

# Açık Küme Üyesi Kırmızı Dev Yıldızların Kimyasal Analizi

Gamze Böcek Topçu<sup>1\*</sup>, Melike Afşar<sup>1</sup>, Chris Sneden<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Ege Üniversitesi, Astronomi ve Uzay Bilimleri Bölümü, İzmir

<sup>2</sup> The University of Texas, Department of Astronomy and McDonald Observatory, Austin

## Özet

Bu çalışmada, NGC 752 açık küme üyesi 10 kırmızı dev yıldızın kimyasal bolluk analizi ve NGC 6940 açık yıldız kümesinin ön analiz sonuçları sunulmaktadır. Model atmosfer parametreleri, Fe I, Fe II, Ti I ve Ti II çizgilerinin eşdeğer genişlikleri ölçülerek belirlenmiştir. Sentetik analiz yöntemiyle belirlenen lityum bolluğu 6707 Å rezonans çizgisinden, oksijen bolluğu ise yasaklanmış [O I] 6300 Å çizgisinden belirlenmiştir. Karbon ve azot bollukları da sentetik analiz yöntemiyle elde edilmiştir. Karbon bolluğu 4311 ve 4325 Å dalga boyu aralığındaki G-bandı ile 5160 ve 5631 Å'da bulunan C<sub>2</sub> Swan bandlarından bulunmuştur. Azot elementinin bolluğu 7995–8040 Å aralığındaki <sup>12,13</sup>CN kırmızı-sisteminden belirlenmiştir. Çalışmamızın önemli hedeflerinden biri olan <sup>12</sup>C/<sup>13</sup>C izotop oranı da aynı sistemdeki yaklaşık 8004 Å'da bulunan <sup>12</sup>CN ve <sup>13</sup>CN çizgi oranlarından tespit edilmiştir. Çalışmada ayrıca, alfa (Mg, Si, Ca), hafif tek-Z (Na, Al), Fe-grubu (Sc, V, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zn), n-yakalama (Y, La, Nd, Eu) elementlerinin bollukları eşdeğer genişlik ya da sentetik analiz yöntemi kullanılarak belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** stars: abundances, Yıldız Tayfı

## 1 Giriş

Klasik yıldız evrim kuramında (ör. Iben 1967), yıldız anakoldan ayrılıp kırmızı dev kolu'na (RGB) doğru evrimleşirken konvektif zarfı yıldızın iç kısımlarına doğru genişler ve lityum, berilyum ve bor bolluklarında ilk seyreltmeye (dilution) neden olur. Yıldız içlerine doğru genişleyen konvektif katmanın H yanmasından sonra ortaya çıkan işlenmiş maddeye ulaşması ve bu işlenmiş maddeyi yüzeye taşıması ile birinci tırmıklama (first dredge-up) meydana gelir. Birinci tırmıklama, özellikle C ve N yüzey bolluklarını değiştirir; <sup>13</sup>C ve <sup>14</sup>N bolluklarını artırırken <sup>12</sup>C bolluğu ve <sup>12</sup>C/<sup>13</sup>C izotop oranı azalır (ör. Charbonnel et al. 1998; Gratton et al. 2000, ve referansları). Bolluklardaki bu değişimlerin miktarı ise başlangıç kütlesi ve metal oranı ile ilişkilidir (ör. Sweigart et al. 1989; Charbonnel 1994). Birinci tırmıklamadan sonra konvektif zarf, yozlaşmış He çekirdeği saran aktif H-yanma kabuğundan yüzeye doğru geri çekilmeye başlar ve bu aşamadan sonra klasik kurama göre RGB evrimi sırasında yüzey bolluklarında başka değişimler beklenmez.

Ancak konveksiyonun tek karşım mekanizması olduğu standart evrim modeli tüm gözlemsel detayları açıklayamamaktadır. Gözlemsel sonuçlar, beklenmemesine karşın, ıştırma fonksiyonu tümseğinden (luminosity bump function, LBF) hemen sonra yüzey bolluklarında daha fazla karşım işlemi gerektiren sonuçlar göstermektedir. N bolluğu beklenenden daha fazla artarken Li ve C bolluğu ile <sup>12</sup>C/<sup>13</sup>C oranı daha fazla azalmaktadır. Bu etki, alan yıldızlarında, açık ve küresel kümelerde, metalce çok fakir devlerde, LMC ve Sculptor gibi farklı gökadalarda gözlenmiştir. Bu sonuçlar aslında ekstra karşımın konumdan ya da başlangıç metal oranından bağımsız, RGB yıldızlarının kendi evrimlerinden kaynaklanan evrensel bir etki olduğunu göstermektedir.

Gözlem sonuçları ve kuramsal çalışmalar arasında iyi bir karşılaştırma yapabilmek için yıldız kütlelerinin iyi bir şekilde belirlenmesi gerekir ki bu da alan yıldızları için zorlu bir iştir. Açık ve küresel kümelerdeki yıldızlar bu tip bir karşılaştırma için daha iyi adaylardır çünkü aynı kimyasal bileşim ile aynı yaşta

ve uzaklıkta oluşurlar. Renk-parlaklık diyagramlarına izokronlar uygulanarak küme üyelerinin sıcaklık, ıştırma, evrim durumu ve kütleleri alan yıldızlarına göre daha duyarlı öngölebilir. Bu bilgiler sayesinde küme üyesi yıldızların bolluk analizleri daha duyarlı bir şekilde yapılarak model atmosferleri çok daha net bir biçimde belirlenebilir. Bu konudaki ilk çalışma Gilroy (1989) tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada 20 Gökada açık kümesindeki dev yıldızlara ilişkin <sup>12</sup>C/<sup>13</sup>C oranları belirlenmiş, geniş yaş aralığını kapsayan gözlem verilerinden daha yaşlı kümelerdeki dev yıldızların genç küme üyelerine göre önemli ölçüde daha fazla karşım geçirdiği sonucuna varılmıştır. Bu yaşlı devlerin <sup>12</sup>C/<sup>13</sup>C oranları da kuramsal beklentilerden çok daha düşüktürler, bir şekilde birinci tırmıklama evresinde beklenilenden daha fazla karşım geçirmiş olmalıdır. Gilroy (1989) çalışmasının bir diğer sonucu da kütlesi ≈2.2 M<sub>⊙</sub>'den az olan küçük kütleli yıldızların daha fazla karşım uğramış olmalarıdır. Sonucun neden kuramsal beklentilerle uyuşmadığı ise bu çalışmadan günümüze kadar bir çok araştırmacı tarafından gözlemsel ve kuramsal olarak incelenmiştir (ör. Charbonnel & Lagarde 2010, ve referansları).

Bu çalışma ile amacımız, yüksek çözünürlük ve sinyal/gürütü oranına sahip tayf gözlemlerini yaptığımız NGC 752 kümesinin üyesi olan 10 adet kırmızı dev (RG) yıldızın dikine hızlarını (RV) ölçerek küme üyesi olup olmadıklarını test ettikten sonra detaylı kimyasal bolluk analiz sonuçlarını literatüre sunarak bu yıldızlarda ekstra karşımın var olup olmadığını tartışmaktır. Ayrıca model atmosferleri duyarlı bir biçimde belirlenen üyelerin Li bolluğu, <sup>12</sup>C/<sup>13</sup>C oranı, fotometrik ve tayfsal HR diyagramları yardımıyla evrim durumlarını tahmin etmektir. Aynı çalışmanın yapılacağı NGC 6940 küme üyesi 12 RG yıldızı için de ön analiz sonuçları sunulmaktadır.

## 2 NGC 752, NGC 6940 ve RG yıldızları

Ortalama yaştaki NGC 752 (≈447 pc) ve NGC 6940 (≈770 pc) kümelerinin ve kırmızı dev yıldızlarının seçimleri ilk olarak WEBDA<sup>1</sup> veri tabanından yapılmıştır. İstenilen parlaklık

\* gamzebocek@gmail.com

<sup>1</sup> <http://www.univie.ac.at/webda/webda.html>

**Çizelge 1.** Dikine hızlar. (a) Böcek Topcu et al. (2015), (b) Mermilliod et al. (2008) (c) Hazırlık aşamasında.

NGC 752	$RV^a$ ( $kms^{-1}$ )	$RV^b$ ( $kms^{-1}$ )	NGC 6940	$RV^c$ ( $kms^{-1}$ )	$RV^b$ ( $kms^{-1}$ )
MMU 1	$4.73 \pm 0.20$	$5.19 \pm 0.15$	MMU 101	$7.74 \pm 0.23$	$6.81 \pm 0.14$
MMU 3	$4.11 \pm 0.20$	$4.56 \pm 0.10$	MMU 152	$9.28 \pm 0.24$	$8.5 \pm 0.15$
MMU 11	$4.45 \pm 0.19$	$4.75 \pm 0.12$			
MMU 24	$4.86 \pm 0.19$	$5.36 \pm 0.10$			
MMU 27	$4.39 \pm 0.19$	$4.58 \pm 0.11$			
MMU 77	$4.58 \pm 0.20$	$5.02 \pm 0.09$			
MMU 137	$5.59 \pm 0.20$	$5.25 \pm 0.09$			
MMU 295	$6.32 \pm 0.23$	$5.20 \pm 0.09$			
MMU 311	$5.19 \pm 0.19$	$5.79 \pm 0.09$			
MMU 1367	$3.98 \pm 0.19$	$4.55 \pm 0.11$			

**Çizelge 2.** Model atmosfer parametreleri. Li bollukları ve  $^{12}C/^{13}C$  izotop oranları.

Yıldız	$T_{eff}$ (K)	$\log g$ ( $cm s^{-2}$ )	$\xi$ ( $km s^{-1}$ )	$[M/H]$	$\log \epsilon(Li)$	$^{12}C/^{13}C$	Evrin Durumu
NGC 752							
MMU 1	5005	2.95	1.07	-0.07	0.15	25	RGB
MMU 3	4886	2.76	1.10	-0.10	1.25	25	RGB
MMU 11	4988	2.80	1.14	-0.06	1.00	25	RC
MMU 24	4839	2.42	1.23	-0.09	<0	15	RC
MMU 27	4966	2.73	1.16	-0.04	0.95	17	RC
MMU 77	4874	2.80	1.15	-0.05	1.34	25	RGB
MMU 137	4832	2.51	1.29	-0.16	<0	15	RC
MMU 295	5039	2.88	1.10	-0.05	<0	20	RHB
MMU 311	4874	2.68	1.24	-0.02	0.78	20	RC
MMU 1367	4831	2.42	1.22	-0.07	<0	17	RC
NGC 6940							
MMU 101	5012	2.93	1.18	-0.04	0.66	>25	
MMU 152	4917	2.66	1.33	-0.13	<0	6	

aralığında yer alan RG yıldızlarının da yer aldığı geniş kapsamlı RV çalışması, (Mermilliod et al. 2008) kullanılarak sadece küme üyesi olanlar seçilerek gözlenmiştir. NGC 752 küme üyesi 10 RG yıldızın gözlemleri McDonald gözleminde bulunan 2.7m çaplı teleskoba bağlı Robert G. Tull Cross-Dispersed Echelle tayfçekeri ( $R \approx 60.000$ ) ile yapılmıştır. Gözlenen dalgaboyu aralığı 4000–8000 Å 'dir. NGC 6940 kümesinin 12 RG yıldızın gözlemleri ise 9.2 m çaplı Hobby-Eberly Teleskobuna (HET) bağlı olan "High Resolution Spectrograph (HRS)" ( $R \approx 60000$ ) ile yapılmıştır. Elde edilen tayflar standard IRAF<sup>2</sup> paketleriyle indirgenmiştir. HET teleskobundan alınan tayf verisi kırmızı ve mavi olmak üzere iki bölgeden meydana gelmektedir. Tayfın mavi tarafı yaklaşık 5100–6900 Å kırmızı tarafı ise yaklaşık 7000–8800 Å dalgaboyu aralığını kapsamaktadır. Her iki bölge IRAF ile ayrı ayrı indirgindikten sonra analiz aşamasında birleştirilmiştir.

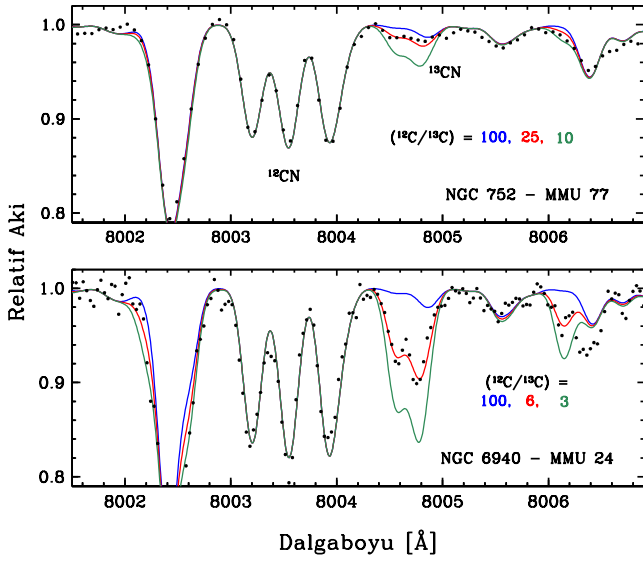
Kimyasal bolluk analizine başlamadan önce RG yıldızların küme üyeliklerini test etmek amacıyla IRAF'ta bulunan *fxcor* paketi ile dikine hız ölçümü yapılmıştır. RV ölçümünde standard yıldız yerine tüm hedef yıldızların model atmosferleri birbirine çok yakın olduğundan ortalama bir model atmosfere sahip olacak şekilde oluşturulan sentetik tayf karşılaştırma standardı olarak kullanılmıştır. Çizelge 1'de her iki küme üyelerinin ölçülen dikine hızları verilmektedir. NGC 752 kümesi için ortalama dikine hız  $\langle RV \rangle = 4.82 \pm 0.20 km s^{-1}$ , NGC 6940 kümesinin ise  $\langle RV \rangle = 8.02 \pm 0.56 km s^{-1}$ 'dir.

### 3 Model Atmosferler ve Bolluk Analizi

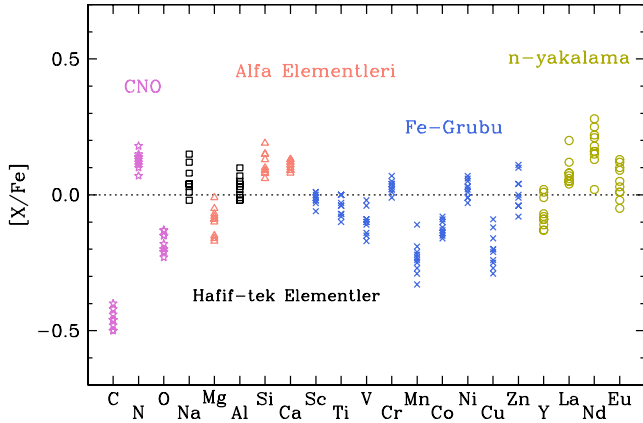
Bolluk analizine başlamadan önceki en önemli adım geçiş olasılıklarının ( $\log gf$ ) ve uyarılma potansiyellerinin (EP) bulunduğu çizgi listelerinin oluşturulmasıdır. Çalışmamızda atomik ve moleküler çizgi listeleri için mümkün olduğunca en yeni laboratuvar çalışmaları seçilmiştir (detaylar için bk. Böcek Topcu et al. 2015). Model atmosferlerin belirlenmesi için başka atomik çizgi veya moleküller ile karışmamış Fe I, Fe II, Ti I ve Ti II çizgilerinin eşdeğer genişlikleri ölçülmüştür. Elde edilen bolluk değerleri için iç tutarlılık sağlanması amacıyla  $R = 150.000$  çözünürlüklü güneş tayfı (Kurucz et al. 1984) aynı çizgi listeleriyle analiz edilmiş, bulunan güneş bollukları küme üyelerinin  $[X/Fe]$  bolluklarının hesabında kullanılmıştır. Castelli & Kurucz (2003) tarafından hazırlanan atmosfer modellerini kullanan MOOG<sup>1</sup> (Snedden 1973) analiz kodunun yarı-otomatik versiyonu ile RG yıldızlarının model atmosferleri belirlenmiştir. Eşdeğer genişlik yöntemi ve sentetik analiz yöntemi ile bolluk belirlenmesi de yine MOOG yazılımının farklı alt paketleri ile yapılmıştır. Başlangıç parametreleri belirlenirken fotometriden bağımsız sıcaklık belirlemek amacıyla çizgi derinliği oranı yöntemi (line-depth ratio, LDR) kullanılmıştır. LDR sıcaklıkları, sıcaklığa çok duyarlı (örneğin V I) ve az duyarlı (örneğin Fe I) elementlerin birbirine çok yakın çizgilerinin merkezi derinlik oranlarından belirlenmektedir (Biazzo et al. 2007a,b). Çizelge 2'de NGC 752 küme üyesi 10 ve NGC 6940 küme üyesi 2 yıldızın hesaplanan, tayfsal model atmosfer parametreleri listelenmiştir.

<sup>2</sup> <http://iraf.noao.edu/>

<sup>1</sup> <http://www.as.utexas.edu/~chris/moog.html>



Şekil 1.  $^{12}\text{CN}$  ve  $^{13}\text{CN}$  moleküllerinden izotop oranlarının belirlenmesi.



Şekil 2. NGC 752 üyesi RG yıldızları için  $[X/Fe]$  oranları.

Si I, Ca I, Ni I, Cr I ve Cr II çizgilerinin bolluk analizi eşdeğer genişlik ölçümü ile yapılmıştır. Güncel geçiş olasılıkları bulunmayan ve çok ince (hyper-fine) yapı gösteren elementler olan V I, Sc II ve Co I için NGC 752 küme çalışmasında ters-güneş analizi ile belirlenen geçiş olasılıkları kullanılmıştır. Bu elementlerin bolluk analizleri MOOG programındaki "blends" rutini ile yapılmıştır. Na I, Mg I, Al I, Mn I, Cu I, Zn I, La II, Nd II ve Eu II çizgilerinin bollukları ise başka atom ya da moleküller ile karıştıklarından sentetik tayf analizi yöntemiyle elde edilmiştir.

Sentetik tayf analizine CNO elementlerinin bolluklarının ard arda belirlenmesi ile başlanmıştır. Oksijen bolluğu 6300 Å'da yer alan yasaklanmış [O I] çizgisinden elde edilmiştir. Azot bollukları 8000–8048 Å aralığındaki CN moleküllerinden belirlenirken, karbon bollukları 5160 ve 5631 Å yöresindeki  $\text{C}_2$  moleküllerinin analizi ile bulunmuştur.  $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$  izotop oranı yaklaşık 8004 Å'da bulunan  $^{12}\text{CN}$  ile  $^{13}\text{CN}$  moleküllerinin oranı ile hesaplanmıştır. Şekil 1'de NGC 752 kümesindeki MMU 77 ve NGC 6940 kümesindeki MMU 152 RG yıldızlarının izotop oranlarının belirlenmesi gösterilmektedir. MMU 152 yıldızının izotop oranı bu derece

yüksek metal bolluğuna sahip açık küme üyeleri arasında şu ana kadar belirlenen en düşük  $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$  değeridir.

#### 4 Sonuçlar

Şekil 2'de NGC 752 küme üyesi 12 RG yıldızının  $[X/Fe]$  bollukları noktalanmıştır. C bolluğu azalırken N bolluğu artmaktadır. Ancak sabit kalması beklenen O bolluğu  $\approx 0.18$  dex azalmıştır. Diğer elementler ise güneş bolluğu etrafında salınmaktadır. Çizelge 2'de ise Li bollukları ve  $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$  oranları verilmektedir.

NGC 752 kümesindeki gözlenen yıldızların evrim durumları Çizelge 2'de yer alan değerler de dikkate alınarak incelendiğinde, yıldızlardan üç tanesinin ilk çıkış devri, altısının kırmızı yığın (RC) yıldızı, birinin ise yatay kırmızı dev kolu (RHB) yıldızı olduğu önerilmiştir (Böcek Topcu et al. 2015). Düşük  $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$  oranı gösteren RC ve RHB yıldızlarının konumları LBF'den sonra yer aldığından ekstra karışım geçirmiş oldukları düşünülmektedir.

NGC 6940 kümesindeki  $[M/H] \approx -0.08$  MMU 152 yıldızının ise ön analiz sonuçları dikkate değerdir. Oldukça düşük karbon bolluğu  $[C/Fe] = -0.46$  gösteren bu yıldızın ( $^{12}\text{C}/^{13}\text{C} \approx 6$ ) karbon izotop oranı da çok düşüktür. Bu değer güneş metal bolluğu civarında şu ana kadar gözlenmiş en düşük karbon izotop oranıdır. NGC 6940 kümesindeki 12 RG yıldızın analiz sonuçları bir başka çalışmamızda duyurulacaktır.

#### Kaynaklar

- Biazzo K., Frasca A., Catalano S., Marilli E., 2007a, *Astron. Nachr.*, 328, 938  
 Biazzo K., et al., 2007b, *A&A*, 475, 981  
 Böcek Topcu G., Afşar M., Schaeuble M., Sneden C., 2015, *MNRAS*, 446, 3562  
 Castelli F., Kurucz R. L., 2003, in Piskunov N., Weiss W. W., Gray D. F., eds, *IAU Vol. 210, Modelling of Stellar Atmospheres*. p. 20P  
 Charbonnel C., 1994, *A&A*, 282, 811  
 Charbonnel C., Lagarde N., 2010, *A&A*, 522, A10  
 Charbonnel C., Brown J. A., Wallerstein G., 1998, *A&A*, 332, 204  
 Gilroy K. K., 1989, *ApJ*, 347, 835 (Gil89)  
 Gratton R. G., Sneden C., Carretta E., Bragaglia A., 2000, *A&A*, 354, 169  
 Iben Jr. I., 1967, *ApJ*, 147, 624  
 Kurucz R. L., Furenlid I., Brault J., Testerman L., 1984, *Solar flux atlas from 296 to 1300 nm*. Aura  
 Mermilliod J. C., Mayor M., Udry S., 2008, *A&A*, 485, 303 (Mer08)  
 Sneden C., 1973, *ApJ*, 184, 839  
 Sweigart A. V., Greggio L., Renzini A., 1989, in *Bulletin of the American Astronomical Society*. p. 789

#### Erişim:

031-1015: UAK-2015 Program --- UAK Bildiri --- Turkish J.A&A.