

WOLF-RAYET YILDIZLARI GÖZLEMSSEL

Halil KIRBIYIK*

1. Giriş

Wolf-Rayet yıldızları bu ismi onları ilk keşfeden astronomların adlarından almaktadır; Charles Joseph Etienne Wolf ve Georges Antoine Ponds Rayet (1). Paris gözlemevinde Cygnus takım yıldızında yaptıkları bir gözlem sırasında sepektrumlarında çok geniş salma çizgileri olan üç cisim (HD 191765, HD 192103 ve HD 192641) dikkatlerini çekmiştir. Bu olay olduğunda yıl 1867 idi. Şimdi bu üç cisim WN6, WC8 ve WC7+8e olarak sınıflandırılmıştır.

Birkaç yıl sonra Respighi (2) uzaydaki er parlak Wolf Rayet yıldızını (γ_2 Velorum) keşfetmiş ve daha sonra bunlara başka yenileri eklenmiştir. 1894 yılma kadar bu ilginç cisimler astronomların fazla dikkatini çekmemiştir. Ancak 1894 yılında Campbell (3) Wolf-Rayet yıldızlarının geniş salma çizgilerinin dalgı boyunu tayin etmiş; ve 1920 yıllarında ilk kez Kanada'da Plaskett (4) tarafından slit (yarık) tayfları alınmıştır.

Wolf-Rayet yıldızları ile ilgili inceleme ve araştırmayı derinliğine başlayan yine bir Kanadalı; Beals'dır. Bu yıldızlar hakkında bugüne kadar edindiğimiz bilgilere katkısı olan bilim adamlarının hepsini burada saymak mümkün değildir, ancak bazlarını söyle sıralayabiliriz: Swings, Struve, Olin Wilson, Hiltner, Kron, Underhill, Kuh, Bappu, Conti, Breysacher, Barlow, Maeder, Noels vb.

2. Tayfsal sınıflama: WN ve WC dizisi

Wolf-Rayet yıldızlarının tayıfı geniş salma çizgileri ile tanınır. Bu çizgilerin genişliği 100 Å a kadar çıkmaktadır. Salma çizgileri atomların uyarılması ve iyonlaşması ile oluşmaktadır.

* ODTÜ, Fizik Bölümü.

Ayrıca Wolf-Rayet yıldızlarında çizgi tayfının uyarılması seviyesi oldukça yüksektir. Tayfları incelendiğinde yapılarında He, C, O, Si olduğu görülmektedir. Bu elementler Wolf-Rayet yıldızlarında farklı iyonlaşma safhalarında gözlenmektedir (HeI, HeII, CII, CIII, CIV, OII, OIII, OIV, OV, OVI, NIII, NIV, NV, SiII SiIII, SiIV). Wolf-Rayet yıldızlarının gözlemlerinin ilginç bir sonucu; tayfında N varsa C ve O olmuyor; C ve O varsa N olmuyor. Bunun sonucu Beals 1935 yılında IAU'nun yıldız Tayfları Komisyonuna Wolf-Rayet yıldızlarının sınıflandırılmasına ilişkin bir teklife bulunmuştur, ve bu teklif 1938 yılında kabul edilerek (5) WN ve WC dizileri ortaya çıkmıştır. Ayrıca WN dizisinin WN 5,6,7, ve 8, ve WC dizisinin de WC 6,7 ve 8 diye alt guruplara ayrılması kabul edilmiştir. Bu alt ayrılma bir iyonlaşma dizisidir. Sonradan keşfedilecek başka iyonlaşma derecelerini de gösterebilmek için WN'ler 5 den ve WC'ler de 6'dan başlatılmıştır. Ultraviyole ve fotoğrafik bölgede tayfsal çizgiler hesaba katıldığından WN dizisinde karbon (C) ve oksijenin (O); WC dizisinde de azotun (N) var olabileceği bulunmuştur. Ancak WN dizisinde azotun, WC dizisinde de karbonun göreceli olarak daha fazla olduğunu belirtmeliyiz. WN yıldızları, ayrıca WNE ve WNL diye iki guruba ayrırlar. WNE yıldızlarında CIV çizgileri gözlenmekte ve tayflarında hidrojene pek raslanmamaktadır. WNL gurubu yıldızların tayflarında ise H bulunmaktadır.

Her iki dizide var olan elementler Tablo 1.de verilmektedir.

Tablo 1. WN ve WC dizisi Wolf-Rayet yıldızlarında görülen elementler,
(altı çizilenler olması muhtemel olan elementler).

WN	HeI, HeII NIII, NIV, NV SiIV CII, CIII, CIV OIII, OIV, OV, OVI
WC	HeI, HeII CII, CIII, CIV OII, OIII, OIV, OV, OVI NIII, NIV, NV S:IV

3. Wolf-Rayet yıldızlarının katalogları

Wolf-Rayet yıldızlarının ilk kataloğu 1894 yılında Campbell tarafından yayınlanmıştır. 55 yıldız kataloğa alınmış, fakat şimdije kadar bunların 12 tanesinin Wolf-Rayet yıldızı olmadığı anlaşılırak listeden çıkarılmıştır. Kısa zamanda WR yıldızlarının sayısı artmış ve ikinci katalog 1912 yılında Fleming (6) tarafından yayınlanmıştır. Fleming'in

listesinde 108 yıldız olup, bunların 86'sı Bizim Galaksi de, 21'i LMC'de ve 1'i de SMC'dedir. Bugün 86'dan 19 tanesinin Wolf-Rayet olmadığı anlaşıldığından listeden çıkarılmıştır. Birisi SMC'de olmak üzere 92 yıldız içeren üçüncü Wolf-Rayet kataloğunu da 1930 yılında Payne (7) yayınlamıştır. Galaksimize ait 91 yıldızdan 20 tanesi daha sonraları listeden çıkarılmıştır. Dördüncü katalog ise 1962 yılında Roberts (8) tarafından yayınlanmıştır. Bu kataloga 123 yıldız alınmış ve daha sonraları 19 tanesi listeden çıkarılmıştır. Beşinci Wolf-Rayet kataloğunu 1968 yılında Smith (9) çıkarmış ve 127 yıldız listelemiştir. Bunlardan yedi tanesi daha sonra listeden silinmiştir. Sonraki yıllarda pek çok yeni Wolf-Rayet yıldızı keşfedilmiştir. Altıncı ve şimdilik son katalog ise 1981 yılında Hucht ve arkadaşları (10) tarafından yayınlanmıştır. Bu katalogda hepsi Galaksimize ait olan 159 tane WR yıldızı vardır. Bunlardan sadece 20 tanesi gerçek WR çift yıldızıdır. Bunlara son yıllarda keşfedilen iki yeni WR yıldızını da eklediğimizde toplam 161 WR yıldızı oluyor Galaksimizde.

WR yıldızları genelde iki ana guruba ayrılmaktadır. Birinci gurup klasik WR yıldızları olup büyük kütleye ve ışınağıne sahip genç yıldızlardır, ve Öbek I (Pop. I) WR yıldızları olarak gösterilirler. Burada bahsettiğimiz bu yıldızlardır. İkinci gurup ise WR tipinde tayıfı olan gezegenimsi bulutsuların merkezi yıldızlarından oluşmaktadır. Bunlar da Öbek II (Pop.II) WR yıldızları olarak bilinmektedir.

Bunlardan başka LMC de 100 kadar (11)

SMC'de 8 tane (12)

ve M33 de 40 tane (13)

WR yıldızı bilindiğini belirtmek yerinde olur.

4. Mutlak kadirleri ve HR diyagramı

Çoğu LMC'de olan bazı Wolf-Rayet yıldızlarının görsel mutlak kadirlerinin tayini yapılmıştır. LMC'deki Wolf-Rayet yıldızları ile Galaksimizdekilerin tayıfları arasında önemli bir fark gözlenmediğinden LMC'deki yıldızlar için bulunan mutlak kadir değerleri Galaksimizdekiler için de geçerli kabul edilebilir. Buna göre Wolf-Rayet yıldızları için bulunan ortalama değerler (14) şöyledir:

WC için : $\bar{M}_v \sim -4.3$, yayılma 1.2,

WNE için : $\bar{M}_v \sim -4.3$, yayılma daha küçük,

WNL için : $\bar{M}_v \sim -6.4$, yayılma 2.5.

Yukarıda verilen mutlak kadirlerdeki yayılmaların yıldızların kendilerinden kaynaklandığı sanılmaktadır (15). Mutlak bolometrik kadirleri ise -7.0 ile -9.5 arasında değişmektedir. Biraz sonra verilecek yüzey sıcaklıklarını da dikkate aldığımızda Wolf-Rayet yıldızlarının HR diyagramında en parlak O-yıldızlarının bulunduğu bölgeye düşüğünü görürüz.

5. Yüzey Sıcaklıkları

Wolf-Rayet yıldızlarının sıcaklıklarını ölçmeye çalışan ilk astronom Gerasimovic'dir (16). Ölçümleri sonucunda Wolf-Rayet yıldızlarının ortalama sıcaklıklarını $17\,000^{\circ}\text{K}$ – $50\,000^{\circ}\text{K}$ arasında bulmuştur. Daha sonraları Beals (17) sıcaklıklarını $54\,000^{\circ}\text{K}$ – $100\,000^{\circ}\text{K}$ arasında, Kuhi (18) WC'ler için 3500 \AA da 65000°K ve 9500 \AA da 15000°K ve WN ler için aynı dalga boylarında 11000°K ve 15000°K olarak bulmuştur. Etkin sıcaklıkların tayini ile ilgili daha ciddi çalışmalar bunlardan sonra başlamıştır.

Pyper (19) UBV renk indislerinden yararlanarak WC yıldızlarının etkin sıcaklığını $20\,000^{\circ}$, ve WN yıldızlarınınını ise $38\,000^{\circ}$ olarak bulmuştur. Morten (20) ise WN yıldızlarının "ring" bulutsuları ile bağlantılı olduğu düşüncesinden hareketle bu yıldızların etkin sıcaklığını 29500°K – 54200°K arasında olduğunu göstermiştir. Willis ve Wilson (21, 22) yer ve uydu gözlemlerini birleştirerek 9 Wolf-Rayet yıldızının renk sıcaklıklarını tayin etmiştir. Buldukları değerler $26\,000^{\circ}\text{K}$ – $36\,000^{\circ}\text{K}$ arasındadır. Benzer yolla Underhill (23) 9 Wolf-Rayet yıldızı için yaptığı incelemede etkin sıcaklıklarını 25500° – 30000° arasında bulmuştur. Son olarak ise Schmutz ve Smith (24)'in bulduğu değerleri verelim. Ultraviyole IUE sürekli (continuum) dağılım ve optik ve kırmızı ötesi verilere dayanan çalışmaları sonucu elde edilen renk sıcaklıklarını yaklaşık olarak $15\,000^{\circ}\text{K}$ – $50\,000^{\circ}\text{K}$ arasındadır.

Değişik araştırmacılar tarafından kullanılan ortak Wolf-Rayet yıldızları için bulunan değerler gözönüne alındığında Wolf-Rayet yıldızlarının etkin sıcaklıklarının $25\,000$ – $30\,000^{\circ}\text{K}$ arasında olduğunu görmekteyiz. Bulunan değerlerden altgruplar arasında belirli bir sıcaklık farkının olmadığını söyleyebiliriz.

6. Kütle kayıp hızları

Küresel simetri varsayımlı ile kütle kayıp hızı ifadesi şöyle yazılabılır:

$$\frac{dM}{dt} = 4 \pi \rho v R e^2 \text{ gms}^{-1}$$

Burada ρ = yoğunluk, v = hız (dişa doğru genişleyen maddenin hızı), ve Re , salma (emission) çizgi bölgesinin yıldızın merkezinden olan uzaklığı ($Re \sim 60 R_\odot$).

Kütle kayıp hızının hesaplanmasımda iki tayfsal ve iki kontinyum (continuum) yöntem vardır.

1. UV yöntem: Şimdilik en duyarlı yöntemdir. Bu yöntemle en küçük kütle kayıp hızı bile ölçülebilir.

2. Optik Yöntem: H_α ve $HeII$ çizgilerinin gözlemi ile yapıldığından en yüksek dM/dt değeri ile sınırlıdır.

3. Kızılıötesi yöntem (IR): En duyarlı yöntem, fakat şimdilik teknik açıdan sınırlıdır. En büyük belirsizlik, kabul edilen hız dağılımından, çünkü kızılıötesi bölgede hız terminal hıza ulaşmamaktadır.

4. Radyo yöntemi: Bu bölgede hız terminal değerine ulaştığından radyo yöntemi modele en az bağımlı olan bir yoldur.

Barlow ve arkadaşlarının (25) 21 Wolf-Rayet yıldızı için, IR ve Radyo gözlemlerine dayanarak, elde ettikleri kütle kayıp hızı değerleri şöyledir:

$$\text{WC'ler için } \overline{\dot{M}}(\text{WC}) = 4.7 \times 10^{-5} M_\odot \text{ y}^{-1},$$

$$\text{WN'ler için } \overline{\dot{M}}(\text{WN}) = 3.2 \times 10^{-5} M_\odot \text{ y}^{-1}.$$

Bieging ve arkadaşları (26) radyo kontinyum yöntemi kullanarak daha küçük bir kütle kayıp hızı elde etmişlerdir,

$$\dot{M}(\text{WR}) = (2.0 \pm 0.6) \times 10^{-5} M_\odot \text{ y}^{-1}.$$

Burada belirtmek gereklidir ki değişik yöntemler farklı \dot{M} değerleri vermektedir (27,28). Kontinyum ve H_α yöntemi en yüksek kütle kayıp hızını verirken uv yöntemi en düşük \dot{M} değerini vermektedir. Işıma gücü yüksek olan yıldızların daha yüksek hızda kütle kaybettikleri dikkat çekicidir. Abbott ve arkadaşları (26) ve Hogg (29) VLA radyo gözlemlerinden kütle kayıp hızı için şu değerleri bulmuşlardır:

$$\overline{\dot{M}}(\text{WN}) = (2.9 \pm 1.1) \times 10^{-5} M_\odot \text{ y}^{-1} \text{ (9 WN yıldızı için)}$$

$$\overline{\dot{M}}(\text{WC}) = (2.3 \pm 0.7) \times 10^{-5} M_\odot \text{ y}^{-1} \text{ (4 WC yıldızı için)}$$

$$\overline{\dot{M}}(\text{WN+O}) = 1.4 \times 10^{-5} M_\odot \text{ y}^{-1} \text{ (1 yıldız için)}$$

$$\overline{\dot{M}}(\text{WC+O}) = 5.9 \times 10^{-5} M_\odot \text{ y}^{-1} \text{ (1 yıldız için)}.$$

Genel olarak kütle kayıp hızlarının işıma gücüne bağlı olarak sınırları şöyledir:

$$-\dot{M}_b = + 6.5 \text{ için } \dot{M} = 10^{-8} - 10^{-7} M_{\odot} \text{ y}^{-1}$$

$$-\dot{M}_b \geq + 11 \text{ için } \dot{M}(\text{WR}) \geq 10^{-5} M_{\odot} \text{ y}^{-1}.$$

Gözlenen kütle kayıp hızları o kadar yüksek ki Wolf-Rayet yıldızları WR döneminde kütelerinin hemen hemen yarısını kaybetmektedirler.

7. \dot{M} -L (ışma gücü) bağıntısı ve kütle kaybı üzerine öneriler

O-B tipi genç yıldızlarda kütle kaybı ışınım (radyasyon) basıncı sonucu yıldız rüzgarları ile olmaktadır.

Gözlemlere göre işıma gücü fazla olan Wolf-Rayet yıldızlarının kütle kayıp hızları daha büyüktür. Singh (30)'in yaptığı çalışmada ise \dot{M} -Te bağıntısının daha anlamlı olacağı belirtilmekte ve yüzey sıcaklığı büyük olan Wolf-Rayet yıldızlarında kütle kayıp hızının daha büyük olduğu gösterilmektedir.

\dot{M} -L diyagramında Wolf-Rayet yıldızları ile O-B yıldızları farklı bölgelerde bulunmaktadır. Bundan çıkarılabilen sonuç ise Wolf-Rayet yıldızlarının kütle kayıp mekanizmasının O-B tipi yıldızlardakinden farklı olduğunu söylemektedir. Wolf-Rayet yıldızlarındaki kütle kayıp hızları O-B yıldızlarına göre 5-20 kat daha fazladır. Yani yıldız rüzgarları mekanizması Wolf-Rayet yıldızlarındaki yüksek kütle kayıp hızlarını açıklayamamaktadır. Öyleyse temel fizik farklı olabilir.

Yüksek kütle kayıp hızları ($4 \times 10^{-5} M_{\odot} \text{ y}^{-1}$) ve $v = 3000 \text{ kms}^{-1}$ lik bir terminal hızla yıldız rüzgarı ile uzaya pompalanan mekanik güç $L_w = (1/2) \dot{M} v^2 \infty = 3 \times 10^4 L_{\odot}$ olmaktadır ki bu da $t(\text{WR}) \sim 5 \times 10^5$ y için 2×10^{51} erg yapar. Yani bir Wolf-Rayet yıldızı yaşam süresi içinde süpernova patlamasına eşdeğer enerjiyi uzaya bırakmaktadır. Buradan, Wolf-Rayet yıldızlarının dev HII bölgelerini beslediğini söyleyebiliriz (13).

8. Wolf-Rayet yıldızlarının Galaksimizdeki dağılımı

Wolf-Rayet yıldızları ve O-tipi yıldızlar her ikisi de Öbek-I yıldızlarıdır. Bu nedenle Garmany ve arkadaşları (31) büyük kütleli yıldızların başlangıç kütle fonksiyonunu (IMF) incelemiştir, Hidayet ve arkadaşları (32) Wolf-Rayet yıldızlarının Galaksimizdeki dağılımına bak-

mış, Meylan ve Maeder (33) büyük kütleli yıldızların Galaksimizdeki sayısal dağılmını ele almış ve Conti ve arkadaşları (34) ise O-tipi yıldızlarla Wolf-Rayet yıldızlarının Galaksimizdeki sayılarını ve dağılmını incelemiştir.

Garmany ve arkadaşları Wolf-Rayet yıldızları ile O-tipi yıldızların başlangıç kütle fonksiyonlarının benzer olduğunu göstermişlerdir. Analizlerinde Güneş'e 2.5 kpC uzaklıktaki 424 büyük kütleli yıldızu, ve aynı uzaklık içinde 31'i Güneş dairesinin içinde 4'ü de Güneş dairesinin dışında olmak üzere 35 Wolf-Rayet yıldızu kullanmışlardır. Hidayet ve arkadaşları ise Wolf-Rayet yıldızlarının Galaksi düzlemine göre simetrik dağılıklarını göstermiş; WC tipi yıldızların sayısının Galaksi merkezine doğru arttığını fakat buna karşın WN'ler için aynı şeyin gözlenmediğine işaret etmiştir. Dağılmının Galaksideki metal zenginliği ile ilgili olabileceğini ileri sürmüştür. Diğer yandan Meylan ve Maeder ise $M_v = -6'$ dan daha parlak olan O-yıldızlarının sayı yoğunluğunun Galaksinin merkezine doğru arttığını bulmuşlardır. Mavi üst devler, sarı üst devler O-yıldızları ile paralellik göstermekte, fakat kırmızı üst devlet tersi bir özellik taşıyarak Galaksi merkezine doğru azalmaktadır. Kırmızı üst devlerin bu özelliği metalikliğin bir sonucu olabileceği sonucuna varılmaktadır. Galaksimizin dış bölgelerinde daha az metal var ve o nedenle daha çok kırmızı üst dev var. Parlaklılığı $-M_b > 8.5$ olan yıldızları ele alarak Wolf-Rayet yıldızlarının O-yıldızlarına sayıca oranını bulmuşlar ve bu oranın Galaksinin dış bölgelerine doğru azaldığını tesbit etmişlerdir. Wolf-Rayet yıldızlarında gözlenen bu sayısal yoğunluk gradyantının sadece başlangıç kütle fonksiyonundan değil fakat aynı zamanda başka etkilerden de olabileceği ileri sürülmüşlerdir (metaliklik gibi). Metalikliğe göre bu oranın (WR-sayı / O-sayı) nasıl değiştiğini şu değerlerden anlayabiliriz:

$$\frac{\text{WR-sayı}}{\text{O-sayı}} = 0.100, \text{ Galaksimizde Güneş civarında}$$

$$" = 0.045, \text{ LMC'de } (z = 0.008-0.010)$$

$$" = 0.019, \text{ SMC'de } (z = 0.002-0.003)$$

Metal zenginliğinin yüksek olması hem O-yıldızlarında hem de kırmızı üst devlerde kütle kayıp hızını artıracagından ve bunun sonucuda daha fazla Wolf-Rayet yıldızu oluşturulabileceğinden kimyasal gradyantın Wolf-Rayet yıldızlarının Galaksideki dağılmını etkileyen önemli bir faktör olduğu sonucuna varılmıştır. Nitekim WR-sayı / Kırmızı

üst dev-sayısı oranı Galaksinin merkezinden dışına doğru azalmaktadır. Bu sonuca dikkat çeken Coti ve arkadaşları aynı oranın SMC ve LMC de de küçük olduğunu belirtmektedirler. Ayrıca Galaksimizde $1 = 125^\circ$ ile $1 = 234^\circ$ arasında (merkezin tersi yönünde) hiç bir Wolf-Rayet yıldızına rastlanmadığını işaret edilmektedir. Analizleri sonucu Wolf-Rayet yıldızlarının Galaksimizdeki dağılımının küteleri büyük olan ($M_* > 40 M_\odot$) O-yıldızlarının dağılımına oldukça benzer olduğunu bulmuşlar ve Wolf-Rayet yıldızlarının büyük küteli O-yıldızlarından olduğu sonucuna varmışlardır. WR-sayısı/O-sayısı ($M_* > 40 \pm 5$) oranının gözlemlsel değerini $= (44/152) = 0.29 \pm 0.09$ olarak elde etmişlerdir. Bu oran kuramsal olarak öngörülen değerden (~ 0.08) 3-4 kat fazladır.

Gözlemlerle kuramsal değer arasında uyum sağlayabilmek için Conti ve arkadaşları O-yıldızlarından başka B-üst devlerini (BI) de analiz numunesi içine almışlardır. Bunlardan sadece $M_b = -8.8'$ den daha parlak ve yüzey sıcaklıklarını $25\,000^\circ\text{K}$ 'den az olanları seçilmişdir, çünkü bu gurup B-yıldızları da Wolf-Rayet yıldızlarının dağılımını andırmaktadır. BI yıldızları da dahil edildiğinde, WR-sayısı/(O+BI)-sayısı oranı $= (44/224) = 0.20 \pm 0.05$ olmaktadır. Ancak yine de gözlemlerle değere düşürülememiştir.

Galaksimizde, nerelerde bulunduklarına gelince ise, toplam Wolf-Rayet yıldızlarının $\%$ (10-30)'u öbek (cluster) içinde bulunmaktadır. Ayrıca en az $\%$ 50'sinin O-B yıldız gurupları (association) içinde olduğu tahmin edilmektedir (35).

9. Kütleleri

Kütleleri, yarıçapları ve yoğunlukları ile ilgili direk gözlemler bilgiler Wolf-Rayet çift yıldızlarından gelmektedir.

Güneşimizin komşuluğunda görünen yakın Wolf-Rayet çift yıldızlarının (WR+O) miktarı $\%$ 25 dir (36). Bununla beraber kompakt bileşeni olan çiftleri de dahil ederek bu oranı $\%$ 50 ye çıkarılanlar da var (37).

Çift Wolf-Rayet yıldızların gözlemlerinden elde edilen bilgilere göre kütleleri $5-50 M_\odot$ arasında değişmektedir (36). Ancak ortalama kütle $20 M_\odot$ civarındadır. Örneğin V444 cyg (WR+O) nin Wolf-Rayet bileşeni $10.1 M_\odot$ 'lık bir kütleye sahiptir.

WOLF-RAYET YILDIZLARI KURAMSAL

Wolf-Rayet yıldızlarının evrim çalışmalarına geçmeden önce bazı önemli özelliklerini birkez daha hatırlayalım:

1. Wolf-Rayet yıldızları oldukça yüksek kütle kayıp hızına sahip ve kütle kaybı yoluyla HII bölgelerine süpernova patlamasına eşdeğerde enerji sağlamaktadır.
2. Wolf-Rayet yıldızları galaksilerde metal zenginliğinin göstergeleridir.
3. Wolf-Rayet yıldızları Galaksimizin bazı elementlerce zenginliğinin kaynağıdır (He^4 , ^{14}N , ^{12}C , ^{16}O ve ^{22}Ne gibi) (38)
4. Wolf-Rayet yıldızları süpernovaların atalarıdır.

Sıralanan bu özellikleri, Wolf-Rayet yıldızlarına duyulan merak ve ilgiyi hep canlı tutmuş ve bunların evrim safhasının anlaşılması astronomlar için önemli bir görev haline gelmiştir.

Evrim hesapları yaparken Wolf-Rayet yıldızlarının evrimi üzerindeki gözlemsel sınırlamalara da dikkat edilmesi gereklidir. Kütlelerinin $5\text{--}50 M_{\odot}$ arasında oluşu, Mutlak bolometrik kadirlerinin -7.0 ile -9.5 arasında bulunması, etkin sıcaklıklarının $35\ 000^{\circ}\text{K}$ den başlayarak $60\ 000^{\circ}\text{K}$ 'ye kadar çıkabileceği, normal olmayan bir element bolluğu sahip olmaları, Galaksimizdeki dağılımları ve yüksek kütle kayıp hızları kuramsal çalışmaları sınırlamaktadır.

İlk kez 1954 yılında Bok (39) Wolf-Rayet yıldızlarının yaşı $10^5\text{--}10^6$ yıl arasında tahmin etmiş, Roberts (40) ise 1958 yılında bilinen verilerden bu yıldızların 2×10^8 yıldan daha yaşlı olmamalı gerektiğini ileri sürmüştür. Aynı yıllarda Sahade (41) Wolf-Rayet yıldızlarının evrimlerinin çekimsel (gravitasyonel) büzülme döneminde olduğunu belirtmiştir.

Bundan tam sekiz yıl sonra 1966 yılında Underhill (42) de hem genç hem de yaşlı Wolf-Rayet yıldızları olduğunu söyleyerek bu fikri desteklemiştir. Yine 1958 yılında Burbidge'ler (43) "Handbuch der Physik" için yıldız evrimleri üstüne bir bölüm yazmış ve bu bölümde Wolf-Rayet yıldızlarının görsel mutlak kadirlerinin -4.5 ile -2.5 arasında olduğunu ve anakol'un altında bulunduklarını yazmıştır. Klasik Wolf-Rayet yıldızlarının sıcak alt-cüceler olarak sınıflandırıla-

bileceği, fakat aynı zamanda yüksek sıcaklıklarını ve ışıma güçleri nedeniyle belki de anakol'un biraz üstünde olabileceklerine işaret edilmiştir. O ve B yıldız gurupları ile ilgili olduklarıdan hareketle, bunların yeni oluşmuş yıldızlar olduğu, ileri evrim safhasında olmalarından da büyük kütleli oldukları sonucuna varılmış ve Öbek-I yıldız gurubuna ait oldukları yazılmıştır. Burbidge'lere göre o günkü durum söyleydi: Wolf-Rayet yıldızları tipik olarak $10 M_{\odot}$ kütleli, büyük kütleli cisimlerden oluşmuş ve enerjileri He-yanmasından gelen cisimlerdi. Bu bilgiler Wolf-Rayet yıldızlarını, yıldızların evrimi çerçevesinde anlamak için bir başlangıç olmuştur.

Çift yıldızlarda kütlenin de bilinmesi ve bileşenler arasında kütle alış-verisi olması evrim hesaplarının yapılmasını ve Wolf-Rayet çift yıldızlarının gözlemlerinin anlaşılmasını kolaylaştırmıştır (44). Ancak kütleler bilinmediği için tek Wolf-Rayet yıldızları ile ilgili o yıllarda (1967) pek bir şey yapılamamıştır. Ancak on yıl kadar bir zaman sonra 1978 yılında tek Wolf-Rayet yıldızlarının evrimi başlatılmıştır (45).

1950 li yillardan bugüne Wolf-Rayet yıldızlarının evrim safhaları ile ilgili farklı pek çok şey söylemiş ve yapılmıştır. Ancak bugünlerde ortaya çıkan durum WR yıldızlarının bilinen gözlemlerini de sağlayan dört ana kuramsal senaryosunun ortaya çıkmasıdır.

WR yıldızlarının oluşturulmasında ortaya çıkan bu dört senaryo şu etkilere dayanmaktadır:

1. Çift yıldızlarda kütle transferi
2. Anakol yıldızlarında kütle kaybı (Conti, 46)
3. Üst devlerde kütle kaybı, özellikle kırmızı üst devlerde,
4. Değişik yollarla karışma.

Bu dört senaryoya karşı gelen evrim yollarını değişik kişiler hesaplamış (47, 48, 49) ve oluşturdukları Wolf-Rayet yıldızlarını HR' diyagramına yerleştirmiştirlerdir. Bileşen yıldızlar arasında kütle transferi olmasından dolayı Wolf-Rayet çift yıldızlarını oluşturmak nispeten kolaydır. Galaksimizde, LMC'de ve SMC'de ve WR çift yıldızlarının dağılımına bakıldığından WR çift yıldızlarının tüm WR yıldızları içindeki yüzdesinin metal zenginliği ile ters yönde değiştiği dikkati çekmektedir. Buradan çıkarılan sonuç çift yıldız senaryosu ile WR yıldızı oluşturmaının önemi değişik galaksilerde aynı olmayıp, belki metal zenginliği gibi bölgесel koşullara bağlı olduğunu göstermektedir.

Cök kesin olmamakla beraber Güneş civarındaki WR yıldızlarının oluşturulmasında değişik mekanizmaların rollerini şöyle sıralayabiliriz: % 15'i karmaşa ve anakolda kütle kaybı yolu ile, % 35'i kırmızı üst dev sonrası evrim safhasında, ve % 50'si de çift yıldız evrimi (görülebilir ve görülemeyen bileşenliler dahil) yolu ile oluşmaktadır.

WOLF-RAYET YILDIZLARININ TİTREŞİMLERİ

Wolf-Rayet yıldızlarının gözlenen sayıları ile kuramsal sayılarının neden birbirinden farklı olduğunun henüz tam açıklanmadığını daha önce belirtmiştim. Bundan başka Wolf-Rayet yıldızlarının gözlemlerinde açıklanması gereken iki nokta daha vardır. Birincisi, bu yıldızların kimyasal yapılarındaki normal olmayan element bulluğu ve ikincisi de çok yüksek kütle kayıp hızına sahip olmalarıdır.

Hem gözlemsel hem de kuramsal yönden bugün hakim olan görüşe göre WN yıldızları, yüzeylerinde CNO çevrimi artığı maddeleri, ve WC yıldızları da He-yanması artığı maddeleri sergilendirmektedir. Diğer yandan Wolf-Rayet yıldızları çok yüksek kütle kayıp hızına sahiptir. Gözlemlerden ve kuramsal çalışmalarдан çıkardığımız sonuç O-tipi yıldızlardan Wolf-Rayet yıldızı oluşturur iken kütle kaybındaki hakim mekanizmanın yıldız rüzgarı olduğunu söyleyebiliriz. Ancak yıldız rüzgarı yolu ile atılan kütle kullanılarak yapılan evrim hesapları gözlenen Wolf-Rayet yıldızlarını açıklayamamaktadır. Bu nedenle kütle atımında başka mekanizmanın da olabileceğinden şüphelenilmiştir. Bunun da yıldızların derinliklerinde oluşan titreşimlerden kaynaklanabileceği ileri sürülmüştür (25). Bu görüşü destekleyen birçok çalışma yapılmıştır (50, 51, 52). Sırasıyla bu çalışmalarda Noels ve Gabriel (50) 80 ve $100 M_{\odot}$ için titreşimsel kararsızlık bulmuş ve e-katlama zamanını 1000 yıl elde etmiş; Maeder (51) 85 ve $120 M_{\odot}$ için yaptığı hesaplarda radyal titreşimsel kararsızlık bulmuş ve Kırkıyık (52) ise $60 M_{\odot}$ için yaptığı çalışmada yine titreşimsel kararsızlık elde etmiştir. Yani bahsi geçen yıldızların kütle kaybı sonucu evrimleşerek Wolf-Rayet yıldızı olmaları safhasında radyal titreşimsel kararsızlıkla yeterli miktarda kütle kaybedebilecekleri gösterilmiştir.

Bu yıldızlarda normal olmayan kimyasal yapının açıklanmasına ilişkin olarak yapılan bir çalışmada da Wolf-Rayet yıldızlarının radyal olmayan titreşimlere karşı da kararsız olabileceği gösterilmiştir (53). Kırkıyık ve arkadaşları bu çalışmada elde edilen kararsızlığın karışmaya neden olabileceğini ileri sürmüştür ve bu yolla yıldızın derinliğindeki nükleer yanma artığı maddelerin yüzeye çıkabileceğini tartışırmıştır.

SONUÇ

Bir yüzyılı aşkın bir zaman önce keşfedilmiş olan Wolf-Rayet yıldızları ile ilgili gözlemler ve kuramsal çalışmaların kısa bir özétini yapmış bulunuyoruz. Wolf-Rayet yıldızları ile ilgili bazı problemlerin özellikle son yıllarda yapılan çalışmalar sonucu, çözüme kavuşturulduğunu fakat hala çözüm bekleyen noktalar olduğunu da görmüş olduk. Wolf-Rayet yıldızlarının açıklanamayan bazı gözlemlerinin açıklığa kavuşturulması için hala pek çok çalışma yapılması gereğine de işaret etmek yerinde olur.

Kaynaklar

- 1- **Wolf, C.J.E., and Rayet, G.A.P., *CR*, 65, 292, 1867.**
- 2- **Respighi, M., *CR*, 74, 516, 1871.**
3. **Campbell, W.W., *Astron. Astrophys.*, 13, 448, 1894.**
4. **Plaskett, J.S., *Publ. Dominion Astrophys. Obs.*, 2, 287, 1924.**
- 5- **Beals, C.S., *Trans. IAU*, 6, 248, 1939.**
- 6- **Fleming, W.P., *Harvard College Obs. Ann.* 56, 165, 1912.**
- 7- **Payne, C.H., *The Stars of High Luminosity, Harvard Obs. Monographs*, No. 3, P. 19, 1930.**
- 8- **Roberts, M.S., The Galactic Distribution of the Wolf-Rayet Stars, *Astron. J.*, 67, 79–85, 1962.**
- 9- **Smith, L.F., A Revised Spectral Classification System and A New Catalogue for Galactic Wolf-Rayet Stars, *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.*, 138, 109–121, 1968.**
- 10- **Van der Hucht, K.A., Conti, P.S., Lundström, I., Stenholm, B., *Space Science Reviews*, 28, 227–306, 1981.**
- 11- **Breysacher, J., Spectral Classification of Wolf-Rayet Stars in the Large Magellanic Cloud, *Astron. Astrophys. Suppl.*, 43, 203–207, 1981.**
- 12- **Azzopardi, M., Breysacher, J., A Search for New Wolf-Rayet Stars in the Small Magellanic Cloud, *Astron. Astrophys.*, 75, 120–126, 1979.**
- 13- **Conti, P.S., Massey, P., Wolf-Rayet Stars and Giant HII Regions in M33: Casual Assciations or Meaningful Relationships, *Astrophys. J.*, 249, 471–480, 1981.**

- 14- Conti, P.S., *Mass Loss and Evolution of O-Type Stars*, Eds. P.S. Conti and C.W.H. de Loore, D. Reidel Publ. Comp., Dordrecht, Holland, P. 431, 1979.
- 15- Massey, P., Conti, P.S., *Wolf-Rayet Stars in the LMC*: How Faint are the Faintest, *Astrophys. J.*, **264**, 126–133, 1983.
- 16- Geraismovic, B.P., *Harvard College Obs. Circ.*, No. 339, 1929.
- 17- Beals, C.S., *Publ. Dominion Astrophys. Obs.*, **6**, 95, 1934.
- 18- Kubi, L.V., Wolf-Rayet Stars, II. The Infrared Spectrum *Astrophys. J.*, **145**, 715–723, 1966.
- 19- Pyper, D.M., The Effective Temperatures of Wolf-Rayet Stars as Derived From Their UBV Colour Indices Corrected for Emission, *Astrophys. J.*, **144**, 13–24, 1966.
- 20- Morton, D.C., *Wolf-Rayet and High Temperature Stars*, Eds. M.K.V. Bappu and J. Sahade, D. Reidel Publ. Comp., Dordrecht, Holland, P. 54, 1973.
- 21- Willis, A.J., Wilson, R., Ultraviolet Observations of Nine Wolf-Rayet Stars, *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.*, **182**, 559 ,1978.
- 22- Willis, A.J., Wilson R., *Mass Loss and Evolution of O-Type Stars*, Eds. P.S. Conti and C.W.H. de Loore, D. Reidel Publ. Comp., Dordrecht, Holland, P. 461, 1979.
- 23- Underhill, A.B., Concerning the Wolf-Rayet and Other Luminous Early-Type Stars, *Astrophys. J.*, **244**, 963–988, 1981.
- 24- Schmutz, W., Smith, L.J., *The Second IUE European Conference* (ESA-SP 157), P. 241, 1980.
- 25- Barlow, M.J., Smith, L.J., Willis, A.J., Mass Loss Rates for 21 Wolf-Rayet Stars, *Monthly-Notices Roy. Astron. Soc.*, **196**, 101, 1981.
- 26- Bieging, J.H.. Abbott, D.C., Churchwell, E.B., Mass Loss Rates for Wolf-Rayet Stars from Radio Continuum Observations, *Astrophys. J.*, **263**, 207–214, 1982.
- 27- Conti, P.S., *Effects of Mass Loss on Stellar Evolution*, Eds. C. Chiesi and R. Stalio, D. Reidel Publ. Comp., Dordrecht, Holland, P. 35, 1981.
- 28- Garmany, C., Olson, G., Conti, P.S., *Mass Loss Rates from O Stars in OB Associations*, *Astrophys. J.*, **250**, 660–676, 1981.

- 29– Hogg, D., in IAU Symposium 99, *Wolf-Rayet Stars: Observations, Physics and Evolution*, eds. C. de Loore and A.J. Willis, D. Reidel Publ. Comp., Dordrecht, Holland, 1982.
- 30– Singh, M., The Wolf-Rayet Stars, *Astrophys. and Space Science*, **120**, 155–119, 1986.
- 31– Garmann, C.D., Conti, P.S., Chiosi, C., *The Initial Mass Function for Massive Stars*, *Astrophys. J.*, **263**, 777–790, 1982.
- 32– Hidayet, B., Supelli, K., Van der Hucht, K.A., *Wolf-Rayet Stars: Observations, Physics and Evolution*, eds. C.W.H. de Loore and A.J. Willis, P. 27, 1982.
- 33– Meylan, G., Maeder, A., *The Population of Massive Stars in the Galaxy: Their Frequency Gradients in relation to Metallicity and Initial Mass Function*, *Astron. Astrophys.*, **129**, 84–88, 1983.
- 34– Conti, P.S., Garmann, C.D., de Loore, C., Vanbeveren, D., *The Evolution of Massive Stars: The Numbers and Distributions of O Stars and Wolf-Rayet Stars*, *Astrophys. J.*, **274**, 302–312, 1983.
- 35– Lundström I., Stenholm, B., *Wolf-Rayet Stars in Open Clusters and Associations*, *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, **58**, 163–192, 1984.
- 36– Massey, P., *The Masses of Wolf-Rayet Stars*, *Astrophys. J.*, **246**, 153–160, 1981.
- 37– Vanbeveren, D., Conti, P.S., *On the Binary Frequency Distribution and Evolution of Wolf-Rayet Stars*, *Astron. Astrophys.*, **88**, 230–235, 1980.
- 38– Maeder, A., *Evolution and Nucleo synthesis in Massive Stars with Mass Loss: The Yields in Helium and Heavy Elements and Constraints on the Past Star Formation Rate*, *Astron. Astrophys.*, **101**, 385–396, 1981.
- 39– Bok, B.J., N.S.F., *Berkeley Conference for Instructors in Astronomy*, p. 5, 1954.
- 40– Roberts M.S., *Etoiles à raies d'émission*, Me'm.Soc. R. Sci. Liege, **20**, 76, 1958.
- 41– Sahade, J., *Observatory*, **78**, 79, 1958.
- 42– Underhill, A.B., *The HR Diagram and Wolf-Rayet Stars*, Observatory, **86**, 25–27, 1966.
- 43– Burbidge, E.M., Burbidge, G., *Handbuch der Physik*, ed.S. Flügge (Springer-Verlag), **51**, 134, 1958.

- 44- Paczynski, B., *Evolution of Close Binaries. V. The evolution of Massive Binaries and the Formation of the Wolf-Rayet Stars*, Acta Astron., **17**, 355–380, 1967.
- 45- de Loore, C.W.H., *Mass Loss and Evolution of O Type Stars*, eds. P.S. Conti and C.W.H. de Loore, D. Reidel Publ. Comp. Dordrecht, Holland, P. 313. 1979,
- 46- Conti, P.S., *Astrophysique et Spectroscopie*, Me'm. Soc. Roy. Sci. Liege, 6^e se'rie, tome IX, P. 193, 1976.
- 47- Noels, A., Gabriel, M., *Evolution of Massive Stars with Mass Loss and Formation of WR Stars*, Astron. Astrophys., **101**, 215, 1981.
- 48- Maeder, A., *Evolutionary Scenarios Leading Massive Stars to WR Stars: Their Mutual Importance, The Role of Mixing*, Astron. Astrophys., **105**, 149–158, 1982.
- 49- de Loore, C.W.H., *Effects of Mass Loss on Stellar Evolution*, IAU Coll., n. 59, eds. C. Chiosi and R. Stalio, 1980.
- 50- Noels, A., Gabriel, M., *Evolution of Massive Stars with Mass Loss and Formation of WR Stars*, Astron. Astrophys., **101**, 215-222; 1981.
- 51- Maeder, A., *Vibrational Instability of Wolf-Rayet Stars*, Astron. Astrophys., **147**, 300–308, 1985.
- 52- Krbiyik, H., *Wolf-Rayet Yıldızları ve Radyal Titresimleri*, Türk Fizik Derneği Toplantısı, ODTÜ Fizik Bölümü, 3–5 Eylül, 1986.
- 53- Krbiyik, H., Bertelli, G., Chiosi, C., *Vibrational Stability Analysis in Relation to WR Stars Models*, ISAS-International School For Advanced Studies, n. 65 /84 /A, 1984.

