

Diyet Yapan Yıldızlar

Prof. Dr. Faruk Soyduġan [Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Fizik Bölümü, Astrofizik Anabilim Dalı ve Ulupınar Gözlemevi

Kütle evrenin, gök adaların ve yıldızların en temel parametrelerinden biri. Kütlesinin ne olduğunu ve ne kadar değiştiğini bilmeden bir yıldızın yapısını ve yaşamını anlamaya çalışmak neredeyse imkânsız. Yıldızların hemen hemen tamamı yaşamları boyunca farklı oranlarda kütle kaybeder. Yıldızların yaşam sürelerini ve enerji çıktılarını belirleyen niceliklerin başında gelen kütle değiştikçe yıldız da değişir. Bazı yıldızlar, yaşamları boyunca kütlelerinin yarısından fazlasını kaybedebilir. Yıldızlarda gerçekleşen, âdeta diyet süreçleri diyebileceğimiz kütle kayıpları, genellikle soğuk ve sıcak yıldız rüzgârlarının etkisiyle meydana gelir. Güneş gibi soğuk yıldızlar küçük miktarlarda kütle kaybeder, çok sıcak yıldızlar ise yüksek ısıtım basıncının etkisiyle büyük çaplı kütle kayıpları yaşar. Yıldızların diyetini detaylarıyla kavramak, gök adaların ve geniş ölçekte evrenin element dönüşümlerini, element çeşitliliğini ve toz bütçesini anlamaya yarar.

boyunca kaybettiği ve özel durumlarda kazandığı kütledir. Yıldızın yaşam süresini veya ne kadar süre füzyonla enerji üreteceğini belirleyen kütlenin yaşamı boyunca ne kadar ve nasıl değiştiğini belirlemek yıldız astrofiziğinin önemli araştırma alanlarından biridir. Bu yazıda yıldızların kütle kaybetme süreçleri ve etkileri üzerinde durduk. Yazıda “diyet” kavramı, yıldızlarda kütle kaybına karşılık gelecek şekilde kullanıldı. Yıldızlar nasıl, neden ve ne kadar kütle kaybediyor? Kaybettikleri kütle yıldızların yaşamını nasıl etkiliyor?

Yıldız oluşumu kütle kazanımı süreciyle başlayıp devam eder. Bu süreçte ortaya çıkan plazma küresi hidrostatik dengeye ulaştıktan sonra artık yeni doğmuş bir yıldızdan söz edilebilir. İşte o yıldızın sahip olduğu kütle, üreteceği ve uzaya yayacağı enerjiyi büyük ölçüde belirler. Diğer taraftan yıldızların önemli bir kısmının kütlesi yaşamları boyunca sabit kalmaz ve farklı nedenlerle değişir. Kütle kaybetme süreci yıldızların önemli bölümü için yaşamlarının farklı dönemlerinde gündeme gelir. Yıldızlarda kütle kaybının ana sebeplerinden biri

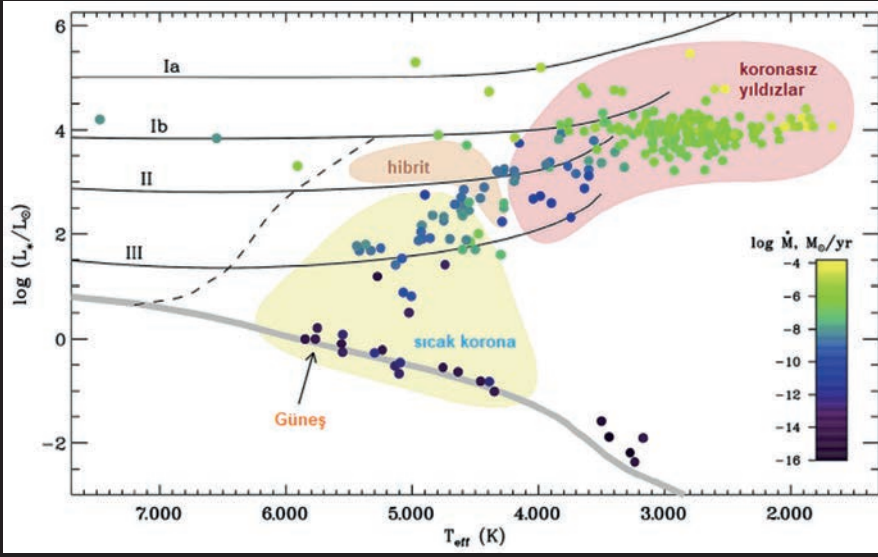
yıldız rüzgârlarıdır. Farklı tür yıldızlarda kütle kaybına gerekçe olabilecek farklı süreçler ortaya çıkabilir. Örneğin çift yıldızlarda, bileşen yıldızlardan büyük kütleli olanı çekirdeğindeki füzyon yakıtını daha çabuk bitirdiği için çekirdeğinde büzülme görülür ve çekirdeğini saran katmanlar genişler. Bu durum yıldızın iç Roche yüzeyini (çift yıldızlarda yıldızın genişleyebileceği en büyük hacmi saran iç yüzey sınırı) doldurmasına neden olur. Yıldız, kütle çekiminin dengelendiği noktadan ona kütle çekimsel olarak bağlı bileşene kütle aktararak kütlesinin önemli bir kısmını kaybedebilir. Kütleyi alan yıldızlar bazen beyaz cüce, nötron yıldızı, hatta kara delik olabilir.

Bu yazıda daha çok tek yıldızlarda yaşanan ve ani patlamalar şeklinde gerçekleşmeyen kütle kayıplarından bahsedeceğiz.

Güneş ve Benzeri Yıldızlarda Kütle Kaybı

Yıldızların çekirdeklerinde gerçekleşen füzyon reaksiyonları, maddenin enerjiye dönüşmesini sağlar. Bu dönüşüm yıldız için kütle kaybı veya başka deyişle nükleer füzyon diyetidir. Albert Einstein tarafından öne sürülen $E=mc^2$ eşitliğiyle basitçe hesaplanabilecek bu kayıp,





Güneş türü soğuk, küçük kütleli, anakol ve yaşamını ileri aşamasındaki yıldızların Hertzsprung-Russell diyagramındaki dağılımları, kütle kayıp mekanizmaları ve oranları ($\log \dot{M}$). (Vidotto, 2021)

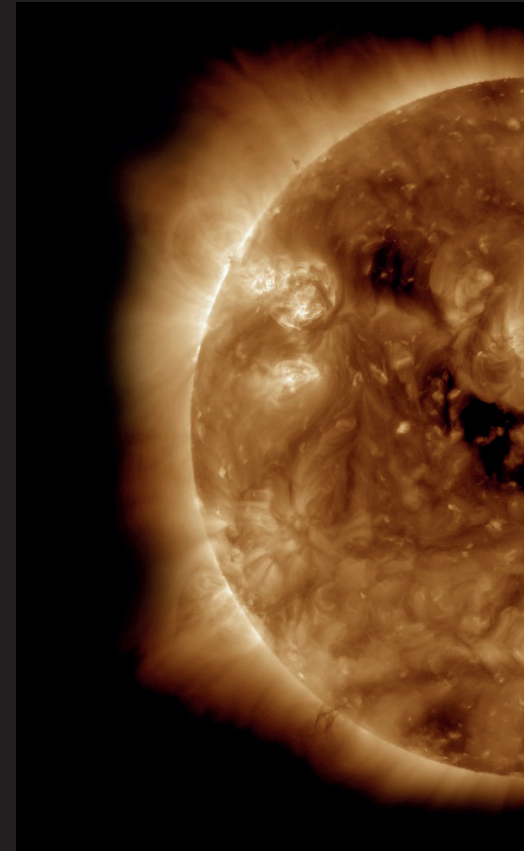
Güneş'te saniyede yaklaşık 4 milyon tona ulaşır. Güneş'in kütlesi (yaklaşık 2×10^{33} gram) dikkate alındığında yaşadığı bu füzyon diyetinin yaşamını değiştirecek etkiye sahip olmadığı anlaşılabilir.

Güneş gibi soğuk ve küçük kütleli yıldızlarda yıldız rüzgârlarıyla da kütle kaybı yaşanır. Güneş rüzgârı, taçküreden (korona) salınan yüklü parçacıklardan oluşur. Rüzgârda büyük oranda proton, elektron ve alfa parçacıkları bulunur. Güneş rüzgârının hızı sakin bölgelerde saniyede 200-300 km iken koronal delikler ve aktif bölgelerde bu hız saniyede 700 km'yi aşabilir. Güneş'in manyetik etkinliğinin neden olduğu Güneş rüzgârıyla gerçekleşen kütle kaybı oldukça düşüktür. Güneş'te soğuk yıldız rüzgârıyla meydana gelen kütle kaybı yılda yaklaşık 10^{-14}

Güneş kütlesi mertebesinde. Manyetik aktivite düzeyi ve temel parametreleri (yarıçap, sıcaklık, uzaya yaydığı enerji vb.) yaşamı boyunca değişse de Güneş'in yıldız rüzgârıyla tüm ömrü boyunca kaybedeceği kütle (kayıp miktarında da değişiklikler olur), toplam kütesinin %1'i mertebesinde olacaktır. Rüzgâr diyeti füzyon diyetinden çok daha büyük olsa da toplam kütle ve bu nedenle yaşam biçimini değiştirecek seviyede değildir. Diğer yandan, kütle kaybı oranı düşük olsa da soğuk yıldız rüzgârları Güneş ve benzeri yıldızlarda önemli miktarda açısal momentum kaybına yol açar. Bu da yıldızların dönme hızlarının zamanla azalması anlamına gelir.

Soğuk ve yaşamının ileri aşamasındaki dev ve süper dev yıldızlarda rüzgâr diyeti

daha şiddetlidir. Korona belirteçleri göstermeyen, küçük kütleli ve gelişimini tamamlamış bu yıldızlarda pulsasyon temelli mekanik kuvvetlerden kaynaklanan madde kayıpları söz konusudur. Güneş gibi yıldızlarda çok yüksek korona sıcaklığı (10^6 K) olsa da rüzgâr yüzünden gerçekleşen kütle kayıpları düşük orandadır. Ancak merkezindeki hidrojeni tüketmiş, daha soğuk korona (10^4 K) katmanına sahip soğuk dev ve süper



Güneş'in dış atmosferinden ayrılan Güneş rüzgârı ve koronal deliklerin morötesi dalga boyunda SDO (Solar Dynamics Observatory) uydusu ile elde edilen görüntüsü (NASA)

dev yıldızlarda çok daha büyük oranda kütle kayıplarıyla karşılaşılır. Bu iki grup (Güneş gibi anakol yıldızları ve yaşamının ileri aşamasındaki soğuk yıldızlar) arasında yumuşak bir geçiş vardır. Bu geçişin görüldüğü “hibrit” yıldızlarda hem ısısal hem de mekanik kaynaklı rüzgârlar görülür. Özetle, Güneş ve benzeri küçük kütleli, soğuk yıldızlarda diyet; hidrojen füzyonu sırasında çok düşük seviyede iken yaşamlarının ileriki aşamasında (dev ve özellikle üst dev evresinde) çok daha kısa zaman ölçeğinde ve

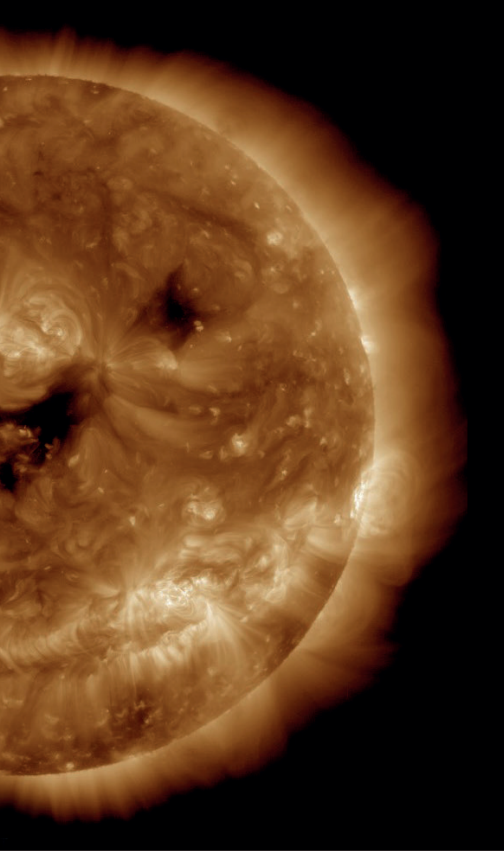
daha şiddetli şekillerde gerçekleşir. Güneş benzeri yıldızlarda yıldız rüzgârıyla kütle kaybının ölçülmesi morötesi bölgede ortaya çıkan ve 1216 Å dalga boyunda gözlenen hidrojene ait Lyman α soğurma çizgisinin analiz edilmesi ile gerçekleşir.

Sıcak Yıldızlarda Kütle Kayıpları

Kuramsal hesaplamalara göre, yıldızların tümü rüzgârla kütle kaybediyor ancak yıldızların temel parametreleri ile fiziksel ve kimyasal özelliklerine göre kütle kaybetme süreçleri ve miktarları değişiyor. Çekirdeklerinde hidrojen füzyonuyla enerji üreten anakol yıldızlarında, atmosfer sıcaklığı 10.000 K dereceyi aştığında, radyasyon kaynaklı rüzgârlar ortaya çıkmaya başlıyor. OB tayf türünden anakol yıldızları, OBA türü süper devler, sıcak alt cüce yıldızlar, gezegenimsi bulutsu çekirdeklerindeki yıldızlar ve Wolf Rayet yıldızları ısıtım basıncının neden olduğu rüzgârlarla yakın uzaylarına madde atıyor. Bu tür yüksek sıcaklıklı ve büyük ısıtım gücündeki (L) yıldızların üst atmosferlerindeki madde, sıcaklıklarının dördüncü kuvvetiyle orantılı olan ısıtım basıncına dayanamaz ve yıldızdan rüzgârlarla ayrılmaya başlar. Başka bir deyişle, bu yıldızların

atmosferlerinin üst bölgelerinde, çekim kuvveti ısıtımın basınç kuvvetine yenilir.

Çok sıcak veya yüksek ısıtım gücündeki yıldızlarda süpersonik hızlara ulaşan rüzgârlar, X ışını salımına neden olur. Bu gök cisimlerinin tayflarına uygulanan X ışını çizgi profil analizleri, onların kütle kayıp oranlarını hesaplamada kullanılır. P Cygni yıldızının ata yıldız olduğu çok sıcak yıldızlarda (daha etkili olarak O ve B türü süper dev yıldızlarda), elektromanyetik tayfın morötesi bölgesinde bazı element çizgilerinde salma ve soğurma yapılarının birlikte görüldüğü rüzgâr kaynaklı P Cygni profilleri gözlenir. Morötesi bölgede bazı rezonans çizgilerinde ortaya çıkan (örneğin CIV, NV, Si IV ve OVI iyonlarına ait çizgiler) bu tayf profilleri, atılan madde miktarı ve rüzgâr hızının (aslında terminal hız olarak kullanılır ve yıldızdan büyük uzaklıklardaki rüzgâr hızına karşılık gelir) ölçülmesine olanak sağlar. Örneğin, OB süper devlerinde, P Cyg çizgi analizleriyle belirlenen rüzgârın hızı saniyede 2.000 km değerini, kütle atım oranları da $10^{-6} M_{\odot}/\text{yıl}$ (bir milyon yılda Güneş kütlesi kadar madde kaybı) oranını aşabilir. Bu arada soğuk süper devlerde rüzgâr hızı oldukça düşüktür (M süper devlerinde saniyede 10 km, K türü süper devlerde ise saniyede 70 km mertebesinde). Rüzgârla atılan madde O türü süper devler gibi bazı yıldızlarda, optik bölgedeki H α çizgisinde salma çizgileri oluşmasına



Komşu gök adamız
Büyük Macellan
Bulutlu'ndan bir kesitin
yer aldığı bu görselde,
içerisindeki çok sıcak
yıldızdan çıkan yoğun
yıldız rüzgârının
şişirdiği devasa bir
kozmik baloncuk
görülüyor.
(N44F - ESA)

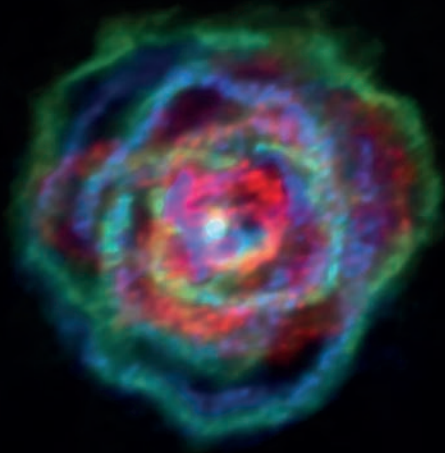


yol açar. Sıcak yıldızların yoğun kütle
atımları nedeniyle, tayfsal enerji
dağılımlarında kızılötesi ve radyo
bölgede artıklar oluşabilir. Bununla
birlikte, ortaya çıkan beklenenden
fazla enerji yardımıyla da düşük
enerji bölgesindeki kütle kayıp

oranları tahmin edilebilir.
Sıcak yıldızlarda yüksek ısıtım
gücünün neden olduğu şiddetli
kütle kayıplarını veya etkin
diyetleri tespit etmek kolay değildir
çünkü kütle kayıplarına ilişkin
kanıtlar genellikle yüksek enerji

bölgesinde yapılan atmosfer dışı
uydu gözlemlerinden elde edilir. Bu
nedenle, kütle kayıplarını tahmin
etmek için başka dolaylı yollar
kullanılır. Örneğin, gözlem verileri
kullanılarak geliştirilen “rüzgâr-
ısıtım gücü bağıntısı - WLR”,
yüzey sıcaklığı 27.500 K'den büyük
yıldızların kütle kayıp oranlarını
($\dot{M}$) tahmin etmek için kullanılır
($\dot{M} \sim L^{1.83}$). Yıldızların dönme hızları,
manyetik alan şiddetleri ve
ağır element bollukları da sıcak
yıldızlarda rüzgâr etkinlikleriyle
gerçekleşen diyeti etkiler. Bu
nedenle, yıldızların oluşumu,
yapısını ve gelişimlerini açıklamaya
çalışan kuramsal modellerde,
fiziksel ve kimyasal özelliklerine
bağlı kütle kayıpları hesaplanırken
veya değerlendirilirken bu etkiler
de dikkate alınır.

Pulsasyon yapan R Aquilae
dev yıldızının etrafında
yıldız rüzgârının etkisiyle
oluşmuş çiçek gibi görünen
yapılar (ESO)



Şok Diyet Uygulayan Yıldızlar: Wolf-Rayet Değişenleri

Wolf-Rayet (WR) yıldızları, yaşamlarının ileri evresine ulaşan, büyük kütleli ve büyük oranlarda kütle kaybeden yıldızlardır. Yıldız diyetinin en şiddetli örneği bunlarda görülür. Kütleleri 20 Güneş kütesinden fazla, yüzey sıcaklıkları ise 25.000 K dereceden büyüktür. Birkaç milyon yılı geçmeyen yaşam süreleri boyunca etraflarındaki uzayı rüzgârla beslerken, ölümleri sırasında gerçekleşen süpernova patlamalarıyla da son şiddetli madde atımlarını gerçekleştirirler. Işınım güçleri Güneş'in milyon katına ulaşan WR yıldızları, enerjilerinin önemli bir bölümünü morötesi bölgede yayınlar. Güçlü ve geniş salma çizgileri gösteren bu yıldızlarda, rüzgâr hızları genellikle saniyede 1.000-2.000 km yöresindedir. WR'lerde kütle kaybı gözlemsel parametrelerle ilişki kurularak tahmin edilebilir. Kütle kayıp oranları daha güçlü olarak bu yıldızların ışınım gücüne (dolayısıyla sıcaklığına) bağlıdır. Bununla birlikte, atılan kütle miktarının atmosferlerinde bulunan helyumdan daha ağır elementlerin bolluğuyla da ilişkili olduğu tahmin ediliyor.



Babak Tafreshi / SPL

WR yıldızlarının en karakteristik ayrımları tayflarındaki çizgi profilleri kullanılarak yapılır. Tayflarında çoğunlukla iyonize helyum, azot, karbon, silikon ve oksijenin güçlü salma çizgileriyle karşılaşılır ancak hidrojen çizgileri çok zayıf ya da görünmezdir. WR yıldızları, temelde WN ve WC olarak adlandırılan iki alt sınıfa ayrılır. WN yıldızları tayflarında belirgin azot salmaları gösterirken, WC yıldızları ise güçlü karbon salma çizgileriyle tanınır. Daha az sıklıkta rastlanan oksijen

baskın tayfa sahip olanlar ise WO alt sınıfında değerlendirilir. Çok büyük kütleleri ve kısa ömürleri nedeniyle bu yıldızların gök adaların içinde az sayıda olması beklenir. Gök adamızda keşfedilen WR'lerin sayısı 600 yöresindedir. Bununla birlikte, gök adada çoğu gaz ve toz içinde gizli toplamda en fazla 2.000-3.000 WR olabileceği tahmin edilmektedir. Ayrıca parlak olmaları nedeniyle komşu gök adalarda da (örneğin Andromeda Gök Adası) birkaç yüz WR keşfedilmiştir.

James Webb Uzay Teleskobu'ndan bir Wolf Rayet Görüntüsü

James Webb Uzay Teleskobu (JWST: James Webb Space Telescope), uzaya gönderilmiş en gelişmiş optik ve dedektör teknolojisine sahip gözlemevidir. Sahip olduğu kızılötesi gözlem yeteneği, oluşum evrelerinde toz ve gazla örtülü farklı gök cisimlerini ve bunların çevreleriyle etkileşimlerini araştırma imkânı sağlıyor. Aynı zamanda JWST sayesinde WR yıldızları gibi, yoğun rüzgârlar şeklinde madde kaybeden yıldızların da anlaşılması için önemli görüntüler ve tayf verileri elde edilebiliyor. Yakın zamanda, 15.000 ışık yılı uzaklığında, Güneş'in 30 katı kütleyle sahip WR124 yıldızı, etrafına attığı madde ile birlikte JWST tarafından görüntülendi. Şu ana kadar 10 Güneş kütlelerinde maddeyi uzaya fırlatan bu yıldız ve benzerleri, evrenin toz bütçesine sürekli katkıda bulunarak araştırmacıların ilgisini çekiyor. Bu yıldızdan saatte 150.000 km hızla uzaya atılan madde yaklaşık 10 ışık yılı çapındaki bir alana yayılıyor. Bu tür WR yıldızlarını farklı dalga boylarında detaylıca araştırmak, evrenin ilk dönemlerindeki büyük kütleli yıldızların yanı sıra o dönemde başlayan ağır element oluşumlarının ve toz kaynaklarının da anlaşılmasına önemli katkılar sağlıyor.



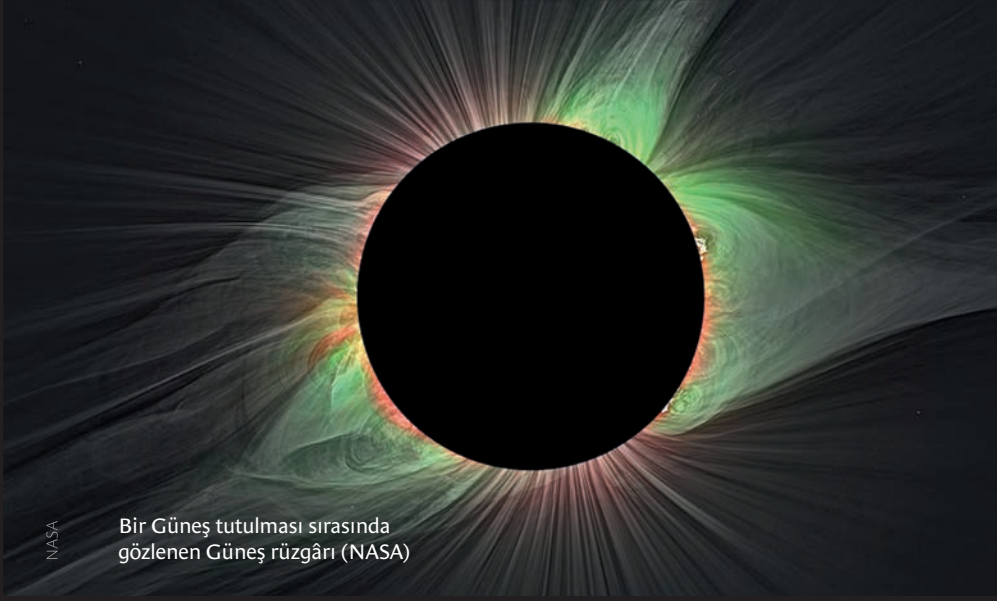
Bu görselde, Wolf Rayet yıldızı WR 124'ün JWST ile alınan yakın ve orta kızılötesi görüntüsü (sol bölüm) ve Hubble Uzay Teleskobu ile alınan optik görüntüsü (sağ bölüm) birleştirildi. (NASA-ESA)

WR yıldızları, müthiş sıcaklık ve parlaklıklarını korumak ve dengede kalabilmek için nükleer füzyon yakıtını çok yüksek hızla yakmalıdır. Diğer taraftan, yaşamlarını önemli derece etkileyecek yüksek

bir oranda kütle kaybederler. Bazı WR'ler yaşamları sırasında kütlelerinin yarısından fazlasını kaybeder. Yaptıkları diyetin etkisini varın sizler düşünün! Genel bir ifadeyle, WR yıldızları bir milyon

yılda 10 Güneş kütleli kaybedebilir. Başka bir deyişle, her üç yılda bir toplamda Dünya'nın kütlesi kadar maddeyi silahtan çıkan bir kurşunun hızının bin katından bile daha büyük hızlarla uzaya fırlatırlar.

Yapılan araştırmalara göre, devasa ve parlak yapıya sahip ancak ölmekte olan WR yıldızlarının önemli bir bölümü çift yıldız sistemi üyesi ve yakınındaki bir bileşen yıldızla kütle çekimsel olarak bağlı yörünge hareketi yapıyor. Yani, şok diyet yapan bu dev ve parlak yıldızların önemli bölümü yalnız ölmüyor! Bir WR'nin tek yaşamasıyla çift yıldız sistemi üyesi olması arasındaki fark, yaşam sürecini önemli ölçüde değiştiriyor. Tek yıldızların yaşamlarını modellemek ve gözlemlerle karşılaştırarak test etmek nispeten daha kolaydır. Çift yıldızlarda ise yıldızların ikisi de WR olduğunda fiziksel süreçler çok karmaşılaşır. Her iki yıldızın da şiddetli rüzgârlara ev sahipliği yapması ve ortaya çıkardıkları rüzgârların çarpışması bunlardan yalnızca biri. Bunun haricinde, çift yıldız üyelerinden biri daha büyük kütleli olduğunda, nükleer yakıtını hızla bitirir ve dış katmanlarını genişleterek yanındaki bileşenine hızlıca kütle aktarmaya başlar. İşte bu evrede işler iyice karışır. Şok diyet uygulayan iki yıldız kütle kaybederken, biri âdeta benim daha hızlı kilo vermem gerekiyor diyerek diğerine madde aktarmaya başlar ancak akan madde diğer bileşenin diyetini bozarak yaşamını alt üst eder. Özetle, çift üyesi WR'lerde hem



Bir Güneş tutulması sırasında gözlenen Güneş rüzgârı (NASA)

ne kadar kütle kaybettiği, yaşam sürelerini ve enerji çıktılarını doğrudan etkiliyor.

Bu yazıda değinmemiş olsak da yıldızlarda enerji üretimi durduğunda veya ölüm anında çekirdeğin üstündeki neredeyse tüm kütlelerin ani bir patlamayla uzaya atıldığını da hatırlatmak gerekiyor. Canlılarda olduğu gibi yıldızlarda da ne kadar kütleli olduklarının yanında ne kadar kütle kaybettikleri de hem yapıları hem de yaşamları için oldukça kritik rol oynuyor. Bununla birlikte kütle kaybetmenin dışında, farklı süreçlerle kütlesi artan ve yaşamları tamamen değişen yıldızlar da olduğunu söylemeliyiz. Yıldızlarda diyeti veya kütle kayıplarını anlamak sadece yıldızların yaşam serüvenlerini çözmeye yönelik değil, gök adaların element bolluklarının anlaşılmasına ve toz bütçelerinin incelenmesine dair bilgilerimize de katkı sağlıyor. . .

Yıldızlar arasında da diyet yapmak her zaman gündemde kalmaya devam edecek gibi görünüyor! ■

kütle ve açısal momentum aktarımı ve kayıplarını anlamak hem de bunların yıldızların yapı ve yaşam çizgilerindeki etkilerini araştırmak çok karmaşık problemlerin çözülmesini gerektiriyor.

Sonuç olarak; yıldız astrofiziği alanında yürütülen araştırmalar yıldızların neredeyse tamamının az veya çok katı diyetler yaptığını gösteriyor. Kütle kaybı süreçleri yıldızların yaşamlarının farklı evrelerinde farklı şiddetlerde

ortaya çıkabiliyor. Güneş benzeri yıldızlarda yılda 10^{-14} Güneş kütlesi kadar kayıp yaşanırken WR yıldızlarında bu kayıp yılda 10^{-5} Güneş kütlesine ulaşabiliyor. Bu diyetler çok çeşitli şekillerde gerçekleşebiliyor. Manyetik etkinlik kaynaklı soğuk yıldız rüzgârlarından ışıınım basıncı kaynaklı sıcak yıldız rüzgârlarına ve bazen pulsasyon kaynaklı dev yıldız rüzgârlarına doğru farklı mekanizmalar diyetlerde rol oynuyor. Yıldızların yaşamları boyunca diyetlerinde

Kaynaklar

- Aline. A. Vidotto, 2021, "The evolution of the solar wind", *Living Reviews in Solar Physics*, 18:3
- Brian E. Wood, 2004, "Astrospheres and Solar-like Stellar Winds", *Living Rev Sol Phys.*, 1, 2.
- Sarah A. Brands, Alex de Koter, Joachim M. Bestenlehner et al. 2022, "The R136 star cluster dissected with Hubble Space Telescope/STIS. III. The most massive stars and their clumped winds", *Astronomy and Astrophysics*, 663, 36.
- Teeraparb Chantavat, Siri Chongchitnan and Joseph Silk, 2023, "The most massive Population III stars", *MNRAS*, 522, 325.
- Vinkı J.S., 2022, "Theory and Diagnostics of Hot Star Mass Loss", *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, 60:203–46
- Füzyon: <https://stanford.io/3rnGzrt>
- Enerji üretimi: <https://go.nasa.gov/46NMGfJ>
- Yıldız rüzgârı: <https://astronomy.swin.edu.au/cosmos/s/stellar+winds>
- Sıcak yıldız rüzgârı: <https://bit.ly/3XKTLcJ>
- Sıcak yıldızlardan kütle kaybı: <https://bit.ly/3DgyLdr>
- Wolf Rayet yıldızları: <https://bit.ly/3D7vvRI>
- Sıcak yıldızlardan kütle kaybı: <https://bit.ly/3PT3ftH>
- WR 124'ün JWST görüntüsü: <https://go.nasa.gov/3rtxM7q>
- Yıldız rüzgârı: <https://bit.ly/3pDN9tp>
- WR 124'ün JWST ve HST görüntüsü: <https://bit.ly/3NQLtoa>