



A Tayf Türünden HD 187983 ve 6 Cas Süperdevlerinin Kimyasal Bolluk ve Rüzgar Analizleri

**Tolgahan Kılıçoğlu^{1*}, Zeynep Avcı¹, Kübraözge Ünal¹, Joachim Puls², Şeyma Çalışkan¹,
Ash Elmaslı Akçar¹, Berahitdin Albayrak¹**

¹Ankara Üniversitesi, Fen Fakültesi, Astronomi ve Uzay Bilimleri Bölümü, Ankara, Türkiye.

²Ludwig-Maximilians-Universität, Fakultät für Physik, Universitäts-Sternwarte, Münih, Almanya.

Özet: Bu çalışmada ışınım temelli rüzgar teorisi kullanılarak yıldız rüzgarlarına ilişkin yarıçapı, terminal hızı, kütle kayıp oranı ve β parametrelerinin çizgi profilleri üzerinde etkileri gösterilmektedir. Oluşturulan teorik çizgi profilleri TÜBİTAK Ulusal Gözlemevi RTT150 teleskobuna bağlı Coude Tayfçeki ile elde edilen A tayf türünden iki süperdevin (HD 187983 ve 6 Cas) tayflarıyla karşılaştırılmaktadır. Klasik model atmosferler ile elde edilen sentetik tayflardan yıldızların etkin sıcaklık, yüzey çekim ivmesi ve dönme hızı elde edilmekte ve 17 kimyasal elementin bollukları sunulmaktadır. Rüzgar içeren ve yerel termodinamik denge varsayımı olmaksızın (YTD'siz) oluşturulan kuramsal tayflar ile yapılan karşılaştırmalar ise yıldızların yarıçapı, terminal hızı, kütle kayıp oranı ve β (şekil) parametresi hakkında ipuçları vermektedir. Çalışmada ışınım temelli rüzgarlar teorisinin süperdevlerin tayflarını ne denli iyi modelleyebildiği tartışılmaktadır.

Anahtar Kelimeler: süperdevler, kimyasal bolluk analizi, yıldız rüzgarları, model atmosferler, HD 187983, 6 Cas, P Cyg

Abstract: In this study, the effect of the radius, terminal velocity, mass loss ratio, and β parameters on the line profiles has been presented using the radiation driven wind theory. The theoretically generated line profiles have been compared to the spectra of two A type supergiants (HD 187983 and 6 Cas) obtained from the Coude Spectrograph attached to RTT150 telescope in TÜBİTAK National Observatory. We have derived the effective temperature, surface gravity, rotational velocity, and abundance of 17 elements of the stars using the synthetic spectra obtained by the classical model atmospheres. The comparisons of the theoretical spectra obtained with NLTE (Non-Local Thermodynamic Equilibrium) model atmospheres including stellar winds also let us to estimate the terminal velocity, mass loss ratio, and β (shape) parameters of the stars. We have also discussed how well the current radiation driven wind theory represents the observed spectra of the A supergiants.

Key Words: supergiants, chemical abundance analysis, stellar winds, model atmospheres, HD 187983, 6 Cas, P Cyg

1. Giriş

Süperdev yıldızlar sıradışı özellikleri gereği astrofizikteki önemli araştırma laboratuvarlarıdır. Bu yıldızlar sahip oldukları şiddetli rüzgarlar nedeniyle yıldızlararası ortamın zenginleştirilmesinde önemli rol oynamaktadır. Bu yıldızların rüzgarlarının incelenmesi yıldız evriminde kütle kaybının rolünün daha iyi anlaşılmasına izin vermektedir. Aynı zamanda A ve B tayf türünden süperdevlerin rüzgar momentum ile toplam ışınım güçleri arasında bir ilişki olduğu Kudritzki ve ark. (1999) tarafından ortaya konmuştur: $\dot{M}v_{\infty} \propto R_*^{-1/2} L^{1/\alpha_{\text{eff}}}$. Bu sayede, toplam ışınım güçleri çok yüksek olan ve uzak galaksilerde bile gözlenmesi mümkün olan bu cisimler tıpkı Cepheidler gibi “uzaklık belirteci” olma potansiyeline sahiptir.

Mavi süperdev yıldızlarda görülen yıldız rüzgarlarının kaynağına ilişkin ilk tutarlı teori Lucy ve Solomon (1970) tarafından öne sürüldü. “Işınım temelli rüzgar teorisi” olarak adlandırılan bu teoriye göre yıldız tayflarının moröte bölgelerinde güçlü soğurmalar neden olan metaller, yıldızın iç katmanlarından gelen ışınımın momentumunu kendilerine aktarırlar. Böylece yüzeydeki yıldız maddesi dışarıya doğru itilir ve yıldız rüzgarları meydana gelir. Abbott (1979), ışınım temelli yıldız rüzgarı oluşturabilecek yıldızların Hertzsprung-Russell diyagramında kütle kaybı gösteren (örn. mavi süperdevler) sıcak yıldızlar ile aynı bölgeye düştüğünü gösterdi. Bu nedenle günümüzde sıcak yıldızlarda görülen yıldız rüzgarlarının nedenini ortaya koyan en tutarlı teorilerden biri bu çalışmanın da konusu olan ışınım temelli rüzgar teorisidir.

Erken A tayf türünden süperdevler tayflarında çok sayıda metal çizgileri içermeleriyle birlikte yıldız rüzgarlarını işaret eden P Cyg benzeri profiller de barındırırlar. Bu sayede bu yıldızların kimyasal element bollukları ve rüzgarlarına ilişkin parametreleri birlikte elde edilebilmektedir. Bu çalışmada erken A tayf türünden HD 187983 ve 6 Cas süperdevlerinin atmosfer parametreleri, kimyasal bollukları ve rüzgar parametreleri klasik model atmosferler ve yıldız rüzgarlarını hesaba katan daha güncel non-LTE model atmosferler aracılığıyla belirlenmektedir.

*Sorumlu Yazar E-Posta: tkilicoglu@ankara.edu.tr

2. Gözlemler

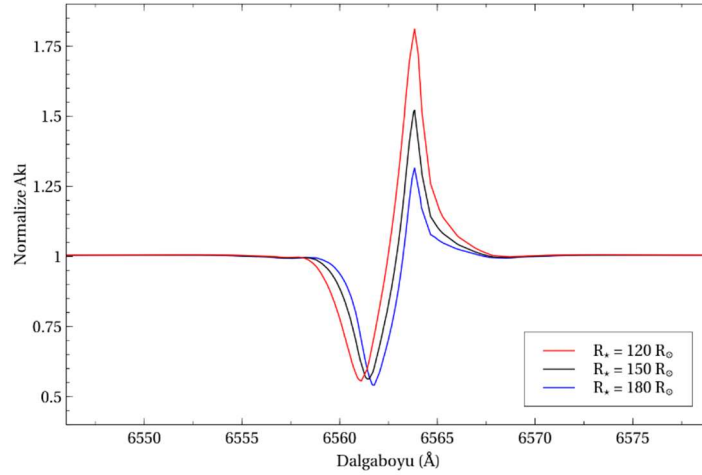
HD 187983 ve 6 Cas yıldızlarının yüksek çözünürlüklü ($R \sim 40000$) ve orta kalitede sinyal gürültü oranına ($S/N \sim 100$) sahip optik bölgedeki (4300-6000 Å) tayfları TÜBİTAK Ulusal Gözlemevi'ndeki RTT150 teleskobuna bağlı Coude Eşel Tayfçakeri ile 2009 yılında elde edildi. Ham tayfsal veriler IRAF (Image Reduction and Analysis Facility, Tody 1993) ve alt programları ile standart prosedürler kullanılarak indirildi ve normalize edildi. Dalgaboyu kalibrasyonu Th-Ar lambası tayfları kullanılarak gerçekleştirildi.

3. Çizgi Profillerine Etkiyen Rüzgar Parametreleri

Bu bölümde rüzgar parametrelerinin çizgi profilleri üzerine etkisi "ışınım temelli rüzgar teorisi" ışığında FASTWIND (Santolaya-Rey ve ark. 1997, Puls ve ark. 2005) programı kullanılarak H_{α} profilleri üzerinde gösterilmektedir.

3.1 Yarıçap (R)

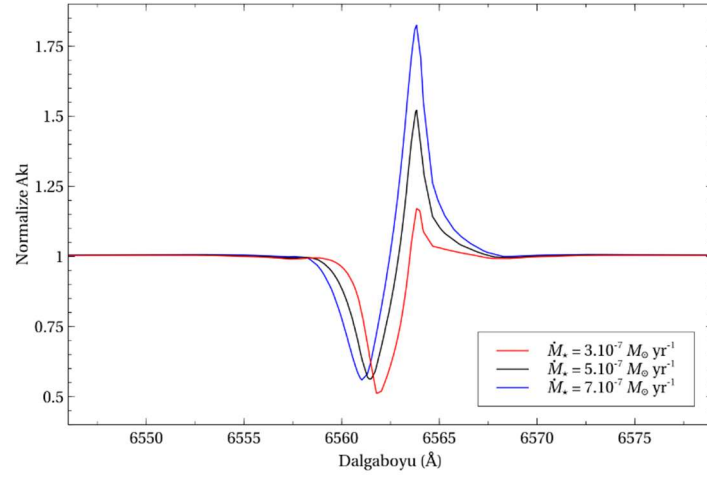
Genişlemiş atmosfere sahip olan yıldızlarda yarıçap parametresi fotosferin nerede bittiğini ve daha seyrek rüzgar maddesinin nerede başladığını işaret eder. Bu nedenle rüzgar analizinde parametrelerin doğru tayin edilebilmesi için büyük öneme sahiptir. Teorik modellerde yıldızın yarıçapının olduğundan büyük alınması fotosferi çevreleyen rüzgar maddesinin olduğundan az kabul edilmesine neden olur. Bu nedenle H_{α} çizgilerinde görülen salma yapısı zayıflar ve soğurma yapısının minimumu bir miktar uzun dalgaboylarına kayar. Yarıçapın daha küçük kabul edilmesi ise tam tersi bir etki yapar. Şekil 1'de farklı yarıçap değerleri için oluşturulan teorik H_{α} profilleri $T_e = 10\,000$ K, $\log g = 1.5$ ve $\dot{M} = 5 \times 10^{-7} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ olan bir kuramsal yıldız için gösterilmektedir.



Şekil 1: Yarıçap (R) parametresinin H_{α} çizgisi üzerindeki etkisi

3.2 Kütle Kayıp Oranı (\dot{M})

Birim zamandaki kütle kayıp miktarı olarak tanımlanan \dot{M} yıldız rüzgarlarına ilişkin temel bir parametredir. Kütle kayıp oranının artması yıldız etrafında yığılmış olan maddenin daha fazla ve yoğun olmasını gerektirir. Teorik modellerde kütle kayıp oranının artması H_{α} çizgilerinde görülen salma yapısını kuvvetlendirir ve soğurma yapısının minimumunun bir miktar kısa dalgaboylarına kaymasına neden olur. Şekil 2'de farklı kütle kayıp oranları için oluşturulan teorik H_{α} profilleri $T_e = 10\,000$ K, $\log g = 1.5$ ve $R = 150 R_{\odot}$ olan bir kuramsal yıldız için gösterilmektedir. Yarıçap ve kütle kayıp oranı parametrelerinin profiller üzerinde yaptığı etki pratikte aynıdır. Bu nedenle P Cyg profilleri kullanılarak yıldızın kütle kayıp oranı bulunmak isteniyorsa yarıçap parametresi başka bir yolla önceden elde edilmelidir.



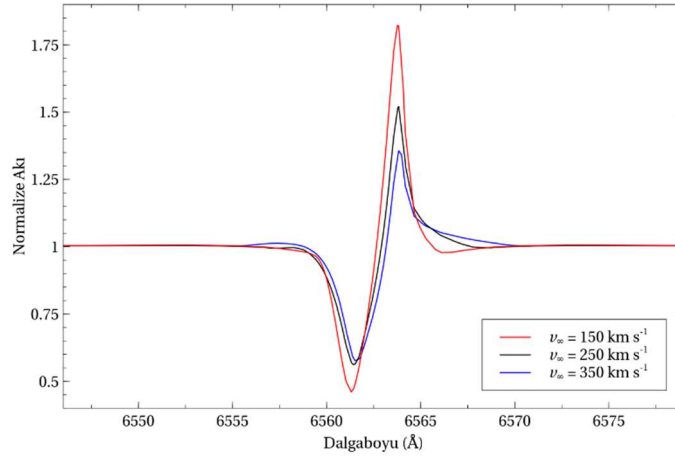
Şekil 2: Kütle Kayıp Oranı (\dot{M}) parametresinin H_{α} çizgisi üzerindeki etkisi

3.3 Terminal Hızı (v_∞)

Yıldızın atmosferinden ayrılan gaz öncelikle yavaş bir şekilde yıldızdan uzaklaşırken gittikçe hızını artırır ve en sonunda terminal hızına yaklaşır. Lamers ve ark. (1995), Krticka ve ark. (2005) ve Puls ve ark. (2008) terminal hızı ile kurtulma hızı arasındaki ilişkiyi ve buna ilişkin bağıntıları aşağıdaki şekilde ifade eder:

$$v_\infty = c(T_e) \times v_{\text{kurtulma}} \quad [\text{burada } c(T_e) \approx 1 - 3 \text{ ve } v_{\text{kurtulma}} = \sqrt{\frac{2GM(1-\Gamma_e)}{R}}].$$

Bu anlamda bakıldığında terminal hızının yıldızın başlıca sıcaklığına, kütesine ve yarıçapına bağlı bir parametre olduğu görülmektedir. Terminal hızının H_α profilleri üzerindeki etkisi özellikle çizginin kanat kısımlarındaki farklılıkla kendini belli etmektedir. Hızın artması durumunda genel profilin kanatları salma yapısında genişlerken salma şiddeti bir miktar azalır. Şekil 3'te farklı terminal hızları için oluşturulan teorik H_α profilleri $T_e = 10\,000$ K, $\log g = 1.5$ ve $R = 150 R_\odot$ ve $\dot{M} = 5 \times 10^{-7} M_\odot \text{ yr}^{-1}$ olan bir kuramsal yıldız için gösterilmektedir.



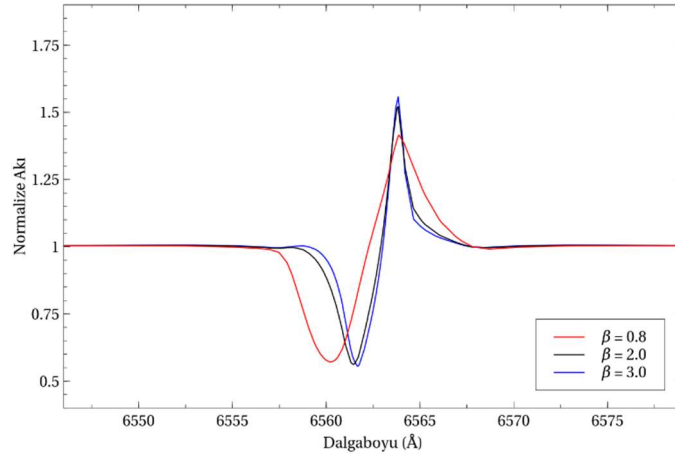
Şekil 3: Terminal Hızı (v_∞) parametresinin H_α çizgisi üzerindeki etkisi

3.4 β Parametresi

Yıldızın yüzeyinden çıkan maddenin terminal hızına ulaşana kadar kat ettiği yarıçap uzunluğu boyunca hızının nasıl değiştiği aşağıda ifadesi verilen β hız kanunu ile modellenebilir (Krticka ve Kubat 2011):

$$v(r) = v_\infty(1 - R/r)^\beta$$

Bu ifadeye yer alan β parametresi şekil parametresi olarak da bilinir ve P Cyg profilinin karakteristiğini belirler. Şekil 4'te farklı β değerleri için oluşturulan teorik H_α profilleri $T_e = 10\,000$ K, $\log g = 1.5$ ve $R = 150 R_\odot$ olan bir kuramsal yıldız için gösterilmekte olup profillerin aynı ölçekte çizilebilmesi için kütle kaybı oranı farklı değerlerde seçilmiştir.



Şekil 4: β parametresinin H_α çizgisi üzerindeki etkisi

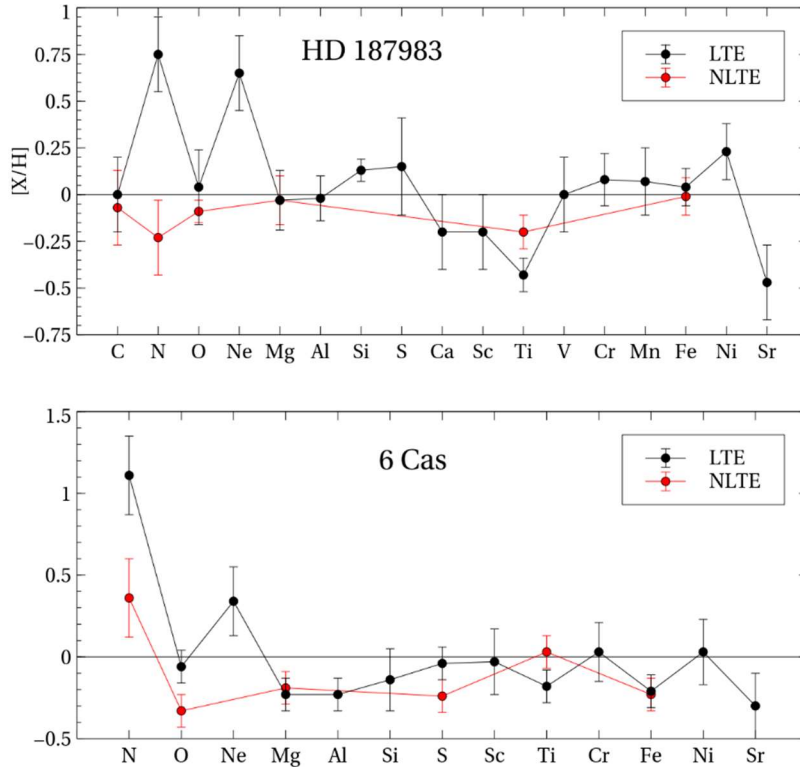
Çizelge 1: Yıldızların atmosfer parametreleri ve izdüşüm dönme hızları

Yıldız	T_e (K)	Log g	$v \sin i$ (km s ⁻¹)
HD 187983	9300 ± 250	1.75 ± 0.15	28
6 Cas	9200 ± 300	1.30 ± 0.20	29

4. Kimyasal Bolluk Analizi

HD 187983 ve 6 Cas'ın kimyasal bolluk analizi için yerel termodinamik denge varsayımını kabul eden ATLAS12 (Kurucz 1993) model atmosferler kullanıldı. Oluşturulan model atmosferler SYNSPEC48 (Hubeny ve Lanz 1995) programı yardımıyla kuramsal tayflara dönüştürüldü. Yıldızlara ilişkin mevcut fotometrik veriler ve tayfsal belirteçler (iyonizasyon/uyartılma dengeleri) gözetilerek yıldızların atmosfer parametreleri tahmin edildi (Çizelge 1). Binişik olmayan orta şiddetli Fe çizgilerine yapılan teorik profil karşıtırmalarından da yıldızların izdüşüm dönme hızları belirlendi (Çizelge 1). Üretilen kuramsal tayflar ile gözlemler karşılaştırılarak en iyi uyumun sağlandığı kimyasal bolluk değerleri belirlendi. Süperdevlerde yerel termodinamik denge varsayımı kullanılarak (YTD'li) elde edilen bolluk değerlerinin varsayım yapılmadan (YTD'siz) elde edilenlere göre bir miktar farklı çıkabildiği bilinmektedir. Bu nedenle YTD'ye ilişkin düzeltme miktarları Schiller ve Przybilla (2008)'den alınarak düzeltildi. Şekil 5'te kimyasal bolluk analizi sonucunda elde edilen bolluk dağılım eğrileri verilmektedir.

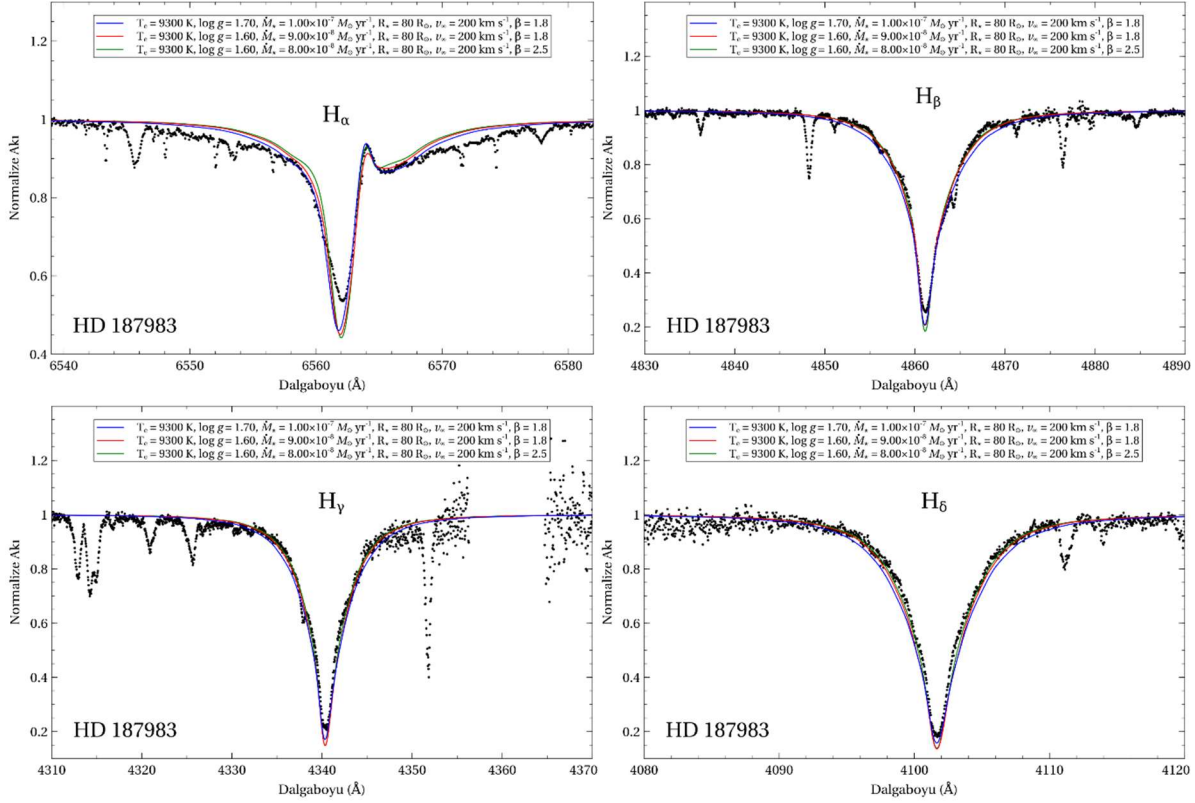
Gerçekleştirilen kimyasal bolluk analizinin sonucunda YTD'siz sonuçlar gözönüne alındığında Ne ve Sr elementleri dışında HD 187983 yıldızının belirgin bir kimyasal tuhafliğe sahip olmadığı görülmektedir. Bu iki elementin bollukları bir veya birkaç çizgi kullanılarak elde edildiğinden yıldızın bu elementler bakımından tuhafliklar sergileyip sergilemediği henüz net değildir. 6 Cas için elde edilen sonuçlar ise yıldızın azot bakımından bir miktar zengin oksijen bakımından ise bir miktar fakir olduğunu işaret etmektedir. Böyle bir sonucun ortaya çıkması için 6 Cas yıldızının bir karışım evresinden geçmiş olması gerekmektedir. Bu durum yıldızın Hertzsprung-Russell çizeneğinde bulunduğu yere gelmeden önce kırmızı süperdev evresinden geçmiş olabileceğini işaret etmektedir. Ancak bu durumun netleştirilebilmesi için daha geniş tayfsal aralıkta ve daha yüksek sinyal-gürültü oranına sahip tayfsal verilere ihtiyaç duyulmaktadır.



Şekil 5: YTD'li ve YTD'siz Kimyasal bolluk analizini sonuçları

5. Rüzgar Analizi

FASTWIND programı ile yerel termodinamik denge varsayımı kullanılmaksızın oluşturulan ve ışınım temelli rüzgar teorisi içeren teorik hidrojen çizgi profilleri HD 187983 ve 6 Cas'ın gözlemsel tayflarıyla karşılaştırılmış ve yıldızların rüzgarlarına ilişkin temel parametrelerinin kestirimi yapılmıştır. Şekil 6'da HD 187983'ün tayfındaki ilk dört hidrojen Balmer çizgisi için gerçekleştirilen çakıştırmalar gösterilmektedir. Şekil 7'de ise 6 Cas'ın tayfındaki ilk üç hidrojen Balmer çizgisi için gerçekleştirilen çakıştırmalar gösterilmektedir.



Şekil 6: Balmer serisinin HD 187983 yıldızının tayfındaki ilk dört çizgisine yapılan teorik çakıştırmalar

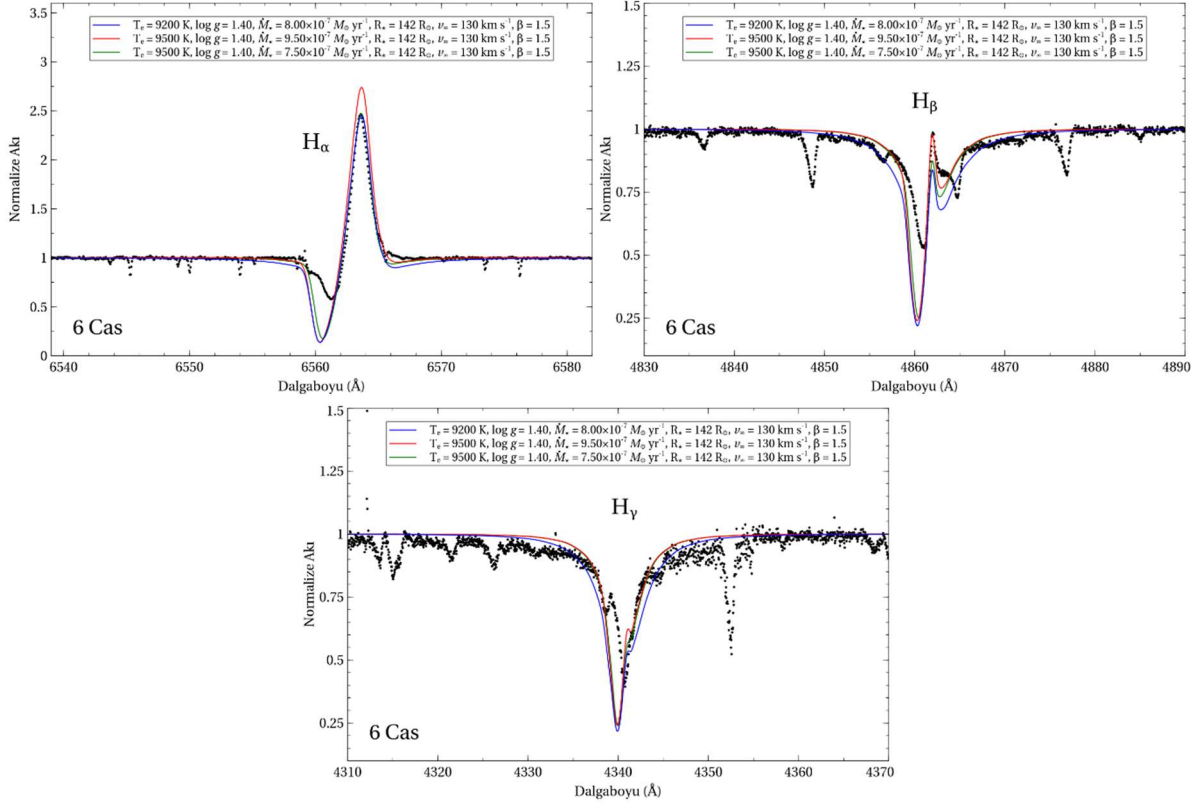
Yapılan analizler HD 187983'ün 200 km s^{-1} terminal hızına sahip rüzgarı nedeniyle $\dot{M} = 1 \times 10^{-7} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ mertebesinde kütle kaybettiğini işaret etmektedir. 6 Cas'ın sergilediği rüzgar ise 130 km s^{-1} terminal hızına sahip olup $\dot{M} = 8 \times 10^{-7} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ mertebesinde kütle kaybına neden olduğu görülmektedir. 6 Cas'ın yarıçapının HD 187983'in kabaca iki katı olduğu göz önünde bulundurulduğunda kütle kayıp oranlarındaki 8 katlık fark akla yatkındır. Şekil 6 ve 7 dikkatlice incelendiğinde tüm hidrojen çizgilerinin aynı sonuçta birleşmediği görülür. Bu nedenle elde edilen parametreler %10-20 aralığında hata payına sahiptir.

6. Özet ve Tartışma

-Bu çalışmada HD 187983 ve 6 Cas yıldızlarının kimyasal bolluk ve rüzgarlarına analizleri gerçekleştirildi. Kimyasal bolluk analizi sonuçları HD 187983'in belirgin kimyasal bir tuhafliğe sahip olmadığını, 6 Cas'ın ise azot bakımından bir miktar zengin O bakımından ise bir miktar fakir olabileceğini işaret etti. Rüzgar analizi sonuçları ise yıldızların mevcut rüzgarlar nedeniyle HD 187983 ve 6 Cas'ın sırasıyla $1 \times 10^{-7} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ ve $8 \times 10^{-7} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ kütle kayıp oranlarına sahip olduklarını ortaya koydu.

-Işınım temelli rüzgar teorisi kullanılarak rüzgara ilişkin oluşturulan kuramsal profillerin yıldız tayflarındaki hidrojen çizgilerinde görülen P Cyg benzeri yapıların özellikle salma ve kanat bölgelerini oldukça başarılı modelleyebildiği görülmektedir. Ancak soğurma bölgesine bakıldığında tüm hidrojen çizgileri için kuramsal tayfların gözlemsel olanlara nazaran daha derin kaldığı ve profillerin şekillerinin çok uyumlu olmadığı görülmektedir. Bu durum rüzgar maddesinin yıldız etrafında homojen olarak dağılmadığını gösteriyor olabilir. Oluşturulan kuramsal modellerde rüzgarın homojen olduğu kabul edilmiştir. Ancak yıldız etrafında biriken maddenin belirli bölgelerde "kümeleşmesi" söz konusu olabilmektedir. Bu nedenle çok daha hassas analizlerin gerçekleştirilebilmesi için kümeleşme durumunu da göz önünde bulunduran teorik modellerin kullanılması gerektiği açıktır. Bu eksikliğe rağmen mevcut modellerin yıldız rüzgarlarındaki kütle kaybını, terminal hızını ve maddenin hangi hız kanununa uygun olarak hareket ettiğini %10-20'lik hata payıyla kestirebildiği görülmektedir.

-Rüzgar analizinin yıldızın atmosfer (T_e , $\log g$) ve temel parametrelerine (R) son derece bağımlı olduğu görülmektedir. Teorik modellemelerde ihtiyaç duyulan gelişmelere ek olarak bu tür süperdev yıldızların atmosfer ve temel parametrelerinin hem fotometrik hem de tayfsal olarak elde edilebilmesine olanak sağlayan güvenilir yöntemlere ihtiyaç duyulmaktadır.



Şekil 7: Balmer serisinin 6 Cas yıldızının tayfindaki ilk üç çizgisine yapılan teorik çakıştırmalar

Bu çalışmanın tamamı Ankara Üniversitesi'nin Uluslararası Bilimsel Etkinlik Destek (UBED) programı tarafından ve bir bölümü ise TÜBİTAK 1001/112T119 numaralı proje tarafından desteklenmiştir. Ayrıca TUG'da 09BRTT150-477-0 ve 15ARTT150-733 projeleri kapsamında RTT150 teleskobunu kullanmada verdikleri destek için TÜBİTAK'a teşekkür ederiz.

7. Kaynaklar

- Abbott, D. C. 1979, IAUS, 83, 237
Hubeny, I. ve Lanz, T. 1995, ApJ, 439, 875.
Krticka J., Korcakova, D. ve Kubat, J. 2005, PAICz, 93, 29
Krticka J. ve Kubat, J. 2011, A&A, 534, 97
Kudritzki, R. P., Puls, J.; Lennon, D. J., Venn, K. ve ark. 1999, A&A, 350, 970
Kurucz, R.L. 1993, ASPC, 44, 87.
Lamers, H.J. G. L. M., Snow, T.P. ve Lindholm, D.M. 1995, ApJ, 455, 269
Lucy, L. B. ve Solomon, P. M. 1970, ApJ, 159, 879
Puls, J., Urbaneja, M. A., Venero, R., Repolust, T. ve ark. 2005, A&A, 435, 669
Puls, J., Vink, J.S. ve Najarro, F. 2008, A&ARv, 16, 209
Santolaya-Rey, A. E., Puls, J. ve Herrero, A. 1997, A&A, 323, 488
Schiller, F. ve Przybilla, N. 2008, A&A, 479, 849
Tody, D. 1993, ASPC, 52, 173