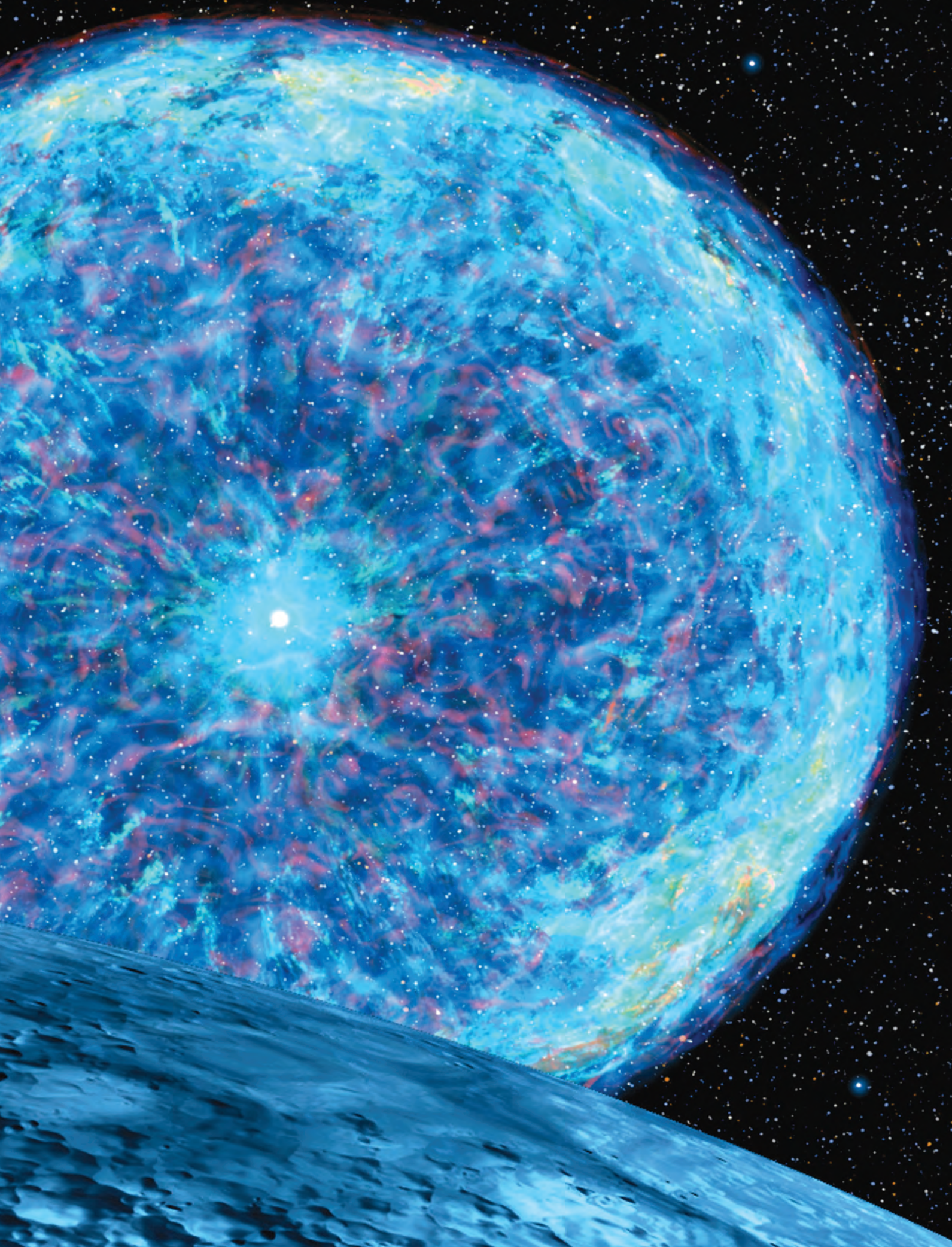


Güneş'in Sonu

**Beyaz Cüce,
Kristal Küre ve
Kara Cüce**

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

"Güneş ve gökadamızdaki yıldızların %97'den fazlasını bekleyen son neredeyse aynı. Galaktik kronometreler olarak da isimlendirilen beyaz cüceler ile başlayan bu serüvenin çözülmesi, Güneş, küçük ve orta kütleli yıldızların yaşamlarının anlaşılmasının yanında, gökadamızın yaşı ve içerdiği karanlık maddeye ilişkin kanıtlar da sunuyor."



Güneş ve benzeri yıldızların doğumundan ölümüne yaşamlarının bazı önemli evreleri gösteriliyor (sağda).

(1)
Doğum, bir süpernova patlamasının oluşturduğu şokla çökmeye başlayan bir molekül bulutunda gerçekleşir.

(2)
Öncelikle çökme sırasında, sıkışan bölgenin etrafında bir disk meydana gelir.

(3)
Bu diskte zaman zaman jet adı verilen fışkırmalar görülebilir.

(4-5)
Bulutun yoğun bölgesinde sıkışan madde, enerji üretmeye başlayıp çökmeyi durdurur ve kararlı hâle gelir. Sonunda Güneş parlamaya başlar ve anakol yıldızı olur.

(6)
Güneş, yaklaşık 4,6 milyar yıldır enerji üretilip yaymaya devam ediyor. Çekirdekdeki yakıt hidrojen azalınca, Güneş dış katmanlarını genişletmeye başlayacak ve daha kırmızı ancak daha parlak görünecek.

(7)
Hidrojen tamamen tükendiğinde şimdiki boyutunun yaklaşık 200 katı büyüklüğe ulaşarak alt-dev yıldız olacak.

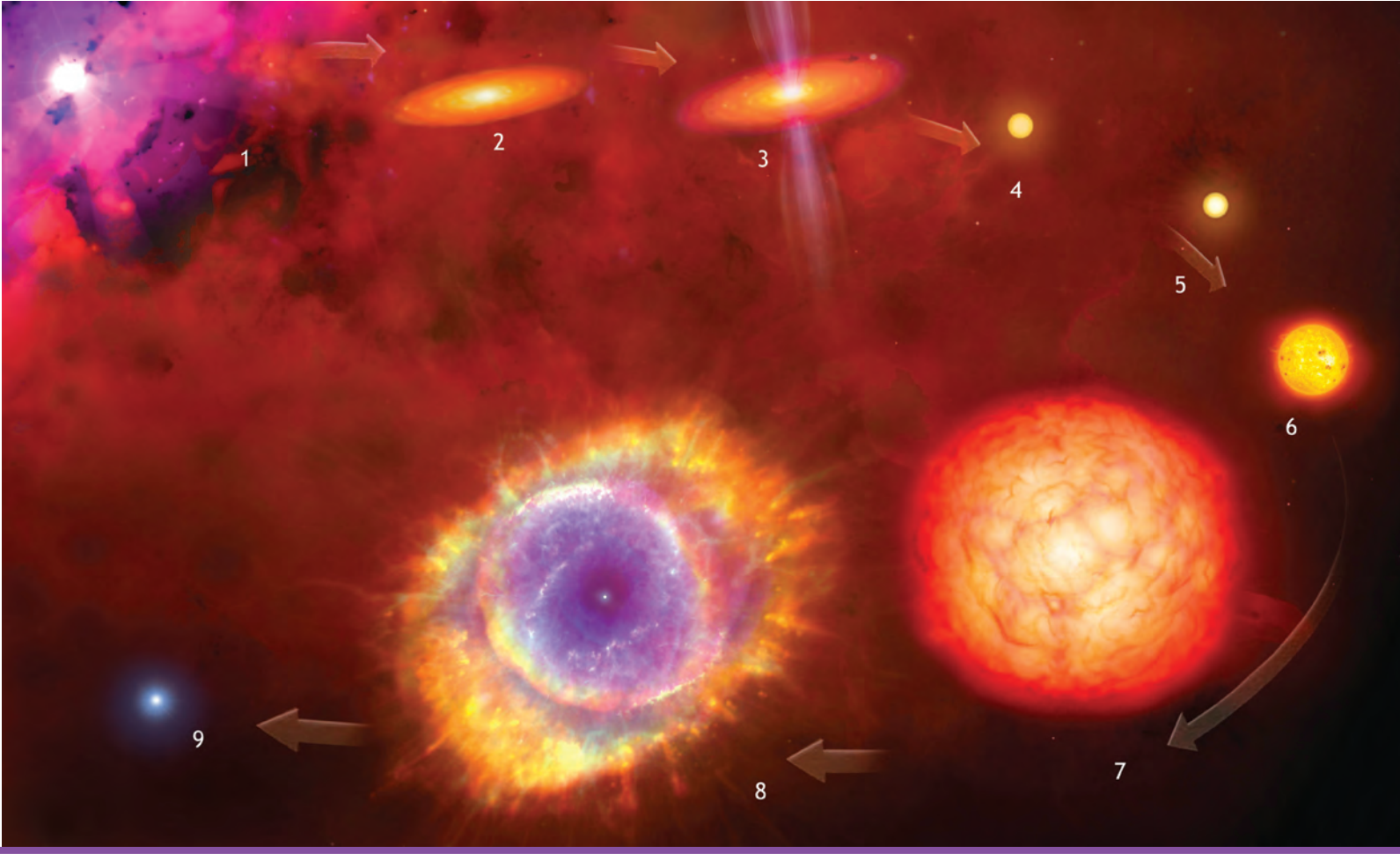
(8)
Çekirdekteki enerji üretimi durduğunda, dış katmanlarını patlama ile atarak, merkezinde artık bir beyaz cücenin yer aldığı, bir gezegenimsi bulutsu oluşturacak.

(9)
Bu gezegenimsi bulutsuda Güneş'ten geriye yalnızca Güneş'in ölü artık çekirdeği olan ve gittikçe soğuyan bir beyaz cüce kalacak.

Yıldızlar, gökadalardan ve evrenin enerji üreten hücreleridir. Makro evrenin anlaşılması, enerji kaynağı ve element dönüşüm fabrikası olan yıldızların doğasının çözülmesine bağlıdır. Yıldızlar, insanlar ve onların araştırdığı diğer canlılara göre çok uzun yaşam sürelerine sahip olsalar da onların yaşamlarını da canlıların hayat serüvenine benzeterek açıklamak anlaşılmasını kolaylaştırıyor. Bu senaryoda, yıldızların hayatı doğum, yaşam ve ölüm olarak üç ana evreye bölünebilir. Bu evrelerin nasıl ve ne kadar sürede gerçekleşeceğini belirleyen parametrelerin başında, onların doğum anındaki kütleleri geliyor. Yıldızların bu yolculuğunda başlangıçtaki kütlelerinin ne kadar değiştiği de onların yaşam döngüsü için önem taşıyor.

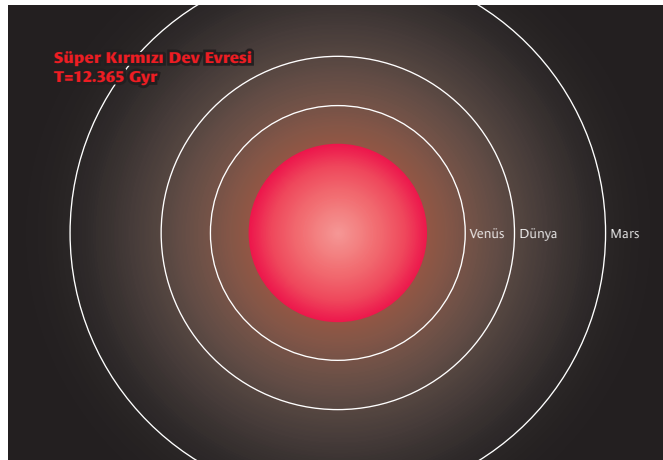
* Bu yazıda, Güneş benzeri yıldızlar ifadesi, Güneş gibi, yaşamlarının sonunda beyaz cüceye dönüşecek yıldızlar için kullanılmaktadır. Bu yıldızlar için başlangıç kütle aralığı yaklaşık 0,1 ila 8 Güneş kütlesine karşılık gelir.

Milyarlarca yıl yaşayabilen yıldızların bu kadar uzun olan yaşam zinciri ve yaşamlarının sona erdiği dönemler nasıl araştırılıyor? Astrofizikçiler, gökadamız içinde farklı kütlelerde doğmuş, farklı yaşlardaki yıldızları inceleyerek, onların uzun zamana yayılmış yaşamlarını, gözlemsel ve kuramsal yolları birlikte kullanarak çözümlenmeye çalışıyor. Özellikle son elli yıldır sürdürülen araştırmalar sayesinde yıldız astrofiziğinde önemli sorulara cevaplar bulundu. Şu anda "Yıldızların geleceği ve sonu nasıl olacak?" sorusuna belirli ölçüde cevap verilebiliyor. Doğum kütleleri Güneş'in sekiz katı kütle kadar olan küçük ve orta kütleli yıldızların yaşamları benzer biçimde sona eriyor. Enerji üretimleri durduğunda gerçekleşen bir patlama ile oluşan ve gittikçe yayılarak kaybolan bir gezegenimsi içinde artık bir çekirdek olarak "beyaz cüce" bırakıyorlar. Başlangıç kütleleri 8-25 Güneş kütlesi arasında olanlar ve 25 Güneş kütlesinden daha büyük kütlelerde doğan yıldızlar ise süpernova patlamaları geçirerek sırasıyla nötron yıldızı ve karadelik olarak sonlanıyorlar.



Bu arada, gökadamızdaki yıldızların %97'den fazlasının, kütleleri Güneş'in kütlelerinin 8 katından küçük olmak üzere, küçük ve orta kütleli yıldızlardan oluştuğu tahmin ediliyor. Bunun anlamı, Güneş'in de içinde olduğu, evrendeki yıldızların çok büyük bir bölümünü benzer bir son bekliyor. Şimdi, Güneş ve benzeri yıldızların* yaşamlarının sonuna nasıl geldikleri sorusuna cevap vermeye çalışalım:

Güneş'in ve diğer yıldızların sonu veya ölümü denildiğinde enerji üretiminin durması anlaşılır. Yıldızlar füzyon reaksiyonlarıyla enerji ürettikleri sürece hayatta kalırlar. Yıldızların yaşamları devam ederken, kütleçekim kuvveti ile merkezde termonükleer füzyonla beslenen yüksek sıcaklığın oluşturduğu basınç birbirini dengeler ve yıldızlar kararlı bir küre olarak yaşamlarına devam ederler.



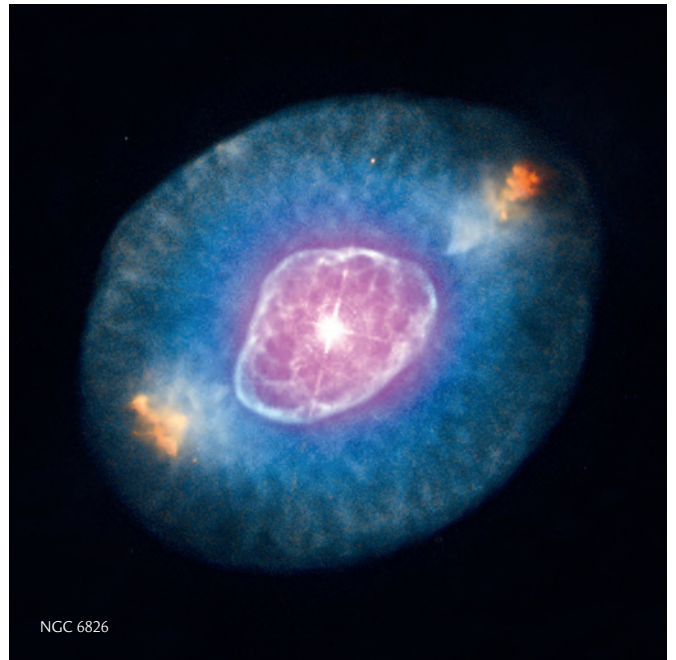
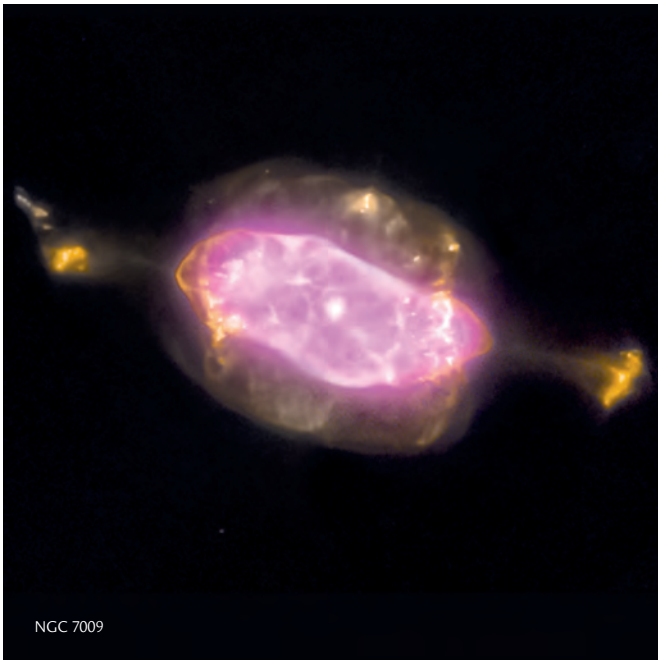
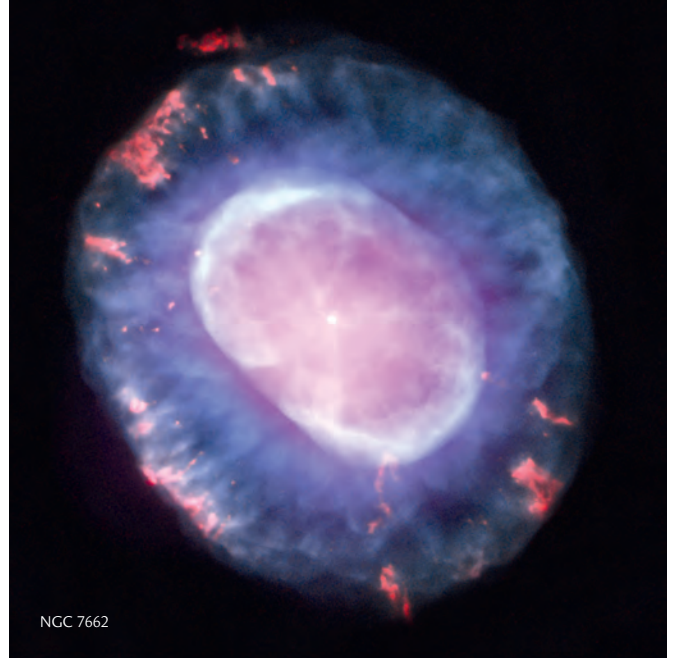
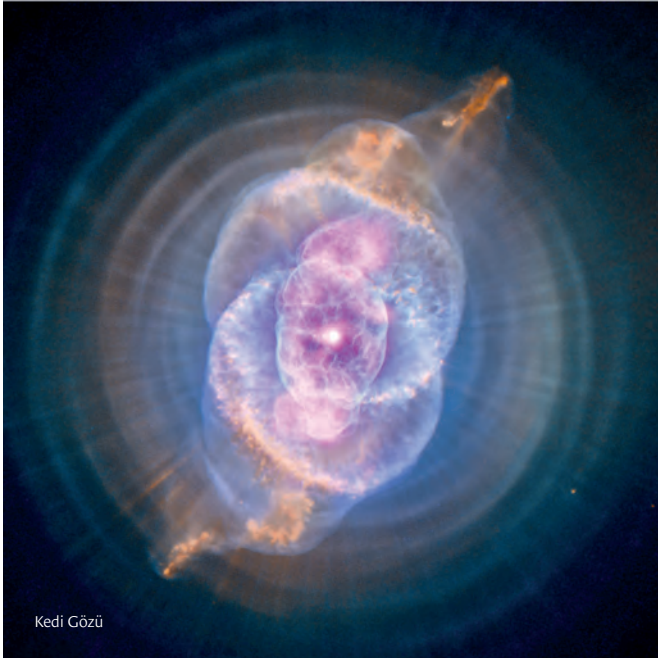
Güneş ve benzer kütlede doğan yıldızların gençlik ve olgunluk dönemleri, füzyon reaksiyonlarıyla gerçekleşen hidrojen-helyum dönüşümüyle, kararlı bir şekilde, enerji üreterek geçer. Yaşamlarının yaklaşık %90'ında enerji üretimi bu yolla gerçekleşir. Anakol evresi olarak bilinen bu evrede, yıldızlar enerji üreten kararlı plazma küreleri olarak görülür.

Güneş'in beyaz cüceye dönüşmeden önce patlama anına yakın bir zamanda ortaya çıkacak kırmızı süper dev görüntüsüyle Venüs, Dünya ve Mars'ın yeni yörüngeleri.

Kütlesinin yarıya yakınını kaybedecek olan Güneş, Merkür'ü içine alacak ve diğer gezegenleri de kendisinden uzağa doğru itecektir.

Güneş ve benzer kütleli yıldızların yaşlılık döneminin başlangıcında (kırmızı dev aşaması), enerji üretme çabaları, helyum ve karbon yakılması (denemeleri) ile sürer ancak bu dönem kısa ve sancılı gerçekleşir. Çünkü kütle yeterince büyük değildir ve hidrojenden sonraki füzyon denemelerinde yıldızların fiziksel özelliklerinde (özellikle çekirdek, dış kabuk ve atmosferde) önemli değişiklikler olur.

Yıldızların uzaya yaydıkları enerji, sıcaklık ve boyutlarında ortaya çıkan değişimler, çekirdekte üretilen enerjideki değişimlerin sonucudur. Üretilen enerjideki dalgalanmalar ve üretimin durması, yıldızların son evrelerine yani ölümlerine yaklaştıklarını gösterir. Bu aşamada, yıldızların çekirdek bölgeleri sıkışır ve böylece bu bölgede sıcaklık ve yoğunluk artışı olur.



Çekirdekdeki sıcaklık 100 milyon °C derecelere kadar ulaşır. Bunun tersine yıldızın dış kısmı da genişleyerek soğur ve yıldız önemli miktarda kütle kaybeder. Güneş türü yıldızlarda, çoğunlukla, çökmeye devam eden çekirdek, helyum ve karbon yakma reaksiyonlarından sonra, yeterli kütleyle sahip olamadığından, enerji üretimini sürdürülemez. Çökme ile oluşan kütleçekimsel enerji hem merkez hem de üst bölgede yer alan kabukta sıcaklığın artmasına yol açarak kabukta hidrojen yanmasını başlatacaktır. Bu yanma, kısa sürede yıldızın boyutunun daha da büyümesine yol açacak ve yaydığı enerjinin hızla artmasına neden olacaktır.

Yaşanacaklara Güneş örneğinden devam edecek olursak, Merkür'ü içine alacak kadar genişleyecek olan Güneş'in, Dünya ve diğer gezegenlerin yörüngelerinin yeniden düzenlenmesine yol açacağını söyleyebiliriz. Bu aşamadan sonra artık, iç basınç dengelenemeyecek ve Güneş patlamayla dış katmanlarını atarak bir gezegenimsi bulutsu oluşturacak ve bu bulutun içinde artık bir çekirdek (beyaz cüce) bırakacaktır.

Artık çekirdek olan beyaz cücede madde, yüksek yoğunluk nedeniyle, "yozlaşmış" (dejenere) gaz formundadır. Bu tür bir madde, atom çekirdeklerinden ve serbest elektronlardan oluşmuş bir çorbaya benzetilebilir. Böylesi bir maddenin davranışını artık kuantum mekaniği ile açıklamaya başlarız. İdeal gaz ortamında basınç sıcaklıkla artarken, yozlaşmış madde için basınç yoğunlukla artmaktadır. Bu ortamdaki maddenin çökmesini önleyen ve bir süre sonra kararlı yapı almasını sağlayan ise yozlaşmış elektronların oluşturduğu basınçtır. Son durumda, kütleçekimin yozlaşmış elektron basıncıyla dengelendiği, etrafta gittikçe yayılarak soğuyan madde ile çevrili, çok yüksek sıcaklıklı, ölü bir artık kalır. Diğer taraftan bu artık, sonun başlangıç nesnesi olan "genç" ve sıcak bir beyaz cücedir.

Hubble Uzay Teleskobu ile optik bölgede görüntülenmiş dört farklı gezegenimsi bulutsu (solda).

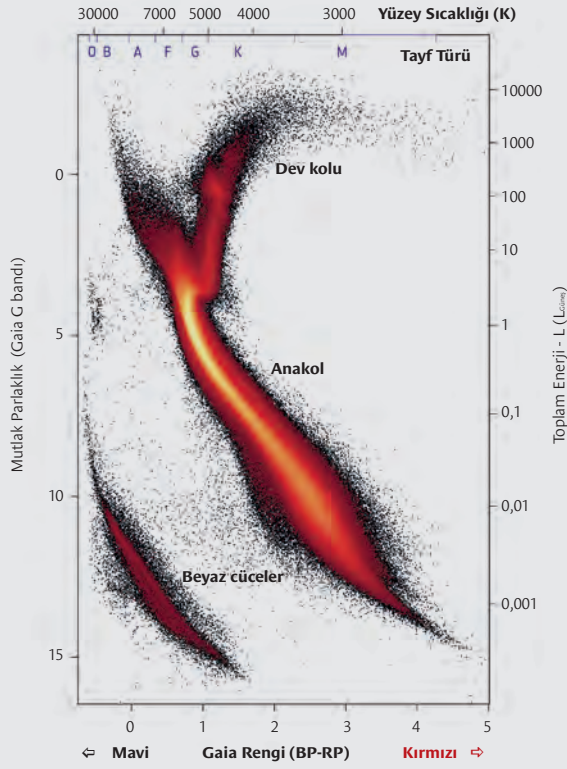
Gezegenimsi bulutsular, Güneş türü yıldızların dış kabuklarını atıp artık olarak beyaz cüce bıraktıkları patlamalar sonucunda oluşur. (NASA)

Gökadamızdaki yıldızların çoğu yaşamlarının sonunda gezegenimsi bulutsu oluşturacak mı?

Astrofizikçilerin tahminlerine göre, gökadamızdaki yıldızların %97'sinden fazlası, patlamanın ardından, merkezinde artık çekirdek beyaz cüce olan, gezegenimsi bulutsu oluşturarak yaşamını sonlandıracak. Kuramsal araştırmalar, Güneş'in de içinde bulunduğu küçük ve orta kütleli yıldızlar için sonun böyle olduğunu gösteriyor. Gözlemsel araştırmalar da dikkate değer sayıda yıldızın sonunun bu şekilde olacağını destekliyor. Bu durumu açıklamak için şu örneği kullanalım:

Gözlemlerle, yarıçapı yaklaşık bir ışık yılı (yaklaşık 9,5 trilyon km) olan tipik bir gezegenimsi bulutsunun tayf verilerinden -Doppler etkisi kullanılarak- genişleme hızının saatte 20 km olarak ölçüldüğünü düşünelim. Gezegenimsi bulutsunun yarıçapı, genişleme hızına bölünürse, yaşının yaklaşık 15.000 yıl olduğu bulunabilir. Bu süre, yıldız yaşamları dikkate alındığında oldukça küçük bir zaman dilimine karşılık gelir. Astrofizikçiler bugüne kadar 3000'den fazla gezegenimsi bulutsu gözlediler ve gökadamızda 15.000'den fazla sayıda bu cisimlerden olduğunu düşünüyorlar.

Bu kadar kısa yaşam sürelerine sahip olmalarına karşın bu kadar çok sayıda gezegenimsi bulutsu gözlenebilmesi, gökadamızdaki yıldızların önemli bölümünün, geçirecekleri patlamaların ardından gezegenimsi bulutsu ve merkezlerinde artık bir beyaz cüce bırakarak yaşamlarının son bölümüne geçeceklerini ortaya koyuyor.



Güneş'ten 5 bin ışık yılı uzaklığa kadar yayılmış, yaklaşık 4 milyon yıldızın Gaia uydusu ile ölçülen renk ve parlaklık verileri kullanılarak oluşturulan Hertzsprung-Russell (HR) veya renk-parlaklık diyagramı (solda).

Diyagramın sol alt bölgesinde yaklaşık 15.000 beyaz cücenin dağılımı görülmüştür. (ESA)

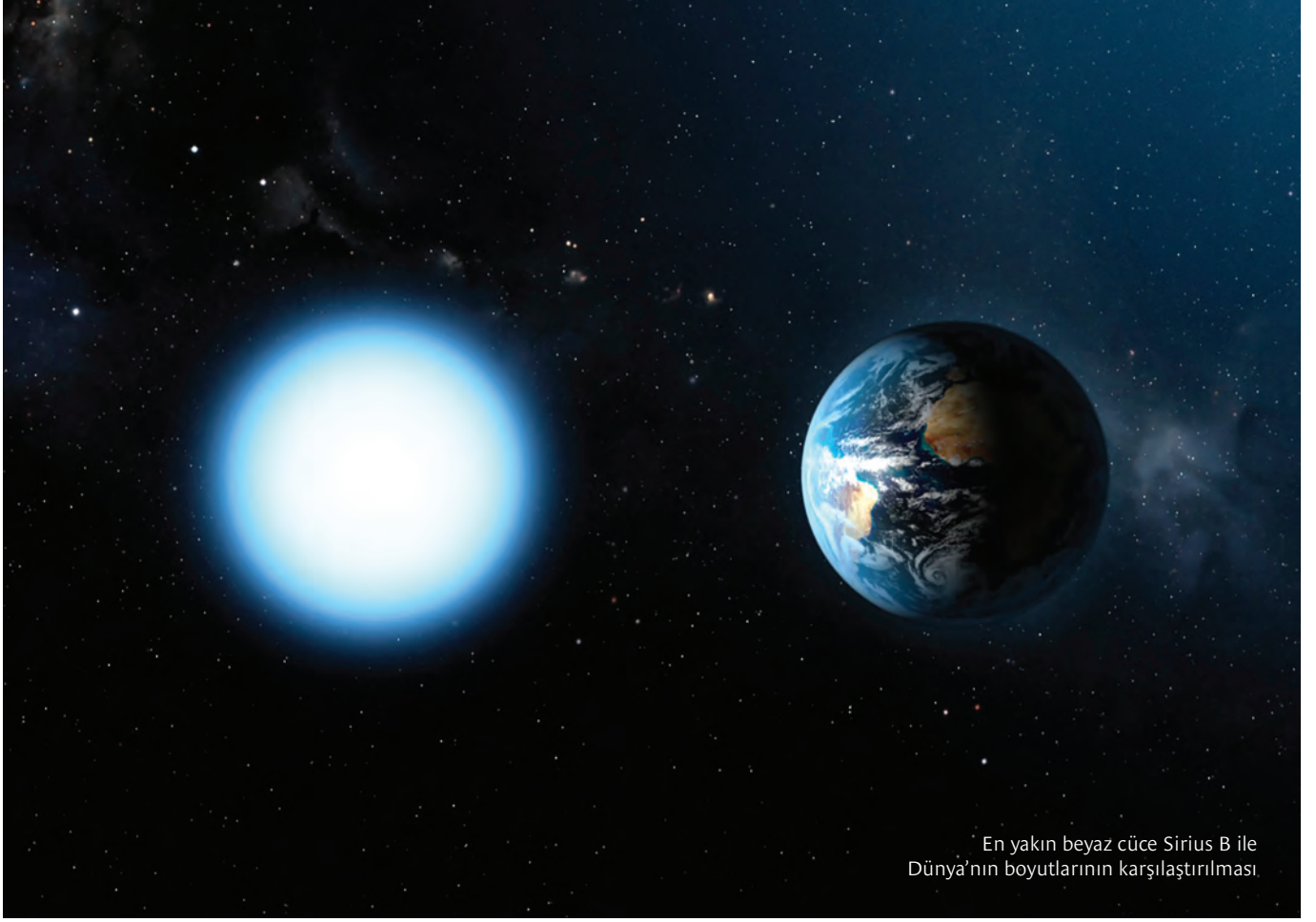
Işıldayan Ölü Artık: Beyaz Cüceler

Güneş benzeri bir yıldızın sonu olan genç beyaz cücelerin yaşları çoğunlukla 12 milyardan büyük, boyutları yaklaşık Dünya büyüklüğünde, kütleleri Güneş kütlelerinden küçük ve yoğunlukları çok büyüktür. Bu yoğunluk değerine kabaca, bir ton kütleli birkaç otomobilin bir yüzük içine sığdırılmasıyla ulaşılabılır. Patlamayla dış kabuk atıldığında açığa kalan beyaz cücelerin sıcaklığı yüz bin dereceleri aşıya da görece kısa bir sürede bu sıcaklık 10.000-15.000°C dereceye kadar düşer. Her ne kadar enerji üretimi durmuş olsa da bu sıcaklık onların yaydığı enerjinin kaynağıdır.

Evrenin en yaşlı - emekli yıldızları veya ölü yıldız çekirdekleri olan beyaz cüceler, gökadamızdaki yıldızların %97'sinin yaşamlarının son evreleri olacak. Bu cisimlerin, Güneş benzeri yıldızların (8 Güneş kütlelerine kadar) kalan çekirdekleri olduğu düşünülürse, beyaz cücelerin önemli bölümü, çoğunlukla son reaksiyon ürünleri olan karbon ve oksijen içermelidir. Az sayıda beyaz cüce için, oksijen - neon - magnezyum içerikten de bahsedilebilir.

Beyaz cücelerin iç yapıları çoğunlukla karbon ve oksijenden oluşmakla beraber çok ince bir atmosferlerinin de olduğu tayf gözlemlerinden ortaya çıkarılmaktadır. Hidrojen ve helyum yoğunluklu içeriğe sahip bu atmosfer yapısının incelenmesi, beyaz cücelerin ısıl dönüşümlerinin anlaşılması için önem taşıyor. Beyaz cücelerin sınıflandırılmasında da atmosfer içeriğindeki baskın element kullanılıyor. Gözlenen tüm beyaz cücelerin yaklaşık %80'i hidrojen baskın bir tayf sergilerken (DA sınıfı), %16'sının atmosferindeki helyum tayfta etkin (DB sınıfı) olarak gözleniyor. Beyaz cücelerin çoğunluğunun atmosfer sıcaklıkları 10.000-16.000°C derece arasında iken çekirdek sıcaklıkları 20 milyon°C dereceye kadar çıkıyor.

Beyaz cücelerde, yıldızlarda olduğu gibi, kütleçekimin füzyon reaksiyonlarıyla üretilen ısı ile dengelenmediği biliniyor. Bu cisimlerde çökme, yozlaşmış elektron baskıncı ile durduruluyor. Yozlaşmış madde, olağandışı özellikler taşıyor. Örneğin, beyaz cüce ne kadar büyük kütleli

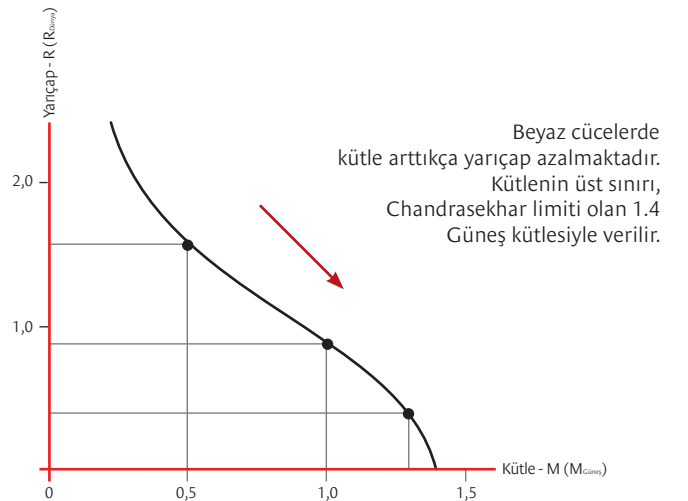


En yakın beyaz cüce Sirius B ile Dünya'nın boyutlarının karşılaştırılması.

olursa o kadar küçük boyutlu olur. Bu durum, beyaz cücenin kütlesi arttıkça kütleçekim kuvvetine karşılık verebilmek için elektronların birbirine yaklaşmasıyla açıklanıyor. Ancak, beyaz cücenin taşıyabileceği kütlenin bir sınırı vardır. Chandrasekhar sınırı denilen bu değer 1,4 Güneş kütlesine karşılık gelir ki eğer beyaz cüce bu kütle sınırını aşarsa, yozlaşmış elektron basıncı desteğini sürdüremez. Bu sınır aşıldığında, Tip Ia süpernovaları olarak bilinen patlamalarla karşılaşırız. Çift bir sistemin üyesi olan bir beyaz cüce, yakınındaki bileşen yıldızından kütle alıp Chandrasekhar limitini aştığında güçlü patlamalar sergiler (örneğin SN 1006).

Güneş ve milyarlarca yıldızın benzer son ile karşılaşacak olması, beyaz cücelerin araştırılmasını değerli kılıyor. Bunun yanında, beyaz cücelerin incelenmesi, gökadamızın en yaşlı nesnelere olmaları nedeniyle, Güneş ve benzeri yıldızların yaşam zincirlerinin çözülmesi ve gökadamızdaki dönüşümün anlaşılmasına katkı verecek sonuçların ortaya çıkmasını sağlıyor.

Tabii ki Güneş gibi milyarlarca yıldızın sonu beyaz cüce ile noktalanmıyor. Bu nesnelere sonun başlangıcı olarak görülebilir. Beyaz cücenin zamanla soğuması ve görülmeyecek kadar düşük sıcaklığa gelince de kara cüceye dönüşmesi beklenen durum. Ancak, bu aşamaya doğru ilerlerken beyaz cücelerin "kristal" kürelere dönüşeceklerine ilişkin araştırmalar da yayınlanıyor.

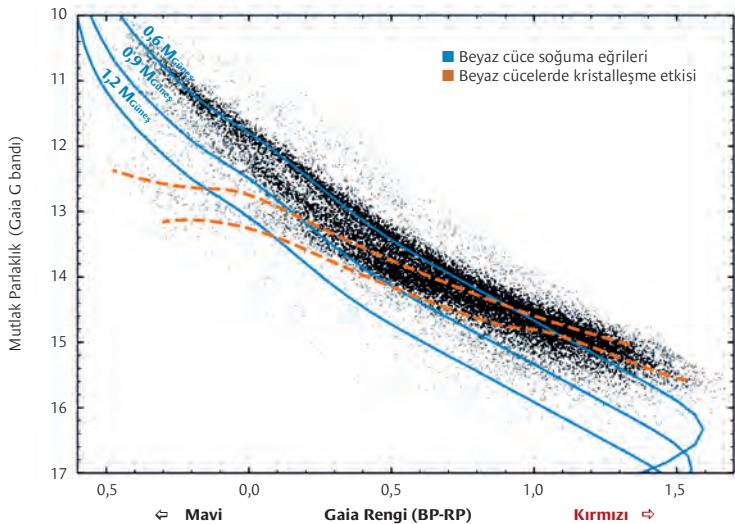


Soğuyan Beyaz Cüceler ve Kristal Küreler

Beyaz cüceler füzyon reaksiyonları ile enerji üretmedikleri hâlde, göreceli yüksek sıcaklıkları nedeniyle uzaya enerji yayarlar. Ancak beyaz cücelerde enerji üretimi olmaması nedeniyle yavaş bir soğuma süreciyle enerjilerini kaybetmeye devam ederler ve bu süreç milyarlarca yıl devam eder. Beyaz cücelerin soğuma süreçlerinin anlaşılması, onların iç yapı özellikleri ve yaşlarına ilişkin bilgiler sunması nedeniyle önemlidir.

İlk oluştuklarında beyaz cücelerin sıcaklıkları, 100.000°C ölçeğinde iken farklı soğuma süreçleri ile sıcaklıkları düşmeye başlar. Genç beyaz cüce evresinde çok hızlı soğuduklarından kısa sürede (beyaz cücenin yapısında hangi elementten hangi oranda bulunduğuyla bağlantılı olarak) birkaç milyar yıl içinde sıcaklıkları 10.000°C'lere gelir. Şu anda gözlenen beyaz cücelerin de önemli bölümü bu sıcaklıklara sahiptir. Beyaz cüceler soğumaya devam ettikçe renkleri değişmeye başlar. Şu ana kadar gözlenen en soğuk beyaz cücenin sıcaklığı yaklaşık 2700°C'dir ve turuncu-kırmızı renktedir. Bu tür gözlemler beyaz cücelerin aslında çok yavaş soğuduklarını ortaya koyuyor.

Gaia uydu verileri kullanılarak oluşturulmuş renk-parlaklık diyagramında 15.000 beyaz cücenin dağılımı ve kuramsal soğuma eğrilerinin karşılaştırılması. Mavi eğriler, farklı kütlelerdeki kristalleşme dikkate alınmadan gerçekleşen soğumayı gösterirken turuncu eğriler (üstteki %20 ve alttaki %80 oranında) kristalleşme etkisiyle birlikte soğumayı gösteriyor. (Pier-Emmanuel Tremblay ve ark. 2019)

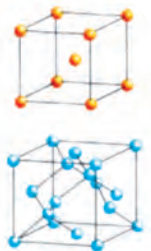


Peki, milyarca yıl süren bu soğuma nasıl gerçekleşiyor?

1952'de İngiliz astrofizikçi Leon Mestel, beyaz cücelerin soğumasını, ısıtılıp dışarıya bırakılan ve soğumaya başlayan demir örneğine benzeterek açıklamaya çalışır. Ancak sıcak bir demir parçasının çok kısa zamanda soğuduğu düşünüldüğünde, bu mekanizmada soğumayı geciktiren bir etkiye ihtiyaç duyulur. Peki, beyaz cücelerin büyük bölümü (kütlenin yaklaşık %99'u) yozlaşmış ve ısıl iletkenliği yüksek bir madde ile dolu olmasına rağmen, soğumaları neden çok daha uzun sürede gerçekleşiyor? Bu sorunun cevabını vermeye çalışırken, beyaz cücelerin yapısını hatırlamak gerekir: Bu nesnelere, gözlemlerle özellikleri belirlenebilen, ideal gaz içeren (çoğunlukla hidrojen ve helyumdan oluşan) çok ince bir atmosfer ve onun altında yozlaşmış elektron yığılı bir madde ile dolu çok yoğun kürelerdir. Bu durumda, Mestel'in kuramsal yaklaşımında, soğuyan demir gibi davranan iç kısımları bir battaniye gibi saran yozlaşmış olmayan atmosfer, ısıyı tutarak soğumanın milyar yıllara yayılmasından sorumlu tutulur.

Bu yaklaşımın ardından gelen araştırmalar, soğumada başka süreçlerin de karmaşık biçimde rol oynadığını ortaya koyuyor. Dış, ince atmosfer katmanından soğumanın fotonlarla kaybedilen enerji ile gerçekleştiği düşünülürken, çok daha sıcak yozlaşmış ve yoğunluğu yüksek bölümden ise nötrino salımı ile enerji kaybedildiği tahmin ediliyor. Özellikle genç ve sıcak beyaz cücelerde nötrino salımının çok daha etkin olduğu düşünülüyor. Bu durumda, genç beyaz cücelerde daha etkin olmak üzere, Mestel tarafından önerilen soğumadan daha hızlı bir soğuma gerçekleşeceği anlaşılıyor. Soğumada diğer önemli etki ise yine yozlaşmış madde bölgesinde soğuma sürecinde ortaya çıkan kristalleşme.

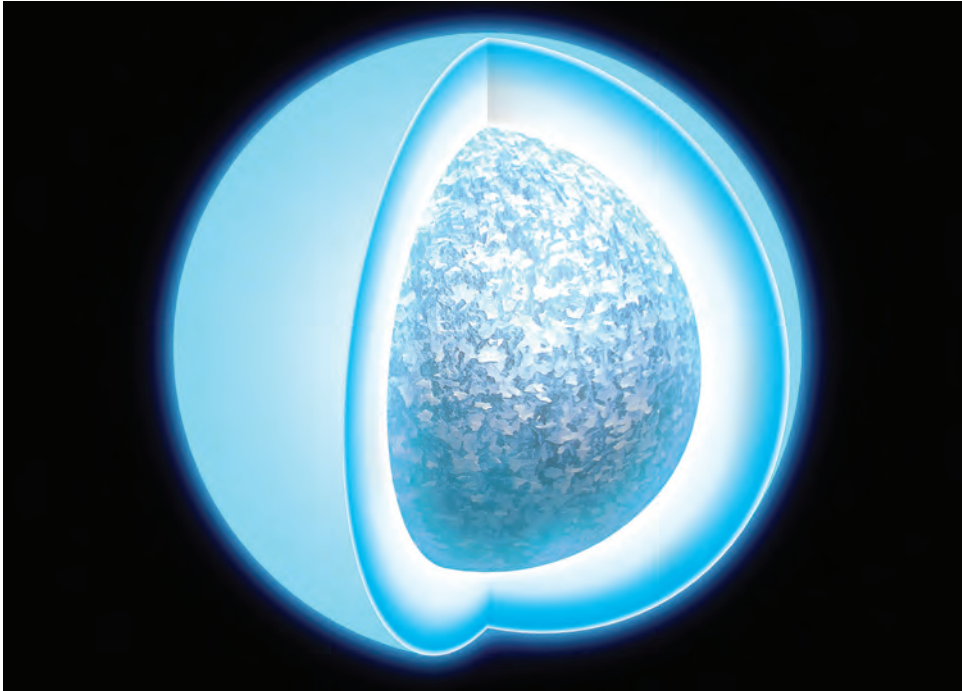
Beyaz cücelerin iç kısımlarında oluşan karbon kristal form ile Dünya'da bulunan elmas için de geçerli olan karbon kristal yapı (üst ve alt). Beyaz cücelerdeki karbon kristallerinin boyutu, elmasa göre 100 kat daha küçüktür. (Kawaler ve Dahlstrom, 2000)



Beyaz cücelerin soğumaları devam ederken, belirli bir sıcaklığa ulaştıklarında (kütleyle göre değişken bir sıcaklık olmak üzere), soğumanın yavaşladığı gözlemlerle ortaya çıkarılıyor. Bu yıl *Nature* dergisinde yayınlanan Pier-Emmanuel Tremblay'ın başını çektiği ekibin Gaia uydu verilerine dayanan araştırmasında, 15.000 beyaz cüce incelenerek soğuma gecikmesi ilk kez doğrudan gösterildi. Bu gecikme, beyaz cücenin iç kısımlarında gerçekleşen kristalleşme ile açıklanıyor. İç bölgede gerçekleşen hâl değişimi, aynı zamanda ek bir enerji beslemesi sağlayarak soğumada yavaşlatıcı rol oynuyor. Bu olayı basitçe şu örnekle açıklayabiliriz: Su bir dondurucuya konulduğunda donarak kristal buz forma ulaşır ve bu aşamada enerji açığa çıkar. Bu sırada, termometreyle belirli aralıklarla sıcaklık ölçülürse suyun sıcaklığının 0°C dereceye kadar düştüğü ve sıfıra ulaştığında bir süre bu sıcaklıkta kaldığı gözlenir. Tam bu anda, su molekülleri kristal forma geçecek şekilde konumlanırlar. Kristal forma ulaştıklarında buz, dondurucuyla aynı sıcaklığa erişinceye kadar sabit hızla soğumaya devam eder.

Araştırmacılar, beyaz cücelerin iç kısımlarında aynı olayın, çok daha uzun zaman ölçeğinde, yaşandığını düşünüyor. Bu cisimlerin çekirdeklerinde yer alan oksijen ve karbon kristalleştikçe ısı yayıyor ve beyaz cücenin soğumasını, kütlesi ve kimyasal içeriğine göre farklı zaman ölçeklerinde olmak üzere, 1-2 milyar yıl geciktirebiliyor.

Büyük kütleli beyaz cüceler, yaklaşık bir milyar yılda kristal forma ulaşırken, Güneş ve benzeri yıldızların sonu olacak daha küçük kütleli beyaz cücelerde ise katı kristal küre yapı ancak 5-6 milyar yıl sonra oluşabilecek. Güneş örneği üzerinden devam edersek, Güneş'in yaklaşık 7 milyar yıl sonra beyaz cüceye dönüşeceği tahmin ediliyor. Bundan yaklaşık 5-6 milyar yıl sonra da bir kristal küreye dönüşeceğini ortaya koyan çalışmalar bulunuyor. Gökadamızdaki yıldızların %97'sinden fazlasının sonunda beyaz cüceye dönüşeceği tahmin edildiğine göre, 15 milyar yıl sonra kristal kürelerle dolu bir gökadamız olabilir!



Beyaz cüceler, kara cüce olmadan önce kristal bir küreye dönüşürler.



Kara cüce gösterimi
(NASA)

Kara Cüceler

Kristalleşme evresinde sağlanan ek ısı, soğumayı geciktirse de, sürekli bir besleme sağlayamayacağından, soğuma devam edecek ve beyaz cücelerin sıcaklıkları ve dolayısıyla uzaya yaydıkları enerji sürekli azalacaktır. Beyaz cücelerin kara cüceye dönüşecek kadar soğumaları için ise kabaca 10 milyar yıldan fazla süre geçmesi gerekir. Beyaz cüceye dönüşüncüye kadar geçen süreyi de göz önüne alırsak Güneş benzeri bir yıldızın kara cüce hâline gelmesi için evrenin şimdiki yaşının (yaklaşık 13,7 milyar yıl) çok üstünde bir sürenin gerekli olduğunu söyleyebiliriz. Bu nedenle, kuramsal hesaplamalar ve gözlemler, şu anda 2000°C'den daha soğuk bir beyaz cüce görmemizin çok da mümkün olmadığını ortaya koyuyor. Artık soğuk bir kristal küre olan kara cüce gözleyebilir miyiz, siz düşünün!

Milyarlarca yıl, enerji üretimi ve beslemesi olmadan, enerji yayararak soğuyan beyaz cüceler, sonunda görülmeyecek kadar soğuk kara cücelere dönüşecekler. Ancak, kütlelerinde değişiklik beklenmediğinden, bilim insanla-

rı onların çevrelerinde oluşturacakları kütleçekim alanı ve etkileşmeler nedeniyle, algılanabileceklerini diğer bir deyişle gözlenebileceklerini düşünüyor. Soğuma zaman ölçekleri üzerine yapılan hesaplamalar ve gözlemsel veriler, beyaz cücelerin en yaşlı olanlarının bile (evrenin yaşına yakın) kara cüce olacak kadar soğuyamadıklarını gösteriyor. Gökadamızın, milyarlarca beyaz cüce için soğuma sürecinin bitmesiyle, karanlık madde olarak da adlandırılacak, doğrudan gözlenemeyen karanlık cücelere dolu olabileceği tahmin ediliyor. ■

Kaynaklar

Pier-Emmanuel Tremblay ve ark., "Core crystallization and pile-up in the cooling sequence of evolving white dwarfs", *Nature*, 565, 202-205, 2019.

<http://www.astronomy.ohio-state.edu/~pogge/Lectures/vistas97.html>

Kaplan, David L. ve ark., "A 1.05 M Companion to PSR J2222-0137: The Coolest Known White Dwarf?", *Astrophysical Journal*, Cilt 789, Sayı 2, s. 119, 2014.

Camisassa, María E. ve ark., "Updated Evolutionary Sequences for Hydrogen-deficient White Dwarfs", *Astrophysical Journal*, Cilt 839, Sayı 1, s.11, 2017.

Hansen, Brad M. S., Liebert, James, "Cool White Dwarfs", *Annual Review of Astronomy & Astrophysics*, Cilt 41, s. 465, 2003.

Steven D. Kawaler ve Michael Dahlstrom, "White Dwarf Stars", *American Scientist*, Vol. 88, sayfa 498-507, 2000.

R. Mark Wilson, "White Dwarfs Crystallize as they cool", *Physics Today*, 72, 3, 14, 2019.

M.A. Seeds ve D.A. Backman, "Foundation of Astronomy", *Cengage Learning*, 12th edition, 2012.