

Güneş Benzeri Titreşim Yapan Yıldızların Temel Özelliklerinin Titreşim Frekanslarından Bulunması

Zeynep Çelik Orhan^{1*}, Mutlu Yıldız¹

¹Ege Üniversitesi, Astronomi ve Uzay Bilimleri Bölümü, İzmir

Özet

CoRoT (2006) ve Kepler (2009) uzay araçları ile çok sayıda yıldız için düşük genlikli Güneş benzeri titreşimler gözlenmiştir. Bu frekanslar ile yıldızların temel özellikleri arasında ilişkiler elde edilmiştir. Literatürde yapılan çalışmalarda genel olarak maksimum genlik ve büyük ayrılma nicelikleri kullanılmıştır. Bu çalışmada ise, büyük ayrılmadaki minimumların frekanslarının tanınal gücü keşfedildi. Yıldızların temel parametreleri olan kütle, yarıçap, ısıtma, yaş ve konvektif katmanın kütlesi ile bu minimum frekanslar arasında ilişkiler kuruldu. Böylece bu temel parametreler sadece sismik verilerle elde edildi. Ayrıca yıldız yapısı ve evrimi hakkında bilgi veren yeni bir asterosismik diyagram geliştirildi.

Anahtar Kelimeler: asteroseismology, Yıldızlar, Ötegezegenler

1 Giriş

Astrofizikğin temel amaçlarından biri yıldızların iç yapısını ve evrimini anlamaktır. Bu da ancak yıldızların temel parametrelerinin yüksek duyarlılıkla belirlenmesine bağlıdır. Tek yıldızlarda kütle, yarıçap gibi temel parametreler doğrudan gözlemler ile belirlenmemektedir. Asterosismoloji de, özellikle Güneş benzeri titreşim yapan yıldızlar için, geliştirilen yeni yöntemlerle titreşim frekanslarından kütle ve yarıçap belirlenebilmektedir. Bu çalışmada ise, bu titreşim frekanslarını kullanarak büyük ayrılmada görülen minimumlar ile yıldızların temel parametreleri arasında ilişkiler saptanmıştır (Yıldız ve ark. 2014).

Yıldızlardan gerek tayfçekker gerekse ışıkölçer yardımıyla alınan yegane bilgi kaynağı olan foton, doğrudan yıldızın yüzey katmanlarıyla ilgili bilgi taşımaktadır. Bu gözlem yöntemleriyle yıldızların tayf türü, sıcaklığı, rengi ve yüzey kütleçekim imesi ($\log g$) duyarlı bir şekilde belirlenebilir. Ancak bu yöntemlerle yıldızların yapısında ve evriminde başat role sahip olan kütle nin duyarlı olarak elde edilmesi oldukça zordur. Bu gözlem yöntemleri kullanılarak kütle, bazı yıldızlar için belirli yöntemler ile saptanabilir. Örneğin, değişen yıldızlar (parlaklığı zamanla değişim gösteren yıldızlar) ve çift yıldızların ışık ve dikine hız eğrilerindeki dönemsel ve/veya dönemsel olmayan değişimlerden faydalanarak kütle ve yarıçap belirli bir duyarlılıkla elde edilebilir. Ayrıca anakol yıldızlarının kütlesi, kütle-ısıtma bağıntısından dolaylı olarak belirlenebilir. Bunların dışında bir başka yöntem de astrofizikçiler tarafından oluşturulan yıldız iç yapı modelleridir. Bu modeller yapılırken yıldızın gözlemler ile belirlenen ısıtma (uzaklığı bilinen yıldızlar için), sıcaklık, $\log g$ ve renk ölçeği (B-V) vb. parametreleri kullanılır. Böylece bu gözlem parametreleri ile uyumlu modeller yapılır. Elde edilen bu kuramsal modellerden kütle ve yarıçap hatta belirlenmesi zor olan yaş da saptanabilir. Ancak yakın zamana kadar, yıldızların iç kısımlarını gözlenemediği için bu modellerin ne kadar gerçekçi olduğu test edilemiyordu. Günümüzde ise gelişen Güneş sismolojisi (helyosismoloji) ve yıldız sismolojisi (asterosismoloji) ile bu sorunlarda çözülmeye başlanmıştır. Bu sayede Güneş ve yıldızların gözlemlerinden elde edilen titreşimlerden faydalanarak başta özek olmak üzere iç katmanları ayrıntılı bir şekilde incelenebildi. Böylece

başta Güneş olmak üzere yıldızların yapısı hakkında yeni bilgiler elde edildi. Örneğin, heliosismoloji sayesinde, Güneş'in özeğe kadar dönme profili çıkartılıp diferansiyel dönmenin varlığı ve difüzyonun Güneş kütleli yıldızlarda oldukça önemli olduğu bulunmuştur. Ayrıca Güneş'in helyum bolluğu ve konvektif katmanın kalınlığı daha duyarlı bir şekilde belirlenmiştir (Basu ve Antia 1995, Basu ve Antia 1997).

Güneş'ten, bize oldukça yakın olduğu için, beş dakika gibi kısa bir gözlem süresinde binlerce farklı modda titreşim alınmaktadır. Bu sayede Güneş'in yüzeyi yanı sıra merkezi de ayrıntılı olarak incelenebilmektedir. Fakat diğer yıldızlar için yeryüzünden yapılan gözlemlerde bu hassasiyette verilerin alınması pek mümkün olmamaktadır. Bu nedenle uzaydan yapılan gözlemlere ihtiyaç duyularak CoRoT (2006) ve Kepler (2009) uzay araçları gönderilmiştir. Bu uzay araçlarından elde edilen gözlem verileriyle astrofizikçiler için yeni bir dönem başlamıştır. Bu verilerin ışığında gelişen yıldız sismolojisinin en büyük başarısı Güneş benzeri titreşim gözlenen tek yıldızların frekanslarından faydalanarak yıldızla ait temel parametrelerin (M , R , L , vb.) oldukça duyarlı bir şekilde belirlenmesidir. Kütle ve yarıçapın hesaplanmasında ölçeklendirme (scaling) ilişkisi türetilmiştir (Kjeldsen ve Bedding, 1995).

$$\frac{M}{M_{\odot}} = \left(\frac{\nu_{\max}}{\nu_{\max,\odot}} \right)^3 \left(\frac{\Delta\nu}{\Delta\nu_{\odot}} \right)^{-4} \left(\frac{T_{\text{eff}}}{T_{\text{eff}\odot}} \right)^{1.5} \quad (1)$$

$$\frac{R}{R_{\odot}} = \left(\frac{\nu_{\max}}{\nu_{\max,\odot}} \right) \left(\frac{\Delta\nu}{\Delta\nu_{\odot}} \right)^{-2} \left(\frac{T_{\text{eff}}}{T_{\text{eff}\odot}} \right)^{0.5} \quad (2)$$

Denklem (1) ve (2)'deki ν_{\max} (maksimum genliğe sahip olan frekans) ve $\Delta\nu$ (büyük ayrılma) değerleri, yıldızların ışık eğrilerinin analiziyle elde edilen frekanslar yardımıyla saptanmaktadır. Tayfsal gözlemlerle de yıldızların etkin sıcaklıkları elde edilmektedir. Güneş için bu gözlem değerleri $\nu_{\max}=3050 \mu\text{Hz}$, $\Delta\nu=135.15 \mu\text{Hz}$ ve $T_{\text{eff}}=5777 \text{ K}$ olarak alınmıştır.

Ölçeklendirme ilişkisi ile sadece gözlem verileri kullanılarak tek yıldızların kütle ve yarıçapı bulunabilir. Peki kütle ve yarıçap verilerini bulmak için kullanılan bu ölçeklendirme ilişkisi ne kadar iyi sonuçlar vermektedir? Denklem (1) ve (2)'de görüldüğü gibi kütle ve yarıçapın belirlenmesindeki belirsizlik ν_{\max} ve $\Delta\nu$ parametrelerinin bulunmasındaki belirsizliğe çok bağlıdır. Bugün de

* zeynep.celik@ege.edu.tr

dahil olmak üzere bu ölçeklendirme ilişkisinin doğruluğunun test edilmesi ve daha da iyileştirilmesi için çok sayıda çalışma yapılmaktadır (White ve ark. 2011, Chaplin ve Miglio 2013 vb.). Bu konuda en güncel çalışmalardan biri de White ve arkadaşları (2011) tarafından yapılmıştır. Çalışmalarında büyük ayrılmanın sadece yoğunluğun karekökü ile orantılı olmadığı ayrıca sıcaklığını da bir fonksiyonu olduğu belirtilmiştir. Böylece (1) ve (2) numaralı denklemlere yeni tanımlanan sıcaklığa bağlı bir fonksiyon da eklenmiştir. ν_{\max} için ise hesaplanan ve gözlenen değerlerine bakıldığında da özellikle büyük frekans değerlerde farklılaşma görülmüştür. Ayrıca Procyon gibi bazı F-tipi yıldızlarda ν_{\max} 'in tayfsal ve ışık eğrisinden elde edilen değerleri arasında oldukça büyük farklılıklar gözlenmiştir (Arentoft ve ark. 2008). Bu yüzden ölçeklendirme ilişkisindeki ν_{\max} 'in etkisi hala tartışılmaktadır. Bu çalışma kapsamında da tek yıldızların kütle ve yarıçapını daha iyi belirlemek amacıyla yeni ölçeklendirme ilişkileri türetilmiştir. Bunun için yıldız iç yapı modelleri kullanıldı. Bu iç yapı modellerinin frekans hesaplamaları yapıldı.

2 ANKİ Evrim Kodu ve Modellerin Özellikleri

2.1 ANKİ kodunun özellikleri

Sismik olarak incelenen modeller ANKİ (Ankara-İzmir, Ezer & Cameron 1965) evrim kodu ile hesaplandı. Konveksiyon, standart karışım uzunluğu kuramından (Böhrn-Vitense 1958) alındı. ANKİ evrim kodunda hidrojen ve helyum için Mihalas ve ark. (1990) geliştirdiği hal denklemini kullanarak Saha denklemi çözülmektedir. Radyatif saydamsızlık için OPAL (Iglesias & Rogers 1996) tablosu kullanıldı. Düşük sıcaklık için Ferguson ve ark. (2005) tablosu kullanıldı. Nükleer reaksiyon hızları Angulo ve ark. (1999) ve Caughlan & Fowler (1988) çalışmalarından alındı. Modellerde dönmenin (Yıldız 2003, 2005) ve mikroskobik difüzyonun (Yıldız 2011; Metcalfe ve ark. 2012) etkisi göz önünde bulundurulmadı. Difüzyonlu modeller, Güneş'in BiSON (Chaplin ve ark. 1999) gözlem frekansları ile model frekanslarını kıyaslamak için yapıldı.

2.2 Modellerin özellikleri

ANKİ evrim kodu kullanılarak $0.8 - 1.3 M_{\odot}$ kütle aralığı için $0.05 M_{\odot}$ aralıklar ile iç yapı modelleri yapıldı. Bu kod için Güneş kimyasal kompozisyonu hidrojen bolluğu (X) 0.7024 ve ağır element bolluğu (Z) 0.0172 olarak alındı. Güneş konvektif parametre (α) değeri 1.98 alındı.

Modellerden elde edilen merkez hidrojen bolluğu (X_c) 0.70, 0.53, 0.35 ve 0.17 değerleri için ADIPLS titreşim paketi (Chirstensen-Dalsgaard, 2008) kullanılarak adyabatik titreşim frekansları hesaplandı. Bu sayede farklı kütledeki aynı görelî yaştaki modeller birbiri ile kıyaslanabildi. Görelî yaş (t_{gor}), modellerden elde edilen anakol yaşının (t_{anakol}) farklı X_c 'deki yaşa (t) olan oranıdır ($t_{\text{gor}}=t/t_{\text{anakol}}$). Anakola oturduğu ilk an olan sıfır yaş anakol (SYAK) modelin t_{gor} değeri oldukça küçüktür ($X_c=0.7$). $t_{\text{gor}}=1$ olduğu durumda ise yıldız anakol terk etmek üzeredir. Diğer X_c değerleri için (0.53, 0.35 ve 0.17) sırasıyla t_{gor} değerleri yaklaşık olarak 0.30, 0.50 ve 0.75'tir.

3 Frekanslarda Görülen Minimumlar

Modellerden elde edilen frekans verileri tek tek ve gruplar halinde incelendi. Bu hesaplanan frekans verilerinden büyük ayrılma değerleri, radyal moddaki frekanslar için $n = 10-25$ aralığında hesaplanan fit yardımıyla belirlendi. Elde edilen büyük ayrılmaya

karşın frekans grafiği çizildiğinde iki tane yeni referans frekansı ($\nu_{\min 1}$ ve $\nu_{\min 2}$) tespit edildi. Bu düşmelerden yüksek frekansta görülene $\nu_{\min 1}$ düşük frekansta görülene de $\nu_{\min 2}$ olarak adlandırıldı. Daha sonra bu yeni referans frekansları Güneş'in BiSON gözlem verisi (Chaplin ve ark. 1999) ile kıyaslandı. BiSON gözlem verilerinde de bu düşmelere rastlandı. Gözlemler elde edilen $\nu_{\min 1} = 2600 \mu\text{Hz}$ ve $\nu_{\min 2} = 1900 \mu\text{Hz}$ civarında iken modeller de bu değerler $\nu_{\min 1} = 2555.18 \mu\text{Hz}$ ve $\nu_{\min 2} = 1879.52 \mu\text{Hz}$ olarak belirlenmiştir. Buradan gözlem ile model verilerin birbiriyle oldukça uyumlu olduğu görülmektedir.

Bu büyük ayrılmaya karşın frekans grafiğini aynı merkezi hidrojen bolluğuna sahip fakat farklı kütleler için çizildi. Bu durumda da minimum frekanslar ile kütle arasında bir ilişki elde edildi. Kütle arttıkça her iki minimum da daha kısa dalga boyuna kaydığı gözlemlendi. Buradan da kütle ile minimumlar arasında bir ilişki türetilmiştir (Yıldız ve ark. 2014).

$$\frac{M}{M_{\odot}} = \left(\frac{\nu_{\min 1} \nu_{\max, \odot}}{\nu_{\min 1, \odot} \nu_{\max}} \right) = \left(\frac{\nu_{\min 2} \nu_{\max, \odot}}{\nu_{\min 2, \odot} \nu_{\max}} \right) \quad (3)$$

Denklem (3)'de kütle ile minimum frekanslar arasında ilişki kuruldu. Ancak hesaplanan kütlelerin daha duyarlı olarak elde edilmesi için yeni yaklaşım geliştirildi.

$$\frac{M}{M_{\odot}} = \left(\left(\frac{\nu_{\min 1}}{\nu_{\min 1, \odot}} \right)^3 \left(\frac{\Delta\nu}{\Delta\nu_{\odot}} \right)^{-4} \left(\frac{T_{\text{eff}}}{T_{\text{eff} \odot}} \right)^{1.5} \right)^{1/4.26} \quad (4)$$

Bu denklem (4) aracılığı ile minimumlar kullanılarak elde edilen kütle ile model kütleleri oldukça uyumludur. Denklem (4) kullanılarak model kütleleri yaklaşık olarak %2 duyarlılık ile elde edildi. Gözlem verilerinden faydalanarak yıldızların kütlelerini duyarlı bir şekilde saptamak için minimumların duyarlı bir şekilde belirlenmesi, etkin sıcaklık ve büyük ayrılmanın oldukça düşük hata payları ile elde edilmesi gerekir.

Yarıçapı hesaplamak için kütleli belirlemedeki gibi minimum frekanslar kullanıldı. Böylece model yarıçapları da %1 gibi büyük bir duyarlılık ile hesaplandı.

$$\frac{R}{R_{\odot}} = \left(\frac{\nu_{\min 1}}{\nu_{\min 1, \odot}} \right)^{0.23} \left(\frac{\Delta\nu}{\Delta\nu_{\odot}} \right)^{-0.99} \quad (5)$$

Denklem (5)'te görüldüğü gibi model yarıçapları, sadece $\nu_{\min 1}$ ve $\Delta\nu$ kullanılarak oldukça duyarlı bir şekilde elde edilmiştir. Kütle ve yarıçap gibi yıldızın diğer temel parametreleri olan log g, konvektif katmanın kütlesi, ısıtma ve yaş hesaplanabilir.

Güneş benzeri titreşim yapan yıldızlar için, Chirstensen-Dalsgaard (1988) sismik HR diyagramını geliştirmiştir. Bu sismik HR diyagramın ile Güneş benzeri titreşim yapan yıldızların büyük ayrılma ve küçük ayrılma frekansları kullanılarak yıldızların oldukça duyarlı olarak anakol evrimi belirlenmektedir. Bu çalışmada ise yeni referans frekansları kullanılarak yeni bir asterosismik diyagram (AD) oluşturuldu. Böylece tespitleri oldukça kolay olan $\nu_{\min 1}$, $\nu_{\min 2}$ ve $\Delta\nu$ frekansları kullanarak temel parametreler elde edildi.

4 Sonuç

Bu çalışmada büyük ayrılmada görülen $\nu_{\min 1}$ ve $\nu_{\min 2}$ frekansları keşfedildi. Literatürde ölçeklendirme ilişkisi olarak bilinen kütle ve yarıçap ν_{\max} , $\Delta\nu$ ve T_{eff} ile bulunabilirken bu çalışmada bu iki yeni referans frekans ile bu bağıntılar yeniden türetilmiştir.

$\nu_{\min 1}$ ve $\nu_{\min 2}$ frekanslarının kütle, yarıçap, konvektif katmanın kütlesi, ısıtma, log g ve yaş gibi yıldızların temel parametreleri ile ilişkili olduğu bulundu. Bu durumda yeni bir

ölçeklendirme ilişkisi geliştirildi. Yeni türetilen ilişkilerde $\nu_{\min 1}$, $\nu_{\min 2}$, ν_{\max} , $\Delta\nu$ ve T_{eff} parametreleri kullanıldı. Bu sayede kütle ve yarıçap sırasıyla %2 ve %1 duyarlılıklar ile elde edildi.

Ayrıca bu çalışmada yeni asterosismik diyagram geliştirildi. Bu diyagramda dikey eksen büyük ayrılma yatay eksen de $\Delta\nu/\nu_{\min 1}$ olarak kabul edildi. Böylece yıldızların anakol evrimi hakkında bilgi veren yeni bir diyagram geliştirildi.

Bu çalışma farklı kütlelerdeki (0.8-1.30 M_{\odot}) Güneş kompozisyonundaki modellerin frekans analizleri üzerine yapılmıştır. Ancak değişen metal bolluğu ile bu ilişkilerin değişmesi söz konusudur. Buna benzer olarak hidrojen bolluğunun değişimine göre de türetilen bağıntılar yeniden gözden geçirilmelidir. Bu konuda yeni bir yayın için çalışma yapılmıştır (Yıldız ve ark. 2015). Daha sonraki çalışmalarda ise CoRoT ve Kepler uzay aracının gözlediği yıldızların frekanslarını kullanarak bu yıldızların temel parametreleri hakkında detaylı bilgi sahibi olmak hedeflenmektedir.

Teşekkür

Bu konuda hazırlanan yayın Prof. Dr. Dilhan Ezer Eryurt'a adanmış olup MNRAS (2014)'ta yayınlandı. Bu hazırlanan çalışma 112T989 numaralı TÜBİTAK projesi tarafından desteklenmiştir.

Kaynaklar

- Angulo C. et al., 1999, Nucl. Phys. A, 656, 3
Arentoft T. et al., 2008, ApJ, 687,
Basu S., Antia H. M., 1995, MNRAS, 276, 1402
Basu S., Antia H. M., 1997, MNRAS, 287, 189
Böhn-Vitense E., 1958, Z. Astrophys., 46, 108
Caughlan G. R., Fowler W. A., 1988, At. Data Nucl. Data Tables, 40, 283
Chaplin W. J. et al., 2011, Science, 332, 213
Christensen-Dalsgaard J., 1988, in Christensen-Dalsgaard J., Frandsen S., Proc. IAU Symp 123, Advances in Helio- and Asteroseismology, Reidel, Dordrecht, p. 295
Chaplin W. J., Christensen-Dalsgaard J., Elsworth Y., Howarth, Isak G. R., Larsen R. M., New R., Schou J. et al., 1999, MNRAS, 308, 405
Chaplin W. J., Miglio A., 2013, ARA&A, 51, 353
Christensen-Dalsgaard J., 2008, Ap&SS, 316, 113
Ezer D., Cameron A. G. W., 1965, Can J. Phys., 43, 1497
Ferguson J. W., Alexander D. R., Allard F., Barman T., Bodnarik J. G., Hauschildt P. H., Heffner-Wong A., Tamanai A., 2005, ApJ, 623, 585
Iglesias C. A., Rogers F. J., 1996, ApJ, 464, 943
Kjeldsen H., Bedding T. R., 1995, A&A, 293, 87
Metcalfe T. S. et al., 2012, ApJ, 748, L10
Mihalas D., Hummer D. G., Mihalas B. W., Dappen W., 1990, ApJ, 350, 300
White T. R., Bedding T. R., Stello D., Christensen-Dalsgaard J., Huber D., Kjeldsen H., 2011, ApJ, 743, 161
Yıldız M., 2003, A&A, 409, 689
Yıldız M., 2005, MNRAS, 363, 967
Yıldız M., 2011, MNRAS, 412, 2571
Yıldız M., Çelik Orhan Z., Aksoy Ç., Ok S., 2014, MNRAS, 441, 2148
Yıldız M., Çelik Orhan Z., Kayhan C., 2015, MNRAS, 448, 3689

Erişim:

014-1715: [UAK-2015 Program](#) --- [UAK Bildiri](#) --- [Turkish J.A&A](#).