

NE YILDIZ NE GEZEĞEN: KAHVERENGİ CÜCELER

Prof. Dr. Cemal AYDIN, Dr. Berahitdin ALBAYRAK ve
Astronom Elmas HANDAL

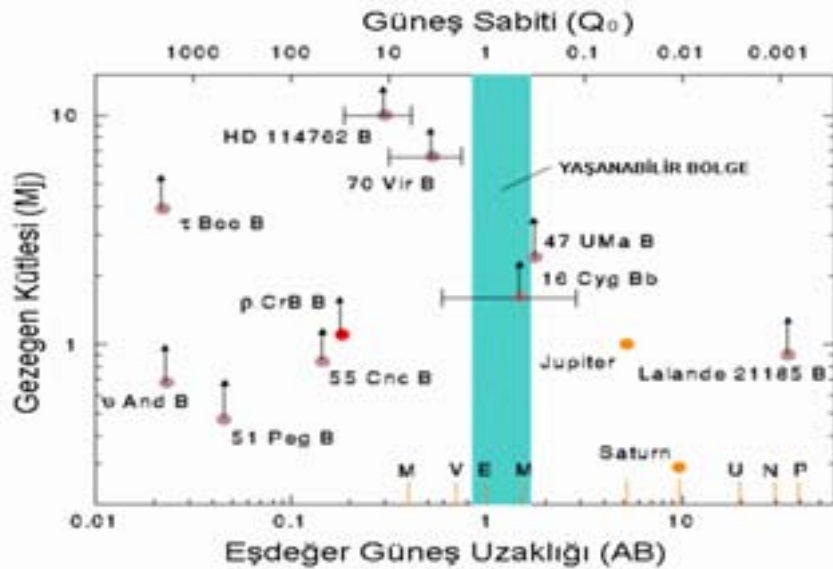
A. Ü. Fen Fakültesi, Astronomi ve Uzay Bilimleri Bölümü, Tandoğan, Ankara
aydin@eros.science.ankara.edu.tr, albayrak@astro1.science.ankara.edu.tr

1. Giriş

Bilim adamları, yaşamın temel kaynağını oluşturan kompleks karbon moleküllerinin evrende, Dünya dışı bir yerlerde bulunma olasılığını göz ardı etmemektedirler. Dünya'daki yaşama benzer izler bulabilmek için, aynı özelliklere sahip başka gezegenlerin varlığının araştırılması gerekir. Başka bir deyişle, yüzeydeki suyun sıvı halde bulunabileceği yerler araştırılmalıdır.

Dünya benzeri bir yaşamın sürdürülmesi için, gezegenin yüzeyinin belli bir sıcaklıkta olması gerekir. Bu sıcaklık, gezegenin yıldızından olan uzaklığı ile ilgilidir. Astronomlar bu uzaklığı kolaylıkla hesaplayabilirler. Bulunan bu yerlere yaşanabilir bölge: "habitable zone" denmektedir. Ayrıca, gezegenin kütlesi de oldukça önemlidir. Dünya'dan daha küçük kütleli gezegenler atmosferlerini çabucak kaybederlerken daha büyük kütleli gezegenler hidrojen oluşmuş yoğun atmosferlerini tutabilirler.

Bugüne kadar Güneş gibi etrafında gezegeni olan bir çok yıldız bulunmuştur. Bütün bu gezegenler Dünya'dan çok daha büyük kütleli ve yıldızlarına daha yakındırlar. Bunlar, Dünya gibi karasal gezegenlerden çok Jüpiter gibi dev gaz gezegenlerine benzerlik gösterirler. Daha büyük olanları ise kahverengi cüceler olabilirler ki bunlar ancak belirsiz bir biçimde parlarlar (sönüktürler). Gelişen gözlemsel teknoloji sayesinde önümüzdeki yıllarda, yıldızlarından çok daha uzaklara konuşlanmış daha küçük gezegenler bulunabileceği gibi keşfedilecek kahverengi cücelerin sayısının da artacağı beklenmektedir.



Şekil 1. Rho(ρ) Corona Borealis yıldızı etrafındaki gezegenin varlığı Noyes ve arkadaşları (1996) tarafından keşfedildi. Güneş Sistemi üyesi olan gezegenler, turuncu ile gösteriliyor. Gezegen kütleleri, Jüpiter kütlesi (M_j) cinsinden veriliyor. Üstteki x-ekseni; yıldızdan gezegen(ler)ine ulaşan yörünge akılarını, alttaki x-ekseni; AB (astronomi birimi) cinsinden her gezegenin yıldızından uzaklığını eşdeğer bir akı karşılığı olarak göstermektedir. Dışmerkezliği

büyük yörüngelerdeki gezegenlere yıldızlarından gelen akıllar, işaretli noktaları kesen yatay çizgilerle gösterilmiştir.

Tablo 1. Etrafında gezegen olduğu belirlenen yıldızlardan bazıları

Yıldız	Yıldızın Tayf Türü	Yıldızın kütlesi (M _☉)	Gezegenin yıldızından ortalama uzaklığı (AB)	Gezegenin minimum kütlesi (M _J)	Gezegenin yörünge dışmerkezliği (e)	Gezegenin yörünge peryodu (gün)	Yıldızın uzaklığı (Dünya'dan) (IY)
Tau Bootis	F7 V	1.25	0.045	3.7	0.006	3.31	49
51 Pegasi	G2 IV	1.00	0.051	0.45	0.01	4.23	50
Upsilon Andromeda	F8 V	1.25	0.056	0.65	0.10	4.61	57
55 Cancri	G8 V	0.85	0.11	0.93	0.03	14.64	44
Gliese 876	M4	0.32	0.21	2.11	0.27	60.5	15
Rho Coronae Borealis	G0 V	1.00	0.23	1.1	0.04	39.6	57
70 Virginis	G4 V	0.95	0.47	6.8	0.40	116.6	59
16 Cygni B	G2.5 V	1.00	1.70	1.7	0.57	802	72
47 Ursae Majoris	G0 V	1.10	2.10	2.4	0.03	1.098	46
14 Herculis	K0 V	0.80	2.50	3.3	0.35	1.619	55

Astronomi Birimi (AB) = 150.000.000 km (ortalama Yer-Güneş Uzaklığı),
Işık yılı (IY) = 9.5 10¹² km

2. YILDIZ OLUŞUMU

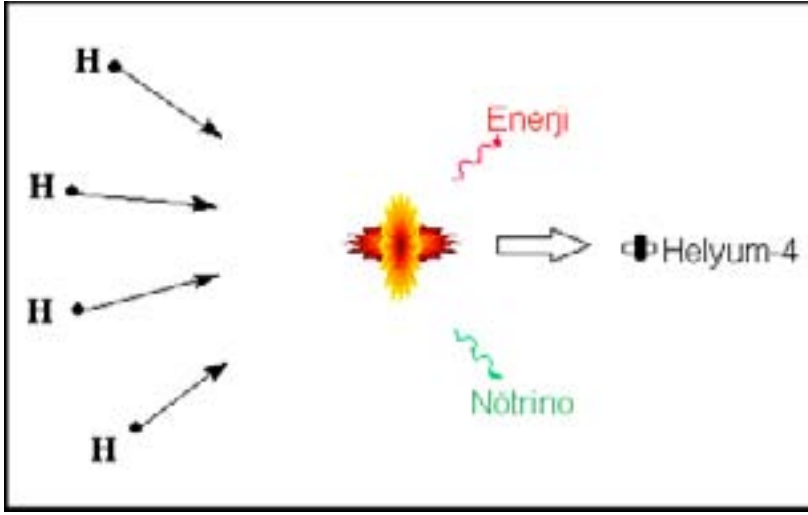
Yıldız, doğada en bol bulunan element olan hidrojenin yavaş yavaş helyum, karbon, azot, oksijen ve demir gibi daha ağır elementlere dönüştüğü ve içinde termonükleer reaksiyonların yer aldığı bir gök cisimidir. Yıldızların yüzey sıcaklıkları, çevrelerinin sıcaklığına göre çok yüksektir ve sürekli olarak uzaya enerji salarlar. Gerçekte yıldız, atom ve moleküllerden çok iyon ve elektronlardan oluşmuş bir gazdır. Termonükleer tepkimeler sürekli bir enerji kaynağı oluşturur ve gazın kimyasal bileşimini yavaş yavaş değiştirir.

Bir yıldız hakkında en dolaylı bilgiyi ışınması içinde bulabiliriz. Ancak ışınma yıldızın derinlikleriyle ilgili değil yüzeyindeki koşullar hakkında bilgiler sağlar. Yıldızların çekirdeğini incelemeye çalışmak, uzun süre kuramcılarının konusu oldu. Bu incelemeler, bir yıldızın yalnızca o andaki özelliklerinin (ışınma şiddeti, büyüklüğü: kütle ve yarıçap, kimyasal bileşim) değil, evriminin de göz önüne alınması amacını güder.

Yıldızlar, uzaya durmadan enerji salar ve böylece kütle kaybederler. Bu enerji, yıldızın içinde nükleer reaksiyonlarla meydana geldiğinden kimyasal bileşim de değişmektedir. Bu şekilde meydana gelen kütle kaybı azdır ve yıldızın tüm yaşamı boyunca yıldız kütlelerinin %1'ini aşamaz.

Bugün yıldızların içinde meydana gelen en önemli reaksiyon zincirinin, hidrojeni helyuma dönüştürenler olduğuna inanılmaktadır. Bu olay hidrojen yanması olarak bilinir. Hidrojenin helyuma dönüşmesinde iki temel reaksiyon zinciri önerilmiştir: Proton-proton zinciri (PP) ve karbon-azot çevrimi (CN). Birinci zincirde hidrojen, doğrudan helyuma dönüştürülür. Fakat karbon-azot çevriminde, karbon ve azot çekirdekleri katalizör olarak kullanılır. Eğer karbonu veya azotu olmayan yıldızlar varsa doğal olarak CN çevrimi olmaz ve o zaman tüm hidrojen yanması PP zinciri ile olmak zorundadır.

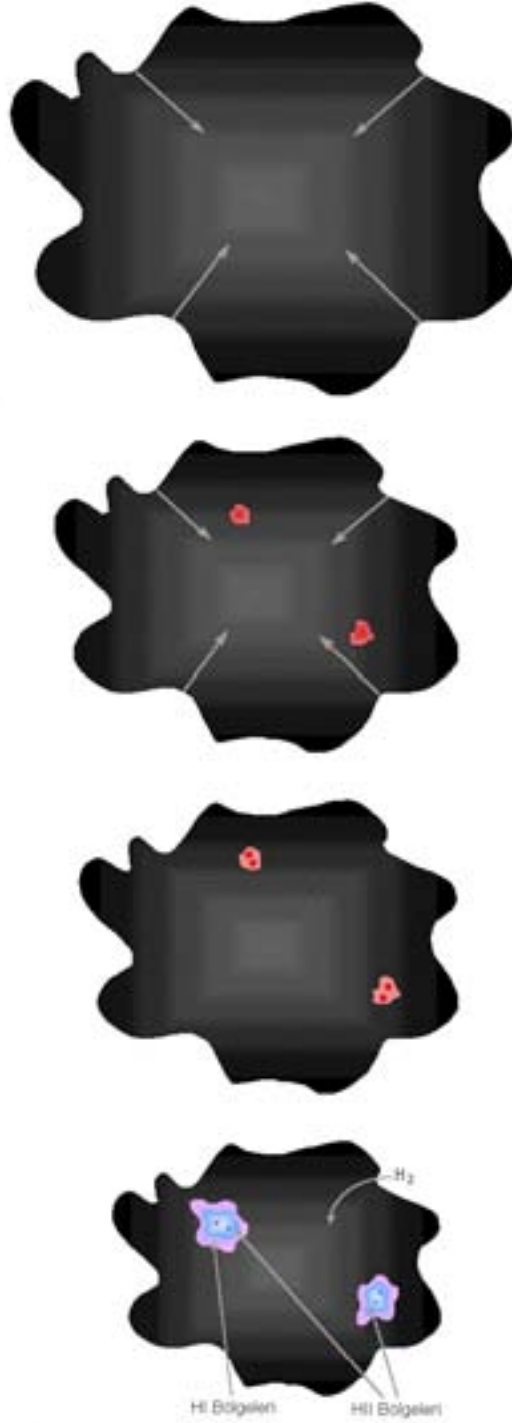
Bir yıldızın, yaşamının büyük bir bölümü boyunca ana özellikleri çok yavaş değişir. Çünkü çok büyük gaz kütlesi olan yıldızların hidrostatik denge durumu çok uzun sürer. Hidrostatik denge durumunda yıldız maddesinin her noktasındaki basınç kuvvetleri, üstte yer alan gaz katmanlarının ağırlına eşittir. Bu denge koşulu yıldızın yüzeyinden merkezine kadar sıcaklık ve yoğunluk dağılımını hesaplamaya imkan tanır. Yıldızların içindeki sıcaklık 10⁶ °K (Kelvin)'den daha yüksektir.



Şekil 2. Hidrojen yakan bir nükleer reaksiyonun temsili gösterimi.

Nükleer tepkimeler sonucunda yıldızın merkezi bölgesinde açığa çıkan enerji yüzeyine ışınım, iletim ve konveksiyon yolu ile iletirler. Termonükleer kaynak tükenirse; çekirdek, çekimsel büzülme evresine girer. Bu olay yıldızın merkezi bölgelerinin yoğunluğunu, sıcaklığını ve basıncını yükseltir.

Yıldızlararası bir bulut parçasının çekimsel yapısı, aynı anda bir yıldızın ve bir dizi gezegenin oluşumuna elverişli, kendi çevresinde dönen bir gaz diskinin doğmasına yol açar. Yıldızların değişmez gök cisimleri olmadığı, aksine doğduğu, evrim geçirdiği, sonra da yok olduğu düşüncesi artık günümüzde bilinen şüphe götürmez bir gerçektir. Ne var ki; bir yıldızın öldüğünü görmek, doğumunu görmekten çok daha kolaydır. Çünkü yıldızın ölümü, günümüzde hesaplarla izlenebilen bir olaydır, ama yıldızların oluşum kuramı henüz çocukluk döneminde ve bu konuyu açığa kavuşturabilecek gözlemler çok azdır.



Şekil 3. Yıldızlar, soğuk bir molekül bulutunun kendi ağırlığı ile parçalanması sonucu doğarlar. Dev moleküler bulut yavaş bir biçimde çökmeye başlar. Henüz biçimsiz bir parça halindeyken, daha yoğun olan kısmı hızlı çöker ve arda kalanından ayrılıp parçalanır. Bu yumrulardan birden fazla yıldız oluşabilir. Eğer birçok büyük kütleli yıldız oluşursa, O-B topluluklarını görebiliriz. Çökmenin gerçekleştiği sırada yeni oluşan bu yıldızlar, büyük ancak soğuk ve kırmızı renktedirler. Toz bulutlarının içine yerleşmiş kırmızıöte kaynaklar olarak belirirler. Yayınlanan enerji başlangıçta gravitasyonel (çekimsel) çökmeden ileri gelir. Çekirdek yeteri kadar ısındığında, termonükleer enerji üretimi başlar ve hidrojen helyuma dönüşür. Eğer O ve B yıldızları mevcutsa, moleküler bulutun içindeki hidrojen iyonize olacaktır.

Yıldızlar, çoğu kez kümeler halinde doğar. Galaksimizdeki genç yıldız kümelerinde yüz binlerce yıldız vardır. Galaksimizde her yıl, Güneş kütlelerinin 3 katıyla 10 katı arasında değişen kütlelerde 30-40 yıldızın doğduğu tahmin edilmektedir. Bununla birlikte yıldızların oluşum oranı çok düşüktür. Büyük bir molekül bulutu kompleksi, Güneş kütlelerinin yaklaşık 1 milyon katına eşit bir kütleyle sahiptir. Ancak, kütlelerinin yalnızca yüzde bir kaçı arasında değişen bir bölümü yıldızla dönüşür.

Oluşum halindeki bir yıldızın merkezi bölgesinin sıcaklığı, hidrojenin termonükleer yanması başlayana kadar artar. Bu aşamada yıldız, olgunluk evresine ulaşmıştır. Yıldız kütlesi ne kadar büyük olursa hidrojenin yanma süresi o kadar kısaldır. Yıldız, Güneş'in yarısından küçük bir kütleyle sahipse, hidrojenin yanmasının 30-40 milyar yıl daha süreceği ve dolayısıyla etkin yaşamının bu ölçüde uzun olduğu hesaplanmıştır. Bu tip yıldızlar çoktur ve özellikle küresel kümelerde yer alır. Bunların yaşamları büyük olasılıkla Beyaz Cüce'ler biçiminde sona erecektir. Buradan da anlaşılacağı üzere Beyaz Cüce'ler, yıldız evriminin son aşamalarını temsil ederler.

Diğer yıldızlarda çekimsel büzülme dönemi başlayarak yıldız çekirdeğine ek enerji sağlar ve çekirdeği saran ince bir katman içinde hidrojen yanması devam eder. Bu aşamada helyumdan oluşan çekirdeğin kimyasal bileşiminin dönüşümü sonucunda ışınım gücünün artması, dış katmanlarda güçlü bir genişlemeye yol açar. Böylece küçük kütleli bir yıldızın yarıçapı başlangıçtaki yarıçapının elli katına ulaşabilir. Dolayısıyla ışınım gücü, yüzeyinde sıcaklığın düşmesi yüzünden biraz artar ve kırmızı-turuncu bir renk alır. Yıldız artık bir Kırmızı Dev'e dönüşmüştür.

Büyük kütleli yıldızlar, galaksilerin evriminde temel rol oynar. Yaşamlarının sonunda bunlar, dev gömleklerinin (dış katmanlarının) büyük bir bölümünü uzaya fırlatır, ardından parlayarak yok olurlar (süpernovalar). Bu patlama galaksilerin kimyasal elementler açısından zenginleşmesinin kaynağını oluşturur ve bu zenginlik yıldızların oluşum sürecine yansır.

3. GEZEĞEN OLUŞUMU

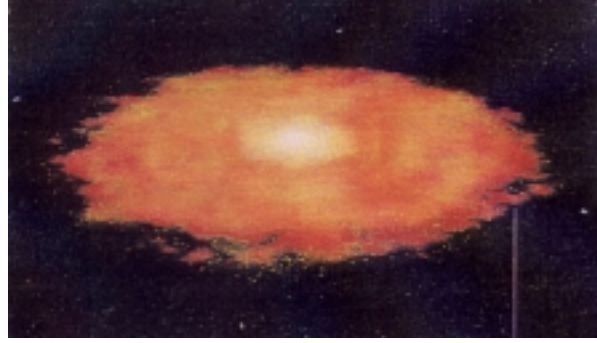
Güneş'in etrafında belli yörüngelerde bulunan bütün gezegenler aynı yönde dolanırlar ve hemen hemen aynı düzlemde bulunurlar. Ayrıca her bir gezegenin kendi eksenini etrafındaki dönme hareketi (Venüs hariç) yine aynı yöndedir. Diğer gezegenlere göre Venüs'ün eksenini etrafındaki dönme hareketinin zıt yönde oluşu 1962 yılına kadar bilinmiyordu. Böylece, gezegen hareketlerinin gösterdiği bu belirgin düzen ve benzer yörünge özellikleri bu cisimlerin ortak bir kök den gelmekte olduklarının en belirgin kanıtıdır.

Nebula Hipotezi olarak bilinen ve 1796'da Laplace tarafından ileri sürülen teoriye göre Güneş, ilk oluştuğu anda sıcak ve yavaş dönen bir bulutu andıran oldukça geniş bir atmosfere sahipti. Bu atmosfer soğudukça yoğunlaştı ve daha hızlı dönmeye başladı. Bu hızlı dönme sonucunda Güneş etrafındaki bu buluttan bir gaz halkası ayrıldı. Arda kalan atmosfer ikinci halkanın oluşumuna kadar daha da fazla büzülüyor ve böylelikle yeni gaz halkaları oluşuyor. Her bir halkadaki gaz, aşama aşama bir gaz gezegeni olacak şekilde bir araya toplanıyor.

1900'lü yılların başlarında Chamberlin ve Moulton tarafından ileri sürülen diğer bir hipoteze göre Güneş, ilk oluştuğu anda gezegenimsi cisimler olarak adlandırılan küçük, katı cisimlerin oluştuğu çok geniş yığınlar tarafından çevrilmişti ve bu cisimler Güneş etrafında bazı noktalarda daha yoğunlardı. Bu yığınlar bir başka grupla birleşerek bir gezegen oluşturacak şekilde büyüyerek bilinen gezegenleri oluşturmuşlar.

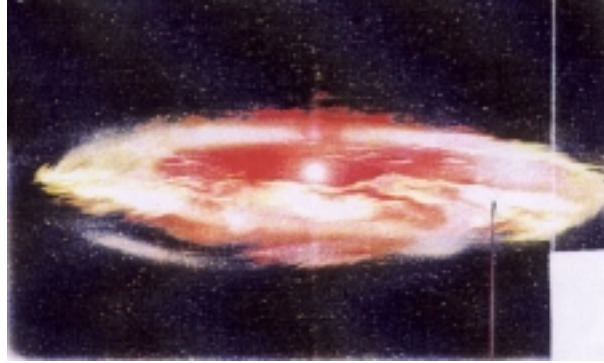
Günümüzde, her iki hipotezi de kapsayan teori rağbet görmektedir. Buna göre, Güneş'in oluşum aşamasında etrafında bulunan madde, dönen bir diskte toplanmıştır. Bu madde, soğudukça küçük katı cisimler oluşmuş ve birbirleriyle birleşmeye başlamışlar.

Güneş'in oluşumundan sonra manyetik alanı bir yandan etrafındaki bu oluşumları bir araya toplarken, diğer yandan da onun dönmesini yavaşlatmış.



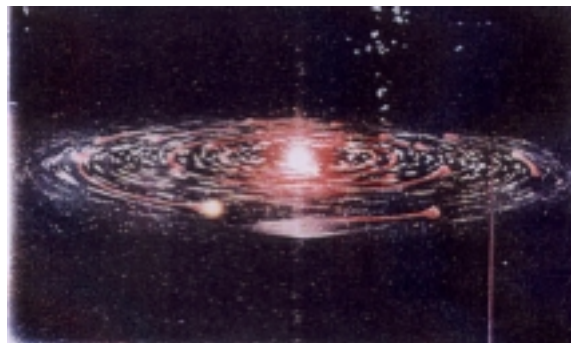
Şekil 4a. Çökmekte Olan Bulut:

Güneş Sistemimiz, gaz ve tozdan oluşmuş büyük bir bulutun, kendi çekimsel etkisi ile çökmesi sonucu oluşmuştur. Bu bulut, disk biçimini almak üzere dönmeye başladığı sırada özellikle merkezi bölgeler ısınır.



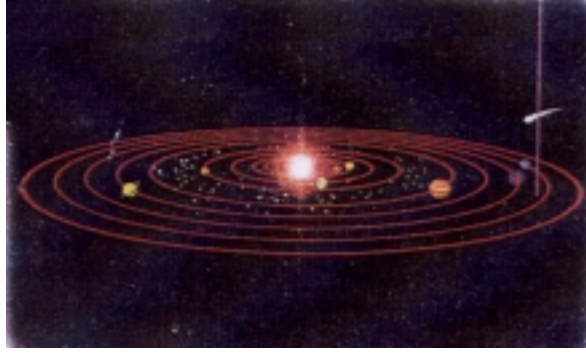
Şekil 4b. Sıcak ve Soğuk:

Sonuçta sıcaklık ve basınç, nükleer bir reaksiyon oluşturmak üzere yükselir ve Güneş parlamaya başlar. Geri kalan maddeler buharlaşır ve küçük partikülleri oluştururlar.



Şekil 4c. Blokların İnşası:

Maddeler her defasında daha büyük kütleler oluşturmak üzere bir araya toplanmaya başlamıştır. Sonuçta bu kütleler gezegenleri oluşturur. Güneş etrafındaki yörüngeleri hemen hemen aynı düzlemedir.



Şekil 4d. Sistemin Tamamlanması:

Uydularıyla birlikte gezegenler ve Güneş Sistemindeki maddelerin çoğunun Güneş'e bağlı olduğu kabul ediliyor. Ancak katı asteroidler ve uzayın derinliklerindeki yörüngelerde dolanan buzlu kuyruklu yıldızların esrarı hala tam olarak çözülememiştir. Bu yüzden Güneş Sisteminin erken dönemlerinin neye benzediği hala tam olarak bilinmemektedir.

4. KAHVERNGİ CÜCELER

4. 1. Kahverengi Cüce Nedir?

Gece gökyüzüne baktığımızda görünen ışık kaynaklarının yıldız veya gezegen olduğunu ilk anda ayırt edemeyiz. Ancak teleskop gibi gözlemsel aletlerle incelemeler yapılarak, bazı cisimleri ışığı yansıttığı (gezegen), bazılarının ise kendilerinden parladıklarını (yıldız) anlayabiliriz. Yıldızlarla gezegenler arasındaki bu fark nereden kaynaklanır?

Yıldızlar, bir gaz bulutunun kendi çekimsel gücü ile sıkışarak oluşur ve bu sırada sıcaklığı artar. Sonunda sıcaklık, merkezde bir termonükleer reaksiyon oluşturacak değere ulaşır ve böylece yıldız kendiliğinden ışık yaymaya başlar. Gezegenler ise bir başka şekilde oluşurlar. Yıldız oluşumundan arda kalan ufak toz parçaları bir araya toplanarak kümeler oluştururlar. Bu kümeler de birleşerek daha büyük madde yığınları oluşturur ve bu süreç tüm toz tükenene dek sürer. Sonuçta kendi ışığını üretecek kadar sıcak ya da yeterince büyük olmayan nispeten soğuk bir kütle oluşur.

Bir yıldızın hayatı boyunca ne kadar zaman parlayacağını onun doğduğu andaki kütlesi tayin eder. Kütlesi ne kadar büyükse, parlaklığı da o denli büyüktür. Fakat bu ilişkinin bir limiti vardır. Çok büyük kütleli yıldızlar evrimlerini bir karadelik olarak sonlandırırlar. Karadelik'ler içinden ışığın dahi kaçamayacağı kadar yoğun cisimlerdir. Yıldızın parlamasını sağlayacak olan termonükleer reaksiyonları ateşlemek için yeteri derecede kütleye sahip olmayan, düşük kütleli cisimler sessiz ve belirsiz bir biçimde hayatlarını sürdürürler ki astronomlar bunlara kahverengi cüce demekteler.



Şekil 5. Bir zamanlar; kahverengi cücelerin görüntülerini elde etmenin tek yolu, hayali manzara resimleriydi. Ancak 1995'lerden sonra bu cisimlerin gözlemsel olarak keşfi, gelişen gözlem aletlerinin kullanımıyla gün geçtikçe artmaktadır. kahverengi cüceler ne gezegenlerin ne de yıldızların özelliklerini taşırlar. Onlar, en az yıldızlar kadar moleküler bulutlardan oluşmuşlardır. Ancak atmosferleri dev gaz gezegenlerini anımsatır. Astronomlar kahverengi cüce türlerini karakterize etmeye başladıklarında amaçları, galaksilerin oluşumunda kahverengi cücelerin önemini belirlemektir. Yukarıdaki şeklin, bir gezegenin uydusunun yüzeyinden çizildiği kabul ediliyor. Öyle ki, uydusu üzerinde bulunan gezegen, yörünge hareketi sonucunda bileşeni olan genç bir kahverengi cüceyi örttüğü an temsil edilmektedir.

Orjinal olarak Kara Cüceler denen bu yıldızaltı cisimler, ilk olarak 1960'larda uzayda özgürce yüzen koyu nesnelere olarak düşünüldü. Yıldız modelleri, bir yıldızın en az Jüpiter kütlelerinin 80 katı bir kütleye sahip olması durumunda, kararlı hidrojen füzyonunu gerçekleştirebileceğini gerektirmektedir. Bu kütle değerinden daha küçük kütleli cisimler var olmalarına rağmen, parlaklıkların çok düşük olmasından dolayı belirlenmesi son derece güçtür. O yıllarda, kahverengi cüce olabileceğinden şüphe edilen iki gök cismi 1995'te net olarak teşhis edildi ve böylece kahverengi cüce varlığı doğrulandı. Birkaç hafta arayla keşfedilen bu iki cisim sırasıyla Teide-1 ve Gliese 229B olarak adlandırıldı. 1997 Ağustos'una kadar en az yarım düzine daha kahverengi cüce belirlendi. Kısa zamandaki bu sayıca artış, gözlem aletlerindeki gelişmelerin bir sonucudur. CCD gibi kuantum etkinliği yüksek dedektörler ve bu aygıtlarla donatılmış teleskoplar, bu ilginç gök cisimlerinin keşfedilmesine katkıda bulunmaktadır. Gözlem aletlerindeki bu gelişmeler yardımıyla daha önce tespit edilemeyen kahverengi cücelerden şimdi neredeyse ayda bir tane bulunuyor.

Yeni keşifler, astronomların kahverengi cücelere ilişkin geliştirdikleri teorileri karşılaştırma olanağı sunmaktadır. Gerçekte varlığı bilinen kahverengi cücelerin atmosfer yapıları hakkında çok az bir bilgi birikimine sahibiz. Diğer taraftan bu cisimlerin sayıları ve evrendeki dağılımları tahmin edilebilmektedir. Bu yöndeki çalışmalar henüz başlangıç aşamasında olmasına rağmen sonuçları yıldız evrim modellerini ve kozmoloji teorilerini destekler. Bilindiği üzere, günümüzde kozmoloji/astrofiziğin en önemli sorunlarından biri evrendeki kayıp kütle dir. Çeşitli gözlemsel ve teorik hesaplamalar sonucunda evrendeki kütlelerin yalnızca % 10'unun tespit edilebildiği ileri sürülmektedir. O halde geri kalan % 90 nerededir? Bir teoriye göre bu kayıp kütle, kahverengi cücelerde saklıdır. Bu nedenle kahverengi cücelerin keşfi kozmoloji için çok önemlidir.

Genç kahverengi cücelerin ana enerji kaynağı gravitasyonel (çekimsel) çökme enerjisidir. Daha yaşlı olanları sadece evrimlerinin erken evrelerinde geçirdikleri çökme sonucu arda kalan iç ısı enerjisi sayesinde ışınım yapabilirler. Yaşlı kahverengi cücelerin parlaklığı

hidrojen füzyonu yapan en küçük yıldızın parlaklığından ($10^{-4}L_{\odot}$) daha küçüktür. Bir yıldızın en düşük sıcaklığı 1800 °K civarındadır. Bundan daha düşük sıcaklığa sahip bir cisim ya kahverengi cücedir yada bir gezegen. kahverengi cüceler büyüklük olarak gezegen ile yıldızlar arasında bulunurlar. Bu cisimler ya yıldızlararası gazın yoğunlaşması (yıldız oluşumu gibi) sonucunda yada bir takım etkiler sonucunda maddenin bir noktada toplanmasıyla (gezegen oluşumu gibi) oluşabilirler. Sıcak kahverengi cücelerde karbonmonoksit baskın olup, soğuk kahverengi cücelerde karbondioksit olarak görülür.

4. 2. Kahverengi Cücelerin Özellikleri

Kütle: kabul edilmiş teorilere göre hidrojen yanmasını başlatabilecek kritik kütle $0.084M_{\odot}$ 'tir. Yani bir kahverengi cücenin kütlesi bundan daha büyük olmamalıdır. En alt sınırın belirlenmesi güçtür, ancak kahverengi cücelerin genellikle 10 ile 84 M_j arasında bir kütleyle sahip oldukları düşünülür.

Güneş Kütleli: $M=2 \times 10^{30}$ kg= 1000 M_j

Jüpiter Kütleli: $M_j= 2 \times 10^{27}$ kg= 0.001 M_{\odot}

Hidrojen yanması için kritik kütle: 84 M_j

Merkezi Isı: Merkezi ısının 3 milyon derecenin altında olması gerekir. Çünkü bu sıcaklık nükleer reaksiyonları başlatmak için yeterlidir. Bu, kütleyle bağlı olup daha küçük kütlelere ilişkin sıcaklıklar daha düşüktür.

Yüzey Isısı: Bir kahverengi cücenin en dış katmanını sıcaklığı 1000 °K civarında olması beklenir, ancak bu ısı yaşa da bağlıdır. Kütle, yaşlandıkça soğur. Yaşamının başlangıcında nükleer füzyon oluşabilir, ancak pek uzun sürmez.

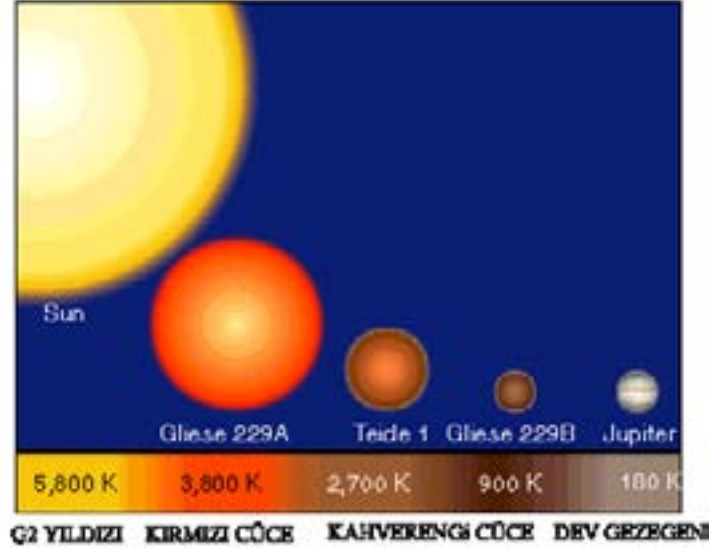
Işınım Gücü: Kahverengi cüceler, yüzey ısıları düşük olduğu için pek parlak değildirler. En sönük yıldızlar için ışınım gücü $10^{-4}L_{\odot}$ iken, genç bir kahverengi cüce soğumadan önce daha büyük bir ışınım gücüne sahip olabilir. Ancak evrimlerinin sonraki aşamalarında ışınım güçleri $10^{-5}L_{\odot}$ civarında olur.

4. 3. Kahverengi Cücelerin Belirlenmesi

Kahverengi cüceler ilginç gök cisimleridir. Onlar ne gezegen ne de yıldızdır. Buna rağmen iki cinsin de özelliklerini taşırlar. Teorilere göre kahverengi cüce, bir yıldızla aynı yolu izleyerek, yani yıldızlararası gaz ve tozdan oluşmuş bulutun kütleçekim nedeniyle çökmesi sonucunda oluşur. Ancak, atmosfer yapısı büyük gazlı gezegenleri anımsatan bir şekilde belirsiz olabilir. Kahverengi cüceler görel olarak küçük cisimlerdir. Buna rağmen Jüpiter'in kütlesinin 80 katı bir kütleyle sahiptirler ve çapları da Jüpiter'inkine yakındır. Bu ilginç gök cisimleri, yıldızlara göre çok daha belirsizdirler. Düşük sıcaklıklarından dolayı atmosfer ısıları kimi yerde 300 °K, kimi yerde de 3000 °K'i bulur.

Sonuç olarak kahverengi cüceler kırmızıöte dalga boylarında en parlak olup çıplak gözle kızıl-kahve renginde görünürler Bu cisimlerin düşük atmosfer sıcaklıklarından dolayı, dış katmanlarında bazı önemli moleküller bulunur. Bunların arasında dikkate değer olanları titanyum oksit (TiO) ve vanadyum oksitlerdir (VO). Bu moleküller, kahverengi cücelerin tayfında Güneş'inkine göre daha egemendir. Çünkü, güneş gibi sıcak bir yıldızda ($T=5770$ °K) bu moleküller yapı korunamaz. Bu moleküllerin varlığı, cismin soğuk olduğunun kanıtıdır. Kahverengi cücelerin düşük sıcaklıkları, astronomlara bunların nerelerde araştırılacağına dair ip ucu vermektedir. Yani kahverengi cüceler, tayflarında belirli moleküller içeren, belirsiz gök cisimleridir.

Hidrojen yakan en küçük kütleli yıldızlar kırmızı cücelerdir. Yüzey sıcaklıkları 3500 °K'den daha düşüktür. Galaksimizde en fazla yıldız türünün kırmızı cüceler olduğuna inanılmaktadır. Çıplak gözle koyu kırmızı renkte görünen bu yıldızların çapları Kahverengi

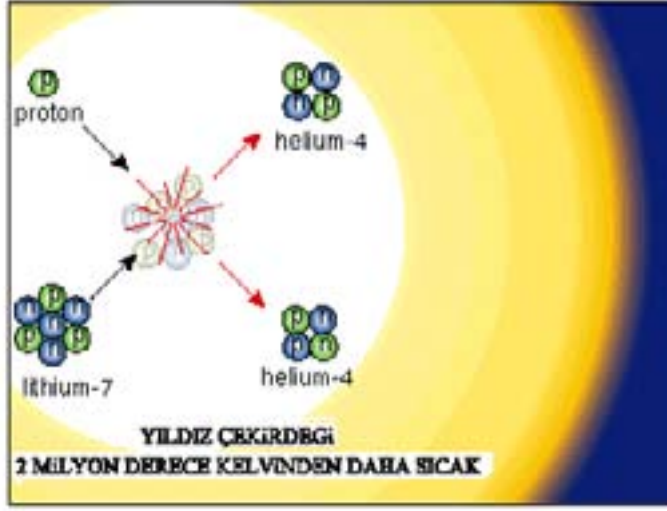


Şekil 6. Teide-1 ve Gliese 229B kahverengi cücelerin yüzey sıcaklığı ve göreceli büyüklüklerinin bir sarı cüce yıldız olan Güneş'e, bir kırmızı cüce yıldız olan Gliese 229A'ya ve bir dev gezegen olan Jüpiter'e göre karşılaştırılması. Kahverengi cüceler küçük kütlelerinden (~80 M_J) dolayı merkezi bölgelerindeki hidrojeni yakamayıp bu yolla enerji üretmezler ve de hiç bir zaman gerçek yıldız olamazlar. En küçük kütleli yıldızlar olan kırmızı cücelerin atmosfer sıcaklıkları 4000 °K'den daha azdır. Bu nedenle, astronomlar bu yıldızları kahverengi cücelerden ayırt etmekte zorluk çekerler. Jüpiter gibi dev gezegenler kütlece kahverengi cücelerden daha küçüktürler. Ancak, çap ve atmosfer bileşimi bakımından neredeyse bu iki tür gök cisimiydirdir. Günümüzde sürdürülmekte olan kahverengi cücelere ilişkin araştırmalar, onların yıldızlararası ortamlarda yukarıda bahsedilen diğer küçük kütleli yıldız ve yıldızaltı gök cisimlerinden ayırt edilmesine yöneliktir.

Cüce'lerinkinden çok büyük değildir. Soğuk olduklarından dolayı atmosferlerinde titanyum oksit ve vanadyum oksit varlığı dikkat çekicidir.

Başlangıçta kahverengi cüce oldukları sanılan bazı gökcisimlerinin, yeni gelişmeler ışığında birer kırmızı cüce oldukları anlaşıldı. Kahverengi cüceler ile kırmızı cüce yıldızları arasındaki fark, yıldızaltı cisimlerin içinde devam eden termonükleer reaksiyonlardır. Bu fark daha dayanıksız bir elementin varlığına (lityum gibi) olanak tanır. 2.5 milyon derece Kelvin de tüm lityum parçalanır. kahverengi cücenin atmosfer sıcaklığına sahip çok yaşlı kırmızı cüce yıldız bile tüm lityumunu parçalar. Bunun yanında Jüpiter kütlelerinin 60 katından daha az bir kütleyle sahip kahverengi cüceler hiçbir zaman lityumunu parçalayacak iç sıcaklığa erişemezler. Ancak, kütlesi 60 ile 80 Jüpiter kütlesi kadar olan kahverengi cüceler lityumu parçaladığı gibi bir miktar da hidrojen yakarlar. Ancak bunlar kararsız cisimler olup hiçbir zaman kararlı yıldız olamazlar. Bundan dolayı; eğer lityum soğuk bir cücede belirlenirse, bu cüce bir kahverengi cücedir. Lityum eksikliği ise; bu cismin ya yıldız yada kararsız bir cisim olduğunun bir kanıtıdır.

Astronomlar, lityumun belirlenemediği durumlarda, bu farkı ayırt edemezler. Lityumun en güçlü spektral çizgisinin görünür bölgede olması ($\lambda 6708 \text{ \AA}$) astronomlar açısından bir şans teşkil etmektedir. Bu durumda lityum bolluğunun saptanması daha kolaydır. En küçük hidrojen yakan yıldızlar ile genç kahverengi cüceler arasındaki temel fark atmosferlerindeki lityum varlığıdır.



Şekil 7. Yıldızların çekirdeğindeki lityum parçalanırken, kahverengi cücelerde böyle bir olay gerçekleşmez. Bu da (lityumun varlığı ya da yokluğu) astronomlara, soğuk gök cisimlerini sınıflandırma olanağı tanır. Yıldızın çekirdeğindeki yüksek sıcaklık, her lityum 7 çekirdeği (3 proton ve 4 nötrondan oluşur) ile bir proton birleşerek iki tane helyum-4 çekirdeği üretir. En soğuk yıldızlar (kırmızı cüceler) bile, hidrojeni yakarak lityumu parçalamak için gerekli sıcaklıklara ulaşabilirler. Tüm yıldızlarda, bu elementin olmayışının nedeni budur. Bunun karşıtı olarak, kahverengi cüceler hidrojen yakmayı sürdüremediklerinden dolayı lityumu da parçalayamazlar.

Bir kahverengi cüce, yeni oluştuğu anda daha sıcak dolayısıyla daha parlak olacaktır. Çünkü kahverengi cüceyi oluşturmak üzere yoğunlaşan madde ısı enerjisi yayınlar. Bu esnada kısa bir süre hidrojen yanmasını başlatmayı da başarabilir. Daha önce belirtildiği gibi, kahverengi cüceler çok parlak değildir ve bu nedenle varlıkları araştırılırken bakılacak olan yerler, yıldız oluşum bölgelerinin yakınları ya da çok sayıda genç yıldızın bulunduğu yerlerdir. Bu tür bölgelere örnek olarak Pleiades ve Hyadesler gibi açık kümeler verilebilir. Bir açık kümedeki tüm yıldızların aynı gaz bulutundan, hemen hemen aynı anda oluşması sonucunda tüm üyelerinin yaşının ve kimyasal bileşiminin aynı olması gerekir. Bu durum cismin kütlelerini tek bağımsız değişken kıldığından astronomların işini oldukça kolaylaştırmaktadır. Yıldız oluşum bölgelerinin yanında yer alan kahverengi cücelere ilgili veri ve bilgilerin şu andaki birikme hızı gerçekten de baş döndürücüdür. Güneş civarındaki araştırmalar, paralaks ve öz hareket çalışmaları, renk araştırmaları, kümelerdeki araştırmalar, radyal hız araştırmaları, halo çalışmaları ve diğer araştırmalar yürütülmektedir. Tüm bu araştırmalar sonucunda elde edilen heyecan verici bilgiler, galaktik halomuzda daha önce saptanamamış olan çok sayıda kahverengi cücenin bulunduğu belirlenmesi olup galaksimizin koyu maddesinin büyük kısmını oluşturmaktadır.

Açık kümeler astronomlar için galaksimizde görece olarak küçük ve iyi tanınan bölgedir. Özel durumlarından dolayı, açık kümelerdeki kahverengi cüceler, tüm kahverengi cüce türlerini temsil etmeyebilir. Bu da neden geniş alanlarda yapılan araştırmaların diğer kahverengi cüceleri bulmak için gerekli olduğunu gösterir. Bu çalışmalardan Samanyolundaki küçük kütleli yıldızların dağılımı hakkında bilgi edinebiliriz. Küçük kütleli yıldız araştırmaları, galaksimizin değişik bölgelerinde (Güneş yakınında, Samanyolu merkezine yakın galaktik çıkıntıda ve galaktik haloda) yapılır. Galaksimizin değişik bölgelerindeki küçük kütleli yıldızlar, galaksi içindeki hareketleri ve metalik özellikleri bakımından farklılık gösterir. Bu farklılıklar kahverengi cüceler arasında da bulunabilir. Buna rağmen soğuk bir cismin yaşını belirlemek oldukça güçtür. Bu nedenle gözlenmesi daha kolay olan Güneş Sistemimiz

yakınında keşfedilebilecek bir kahverengi cücenin varlığı daha geniş alanlarda benzer çalışmaların yapılmasını gerektirecektir.

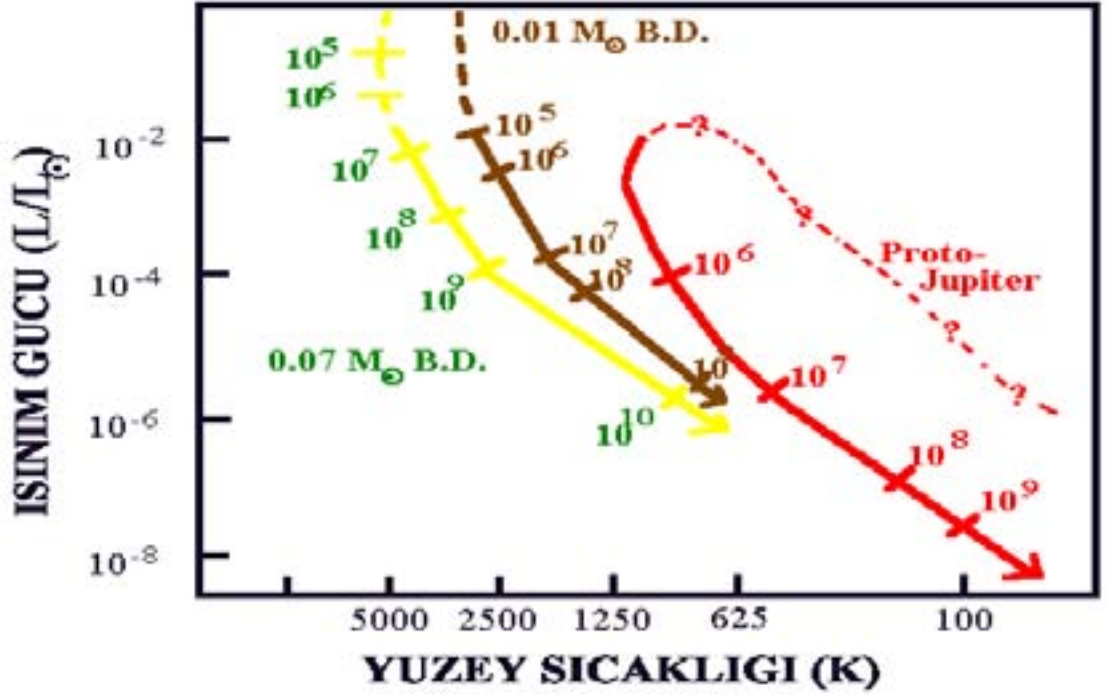
Kahverengi cüceleri belirlemenin bir başka yolu da, hidrojen yakan yıldızların belirsiz yoldaşlarının kimliğini araştırmaktır. Bu yaklaşımla kahverengi cüce direkt olarak, yada baş yıldıza uyguladığı çekimsel etki ile belirlenebilir. Gökyüzündeki yıldızların yarısı, çift yada çoklu yıldız sistemlerinin bir üyesidir. Buna göre birçok kahverengi cüce hidrojen yakan bir yıldızın yoldaşı olabilir. Ancak, çift yıldız sistemindeki baş yıldızın çok parlak olması kahverengi cücenin belirlenmesinde güçlük yaratır.

4. 4. Kahverengi Cücelerin Evrimleri

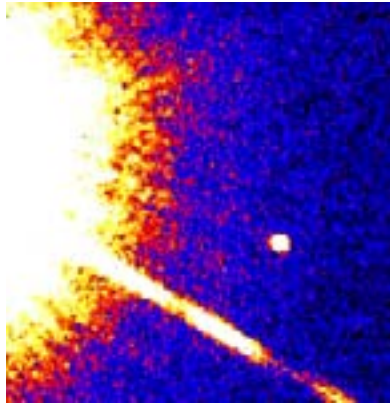
Yoğunlaşmış yıldızlararası maddeden oluşmuş bulutlar kütleli çekim etkisiyle çökerek yıldızları oluşturur. Eğer gaz kütleli büyüklüğü $0.08 M_{\odot}$ 'den küçük ise merkezi sıcaklık nükleer reaksiyonları sürdürecektir düzeyde yükselmez. Kısa bir süre için merkezi bölgede hidrojen yakabilir. Bu durumda oluşan cisme **Kahverengi Cüce** denir. Kahverengi cüce çöktükçe parlar. Çünkü ışınımın tek kaynağı kütleli çekim enerjisidir. Bu çökme elektronlar tarafından oluşturulan karşı etkinin baskın olacağı ana kadar devam eder. Bu andan itibaren ek bir enerji kaynağı olmadığından, gittikçe soğuyarak sönmeye başlar. Bu sürecin sonunda söz konusu kahverengi cüce bir **kara cüce** haline gelir.

4. 5. Kahverengi Cücelerin Keşifleri

Son yıllarda bu gök cisimlerini belirlemek için yapılan çalışmalar başarıyla sürmektedir. Teide-1; İspanya'nın Tenerife Adası'nın temiz, koyu gökyüzünde Pleiades yıldız kümesinin belirsiz oluşumları incelenirken keşfedildi. Teide-1'in göze çarpmasının nedeni rengi idi. Cismin atmosferinde yapılan ölçümlerde titanyum oksit, vanadyum oksit ve doğal sodyuma rastlandı. Bu elementler, düşük parlaklığa sahip bir cüce için beklenen özelliklerdir. Kaliforniya Üniversitesi'nden Gibor Basri ve Geoff Marcy araştırmaları sonucunda Teide-1'in atmosferinde lityumun varlığını belirlediler. Bu da bu cismin kesin olarak bir kahverengi cüce olduğunun kanıtıydı. Pleiades kümesindeki bu araştırmalarla, belki de 40 Jüpiter kütlelienden daha küçük kütleli kahverengi cücelerin varlığı belirlenebilecektir.



Şekil 8. Kahverengi cücelerin en parlak oldukları zaman genç oldukları andır. Şekil, farklı kütleli 3 cismin HR diyagramındaki evrim yollarını göstermektedir. 0.07 Güneş kütleli bir kahverengi cüce (neredeyse bir yıldız olacak kadar büyük), 0.01 Güneş kütleli bir kahverengi cüce ve Jüpiter benzeri bir cisim. İşaretli yerlerdeki sayılar yıl olarak çökmenin başladığı andan itibaren geçen zamanı (yaşı) göstermektedir.



Şekil 9. Gliese 229B kahverengi cücesi, bileşeni olan Gliese 229A kırmızı cücesine göre küçük bir nokta şeklinde görünür (sol tarafta). Sağ tarafta ok ile gösterilen Teide-1, Pleiades açık kümesindeki birçok belirsiz yıldız arasından seçilebiliyor. Bu iki gök cisimi kahverengi cüceler arasındaki farklılıkların birer temsilcisidirler. Teide-1, Jüpiter kütlelerinin 55 katı bir kütleyle sahip, yaklaşık 100 milyon yaşında, genç bir kahverengi cücedir. Atmosfer sıcaklığı ise bir kırmızı cüceyi andırır. Gliese 229B, Jüpiter kütlelerinin 20 ile 60 katı bir kütleyle sahip, 5 milyar yaşında, soğuk bir kahverengi cücedir.

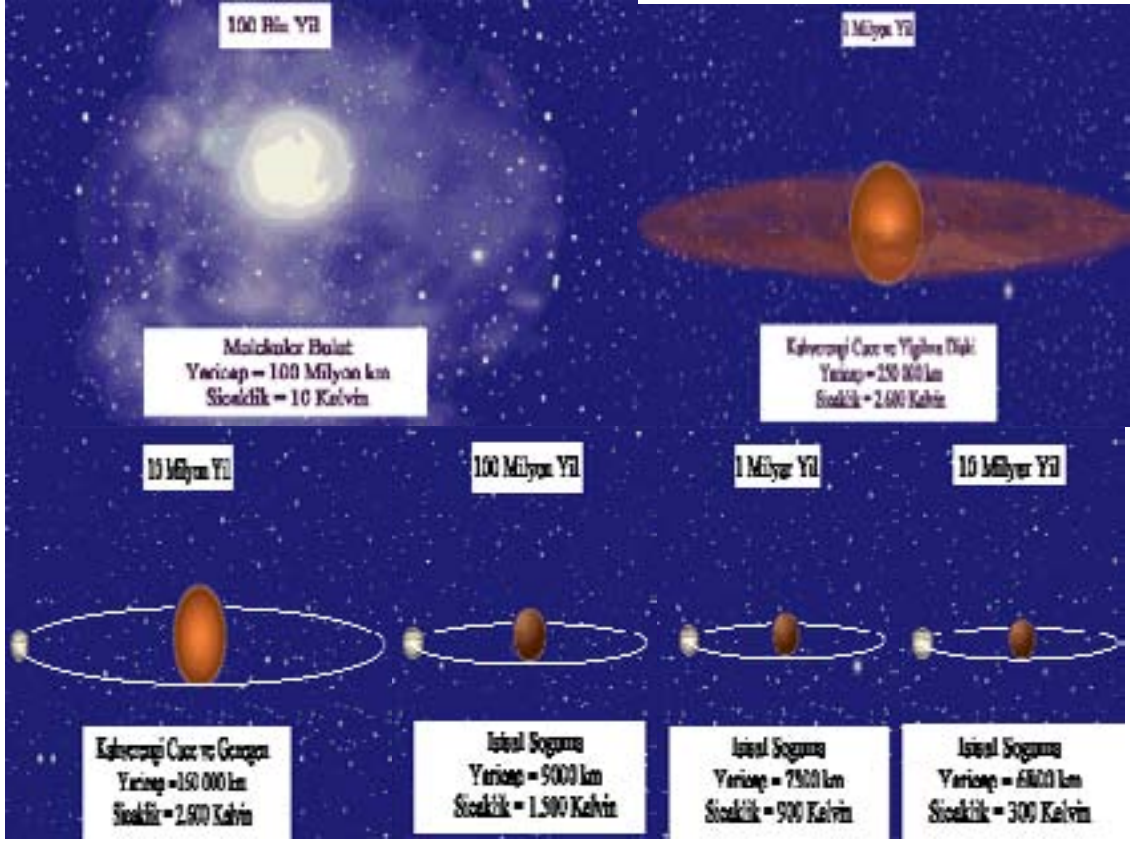


Şekil 10. Kahverengi cüceleri belirlemede kullanılan üç farklı method. Gliese 229B kahverengi cücesi, kırmızı bir cüce yıldız olan Gliese 229A'nın sönük bir yoldaşıdır. Bu kahverengi cüce, Koronograf ile tesbit edilmiştir. Bu aygıt, astronomlara parlak bir yıldızın yanında saklanmış olan, belirsiz cisimleri inceleme olanağı sağlar. Teide-1, CCD ile yapılan gözlemlerin analiziyle belirlendi. Teide-1 Pleiades'te son derece genç (belki de 100 milyon yaşında) bir kahverengi cücedir. Kelu-1 ise; Beyaz Cüce'leri (hayatın son aşamasında olan sıcak yıldız artıkları) belirlemek amacıyla devam eden geniş alan araştırmaları sırasında keşfedildi.

Mount Palomar ve Hubble Uzay teleskobu gözlemlerini kullanan Kaliforniya Teknoloji Enstitüsü ve Johns Hopkins Üniversitesi astronomları, Teide-1'in keşfinden kısa bir süre sonra Gliese 229B'yi belirlediler. Bu kahverengi cüce; kırmızı bir cüce yıldız olan Gliese 229A'nın yoldaşıdır. Gliese 229B'nin kırmızıöte tayfında metana (CH_4) ve sadece 1500 °K'den daha düşük sıcaklıklarda oluşabilen bir başka dayanıksız moleküle rastlandı. Böylelikle Gliese 229B'nin bir yıldız olamayacak kadar soğuk olduğu anlaşıldı.

Kelu-1 denen cismin tayfında en soğuk kırmızı cüceler ve kahverengi cücelerde bulunan titanyum oksit veya vanadyum oksit'in varlığına rastlanmadı. Buna rağmen atmosferinde lityum ve metan bulundu. Düşük sıcaklıklarda var olan lityum ve metanın varlığı, titanyum oksit ve vanadyum oksitin de bu sıcaklıklarda olmasını gerektirir. Fakat titanyum oksit ve vanadyum oksit 2500 °K'den daha düşük sıcaklıklarda yoğunlaşarak $CaTiO_3$ benzeri toz taneciklerine dönüşürler. Bunun sonunda, bu iki moleküle ait çizgiler tayfta görülmez. Kelu-1'in sıcaklığı düşüktür. Bu da, onun Pleiades kümesinde bulunan kahverengi cücelerden daha yaşlı olduğunu gösterir. Belirsiz olması ve arkafon yıldızlarına doğru hızlı hareketi, bu kahverengi cücenin Güneş Sistemimize oldukça yakın (belki de 30 İY uzaklıkta) olduğunu gösterir. Kelu-1'in kütlesi Jüpiter'in kütlesinin 75 katından daha azdır.

Haziran 1997'de Boston'da gerçekleşen "Soğuk-yıldız" konferansında, bir seri yeni kahverengi cüce gözlemi sunuldu. Bunlardan en merak uyandırıcı olanları, Güneş Sistemi yakınında (50 İY) tek olan ve atmosferinde lityum bulunduran iki kahverengi cüce idi. Bunların kütleri 60 Jüpiter kütlesinden ve yaşları da 1 milyar yıldan daha az olduğu belirlendi. 50 ıy yarıçaplı bir gökyüzü bölgesinde yüzlerce kahverengi cücenin bulunabileceği tahmin edilmekte. Bu yıldız altı gök cisimleriyle ilgili dikkat çekici bir diğer gelişme çekimsel olarak birbirlerine bağlı ve birkaç günlük periyoda sahip iki kahverengi cüceden oluşan çift sistemin bulunmasıdır. Bu çifte ilişkin gözlemler sürdürülmektedir.



Şekil 11. Bir kahverengi cüce yaklaşık 10^{13} cm çapındaki dev moleküler buluttan oluşur. İlk 1 milyon içinde bulut yoğunlaşarak yaklaşık 25×10^9 cm yarıçaplı bir diske sahip maksimum sıcaklığı 2600 °K olan bir kahverengi cüceye dönüşür. Bazı durumlarda, yığılma diskinde biriken maddeden kahverengi cüce etrafında yörünge hareketi yapan bir gezegen oluşabilir. Bir kaç milyon yıl sonra, kahverengi cüce, uzun bir soğuma dönemine girer ve bu ısını yavaşça uzaya yayınlar. Olayı takip eden 10.000 milyon yıl içinde kahverengi cüce, daha da yoğunlaşır ve soğur. Böylece astronomlar sıcaklığı ve kütlesi bilinen bir kahverengi cücenin yaşını tahmin edebiliyorlar.

4. 6. Kahverengi Cüceler ve Gezegenler Arasındaki Farklar

Kahverengi cücelerin keşfi, Güneş Sistemi dışındaki gezegenlerle paralel gelişti. Şimdiye kadar Güneş Sistemi dışındaki gezegenler hakkında somut bir delil yoktu. Bu yüzden onlar, kahverengi cücelerle direkt olarak mukayese edilemiyordu. Güneş Sistemi dışındaki gezegenler, kahverengi cücelerden daha belirsiz olduklarından, astronomlar bunların varlıklarını ancak gezegeni oldukları yıldızlar üzerine yaptıkları çekimsel etkiler ile tespit edebiliyorlar. Bu yöntem, gezegenin minimum kütlesi ve yıldızından olan uzaklığı hakkında bilgi edinebilmemizi sağlamaktadır. Ancak söz konusu yöntemle, bu gezegenlerin atmosfer yapıları hakkında bir bilgi elde edilemez. Astronomlar daha çok kahverengi cüce ve Güneş Sistemi dışında gezegen bulmaya devam ettiği sürece bu gök cisimleri hakkındaki şüphelerimiz giderilecektir.

Kahverengi cücelerle, Güneş sistemimizdeki büyük gezegenlerin karşılaştırılmasında bir takım güçlükler yaşanmaktadır. Örneğin, Jüpiter'in atmosferinin dış katmanlarına metan ve su egemenken, aynı bolluğu Gliese 229B kahverengi cücesinde de görmekteyiz. Teide-1'de ise çok az miktarda metan ve suya rastlanır. Bu kahverengi cücenin atmosferi çoğunlukla karbon monoksit ve titanyum ile vanadyum oksitlerinden meydana gelmiştir. Buna göre; Gliese

229B'nin, Teide-1'den ziyade Jüpiter ile daha fazla ortak noktaları bulunur. Bunun yanında Teide-1 çok gençtir (100 milyon yaşında). Oysa Gliese 229B ve Jüpiter bu kahverengi cüceden 10 ile 50 kez daha yaşlıdır. Kahverengi cüce ve gezegen modelleri, Teide-1'in yaşlandıkça atmosferindeki metan ve su miktarının daha da artabileceğini ileri sürmektedir. Kelu-1 ve DENIS-P J1228-1547 sadece Jüpiter'den değil aynı zamanda Gliese 229B ve Teide-1'den de farklıdır. Bu bileşeni olmayan kahverengi cücelerin atmosferlerinde değişik moleküller bulunur. Aynı zamanda renkleri de farklıdır.

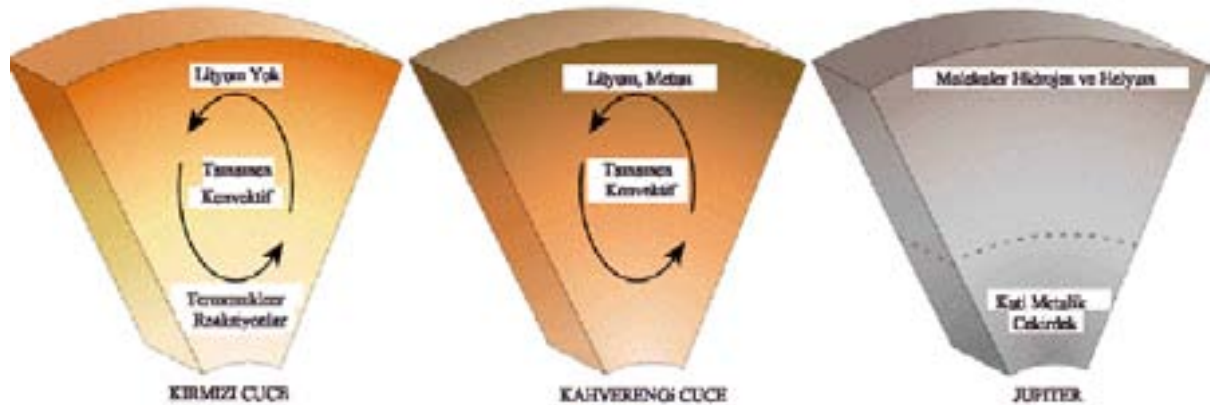
Kimi astronomlara göre kahverengi cüceler ile gezegenler arasındaki yegane fark, döteryum füzyondur. Jüpiter'in kütesinin 12 katından daha küçük kütleli cisimler döteryumu yakamazlar. 12 Jüpiter kütesinden daha küçük kütleli kahverengi cüceler “**Süper Gezegen**” olarak adlandırılır.

Hesaba katmanız gereken bir diğer ayırt edici özellik ise, cismin yörünge özellikleridir. Kahverengi cüceler ya tek başına bulunan cisimler yada yıldızların yoldaşlarıdır. Oysa gezegenler, daha büyük cisimlerin bulunduğu sistemler içinde yer alırlar. Güneş Sistemimizdeki gezegenler neredeyse dairesel yörüngelere sahipken, Güneş Sistemi dışındaki gezegenler için de aynı durum söz konusudur. Fakat bir kahverengi cüce daha çok dışmerkezliği büyük eliptik bir yörüngeye sahiptir.

Kahverengi cücelerle gezegenler arasındaki fark, iç yapılarından da kaynaklanır. Kahverengi cüceler çöken yıldızlararası gaz bulutunun bir ürünüdür. Diğer taraftan gezegenlerin, yıldız diskinin içinde toplanan küçük katı cisimlerden oluştuğuna inanılmaktadır. Bundan dolayı, kahverengi cüceler kimyasal olarak yıldızlardan ayırt edilemezken gezegenler katı, metalik bir iç yapıya sahip olacaklardır.

Sonuç olarak, bildiğimiz kahverengi cüceler ile gördüğümüz gezegenler arasında oldukça büyük farklar vardır. Dev gezegenlerin atmosferlerinde moleküler hidrojen (H_2) ve Karbonmonoksit (CO) gibi kompleks moleküller bulunur, ancak titanyum oksit ve vanadyum oksit ya da suya rastlanmaz.

Daha fazla gezegen ve kahverengi cüce keşfinin bize yeni sürprizler hazırlayacağına inanılmaktadır.



Şekil 12. Kırmızı cüceler, kahverengi cüceler ve dev gezegenler iç yapıları bakımından birbirlerinden farklılık gösterirler. Hem kırmızı cüceler, hem de kahverengi cüceler konveksiyonun etkisiyle çekirdeklerinde bulunan elementleri karıştırırlar. Fakat kahverengi cücelerdeki termonükleer reaksiyonların eksikliği, lityum gibi dayanıksız moleküllerin varlığına olanak tanır. Genel olarak, kırmızı cüceler ve kahverengi cüceler kimyasal olarak pek de farklı değildir. Ancak gezegenler küçük, katı kütlelerin toplanmasından oluştuğu için, kimyasal olarak homojenlikten uzaktırlar. Bu farklılığa gazımsı üst katmanlar ve katı metalik çekirdek de dahildir.

KAYNAKLAR

- Bracher, K., 1998, "Is The Solar System Unique?", *Mercury*, 27, 7.
- Cowen, R., 1998, "Two Teams Find Planet Orbiting Nearby Star", *Science News*, 153, 405.
- Cowen, R., 1998, "Astronomers Find Long-priod Planet", *Science News*, 154, 22.
- Cowen, R., 1998, "Exploring New Words", *Science News*, 154, 88.
- Glanz, J. 1995, "Found: A Star Too Small to Shine", *Science* 270, 1435.
- Martin, E. L., Rebolo, R. and Zapatero-Osorio, M. R., 1997, "The Discovery of Brown Dwarfs", *American Scientist*, 85, 522.
- Marley, M. S., Saumon, D., Guillot, T., Freedman, R. S., Hubbard, W. B., Burrows, A. and Lunine, J. I., 1996, "Atmospheric, Evolutionary, and Spectral Models of the Brown Dwarf Gliese 229B", *Science* 272, 1919.
- Nakajima, T., Oppenheimer, B. R., Kulkarni, S. R., Golimowski, D. A., Matthews, K. and Durrance, S. T., 1995, "Discovery of a cool brown dwarf", *Nature*, 378,463.
- Noyes, R., Korzennik, S., Nisenson, P., Jha, S., Krockenberger, T. and Horner, S, 1996, IAU Circular, No. 6316.
- Oppenheimer, B. R., Kulkarni, S. R., Matthews, K. and Nakajima, T., 1995, "Infrared Spectrum of the cool brown dwarf GL: 229B", *Science* 270,1478.
- Rebolo, R., Zapatero-Osorio, M. R. and Martin, E. L., 1995, "Discovery of a brown dwarf in the Pleiades star Cluster", *Nature*, 377,129.