

SİSMİK OLAN VE OLMAYAN VERİLERİN İŞİĞİNDA α CENTAURİ A VE B İÇİN İÇ YAPI MODELLERİ: KONVEKTİF PARAMETRENİN ZAMANA BAĞIMLILIĞI

Mutlu YILDIZ¹

Özet

α Centauri çift yıldız sistemi, bileşenlerinin yapısı üzerine en duyarlıklı gözlemsel kısıtlamalar (constraints) olan yıldız sistemlerinden birisidir. α Centauri A ve B'nin iç yapı modelleri için artık sismik kısıtlamalara da sahibiz. Sismik olmayan kısıtlamaları sağlayan modellere göre sistemin yaşı 8.9 milyar yıl iken, sismik kısıtlamalara göre 5.6-5.9 milyar yıl civarında bir yaş söz konusudur. α Centauri sistemi Güneş benzeri bileşenleri ile, Yıldız ve ark. (2006) tarafından Hyades yıldızlarının analizinden bulunan konvektif parametrenin yıldız kütesine olan bağımlılığını test etmek için de çok uygundur. Sismik olmayan kısıtlamalara dayanan modellere göre α Centauri A ve B'nin konvektif parametresi, sırasıyla, 2.10 ve 1.90'dır. Sismik kısıtlamalara uyan modellere göreyse, konvektif parametre α Centauri A için 1.64, B için 1.91 bulunmaktadır. Bu iki farklı görünümü dikkate alarak, konvektif parametrenin zamana (örtük) bağımlılığı için iki ayrı açıklama türetiyoruz. Bu açıklamalar Hyades için elde edilen açıklama ile uyumludur.

Anahtar Kelimeler: iç yapı, evrim, bolluk, görsel çift, yıldızlar: α Centauri

Abstract

The α Cen binary system is one of the well known stellar systems with very accurate observational constraints to structure of its component stars. In addition to the classical non-seismic constraints, we have also seismic constraints for the interior models of α Cen A and B. While we obtain 8.9 Gyrs for the age of the system for non-seismic constraints, the seismic constraints imply that it is about 5.6-5.9 Gyrs. The α Cen binary system with its solar type components is also very suitable for testing the stellar mass dependence of the mixing-length parameter for convection derived from the binaries of Hyades. The values of the mixing-length parameter for α Cen A and B are 2.10 and 1.90 for the non-seismic constraints. If we employ the seismic constraints together with the non-seismic constraints, we obtain 1.64 and 1.91 for α Cen A and B, respectively. By taking care of these two different aspects for the mixing-length parameter, we derive two expressions for its time dependence which are also compatible with the mass dependence of the mixing-length parameter derived from the Hyades stars.

Key Words: stars: interior -- evolution – abundances, binaries: visual, stars: individual: α Centauri

¹ Ege Üniversitesi, Fen Fakültesi, Astronomi ve Uzay Bilimleri Bölümü, 35100 Bornova İzmir
E_Posta: mutlu.yildiz@ege.edu.tr

1.Giriş

Her cisim kendince titreşim yapar. Buna yıldızlar da dahildir. Özellikle Güneş benzeri geç tip yıldızların bu titreşimleri onların yaşına ilişkin önemli veriler sunma potansiyeli göstermektedir. Bu tip küçük kütleli yıldızların evrimleri çok yavaş olduğundan, klasik verilerden yola çıkarak yaşa ilişkin bilgiye ulaşmak çok zor olduğundan, sismik yoldan elde edilen veri neredeyse seçeneksizdir (alternatifsizdir). Gökadamızın başlangıç ve daha sonraki evrelerinde oluşmuş sadece bu tür yıldızların hala var olduğunu düşünürsek bu bilgilerin yıldız astrofizini aşan bir öneme sahip olduğu daha açık bir şekilde algılanabilir.

Yakınlığından dolayı sismik verilerin potansiyelini en iyi değerlendirebileceğimiz yıldız sistemi, iki Güneş benzeri yıldız barındıran, görsel bir çift yıldız ve ikilinin etrafında dönen Yakın Centauriden oluşan, α Centauri sistemidir. Çift yıldız sistemini oluşturan yıldızların kütle, parlaklık ve yarıçapları [1,2,3] oldukça duyarlı bir şekilde saptanmış ve her iki yıldızın sismik özellikleri, sismik yoldan yaşın belirteci olan frekanslar arasındaki küçük ayrılmaları hesaplayabilecek kadar ayrıntılı olarak tayfsal yoldan gözlemlenebilmiştir [4,5]. Her iki yıldız için yaklaşık otuz farklı modda titreşim gözlemlenmiş ve bunların mod tayini yapılabilmektedir. Bu küçük ayrılmalar yıldızların nükleer özeğindeki fiziksel koşulların, özellikle ses hızı profilinin, oldukça duyarlı fonksiyonu olduğundan modeller üzerine çok ciddi kısıtlamalar getirmektedir.

Bir önceki bildiride belirtildiği gibi geri tip yıldızlardan oluşan bir sistem için iç yapı modellenmesinde gerekli olan girdi sayısı klasik yoldan belirlenen gözlemsel kısıtlamaların sayısından fazla olduğundan, biricik çözüm elde etmek, çok özel koşullar dışında, pek mümkün olamamaktadır. Bu bakımdan, önceki bildiride sunulan, Hyades yıldızları için keşfedilen konvektif parametre (α) ve yıldız kütlesi arasındaki bağıntı özel önem arz etmektedir. Bu sayede, eğer Hyades için elde edilen bağıntı farklı evrimsel süreçleri ve kimyasal içerikleri kapsayacak kadar genelleştirilebilirse, model girdilerinden konvektif parametre artık bir bilinmeyen olmayacak, yıldızın gözlenen özelliklerinden türetilebilecektir. Bu sonucun, α Centauri'nin bileşenleri gibi az-çok evrimleşmiş yıldızlarda test edilmesi gerekmektedir.

2. α Cen A ve B'nin Gözlemsel Özellikleri

2.1 α Cen A ve B'nin Klasik Gözlemsel Özellikleri

α Cen A ve B'nin kütlelerinin gözlemsel olarak saptanması üzerine bir çok çalışma yapılmıştır. Bu konuda özellikle Pourbaix'in farklı gruplarla yaptığı çalışmaları anmak gerekir. Adı geçen astrofizikçinin geniş bir grupla yapmış olduğu en son çalışmaya göre bu yıldızların kütleleri $M_A = 1.105 \pm 0.007 M_\odot$ ve $M_B = 0.934 \pm 0.007 M_\odot$ [1] olarak saptanmıştır. Yarıçaplar ise Kervella ve ark. [3] tarafından girişimölçer yoluyla $R_A = 1.224 \pm 0.003 R_\odot$ ve $R_B = 0.863 \pm 0.005 R_\odot$ olarak bulunmuştur. Yarıçap değerleri için verilen belirsizliklerin gerçek hatalar değil bir çeşit standart sapma olduğunu belirtmekte yarar vardır.

Bu yıldızların renk ve parlaklıkları üzerine de bir kaç çalışma yapılmıştır. Klasik UBV filtreleri ile yapılan ölçümlerden ikisini anmak yararlı olacaktır. Bunlardan ilki Hoffleit ve Jaschek'e [6] aittir ve $V_A = -0.01$, $V_B = 1.33$, $(B-V)_A = 0.71$, $(B-V)_B = 0.88$ değerleri verilmektedir. Bu değerler tayfsal yoldan elde edilen etkin sıcaklıklarla ve girişimölçerden elde edilen yarıçaplarla uyumlu değildir. İkinci ölçüm ise Bessel [2] tarafından yapılmıştır: $V_A = 0.01$, $V_B = 1.34$, $(B-V)_A = 0.633$, $(B-V)_B = 0.84$. Bu değerler hem diğer gözlemsel verilerle uyumludur hem de dönüşüm tablolarından yıldızların yüzeyindeki ağır element bolluklarını hesaplayabilecek kadar elverişli görünmektedir. İlginçtir ki, Bessel'in bu güzel ölçümleri α Cen A ve B'nin içyapı modellenmelerine dayanan hiç bir çalışma tarafından ya fark edilmemiş ya da dikkate alınmamıştır.

Bessel'in kadir değerlerini ve Söderhjelm'in [7] verdiği ıraksınımı kullanarak, mutlak parlaklıkları $M_{VA} = 4.37$ ve $M_{VB} = 5.707$ olarak buluruz. Bu mutlak parlaklıkları ve diğer gözlenen özellikleri kullanarak, Lejeune ve ark.'nın [8] dönüşüm tablolarından $(BC)_A = -0.102$, $(BC)_B = -0.223$ buluyoruz. Böylece, $L_A = 1.544 L_{\odot}$ ve $L_B = 0.507 L_{\odot}$ elde ediyoruz. Renklerin metal bolluğuna duyarlılığından dolayı her iki yıldızın yüzeyindeki metal bolluğunu da saptamak mümkündür: Güneş bolluğuna göre, birinci bileşen için $0.074 dex$, ikinci bileşen için $0.125 dex$. Dönüşüm tablolarındaki standart metal bolluğunu $Z = 0.02$ kabul edersek, $Z_A = 0.0237$ ve $Z_B = 0.0267$ buluruz. Burada, iki yıldızın yüzey metal bolluklarının birbirinden farklı olması, daha net bir ifadeyle Z_B 'nin Z_A 'dan 0.003 kadar fazla olması dikkat çekicidir ve oldukça anlamlıdır. Çünkü, yayılmanın etkisiyle α Cen A'nın yüzeyindeki metal bolluğu B'ninkine göre daha hızlı bir şekilde azalmaktadır. Yerine göre, metal bollukları arasındaki bu fark bile sistemin yaşı için iyi bir belirteç olarak görülebilir. Bu meyanda, her türlü aracı kullanmakta çaba göstermeliyiz.

2.2 α Cen A ve B'nin sismik gözlemsel özellikleri ve sismik HR diyagramı

Asimtotik ilişkiden biliyoruz ki, yıldızların titreşimleri ile çapsal mertebeleri (n) ve derecesi (l) arasında

$$v_{nl} = \left(n + \frac{l}{2} + \alpha_n\right) \Delta v_0$$

ilişkisi geçerlidir. n 'yi bir azaltıp l 'yi iki arttırsak, $v_{n-1, l+2}$ frekansını ifade etmiş oluruz ki, bu iki frekans asimtotik ilişki gereği birbirine çok yakındır. Daha önemlisi, frekanslar arasındaki küçük ayrılmalar olarak adlandırılan,

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

bu iki frekans arasındaki fark evrime çok duyarlıdır [9]. Frekanslar arasındaki büyük ayrılmalar ise

$$\Delta v_0 = v_{n0} - v_{n-1, 0}$$

yıldızın ortalama yoğunluğunu ifade etmektedir. Frekanslar arasındaki küçük ayrılmaları aşağıdaki ilişkide verilen D_0 ile de ifade edebiliriz:

$$v_{nl} = \left(n + \frac{l}{2} + \alpha_n\right) \Delta v_0 - l(l+1)D_0$$

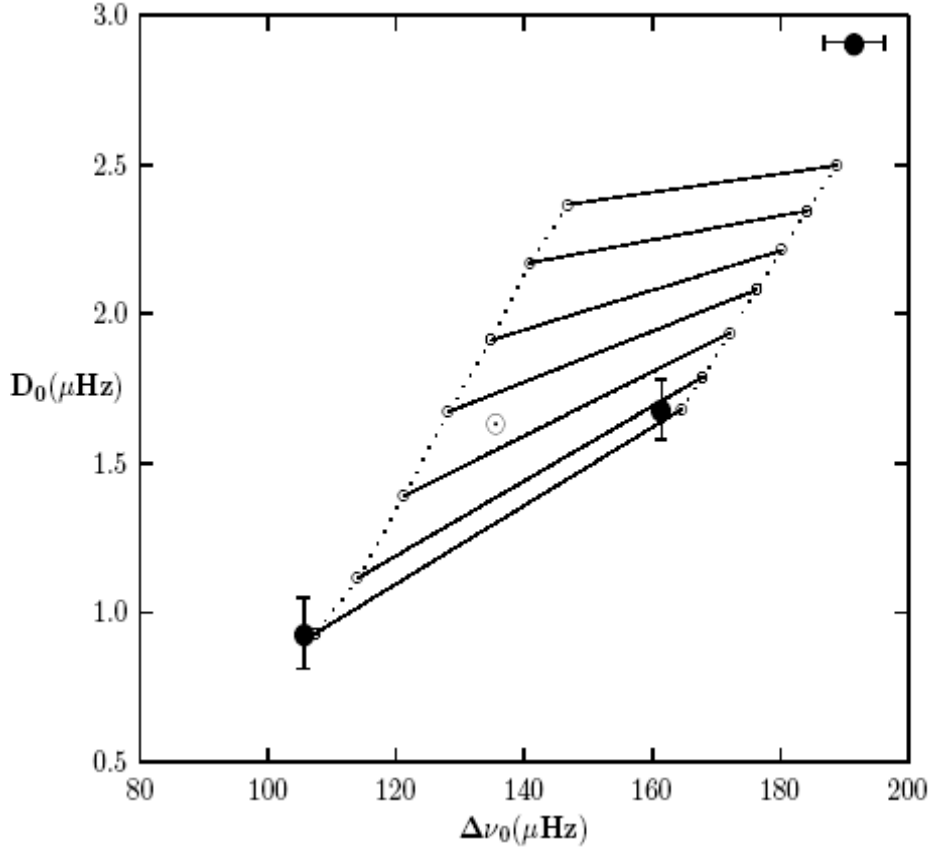
Yatay eksenin Δv_0 , dikey eksenin ise D_0 olduğu diyagram sismik HR diyagramı olarak adlandırılmakta ve klasik HR diyagramı gibi, hatta daha fazlasını, yıldızların evrimine ve yapısına ilişkin bilgiyi bize sunmaktadır.

α Cen A'nın gözlenen sismik [4] özellikleri $D_0 = 0.93 \mu\text{Hz}$ ve $\Delta v_0 = 105.5 \mu\text{Hz}$ değerlerini vermektedir. α Cen B'nin gözlenen sismik [5] özelliklerinden ise $D_0 = 1.69 \mu\text{Hz}$ ve $\Delta v_0 = 161.1 \mu\text{Hz}$ bulunmaktadır.

2.3 α Cen A ve B'nin Sismik Gözlenen Kimyasal Özellikleri

α Cen A v B'nin kimyasal bolluklarının tayfsal yoldan belirlenmesi üzerine bir çok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmaların çoğu, yıldızlarda pek bol bulunmayan Fe ve/veya benzer elementlerin bolluklarının bulunmasıyla uğraşmaktadır. Az bulunan elementlerin yanı sıra oksijen, karbon ve azot gibi normal yıldızlarda en bol bulunan ağır elementlerin de bolluklarının hesaplandığı en kapsamlı çalışmalar Neuforge-Verheecke ve Magain [10] ve Feltzing ve Gilmore [11] tarafından yapılmıştır. Her iki çalışmada da ortalama ağır element bolluğu $0.25 dex$ civarında bulunmaktadır. Ancak, Güneş'in tayfsal yoldan hesaplanan element bolluğunda bile radikal değişiklikler olagelmektedir [12]. Bu nedenle, diğer yıldızların da bolluklarına ilişkin kesin değerler vermekten sakınmak yerinde olacaktır. Hem

saydamsızlık (opasite) hem de hal denklemindeki ağır element karışımı için Feltzing ve Gilmore'un verdiği değerleri aldık.



Şekil 1. α Cen A ve B için sismik kısıtlamalara uyan modellerin sismik HR diyagramındaki izi. Kıyaslama amacıyla her iki yıldızın ve Güneş'in gözlemlendiği konularda işaretlenmiştir. En tepedeki düz çizgi sıfır-yaş-ana-kola çok yakındır ($t=100$ My). Daha alttaki düz çizgilerin her biri, en alttaki hariç, 1Gy'lık bir artışa denk gelmektedir. Gözlemlerle uyumlu olan düz çizgi ise 5.7 Gy'ı göstermektedir.

3.Modeller

Model özellikleri genel olarak bir önceki bildirimde verildiği gibidir. Bu çalışmada saydamsızlık için OPAL96 [13] kullanılmıştır. Sistemin yaşı yayılma (diffüzyon) işleminin gözönünde tutulmasını gerektirecek kadar olduğundan, Thoul ve ark.'nın [14] yayılma katsayısı kullanılarak hidrojen ve ağır elementlerin yayılması hesaba katılmıştır.

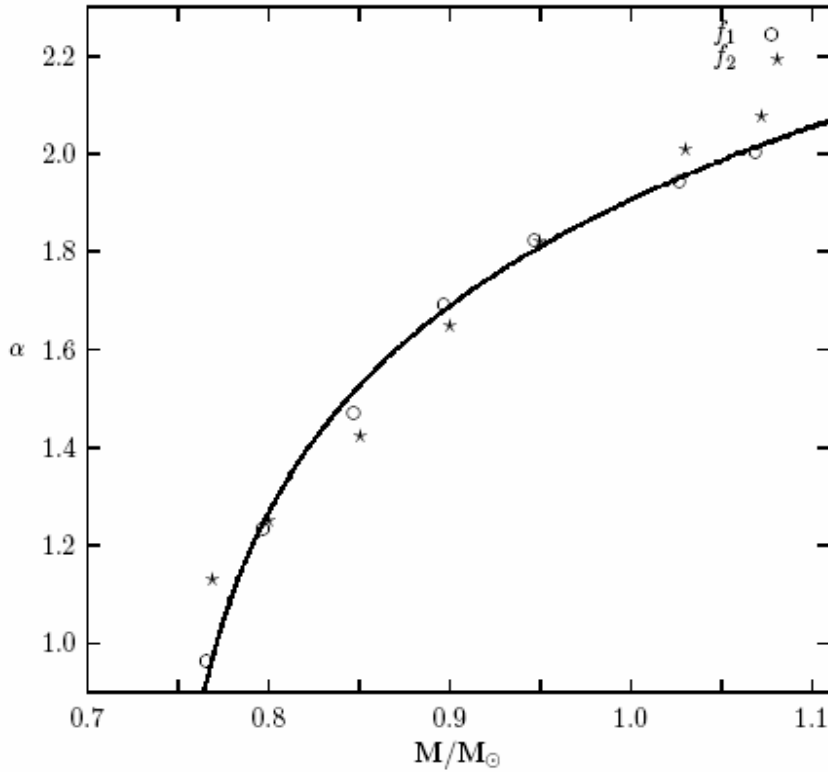
4.Çözüm Yöntemi ve Bulgular

4.1 Sismik Olmayan Kısıtlamaları Sağlayan Modeller

Beş bilinmeyen (X , Z , yaş ve her iki bileşenin konvektif parametresi α) bulabilmek için L_A , L_B , R_A ve R_B için dört denklem yazabiliriz. Çözüm için gerekli olan beşinci denklemi yüzeyde gözlenen (Z/X) oranı için yazıyoruz. α Cen A'nın (Z/X) oranını 0.0237 olarak elde edilen çözüm ve oluşturulan model Tablo 1'in ilk iki satırında verilmiştir (Model NOS). Sismik olmayan verilere göre sistemin yaşı 8.88 Gy'dır ve α Cen A ana-kol ömrünün sonuna çok yakındır. Sismik veriler kısıtlama olarak kullanılmadığından doğal olarak bu modeller sismik verilerle uyumlu değildir. Hem α Cen A'nın hem de B'nin modelinden elde edilen D_0 gözlenen değerden oldukça düşüktür. Ayrıca, α Cen A'nın konvektif parametresi B'ninkinden daha büyüktür.

Tablo 1 Sismik ve klasik kısıtlamalara uyan modellerin temel özellikleri. Son iki satır gözlemsel kısıtlamaları vermektedir.

Star	L/L_{\odot}	R/R_{\odot}	T_{eff}	X_0	Z_0	Z_8	$(Z/X)_8$	α	$t(10^9 \text{y})$	$\delta\nu_{02}$	$\delta\nu_{13}$	D_0	$\Delta\nu_0$	α	MODEL
A	1.545	1.224	5822	0.703	0.0328	0.0237	0.0316	2.10	8.88	2.7	.....	0.45	106.5	FG2001	NOS
B	0.507	0.864	5246	0.703	0.0328	0.0267	0.0364	1.90	8.88	6.6	15.8	1.30	164.6	FG2001	NOS
A	1.545	1.224	5822	0.669	0.0322	0.0237	0.0316	1.64	5.70	5.57	.....	0.93	107.4	FG2001	SIS
B	0.584	0.863	5436	0.669	0.0322	0.0271	0.0388	1.91	5.70	9.15	18.6	1.68	164.6	FG2001	SIS
B	0.506	0.862	5248	0.669	0.0322	0.0271	0.0389	1.58	5.70	9.50	19.0	1.74	163.5	FG2001	SIS914
A	1.544	1.224	5824	.....	.....	0.0237	0.0317	.....	.....	5.6	.....	0.93	105.6	.....	obs
B	0.507	0.863	5250	.....	.....	0.0267	0.0387	.....	.....	10.14	16.73	1.69	161.5	.....	obs



Şekil 2. Farklı kütlelere sahip yıldızların konvektif zarflarının yapısal özelliklerine bağlı olarak öngördükleri α değerleri. Örnek olarak Hyades yıldızları seçilmiştir. Sürekli çizgi bu yıldızlar için bir önceki bildiriye verilen bağıntıyı temsil etmektedir.

Bu modeller için hesaplanan 8.88 Gy'a çok yakın bir yaşı del Peloso ve ark. tarafından gökada ince diski için bulmuşlardır. Onların yaş belirlemesi, α Cen A ve B de dahil, 26 yıldızın Th'un Eu'a bolluk oranlarına dayanmaktadır.

4.2 Sismik kısıtlamaları sağlayan modeller

Sismik olmayan verileri sağlayan modellerin sismik özellikleri ile gözlemsel verilerin kıyaslanmasından anlıyoruz ki, sismik verilerin ifade ettiği yaş çok daha az olmalıdır. Fakat, bu durumda da, modellerin gözlenen L_A ve L_B yi eş zamanlı olarak sağlama olanağı ortadan kalkmaktadır. Bu nedenle, α Cen B modelinin ışınım gücünü gözlenen değerlere karşılaştırma işlemi göz ardı ettik. Bu durumda elde ettiğimiz çözüm ve modeller Tablo 1'deki üçüncü ve dördüncü satırlarda verilmektedir. Sistemin yaşı sismik verilere göre 5.7-5.9 Gy civarında bir yaşa sahiptir.

Bu modellerin sismik HR diyagramındaki evrimleri Şekil 1’de çizilmiştir. Noktalı çizgiler her iki yıldızın modellerinin evrimsel izini temsil etmektedir. Sıfır-yaş-ana-kol (SYAK) en tepedeki düz çizgiye çok yakındır ($t=100\text{My}$). Her bir düz çizgi, en alttaki düz çizgi hariç, 1Gy’lık bir artışı ifade etmektedir. Gözlemlerle (dolu daireler) uyumu dikkat çeken en alttaki düz çizgi ise sistemin bulunan yaşına, 5.7 Gy’a denk gelmektedir. Kıyaslama amacıyla Güneş’in diyagramdaki gözlemsel konumu da [15] işaretlenmiştir.

Sismik olmayan kısıtlamaları sağlayan modellerin tersine, α Cen A’nın konvektif parametresi B’ninkinden daha küçüktür. Bu sonuçta, B’nin model ışınım gücünün gözlenenenden %15 daha fazla olması etkili olmuş olabilir. Bu fazlalık eğer B’nin kütesinin farklı bulunmasından kaynaklanıyor olsaydı uyum için gereken kütle ne olurdu sorusunun yanıtı beşinci satırda verilmektedir: $M_{B,\text{uyum}}=0.914 M_{\odot}$. Ancak, gözlemsel açıdan gözönünde tutmamız gereken başka olasılıklar da söz konusudur; örneğin B’nin yarıçapının olduğundan daha küçük ölçülmesi gibi bir sonuç ölçümlerden türetilen ışınım gücünün gerçek ışınım gücünden daha küçük çıkmasına neden olur. Kuramsal açıdan düşünecek olursak, yıldızların iç kısımlarında standart modellerde gözönünde tutmadığımız bir takım işlemlerin modellerle gözlemler arasındaki uyumu engellediğini akıldan çıkarmamakta yarar vardır.

5. Konvektif Parametrenin Zamana Bağlılığı Üzerine

Hyades’in yıldızları için elde edilen konvektif parametre ile yıldız kütesi arasındaki bağıntıdan α Cen A ve B’nin konvektif parametrelerini $\alpha_A= 2.06$ ve $\alpha_B= 1.78$ olarak buluyoruz. Sismik olmayan kısıtlamalara uyan modellerde is A’nın konvektif parametresi bağıntıdan elde edilene çok yakinken B’ninki oldukça farklıdır: $\alpha_A= 2.10$ ve $\alpha_B= 1.90$. Modellerinki bağıntıdan elde edilenden fazla olduğundan zamanla bir artış olabilir düşüncesine meyil edilmesi çok şaşırtıcı olmaz. Sismik kısıtlamaları sağlayan B modelinin konvektif parametresi önceki modeldeki ile aynı olmasına karşın A modelininkinde ciddi bir azalma olmaktadır; $\alpha_A= 1.64$. Acaba, B’nin konvektif parametresi zamanla artarken A’nınki azalıyor mu?

Bu sorunun yanıtını araştırabilmek için Hyades yıldızları için elde edilen bağıntılara dönelim ve bu sefer o yıldızlar için bulunan konvektif parametreleri yıldız kütesi yerine konvektif zarfı betimleyen fiziksel nicelikler cinsinden ifade edelim. Çeşitli denemelerin sonucunda her bir yıldızın konvektif parametresi için benzer değerleri veren iki ayrı ifade elde ettik:

$$f_1 = 2.5 - \rho_{bcz} \left(\frac{2.7}{T_{6,bcz}} \right)^4 - \rho_{ph} \left(\frac{1.4}{T_{5,ph}} \right)^4,$$

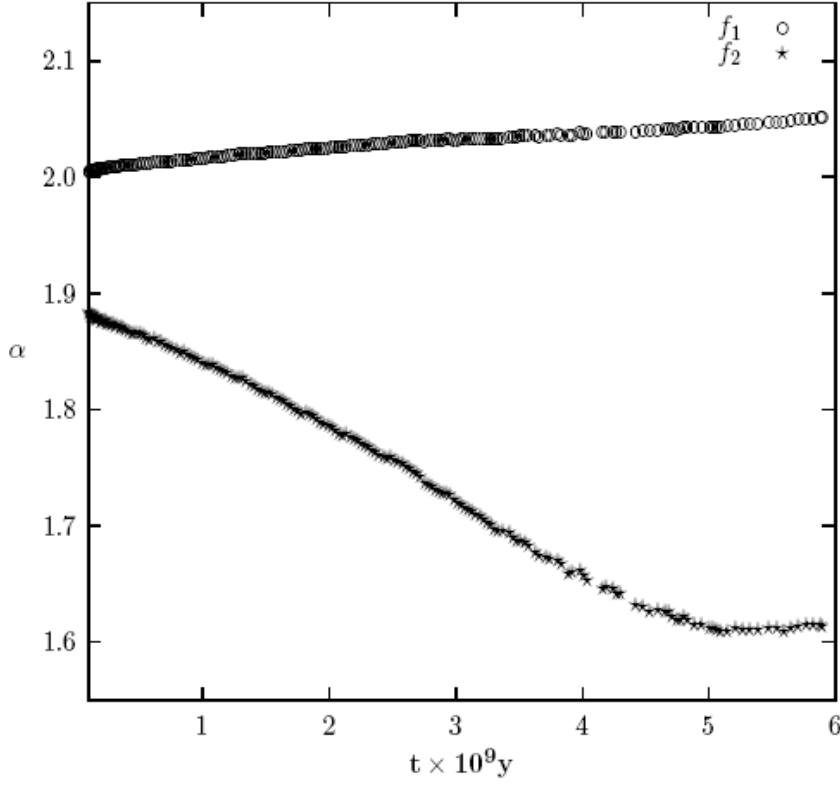
ve

$$f_2 = \frac{3.25}{\rho_{bcz}^{0.8}} - \rho_{bcz} \left(\frac{M_{bcz}}{r_{bcz}^2} \right)^{0.5} \left(\frac{T_{6,bcz}}{3.8} \right)^4.$$

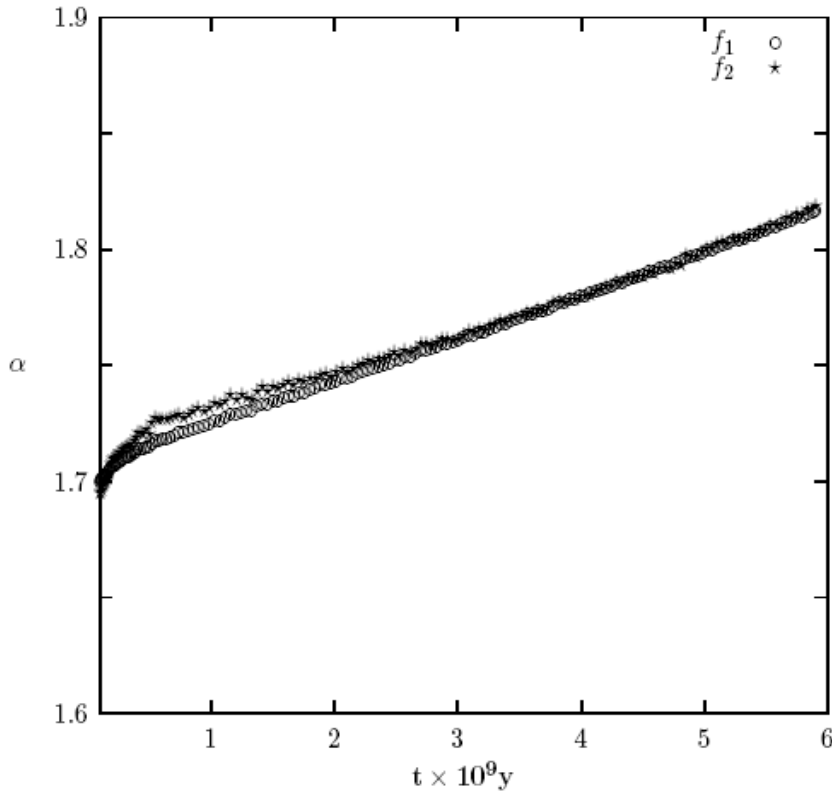
Bu açıklamalardaki alt indisler bcz konvektif zarfın tabanını, ph ise ışıküreyi temsil etmektedir. r_{bcz} konvektif bölgenin taban yarıçapını, M_{bcz} ise bu yarıçapa sahip kürenin içerdiği toplam kütle göstermektedir. Her iki nicelik Güneş biriminde yazılmıştır. Bu iki fonksiyonun Hyades yıldızları için öngördüğü α değerleri Şekil 2’de çizilmiştir. Kıyaslama amacıyla yıldız kütesine bağlı açıklama sürekli çizgi ile çizilmiştir.

Hyades’in SYAK’a yakın geri tip yıldızlarının konvektif parametresi için çok yalın sonuçlar veren bu iki fonksiyon örtük bir şekilde de olsa α ’nın zamana bağlılığını ifade etmektedir. Çünkü, evrim ilerledikçe konvektif zarfın fiziksel yapısı değişecektir, bu da α ’nın değişmesi demektir. Şekil 3’te α Cen A modeli için f_1 (daire) ve f_2 ’den (yıldız) hesaplanan α değerleri zamanın fonksiyonu olarak çizilmiştir. f_1 sismik olmayan kısıtlamalara uyan

modellerle uyumlu bir şekilde zamanla konvektif parametrede artış öngörürken, f_2 sismik verilere uyan modellere uygun olarak zamanla azalış göstermektedir. α Cen B için her iki açıklama da hemen hemen aynı sonucu vermektedir (Şekil 4).



Şekil 3. f_1 ve f_2 bağıntılarının α Cen A için öngördüğü α 'nın zamanla değişimi



Şekil 4. f_1 ve f_2 bağıntılarının α Cen B için öngördüğü α 'nın zamanla değişimi

6.Sonuç

α Centauri sistemi için sismik ve klasik gözlemsel kısıtlamalar birbirinden oldukça farklı yaşlar vermektedir. İlk grupta yer alan kısıtlamalardan sistemin yaşı 5.7-5.9 Gy civarında bulunurken, ikinci gruptakiler 8.9 Gy gibi oldukça büyük bir yaş vermektedir. Th/Eu oranından galaktik ince diskin yaşının da 8.9 Gy bulunması dikkat çekicidir.

α Cen A ve B'nin modellerini sismik ve klasik verilerin tamamını eş zamanlı olarak gözlemlerle maalesef uyumlulaştırılamıyoruz. Bu sorunun, kaynağı gözlemsel sonuçlar olabileceği gibi, örneğin α Cen B'nin kütlesi veya yarıçapı ölçülenden daha farklı ise, kuramsal bir eksiklikten de kaynaklanmış olabilir.

Hyades yıldızları için türetilen konvektif parametre ile yıldız kütlesi arasındaki bağıntının daha yaşlı yıldızlardan oluşan α Cen sisteminde nasıl bir hal aldığını araştırdık ve daha önceki bağıntıyı da kapsayan ve daha genel olan iki ayrı bağıntı elde ettik. Bunlardan birisi α Cen A modeli için zamanla artan α verirken diğeri azalmayı öngörmektedir. Bu iki bağıntının α Cen B için öngördükleri ise hemen hemen aynıdır. Bu bağlamda netleşme sağlamak için başka yıldız sistemlerinin de araştırılması gerekmektedir.

Kaynaklar

- [1] Pourbaix, D., Nidever, D., McCarthy, C., Butler, R.P., Tinney, C.G., Marcy, G.W., Jones, H.R.A., Penny, A.J., Carter, B.D., Bouchy, F., ve 5 yazar 2002, A&A, 386, 280
- [2] Bessell, M.S. 1990, A&AS, 83, 357
- [3] Kervella, P., Thevenin, F., Segransan, D., Berthomieu, G., Lopez, B., Morel, P., Provost, J. 2003, A&A, 404.1087
- [4] Bouchy, F., Carrier, F. 2002, A&A, 390, 205
- [5] Kjeldsen, H., Bedding, T.R., Butler, R.P., Christensen-Dalsgaard, J., Kiss, L.L., McCarthy, C., Marcy, G.W., Tinney, C.G., Wright, J.T. 2005, ApJ, 635, 1281
- [6] Hoffleit D., Jaschek, C. 1982, The Bright Star Catalogue, Yale University Observatory, New Haven, 4. baskı
- [7] Söderhjelm, S. 1999, A&A, 341, 121
- [8] Lejeune, T., Cuisinier, F., Buser, R. 1998, A&AS, 130, 65
- [9] Christensen-Dalsgaard, J. 1988, Advances in Helio- and Asteroseismology, IAU Symposium, No. 123, Ed. J. Christensen-Dalsgaard ve S. Frandsen, p.295
- [10] Neuforge-Verheecke, C., Magain, P. 1997, A&A, 328, 261
- [11] Feltzing, S., Gonzalez, G. 2001, A&A, 367, 253
- [12] Asplund, M., Grevesse, N., Sauval, A.J. 2005, Cosmic Abundances as Records of Stellar Evolution and Nucleosynthesis, ASP Conference Series, Vol. 336, Ed. F.N. Bash ve T.G. Barnes, San Francisco, p.25
- [13] Iglesias, C.A., Rogers F.J. 1996, ApJ, 464, 943
- [14] Thoul, A., Bahcall, J.N., Loeb, A. 1994, ApJ, 421, 828
- [15] Chaplin, W.J., Elsworth, Y., Isaak, G.R., Miller, B.A., New, R. 1999, MNRAS, 308, 424