv_0 arasında değişir) x-eksenine, $v_0 + k\Delta v_0$ ise y-eksenine alınır. Δv_0 frekans  l eėi (frequency modulo) olarak adlandırılır ve diyagramla birlikte verilir. Her bir derece (l) için bir simge kullanılır ve her bir frekansın genliğini göstermek üzere onun genliğiyle orantılı büyüklükte o dereceye ait bir sembol kullanılır.

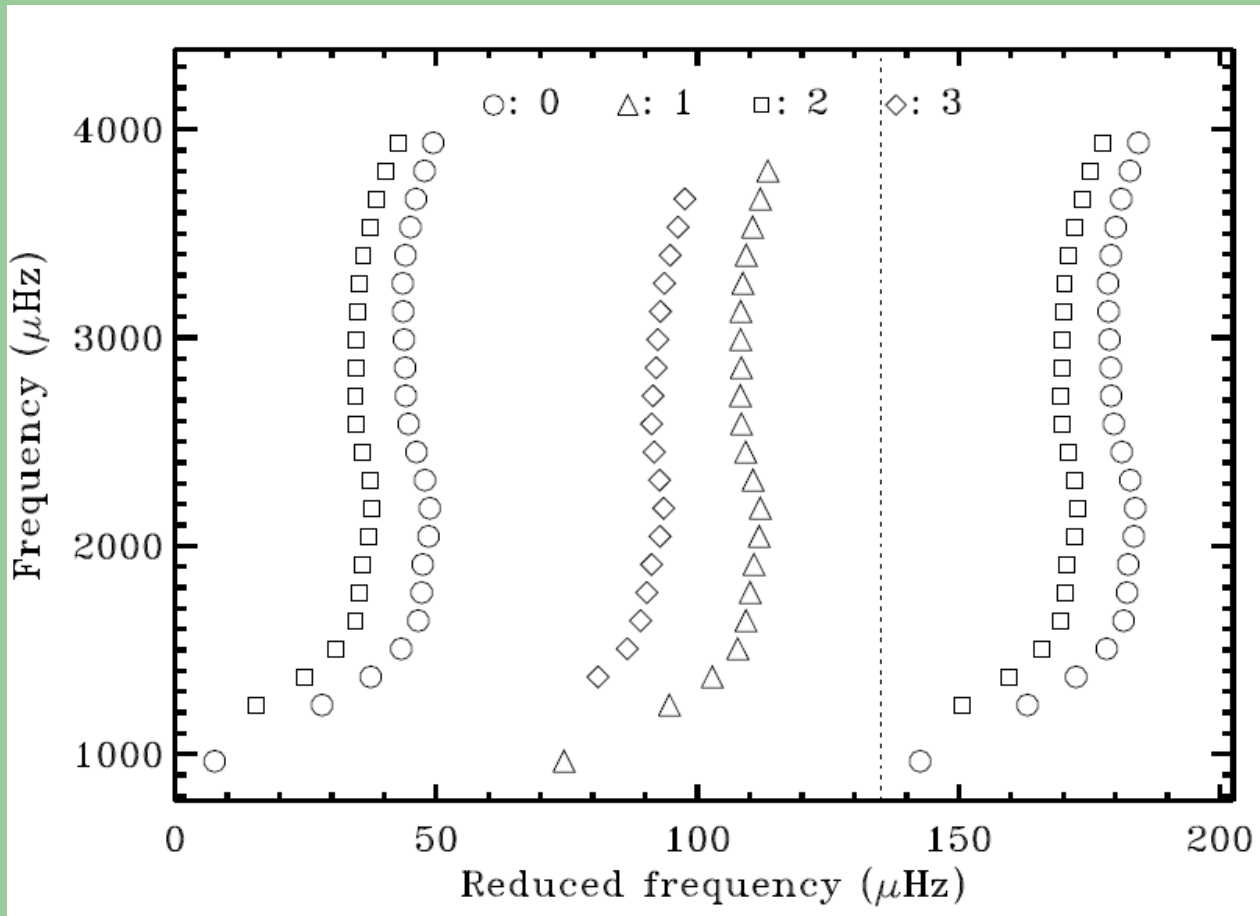
Yandaki ech lle diyagramında $v_0 = 830 \mu\text{Hz}$, $\Delta v_0 = 135 \mu\text{Hz}$ (sayı bir yerden tanıdık geldi mi?)'dir. Simgeler farklı dereceleri (l) göstermektedir.

Eėer asimptotik ilişki zonklayan bir yıldız için tam olarak doğru olsa, bu diyagram yanda olduğu gibi aralarında

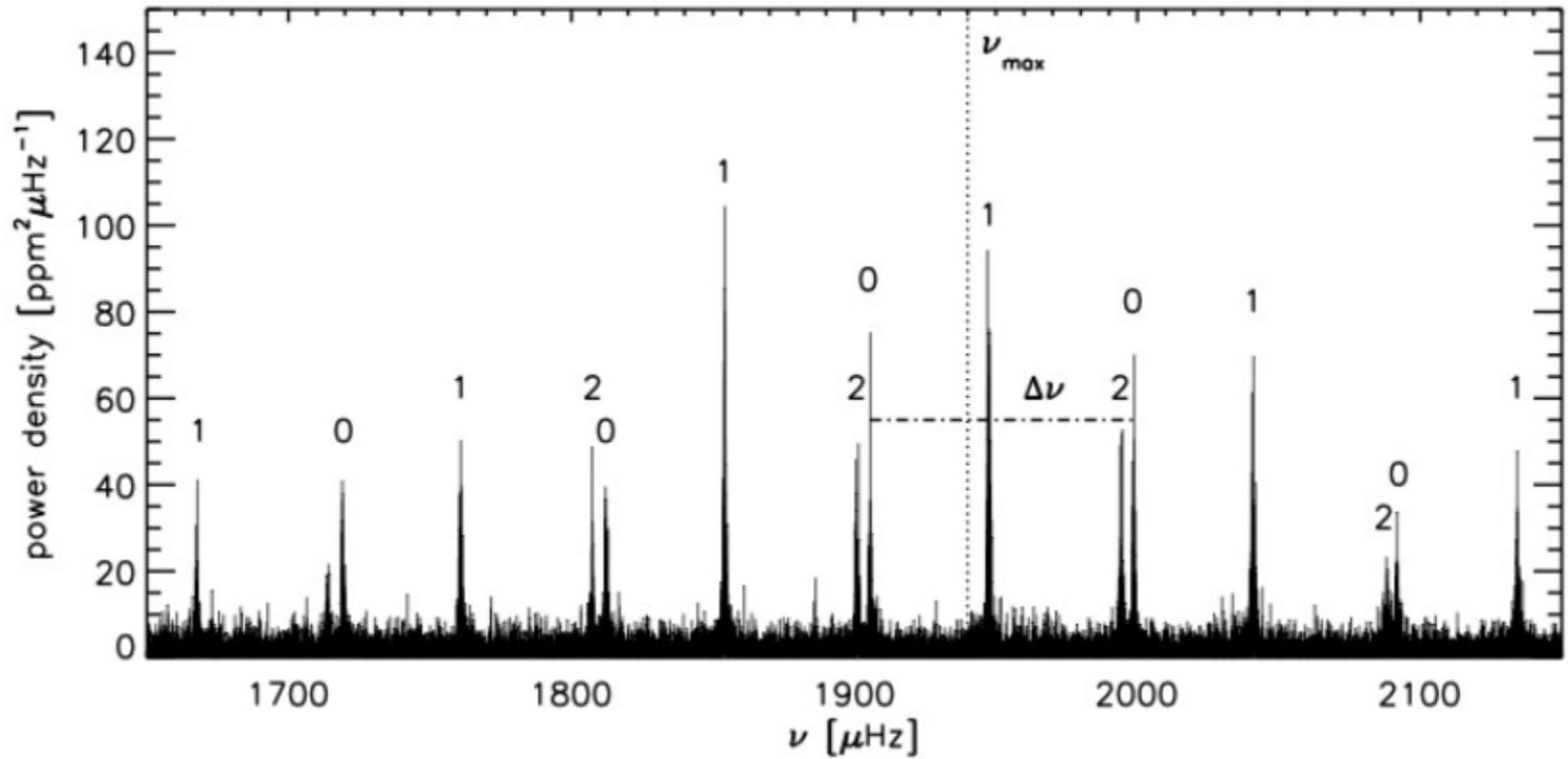
$$\delta v_l = v_{nl} - v_{n-1l+2}$$

küçük ayrışması kadar fark olan dik doğrulardan oluşur. Her bir derece için üst üste iki simge arasında ise hep Δv_0 ortalama büyük ayrışma frekansı kadar fark olur. Oysa gözlenen durum böyle değildir.



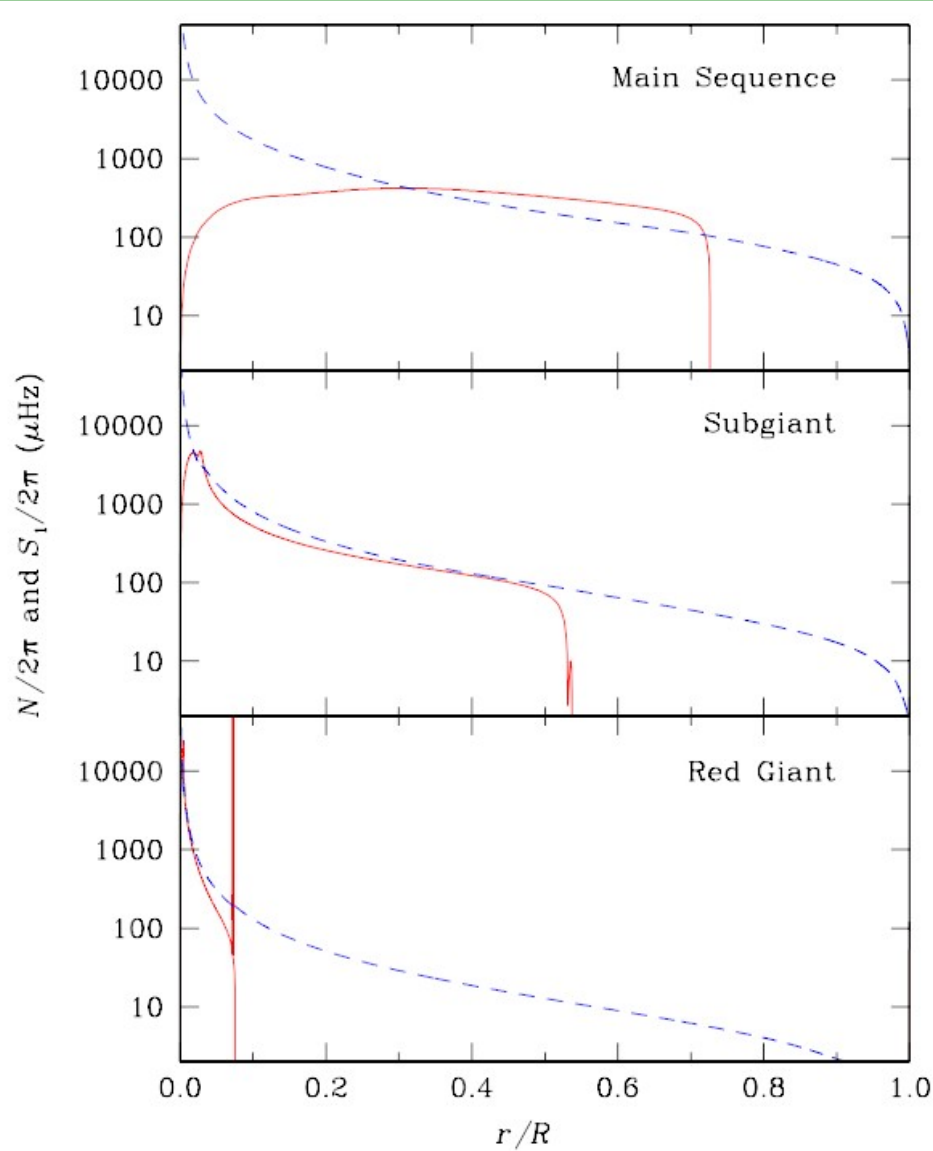


Güneş zonklamaları için BiSON verilerine dayalı olarak oluşturulan echelle diyagramı. Burada $\nu_0 = 830 \mu\text{Hz}$, $\Delta\nu_0 = 135 \mu\text{Hz}$ 'dir. Diyagramın dik bir doğru şeklinde olmaması yüzey yakınında değişen koşullardan (sıcaklık-basınç, kimyasal kompozisyon, iyonizasyon bölgeleri, konvektif katmanın sınırları, dolayısı ile dalga hızı) kaynaklanmaktadır. Asimptotik ilişkiden bu sapmalara bakarak, Güneş'in iç katmanları konusunda bilgi sahibi olmak mümkün olmuştur.



Bir anakol yıldızı için (KIC 3656479) frekans spektrumu. Mod belirlemesi yapılmış her bir freknanın üzerinde o mod için yüzeydeki düğümlerin sayısını gösteren derece (l, angular degree) verilmiştir. $l = 0$ modları radyal modlardır. Büyük ayrışma ($\Delta\nu$) aynı dereceden, birbirini takip eden iki üst ton (o modun radyal doğrultudaki (küresel) düğümlerini gösteren kuantum sayısı, n) arasındaki frekans farkını göstermektedir. (Hekker & Mazumdar 2014)

Kaçınılan Örtüşmeler (ing. Avoided Crossings)



Hekker & Marduzan (2014)

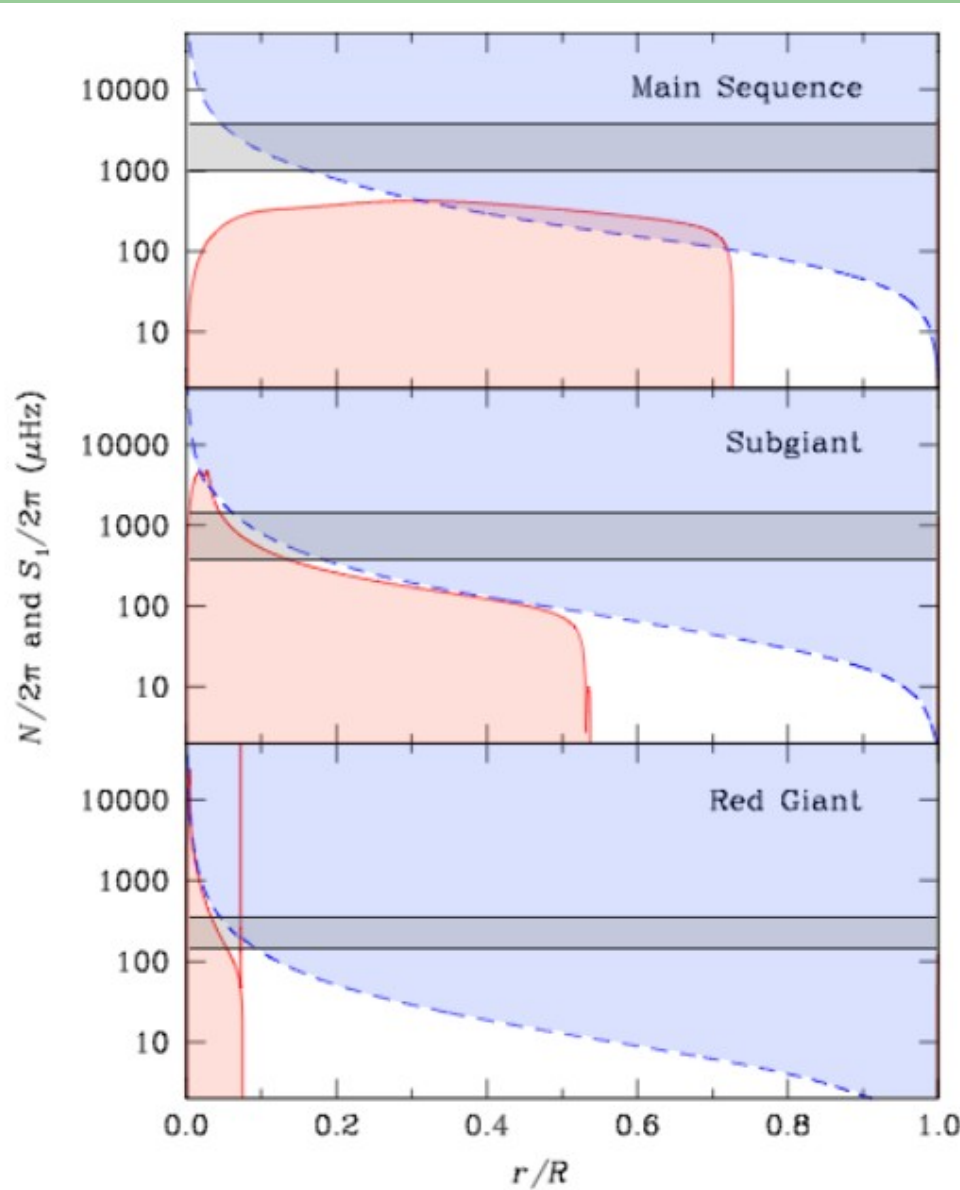
Radyal olmayan p-modları yüzeye yakın bir kovukta (ing. cavity) etkili olurken frekanslarının alt limiti **Lamb Frekansı (S_l)**'dir. Üstte ise kovuk atmosferin seyreltiği en dış katmanlarla sınırlıdır. Bu nedenle bu modların bir de üst frekans limiti vardır ve limit **kesme frekansı (cut-off frequency, S_t , $v_{ac} \propto \sqrt{T_{eff}}$)** olarak adlandırılır. Yıldızlar evrimleştikçe yüzey çekim ivmesinin düşmesi (yıldızın yarıçapının artması) nedeniyle p-modu salınımların frekansı azalır.

Buna mukabil, Güneş-benzeri yıldızların radyatif bölgelerinde etkin g-modlarının salınım frekansları (**Brunt-Vaisala frekansı, N**) ise yıldız evrimleştiktçe çekirdek bölgesinin sıkışmasıyla artar.

g-modları $v < S_l, N$; p-modları ise $v > S_l, N$ koşullarını sağlarlar. Bu koşulların sağlanmadığı **ara bölgede** her iki moda ilişkin salınımlar da zayıflamaya başlar.

Yanda $l = 1$ modları için Brunt-Vaisala frekansı (N , kırmızı eğri), Lamb frekansı (S_l)'nin Güneş kütlesinde bir yıldızın farklı evrim durumlarındaki yıldızın merkezinden yüzeyine doğru değişimi görülmektedir.

Kaçınılan Örtüşmeler (ing. Avoided Crossings) Karışmış Modlar (ing. Mixed Modes)



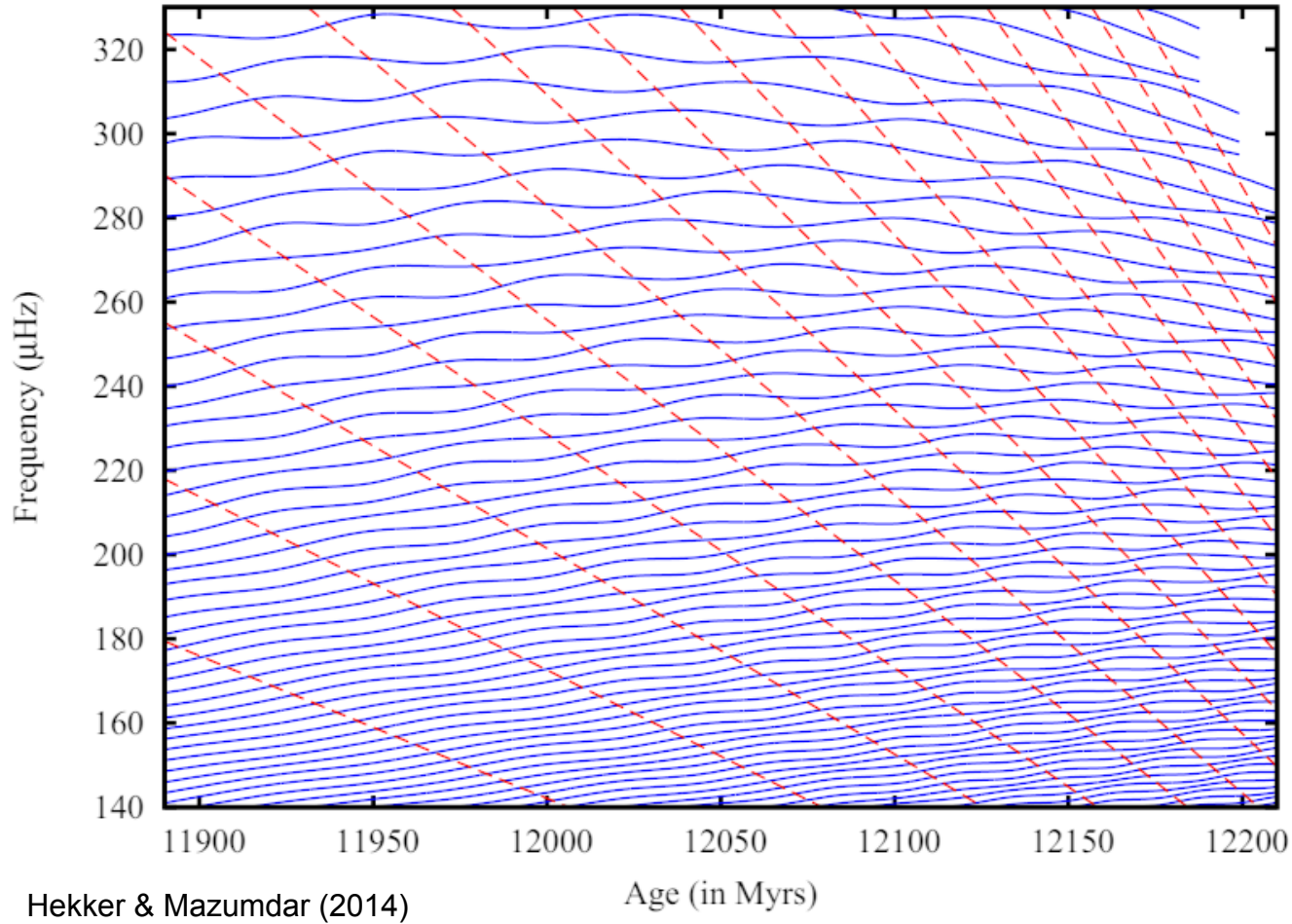
Hekker & Marduzan (2014)

Kırmızı altdev ve dev yıldızlarda p- ve g-modları benzer frekanslara sahiptir. Her iki türde salınımın uyarıldığı bölgeler arasındaki **ara bölge** dar bir bölge ise bu durumda onun altında ve üstündeki bölgelerde uyarılmış salınımlar sönümlenmez ve birbirleriyle girişim yaparlar (örtüşürler). Kaçınılan örtüşmeler (ing. avoided crossings) adı verilen bu girişimler, bazı frekanslarda güçlenmeye neden olur. Sonuç olarak y_1 ve y_2 olarak isimlendirebileceğimiz iki salıncının

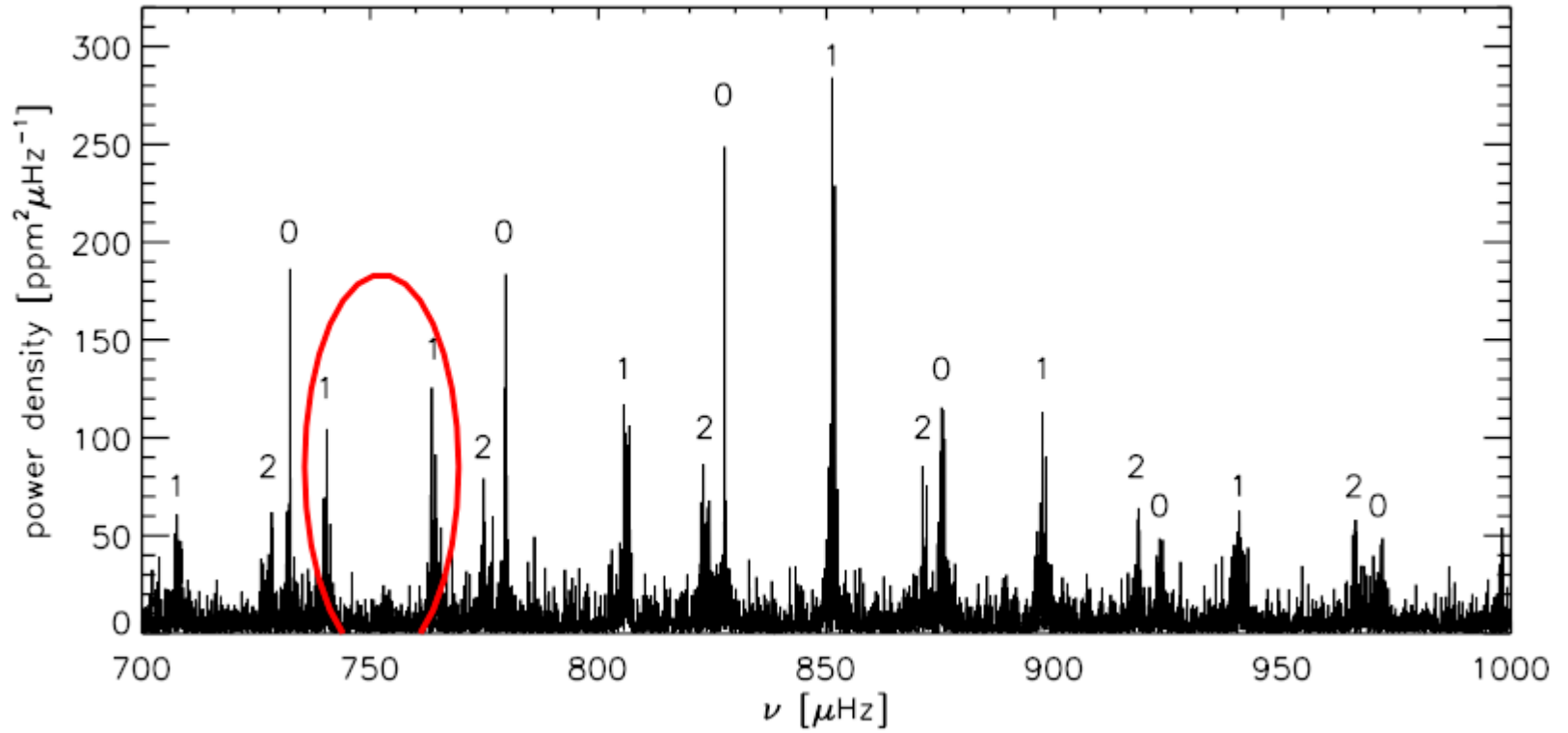
$$\frac{d^2 y_1(t)}{dt^2} = -\omega_1^2 y_1 + \alpha_{1,2} y_2$$

$$\frac{d^2 y_2(t)}{dt^2} = -\omega_2^2 y_2 + \alpha_{2,1} y_1$$

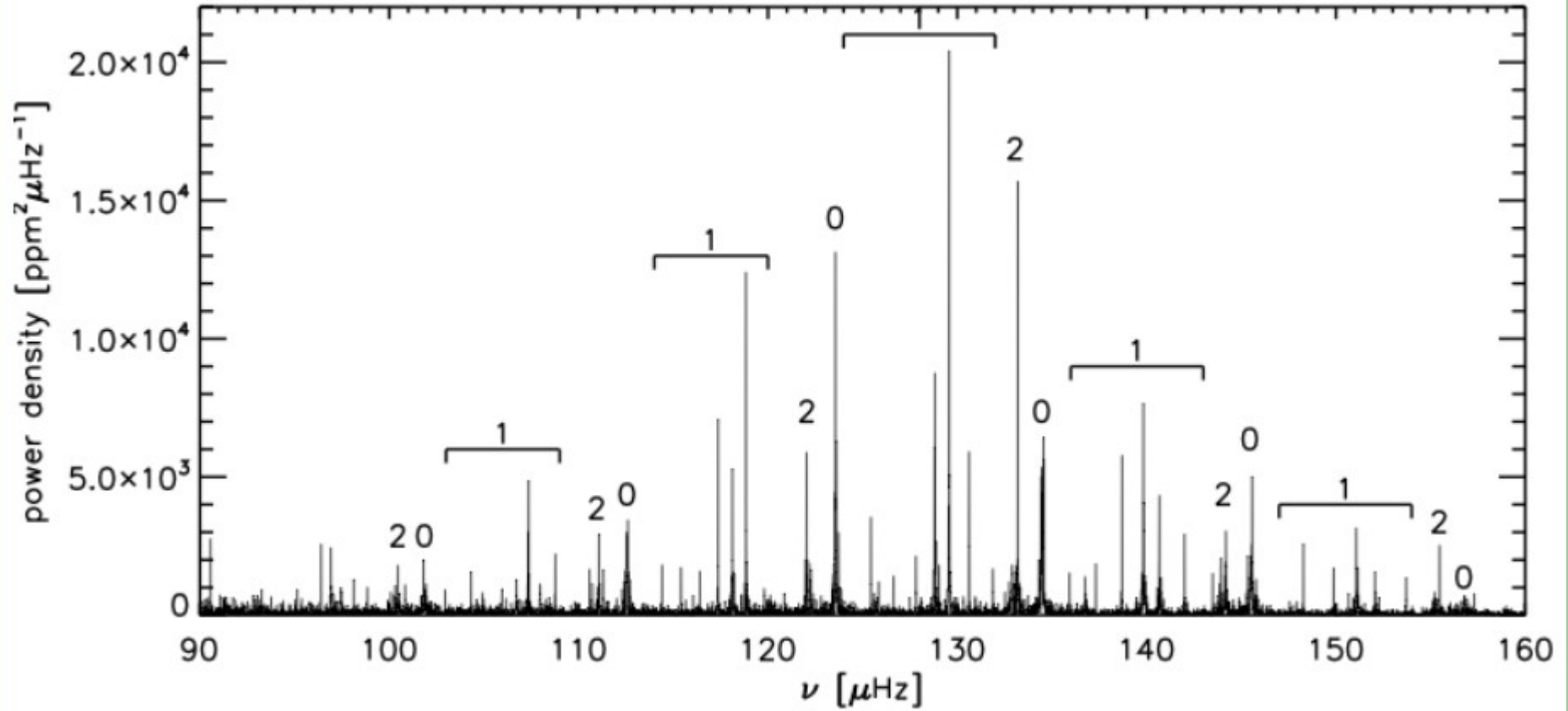
$\omega_0 = \omega_1 = \omega_2$ frekansında özfrekansları kesişir. $|\omega_1^2 - \omega_2^2| \ll \alpha_{1,2}$ olması durumunda, yani bu iki frekansı birbirine bağlayan $\alpha_{1,2}$ terimi, frekanslar arası farktan çok büyük olduğunda, ki dev yıldızlarda durum budur, örtüşürler ve bu özfrekanslar **karışmış iki mod** olarak gözlenirler.



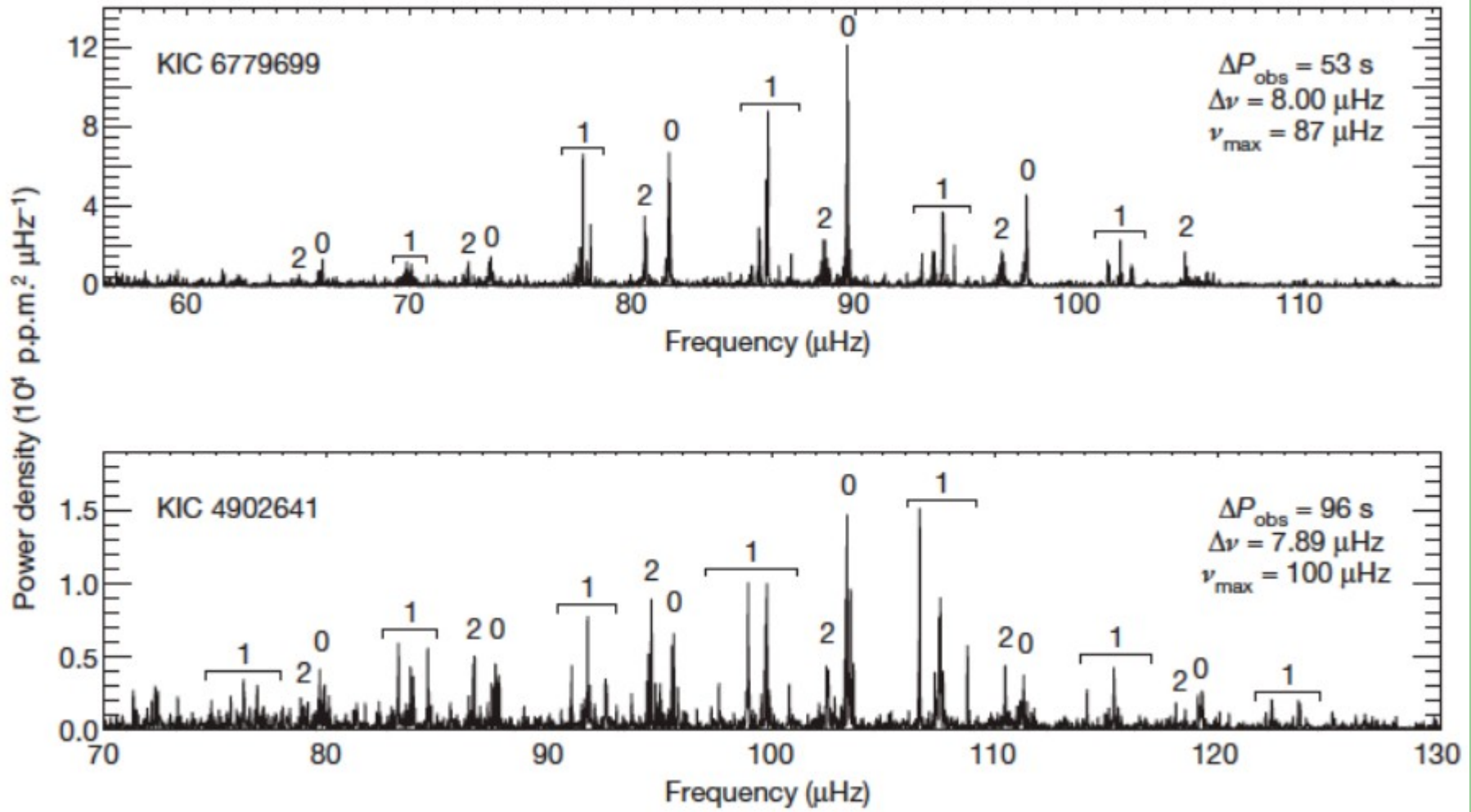
1 $M_{\text{güneş}}$ kütlesinde bir yıldızın kırmızı dev aşamasında yaşla birlikte zonklama frekansının değişimi. Mavi eğriler farklı üst tonların $l = 1$ derecelerini, kırmızı kesikli doğrular $l = 0$ derecelerini göstermektedir. p-modu frekansları yaşla azalırken, g-modu frekansları artmakta ve birbirlerine yaklaşıyor bir noktada birbirlerini geçerek ilerlemek yerine, örtüşmektedir. Bu örtüşmeler yukarıdaki grafikte mavi eğrilerdeki artışlar olarak kendini göstermektedir. Bu frekanslardaki modlar karışmış yapıdadır (mixed modes). Bu modlardan biri p-modunun özelliklerini, diğeri g-modunun özelliklerini baskın olarak taşır. Bu frekanslar yıldızın sadece belirli bir evrim aşamasında ve belirli bir yaşında oluşabildiği için, gözlenmeleri durumunda **yıldızın yaşı** hakkında hassas bilgi sağlarlar!



Bir altdev yıldız olan KIC 11395018 için frekans spektrumu üzerinde 740.3 μHz ve 764 μHz 'de karışmış iki mod (mixed mod) görülmektedir. Bu modların dereceleri $l = 1$ olarak belirlenmiştir (Hekker 2013).



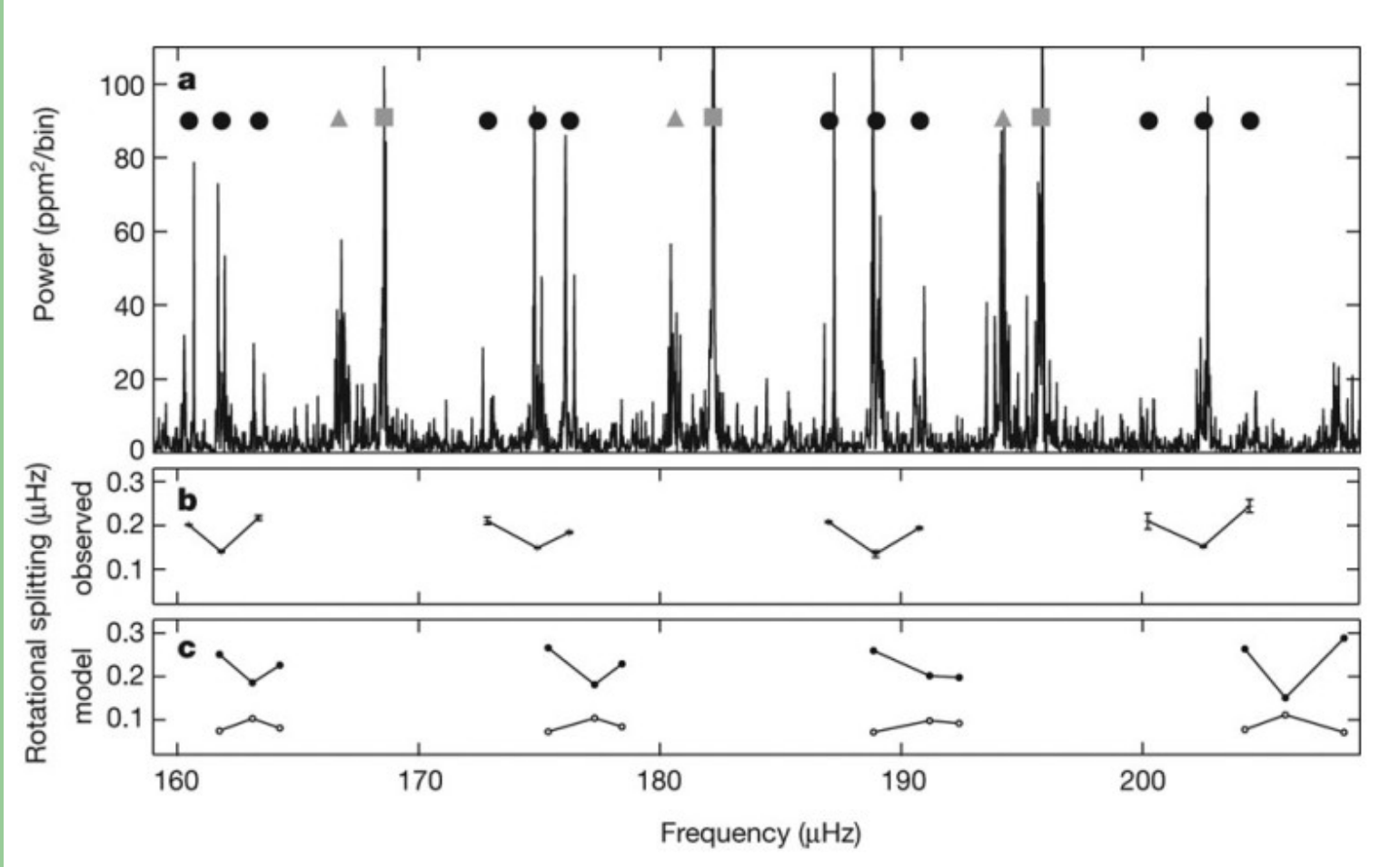
Yaşla artan g-modu frekansları belirli bir frekansa doğru artarak yaklaşır ve o frekans civarında bir yoğunluk oluşturur. Bu frekanslarda bir p-modu ile etkileşerek birden fazla karışmış mod da uyarabilirler. Bir dev yıldız olan KIC 9145955 için frekans spektrumunun $l = 1$ modunda bu türden çeşitli karışmış modlar görülmektedir (Hekker 2013).



Beck et al. 2011, Science / Bedding et al. 2011, Nature / Mosser et al. 2014

Karışımı modların gözleendiği dev yıldızlara iki örnek

Dönme İle Ayırışma (ing. Rotational Splitting)



Hızlı dönen yıldızlarda dönme frekansı gözlenen zonklama modlarında yarılmaya neden olur. Bu frekans uzayında iki dönemli olgunun üstüste binmesinden kaynaklanan bir fenomendir ve dönme ile ayırışma (ing. rotational splitting) olarak adlandırılır. Bu olgudan yararlanılarak yıldızın farklı katmanlarına denk gelen frekanslardaki yarılmalardan yıldızın farklı katmanlardaki dönme hızı çıkarılabilir (Beck vd. 2012).

Ölçeklendirme Bağlılıları (ing. Scaling Relations)

Maksimum genliğin olduğu frekans

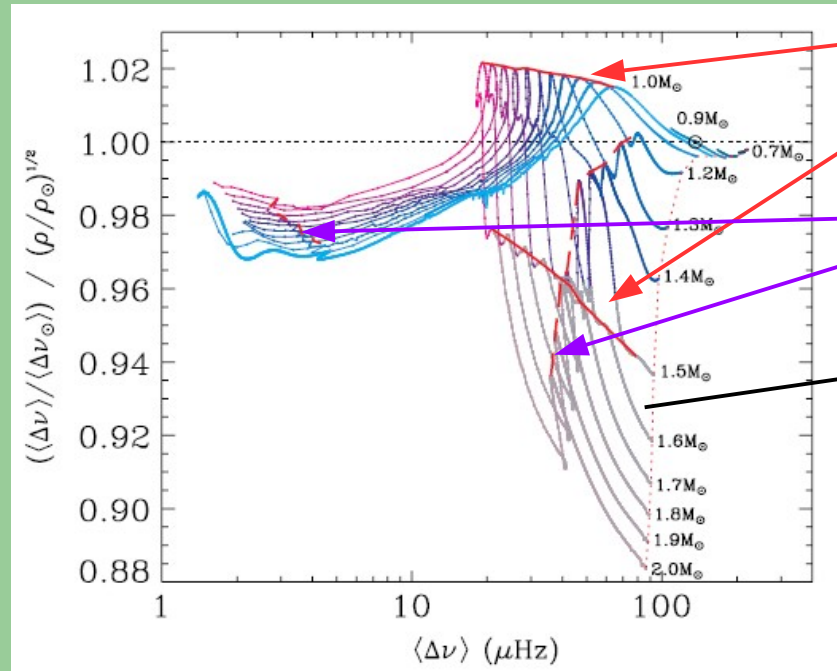
Büyük ayırışma

$$\nu_{\max} \propto \frac{g}{\sqrt{T_{\text{eff}}}} \propto \frac{M}{R^2 \sqrt{T_{\text{eff}}}}$$

$$\frac{\nu_{\max}}{\nu_{\max, \odot}} = \frac{M/M_{\odot} (T_{\text{eff}}/T_{\text{eff}, \odot})^{3.5}}{L/L_{\odot}}$$

$$\rho \approx \left(\frac{\Delta\nu}{\Delta\nu_{\odot}} \right)^2 \rho_{\odot}$$

$$\Delta\nu \propto \sqrt{\frac{M}{R^3}}$$



Konvektif zarf
bölgesi

Konvektif çekirdek
bölgesi

ZAMS

Klasik kararsızlık kuşağının soğuk taraftaki limitinden daha sıcak modeller ($Z = 0.017$) gri, ZAMS noktalı kırmızı eğri ile gösterilmiştir. Ayrıca evrim yolları üzerindeki keskin dönüşler işaretlenmiştir. (White vd. 2011)

$$M \propto \frac{\nu_{\max}^3}{\Delta\nu^4} T_{\text{eff}}^{3/2}$$

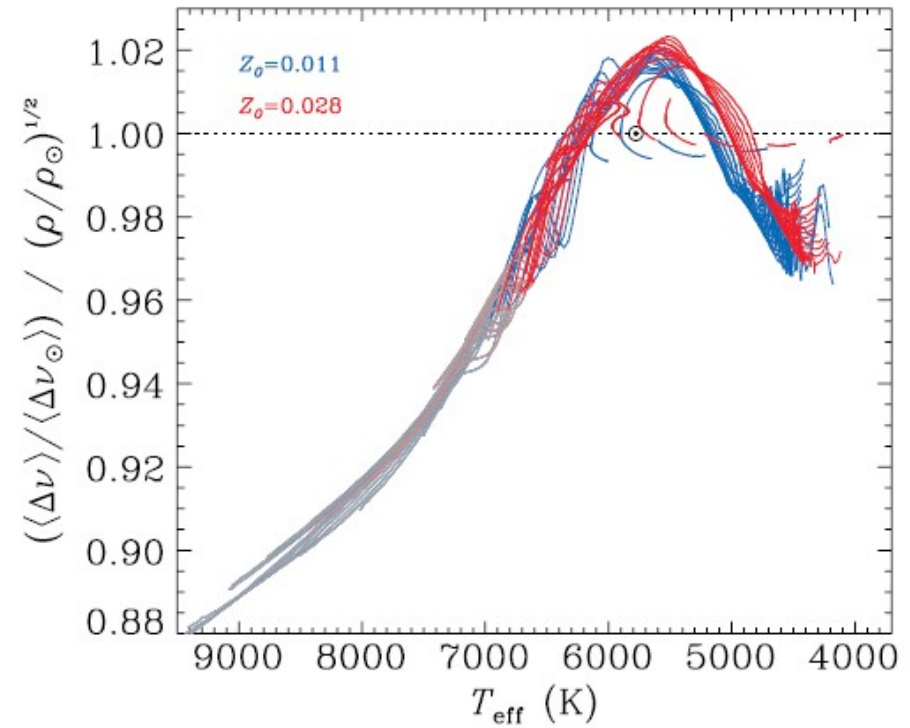
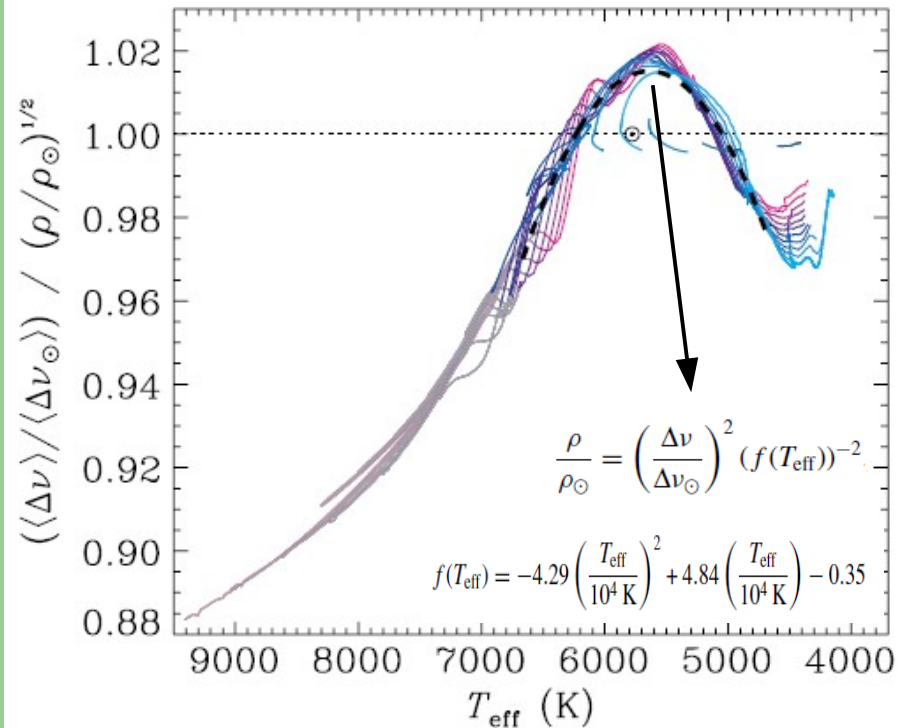
$$R \propto \frac{\nu_{\max}}{\Delta\nu^2} T_{\text{eff}}^{1/2}$$

$$M \propto \frac{\nu_{\max}^{12/5}}{\Delta\nu^{14/5}} L^{3/10}$$

$$R \propto \frac{\nu_{\max}^{4/5}}{\Delta\nu^{8/5}} L^{1/10}$$

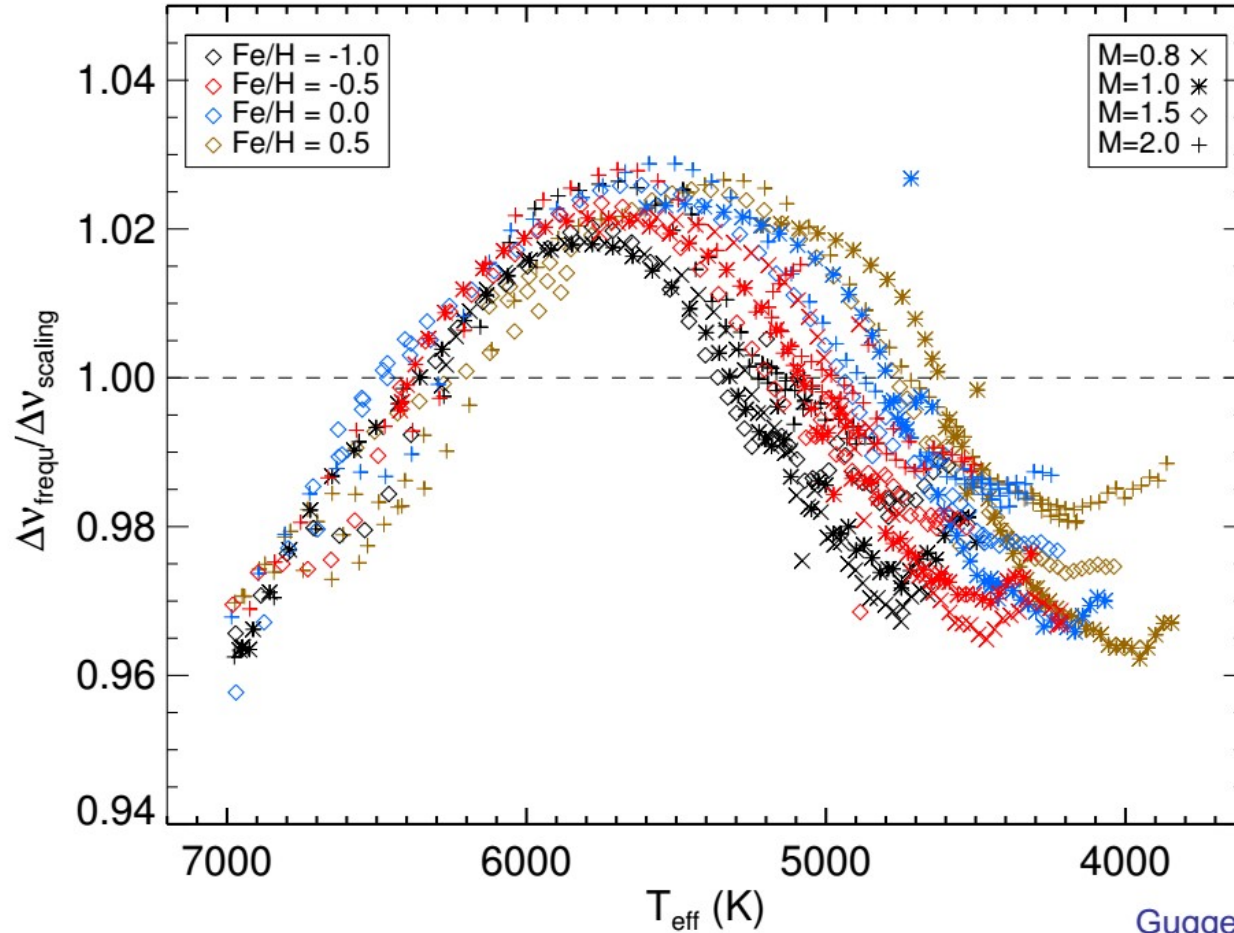
Ölçeklendirme Bağlılıları (ing. Scaling Relations)

White vd. 2011



Sıcaklık ve metal bolluğunun ölçeklendirme bağıntılarına etkisi

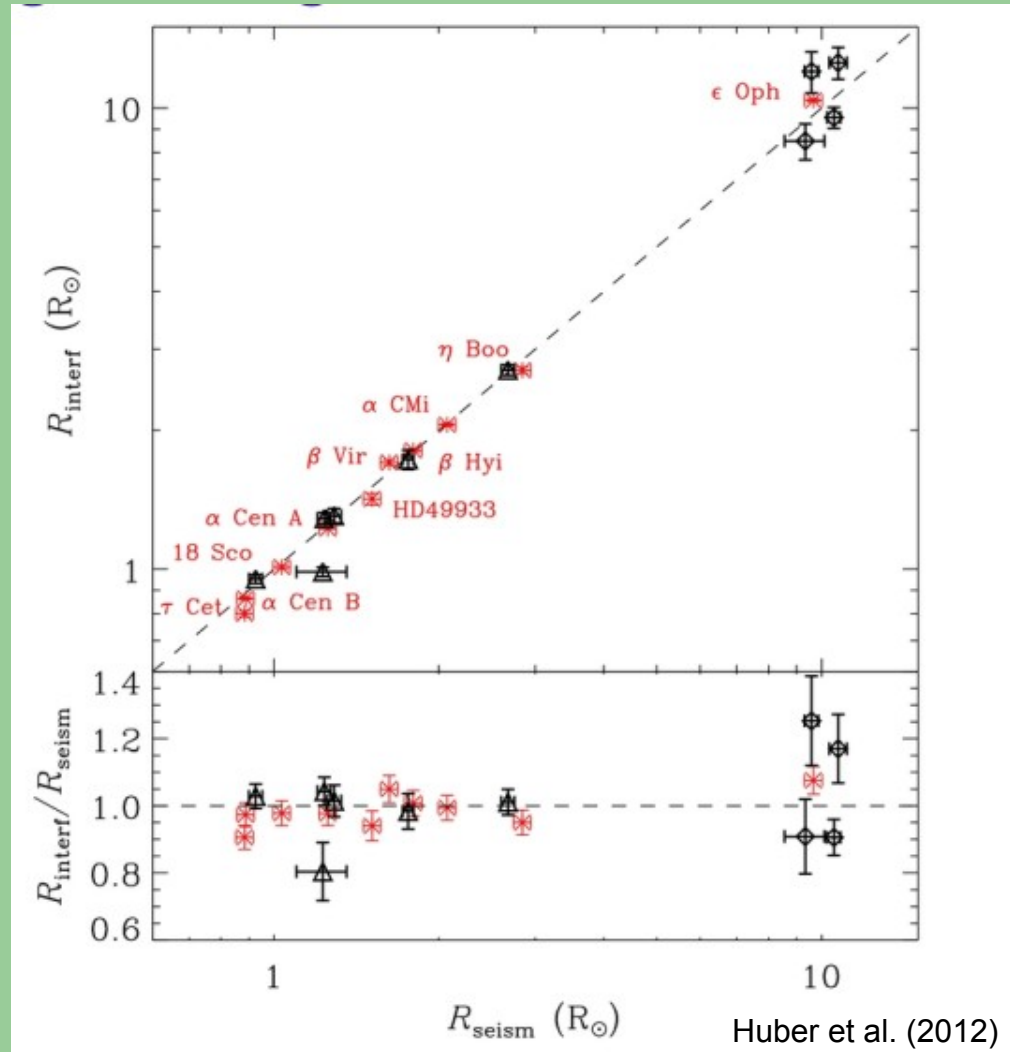
Ölçeklendirme Bağlılıları (ing. Scaling Relations)



Guggenberger et al. 2016

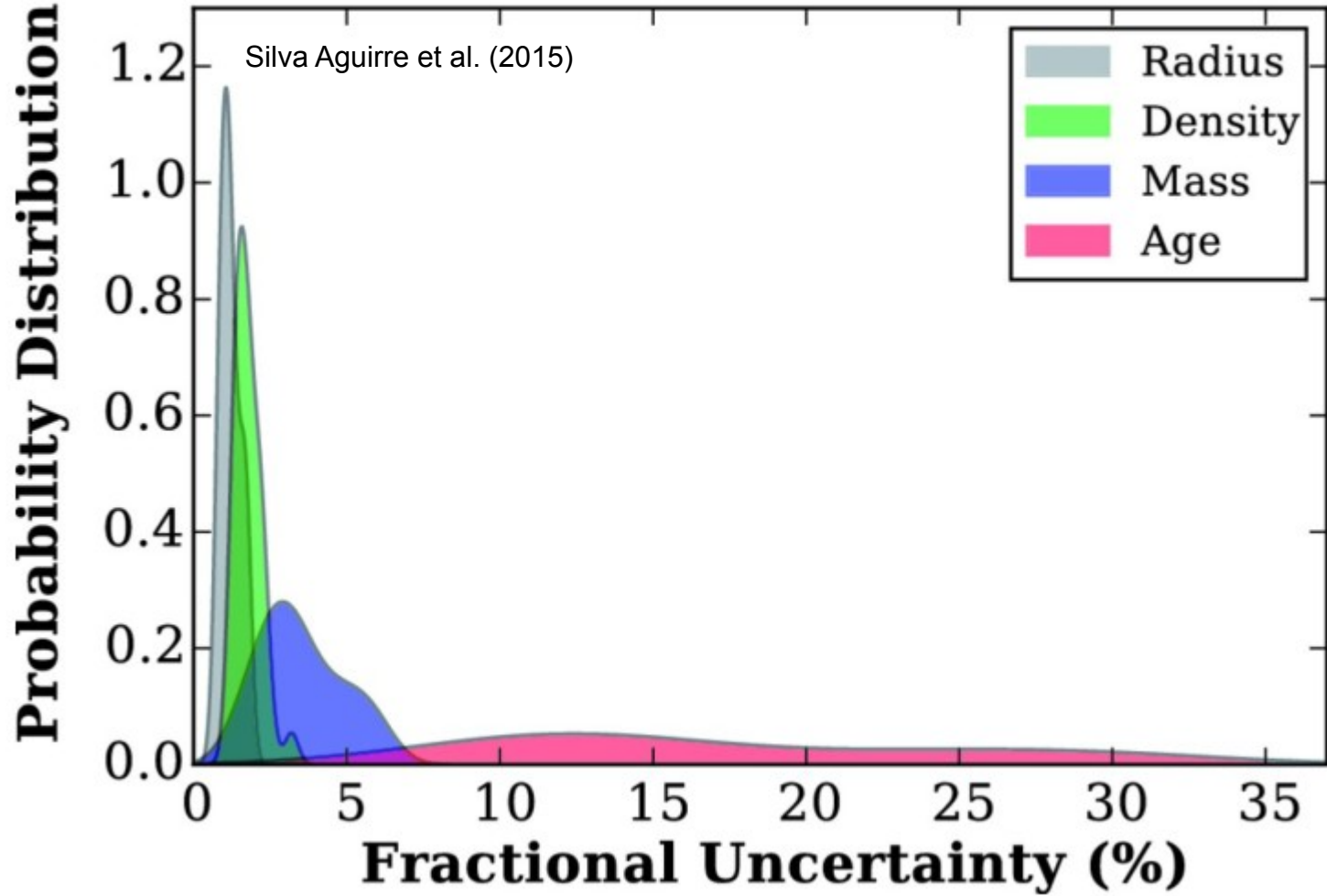
Kütle ve metal bolluğunun ölçeklendirme bağıntılarına etkisi

Ölçeklendirme Bağıntılarının Başarısı



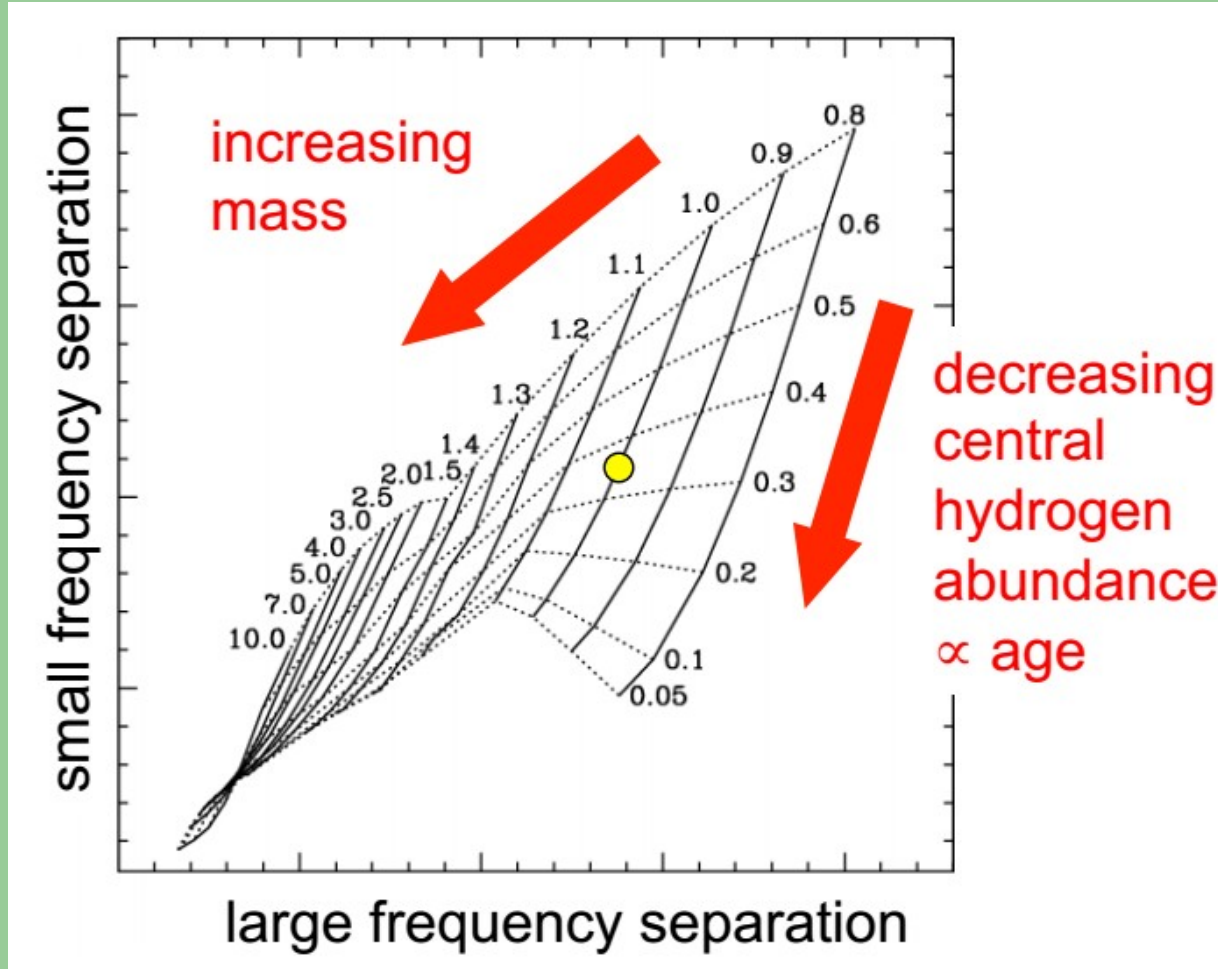
Ölçeklendirme bağıntıları kullanılarak hesaplanan yarıçaplarla interferometri yöntemiyle elde edilen yarıçapların karşılaştırılması

Ölçeklendirme Bağıntılarının Başarısı

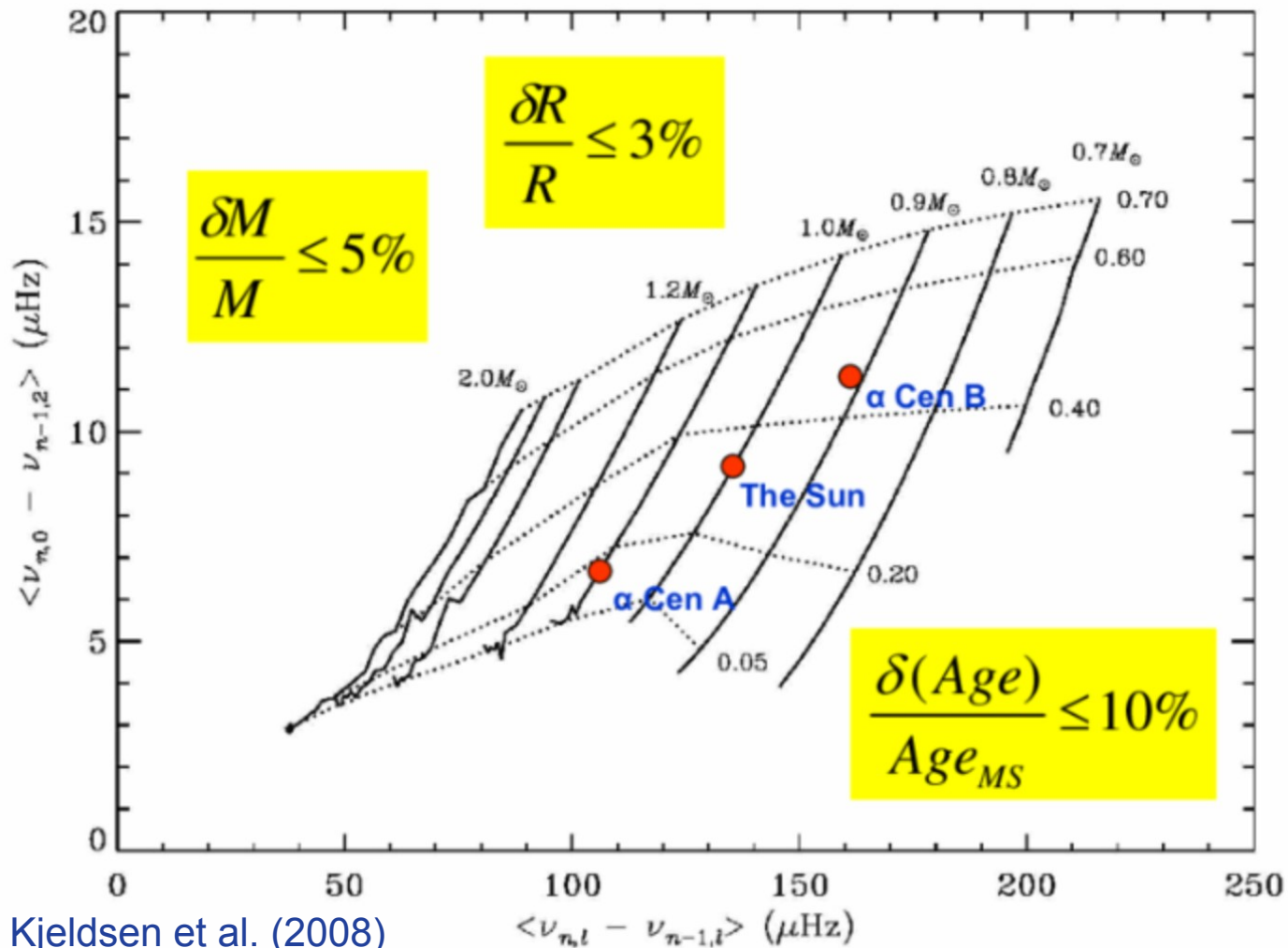


Ölçeklendirme bağıntıları kullanılarak hesaplanan parametrelerin üzerindeki belirsizliklerin olasılık dağılımı

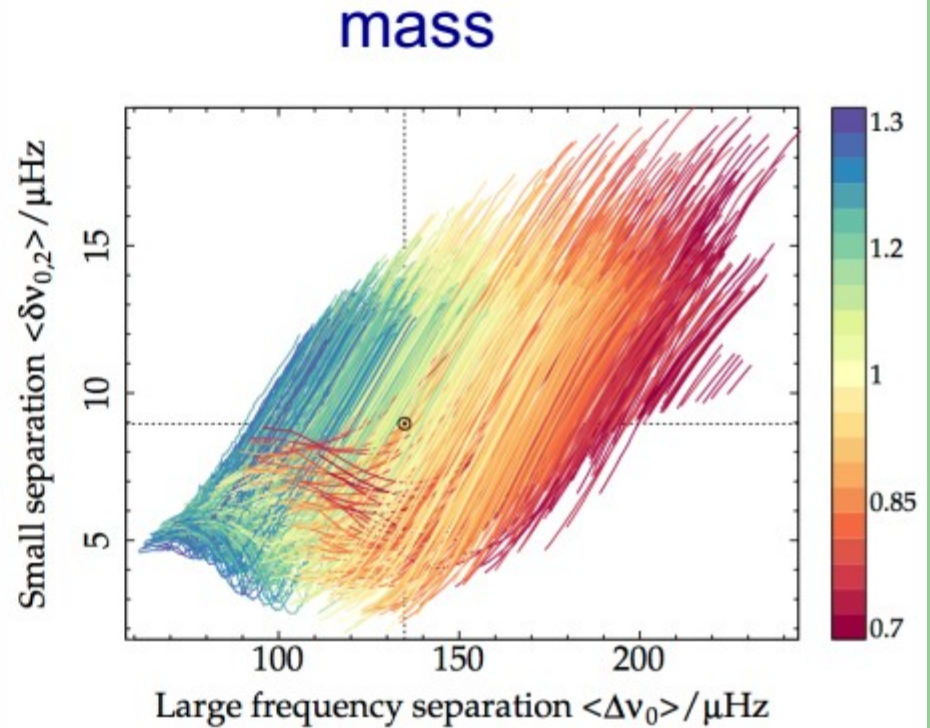
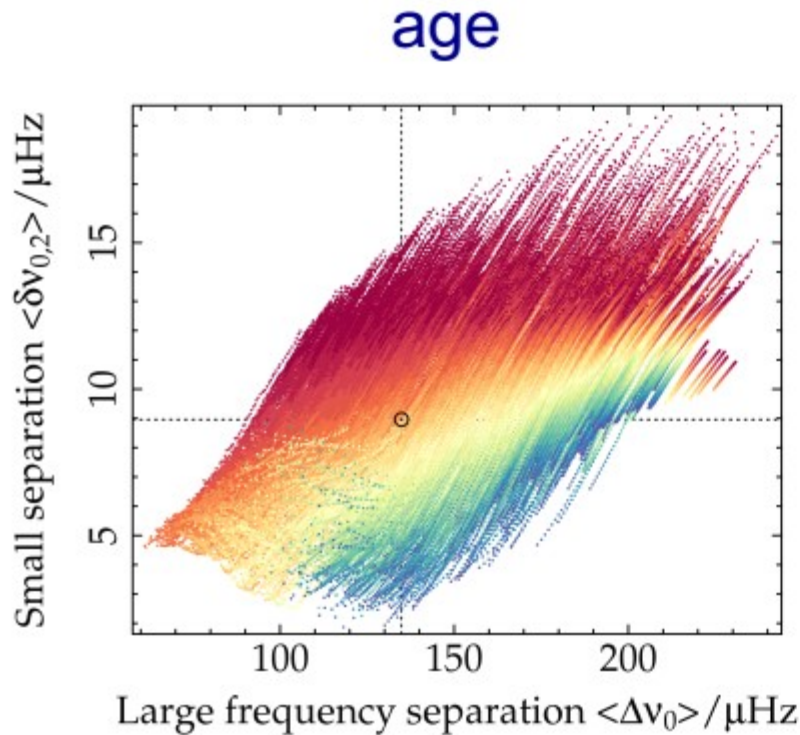
Christensen-Dalsgaard Diyagramı (C-D) "Asterosismik HR Diyagramı"



C-D'de eksenler büyük ve küçük frekans ayrışmalarıdır ($\Delta\nu$ ve $\delta\nu_{02}$). Sürekli eğriler sabit kütle için evrim yollarını gösterirken, süreksiz (kesikli) eğriler sabit çekirdek hidrojen içeriğini (ve dolayısıyla yaşı) göstermektedir. Bu iki sismolojik parametrenin gözlemlerden tayini sonrası, asterosismik HR diyagramı kullanılarak kütle, yarıçap ve yıldız yaşı, sırasıyla %5, %2-3 ve %5-10 belirsizlikle; ortalama yoğunluklar ise %1 duyarlılıkla belirlenebilmektedir. Güneş'in konumu içi dolu sarı daireyle gösterilmiştir. Güneş kütleğinde bir anakol yıldızının frekans spektrumunun analizinden $\Delta\nu \sim 135 \mu\text{Hz}$, $\delta\nu_{02} \sim 9 \text{ Hz}$ olarak belirlendiğinde, 4.56 milyar yılda merkezindeki hidrojenin %35'e kadar düştüğü anlaşılabilmektedir.



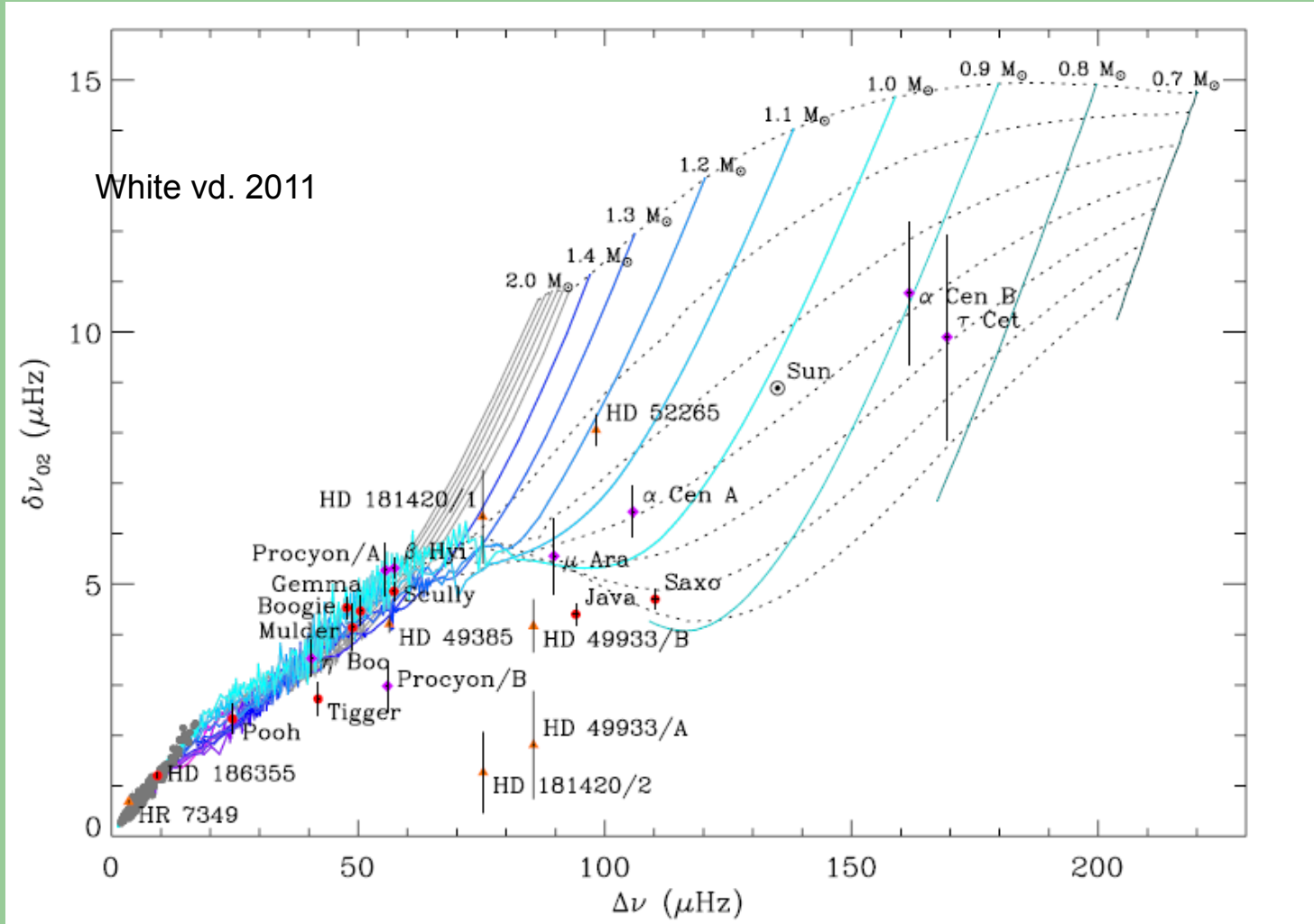
Christensen-Dalsgaard Diyagramı (C-D)



Bellinger et al. (2017)

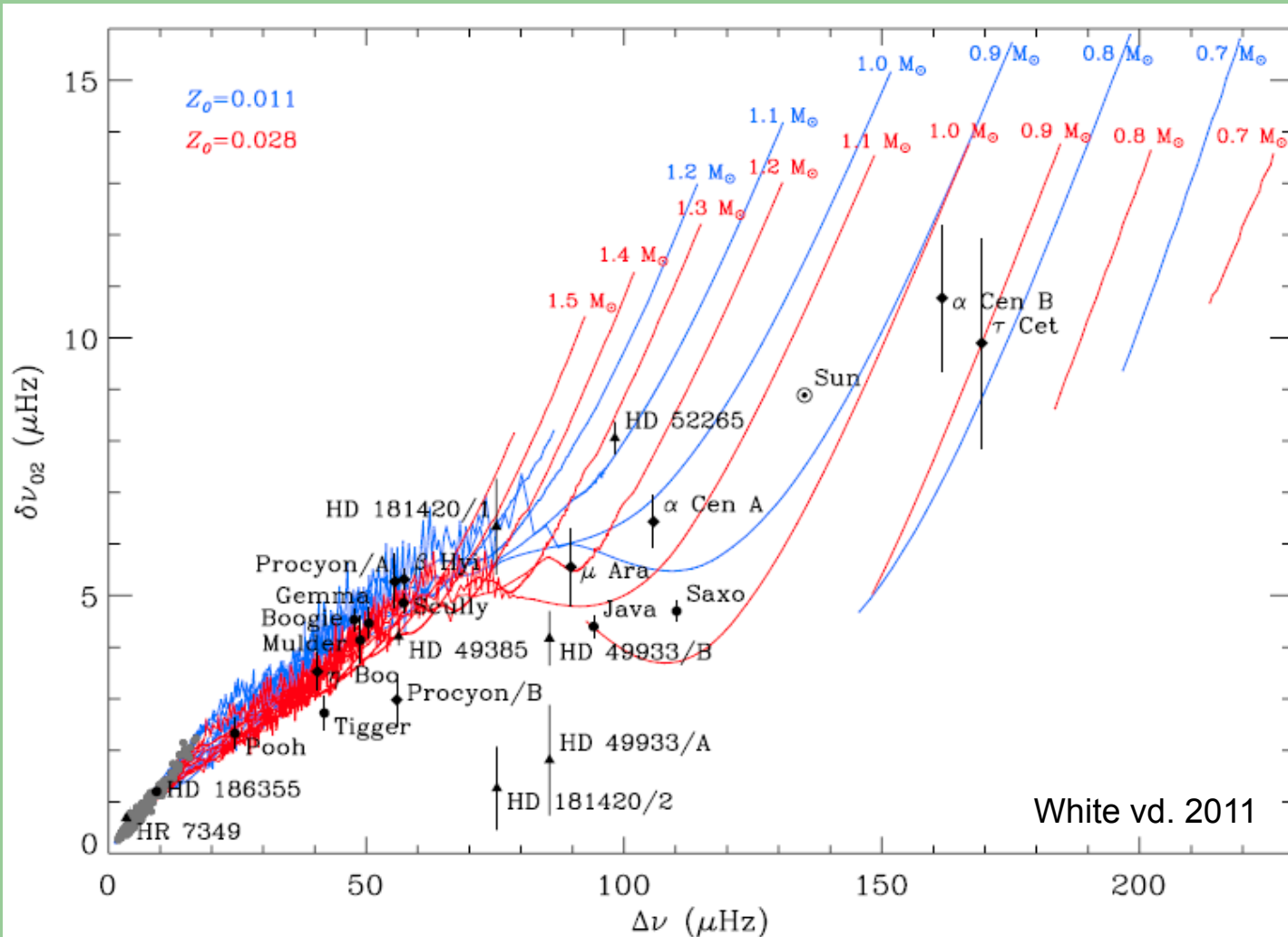
Sonuç olarak tıpkı etkin sıcaklığı ve ışınım gücü belirlenen bir anakol yıldızının kütle ve yaşının tahmin edilebilmesi gibi büyük ayrışma ($\Delta\nu$) ve küçük ayrışma ($\delta\nu_{02}$) asterosismolojik parametreleri ışık eğrisinin güç (frekans) spektrumundan belirlenebilen bir yıldızın da kütle ve yaşı belirlenebilmektedir. Bu anlamda C-D diyagramları “**asterosismik HR diyagramları**” olarak da adlandırılabilir. Ancak, klasik bir HR diyagramından farklı olarak bu iki parametre Güneş-benzeri salınım gözlenen yıldızlar için çok daha iyi duyarlılıkta belirlenebilmektedir!

Christensen-Dalsgaard Diyagramı (C-D)

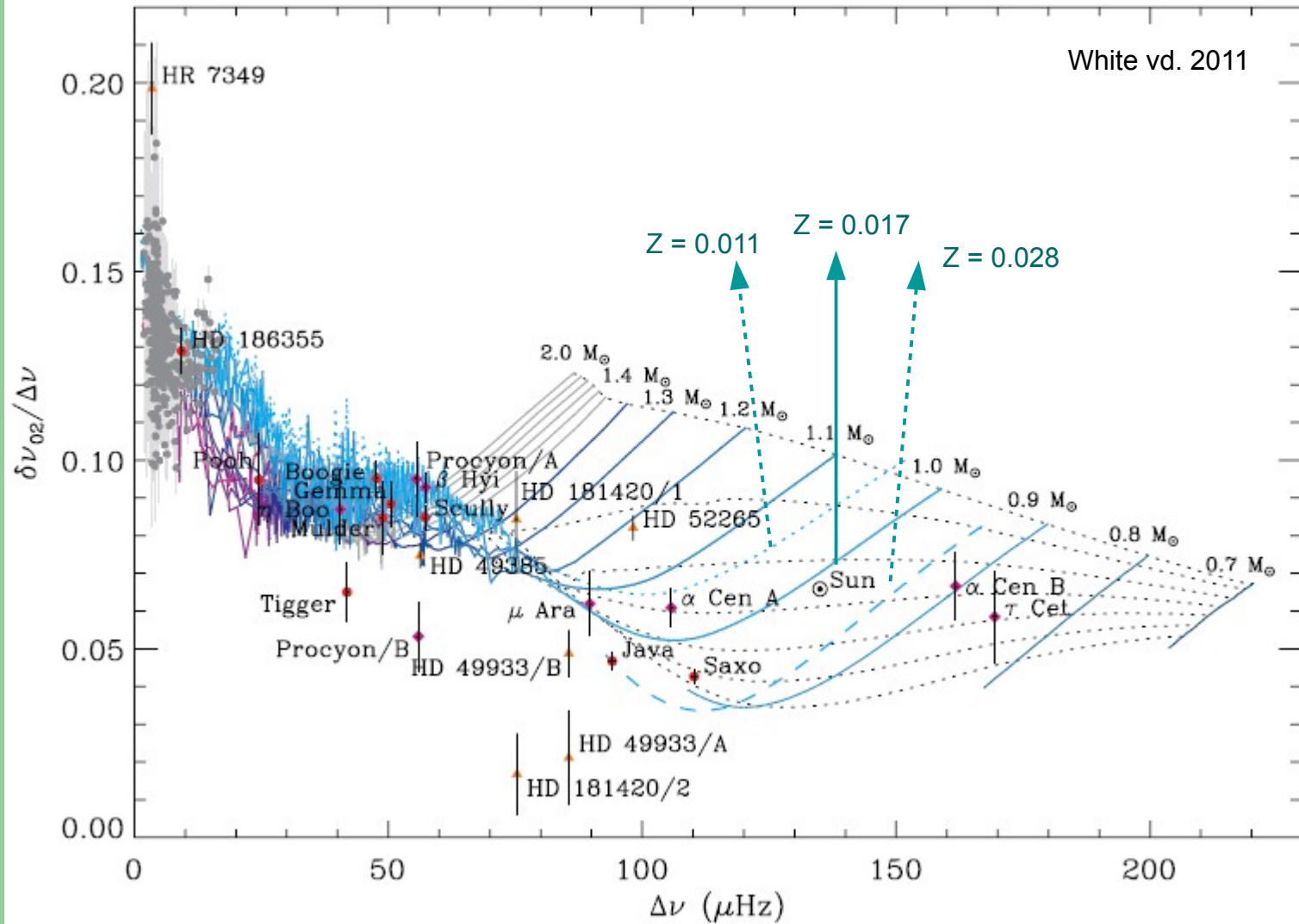


Diyagram 0.7 – 1.5 $M_{\odot}$ kütle aralığındaki anakol yıldızları için çok daha iyi bir çözünürlüğe sahip olduğu için duyarlı parametre değeri belirlemek üzere kullanılabilirken; daha büyük kütleli ya da büyük ve küçük ayrışmanın daha düşük frekanslarda gözlemlendiği dev yıldızlar için çözünürlük kötüleşmekte, yıldızlar üstüste bindiği için parametre duyarlılığı oldukça düşüp, dejenerasyon artmaktadır.

Christensen-Dalsgaard Diyagramı (C-D) Metalisite Etkisi



C-D Diyagramı - II



Diyagram y-ekseninin doğrudan küçük ayrışma yerine küçük ayrışmanın büyük ayrışmaya normalize edilmesiyle de çizdirilebilir. Bu durumda metalisite etkisi daha net görülür. Ayrıca eş yaş eğrilerinin yatay olması, yaşta da daha iyi bir çözünürlük getirmektedir.

C-D Diyagramının Özellikleri

- ✓ CD-II'nin üzerinde izokronların yatay olması Δv büyük ayrışmasının iyi bir yaş belirteci olduğunu göstermektedir.
- ✓ δv_{02} yerine başka bir küçük ayrışma (örn. δv_{01}) da kullanılabilir. Ancak dev yıldızlarda δv_{01} kaçınılan örtüşmeler (ing. avoided crossings) nedeniyle asimptotik ilişkiden önemli ölçüde sapar.
- ✓ C-D diyagramı özellikle $M < 1.5 M_{\odot}$ yıldızlar için faydalıdır, zira düşük kütlelerde evrim yolları birbirlerinden önemli ölçüde ayrılırlar. Altdev ve devlerde evrim yolları birbirlerine oldukça yaklaşmıştır. Bu tür yıldızların C-D diyagramındaki yerleri yaş ve kütlelerinin iyi bir belirteci olmaz.
- ✓ Anakol yıldızları için kütle belirleme hassasiyeti %1-5 düzeyindedir.
- ✓ Yaş özellikle dev yıldızlar için daha da problemlidir.
- ✓ Metal bolluğunun açık etkisi, söz konusu yıldızlar için metal bolluğunun spektroskopik yöntemlerle belirlenmesinin gerekliliğine işaret etmektedir. Ancak bu durumda diğer parametrelere daha güvenli geçilebilir.

Kırmızı Dev Yıldızlarda Güneş Benzeri Salınımlar CoRoT/Kepler Öncesi (ing. Pre-CoRoT/Kepler Era)

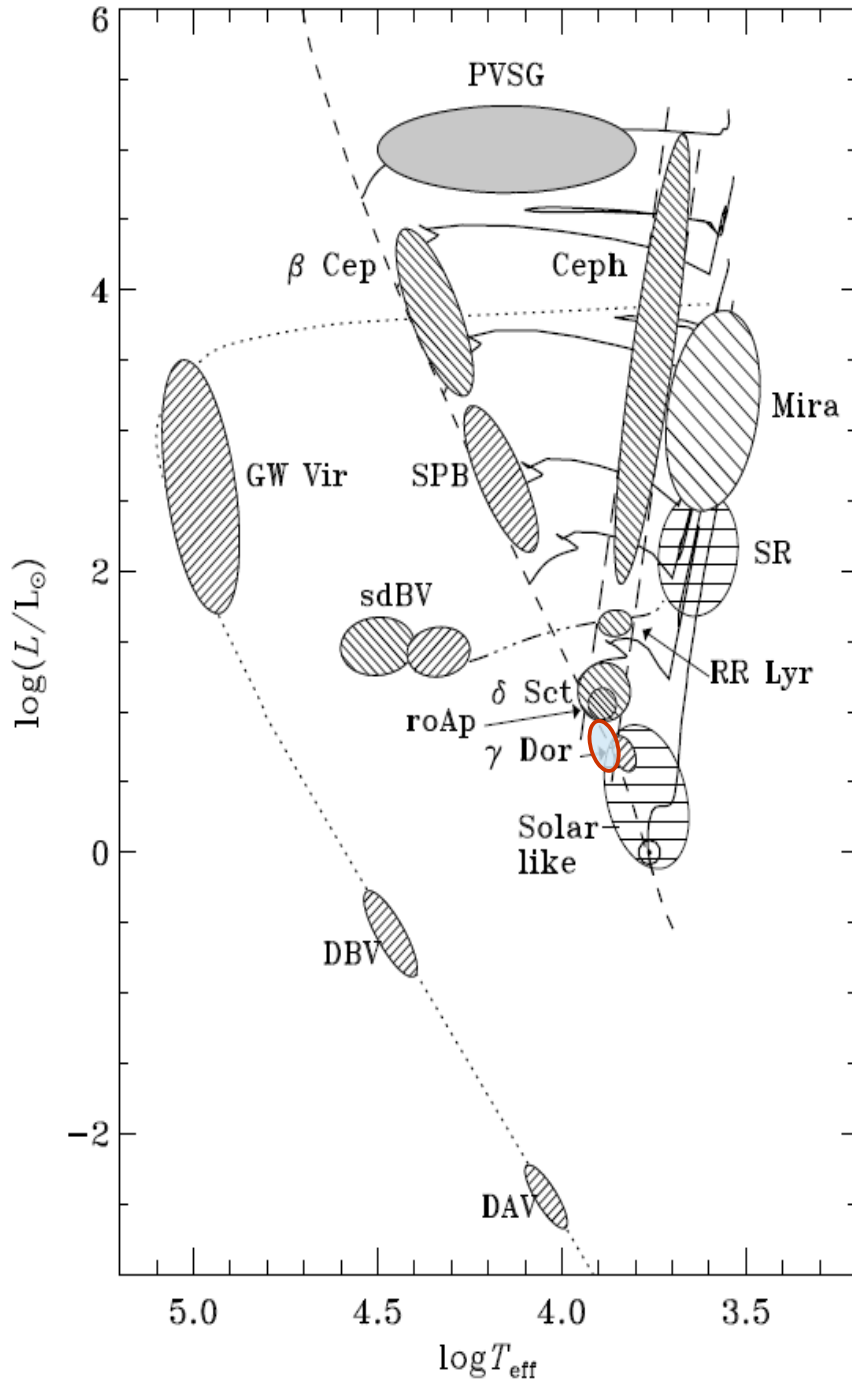
- ✓ Konvektif zarfa sahip bütün yıldızlarda güneş benzeri, stokastik salınımlar bekleriz. Miralar ve SR yıldızları gibi çok genişlemiş atmosfere sahip, ısı enerjisiyle sürülen (κ -mekanizması) yüksek genlikli değişimin gözlemlendiği yıldızlarda bu tür salınımları gözlemek zor olsa da kırmızı dev yıldızlarda bu mümkündür.
- ✓ Her ne kadar daha önce bu tür yıldızlarda Güneş-benzeri salınımların gözlemlendiğine dair iddialar olmuşsa da (α Boo: Smith vd. (1987), Innis vd. (1988), Merline vd. (1999), β Oph: Hatzes & Cochran (1994), Edmonds & Gilliland (1996), α UMa (Buzasi vd. 2000) ilk genel kabul gören, açık gözlem sonucu Frandsen vd. (2002) tarafından ξ Hya yıldızı için verilmiştir. Daha sonra Kallinger vd. (2005) GSC09137-03505 yıldızının Hubble verisinde, Setiawan vd. (2006) HD32887 (K4 III) ve HD81797 (K3 II-III) yıldızlarında Güneş benzeri salınımların varlığını ortaya koymuştur.
- ✓ Gough & Houdek (2002) çekirdekle genişlemiş zarf arasındaki dramatik yoğunluk farkının radyal olmayan modları çok daha fazla sönmüleyeceği (ing. damping) öngörüsünde bulundular. Bu öngörü bu tür yıldızlarda sadece radyal modların gözlenebilir genliklere ulaşan fotometrik değişimler yaratabileceği anlamına gelebilir!
- ✓ Buna karşın Hekker vd. (2006) dört zonklayan dev yıldızın dikine hız gözlemleri üzerinde gerçekleştirdikleri çapraz korelasyon analizinde, bu yıldızlardaki değişimin ancak radyal olmayan salınımların varlığıyla açıklanabileceğini öne sürmüştür.

Kırmızı Dev Yıldızlarda Güneş Benzeri Salınımlar

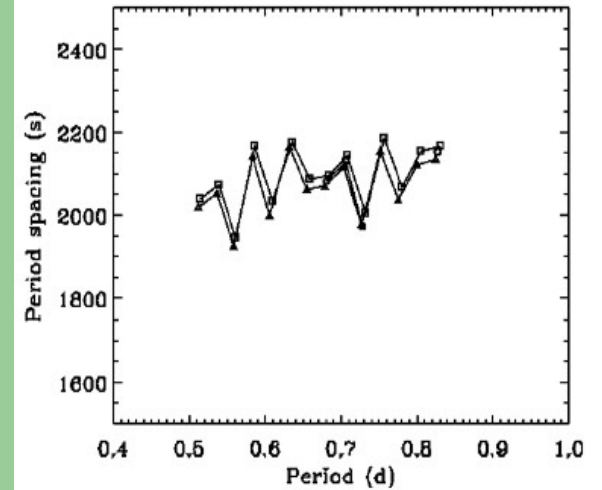
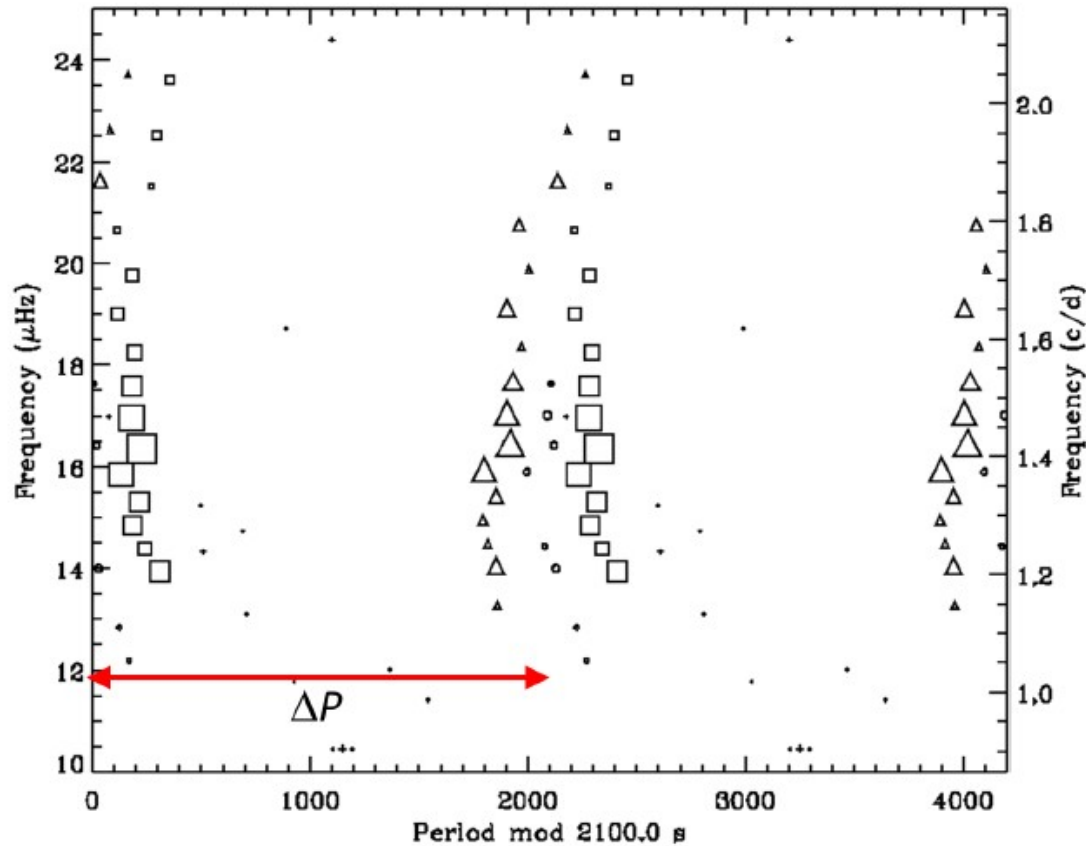
CoRoT/Kepler Devri

- ✓ Yerden yapılan tayfsal gözlemler (Aerts vd. 2008) ve CoRoT gözlemleri (Michel vd. 2008) Kırmızı Dev Yıldızlar'ın da düşük frekanslarda, düşük genlikli salınımlarının olduğunu, ancak mümkünse daha uzun süreli, kesintisiz gözlemlere ihtiyaç duyulduğunu ortaya koydu.
- ✓ Bedding vd. (2010) Kepler Q1 verilerine dayanarak Kepler Kataloğunda (KIC, Latham vd. 2005) “kırmızı dev” olarak kodlanmış 1500 yıldızın astrosismolojik analizini gerçekleştirdiler. İnceledikleri yıldızların %20'sinde %1'in üzerinde genliklerde M-türü dev salınımları (Mira ve SR) gözledikleri için bunları elediler. Kalan yıldızlardan 1000 kadarında düşük frekanslarda salınım frekansları, 700 kadarında “büyük ayrışmayı” (ing. large separation) hesaplayacak kadar yüksek genlikli frekansları tespit ettiler.
- ✓ Bedding vd. (2010) çalışmalarında bu yıldızlardan kırmızı devler kolunun (RGB) dibinde yer alan düşük ışıyım güçlü Kırmızı Devlere ($v_{\max} > 100 \mu\text{Hz}$) odaklanmayı tercih ettiler. Bu yıldızlar için sismolojik parametreleri de hesaplayabildiler ($v_{\max}$, Δv , δv).

γ Dor Yıldızları



- ✓ Pop – I (genç, metalse zengin)
- ✓ Erken F-tayf türü yıldızlar
- ✓ **Kütle Aralığı:** $1.5 M_{\odot} - 1.8 M_{\odot}$ (Anakol)
- ✓ Radyal olmayan (non-radial) zonklamalar
- ✓ **Fotometrik Genlik** (ΔV) $\sim 0^m.1$
- ✓ **Zonklama Dönemi:** 0.5 – 3 gün (p-modu salınımlarinkinden uzun)
- ✓ Yüksek dereceli non-radyal g-modu salınımlar
- ✓ **Salınım Kaynağı (Driver):** Konvektif akının bloke edilmesi (convective flux blocking, Guzik et al. 2000, Dupres et al. 2005)
- ✓ Güneş-benzeri salınımlar?
- ✓ g-modu salınımların eş-dönem aralıklı modlara ayrılması beklenir.
- ✓ KIC11145123'de modların eş-dönemli aralıklara ayrılması ($\Delta P = 2100$ sn) gözlenmiştir (Bedding et al. 2014).



Tıpkı p-modu salınımlar için oluşturduğumuz gibi, g-modu salınımlar için de échelle diyagramları oluşturabiliriz. Ancak, p-modları eş-frekanslarla (ortalama büyük ayrışma) ayrışırken, g-modları **eş-dönemle** ayrılırlar ve ilişki doğrusal değildir ($\Delta P \propto 1 / (l(l+1))^{1/2}$). Burada **KIC11145123** için verilen tüm salınımlar aynı derece ($l = 1$) non-radyal salınımlardır. Ancak dönme (erken F-tayf türündeyiz!) nedeniyle ayrışma azimutal dereceyi ($m \neq 0$) de dikkate almamızı gerektirir. Bu nedenle $l = 1$ üçe ayrılmıştır ($l = 1$ **tripleti**). Semboller bu tripletten her birini, büyüklükleri ise tekil frekanslardaki genlikleri göstermektedir. Sağda modların tripletin farklı azimutal derece ($m = 0, 1$ ve $m = -1, 0$) ikilileri için zonklama frekanslarına karşılık dönem farklarını görüyoruz. (Bedding et al. 2014)

Kaynaklar

✓ Anakol Öncesi Zonklamaları :

- Casey, M.P. vd., 2013, “Constraints on Pre-Main-Sequence Evolution From Stellar Pulsations”, Precision Asteroseismology Proceedings, IAU Symposium #301

✓ Güneş-Benzeri Salınımlar:

- ✓ Bedding, T., 2011, “Solar-like Oscillations An Observational Perspective, Tim Bedding”, arXiv preprint
- ✓ Chaplin & Miglio, 2013, “Asteroseismology of Solar-Type and Red Giant Stars”, Ar&AA
- ✓ Hekker & Mazumdar 204, “Solar-like oscillations in subgiant and red-giant stars: mixed modes, IAUS, 301, 325

✓ γ Doradus Yıldızları:

- ✓ Bedding, T.R, 2014, “Echelle Diagrams and Period Spacings of G Modes in Gamma Dor Stars From Four Years of Kepler Observations”, arXiv preprint

Diğer Kaynaklar

- ✓ Bedding, T. vd., 2010, “Solar-like Oscillation in Low Luminosity Red Giants First Results from Kepler”, ApJ, 713, L176
- ✓ Baudin, F. vd., 2011, “Amplitudes and Lifetimes of Solar-like Oscillations Observed by CoRoT”, A&A, 529, A84
- ✓ Bedding, T. vd. 2011, “Replicated Echelle Diagrams in Asteroseismology A Tool for Studying Mixed Modes and Avoided Crossings”, arXiv preprint
- ✓ Christensen-Dalsgaard, J., 2011, “Asteroseismology of Red Giants”, arXiv preprint
- ✓ Mosser, B., 2011, “Red Giants Unveiled”, SF2A
- ✓ White, T.R. vd., 2011, “Asteroseismic Diagrams from a Survey of Solar-like Oscillations with Kepler, ApJ, 742, L3
- ✓ White, T.R. vd., 2011, “Calculating Asteroseismic Diagrams for Solar-like Oscillations”, ApJ, 743, 161
- ✓ Hekker, S. vd., 2012, “Solar-like Oscillation in Red Giants Observed with Kepler”, A&A, 544, A90
- ✓ Miglio, A. vd., 2012, “Solar-like Pulsating Stars as Distance Indicators G and K Giants in the CoRoT and Kepler Fields”, EPJ Web of Conferences, 19, 5012
- ✓ Mosser, B. vd., 2012, “Characterization of the Power Excess of Solar-like Oscillation in Red Giants with Kepler”, A&A, 537, A30
- ✓ Samadi, R.. vd., 2012, “Amplitudes of Solar-like Oscillations in Red Giant Stars”, A&A, 543, A120
- ✓ Mosser, B., 2013, “Red Giant Seismology Observations”, EPJ Web of Conferences, 43, 3
- ✓ Mosser, B. vd, 2013, “Asymptotic and Measured Large Frequency Separations”, A&A, 550, A126
- ✓ Hekker, S. vd., 2013, “CoRoT and Kepler Results on Solar-like Oscillators”, Adv. Sp. Res., 1581