

AST121 Astronomiye Giriş

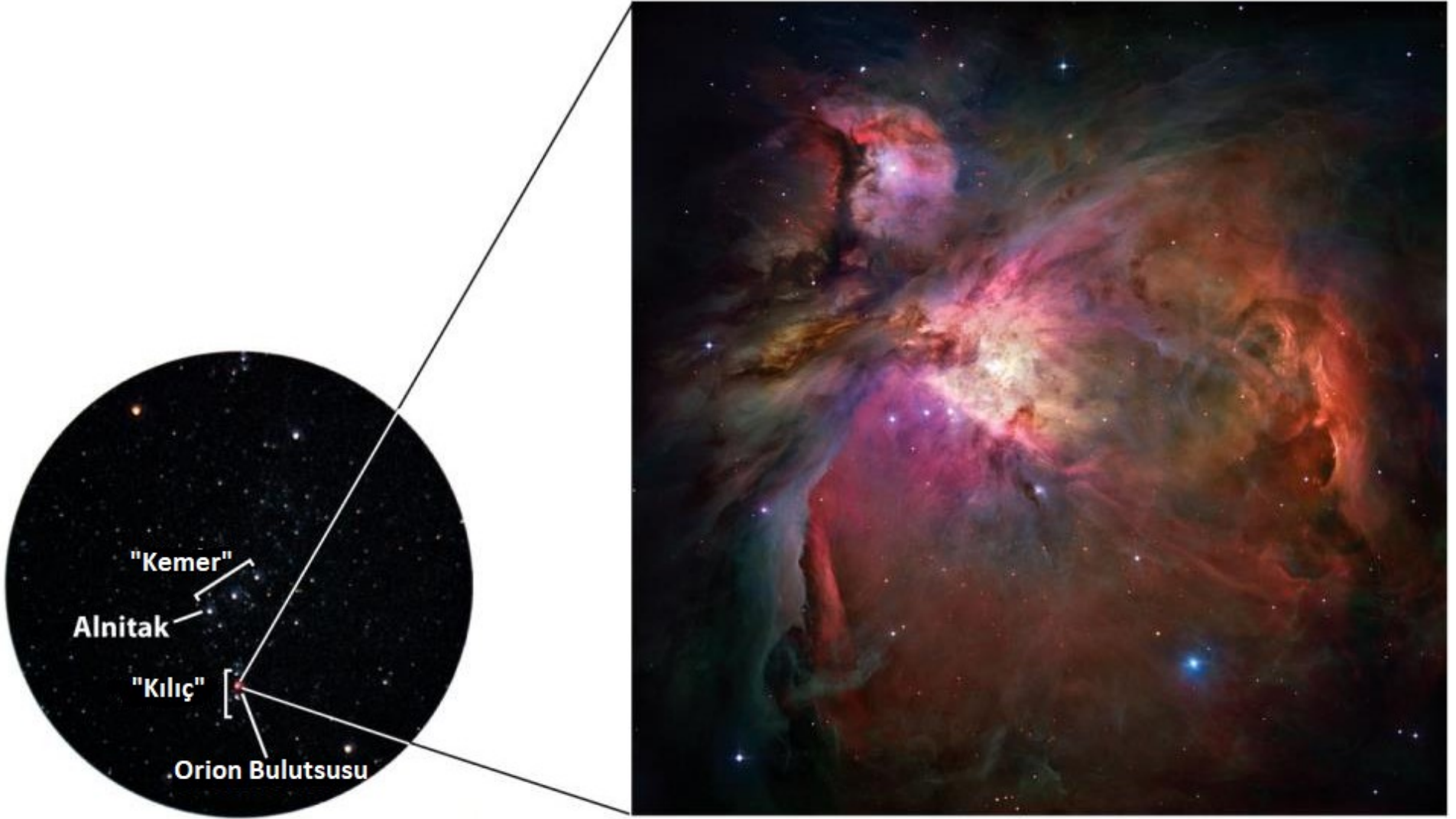
Ders 8 : Yıldız Evrimi



Yıldız Oluşumu



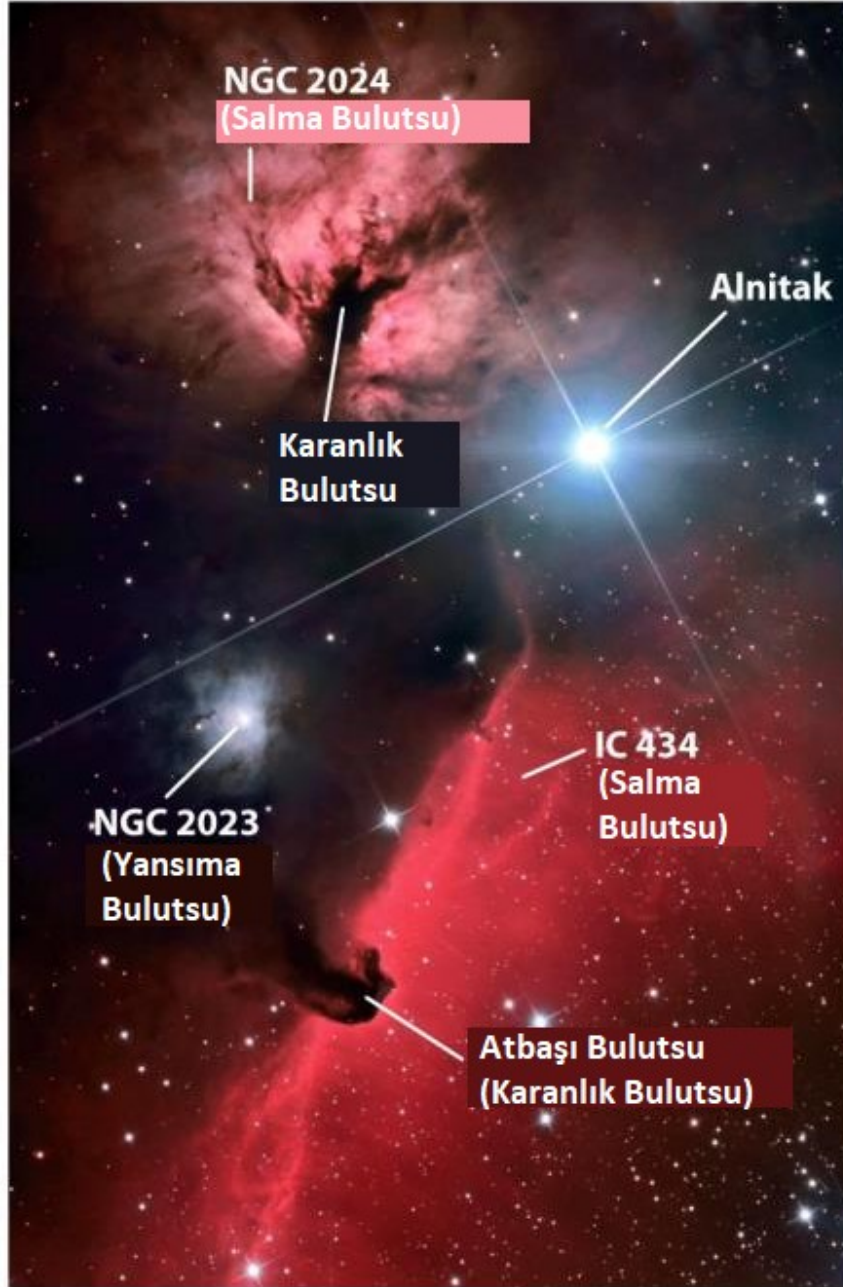
“Yıldızlar, yıldızlararası ortamdaki dev toz ve gaz bulutlarında (bulutsularda) oluşurlar”



(a) Orion'un (Avcı) geniş açı görünümü

(b) Orion Bulutsusuna (nebula) yakından bakış

Salma, Yansima ve Karanlık Bulutsular

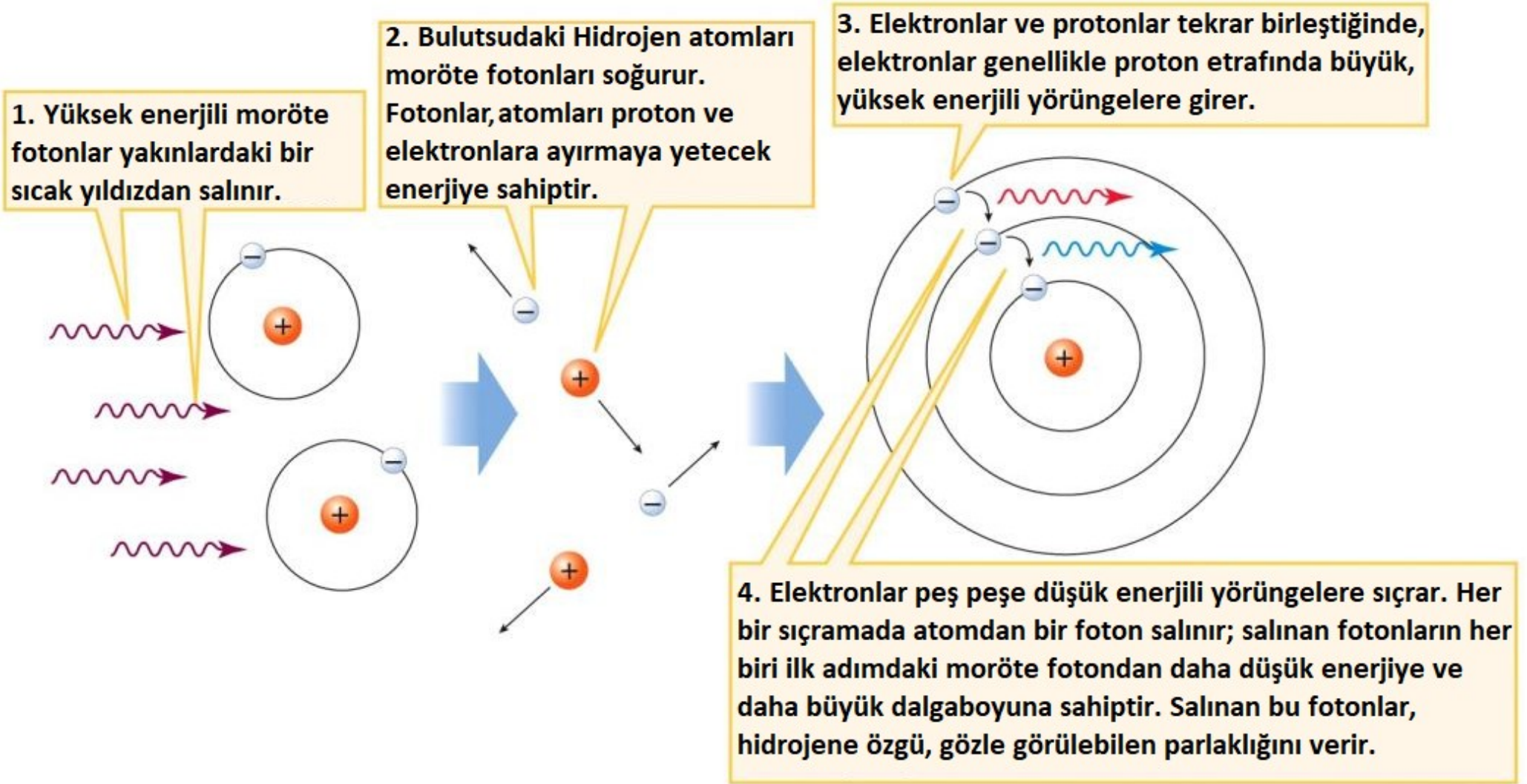


Salma bulutsuları Hidrojen atomunun $n=3$ düzeyinde bulunan bir elektronunun $n=2$ enerji düzeyine geçişi sonucu emisyon çizgisi formunda $656,3 \text{ nm}$ 'de oluşan H_α salması nedeniyle kırmızı / pembe karakteristik bir renge parlamlar. **Yansima bulutsuları**, içerdikleri toz parçacıklarının kısa dalgaboylu (mavi) ışığı çok verimli bir şekilde saçması nedeniyle mavi renkte görünür. **Karanlık bulutsular** yüksek yoğunlukları ve moleküllerce domne edilen kimyasal yapıları nedeniyle ışınımaya oldukça opaklardır. Bu nedenle arka plandaki yıldızların ışığını soğururlar ve arkaplandaki yıldızlar da görünmediği için karanlık olurlar.

Bu bulutsular yandaki Orion (Avcı) yıldız oluşum bölgesinde de görüldüğü gibi yıldız oluşum bölgelerinde bir arada bulunurlar.

Şekil 18-2

İyonizasyon ve Tekrar Birleşme



Şekil 18-3
Universe, 10. Baskı



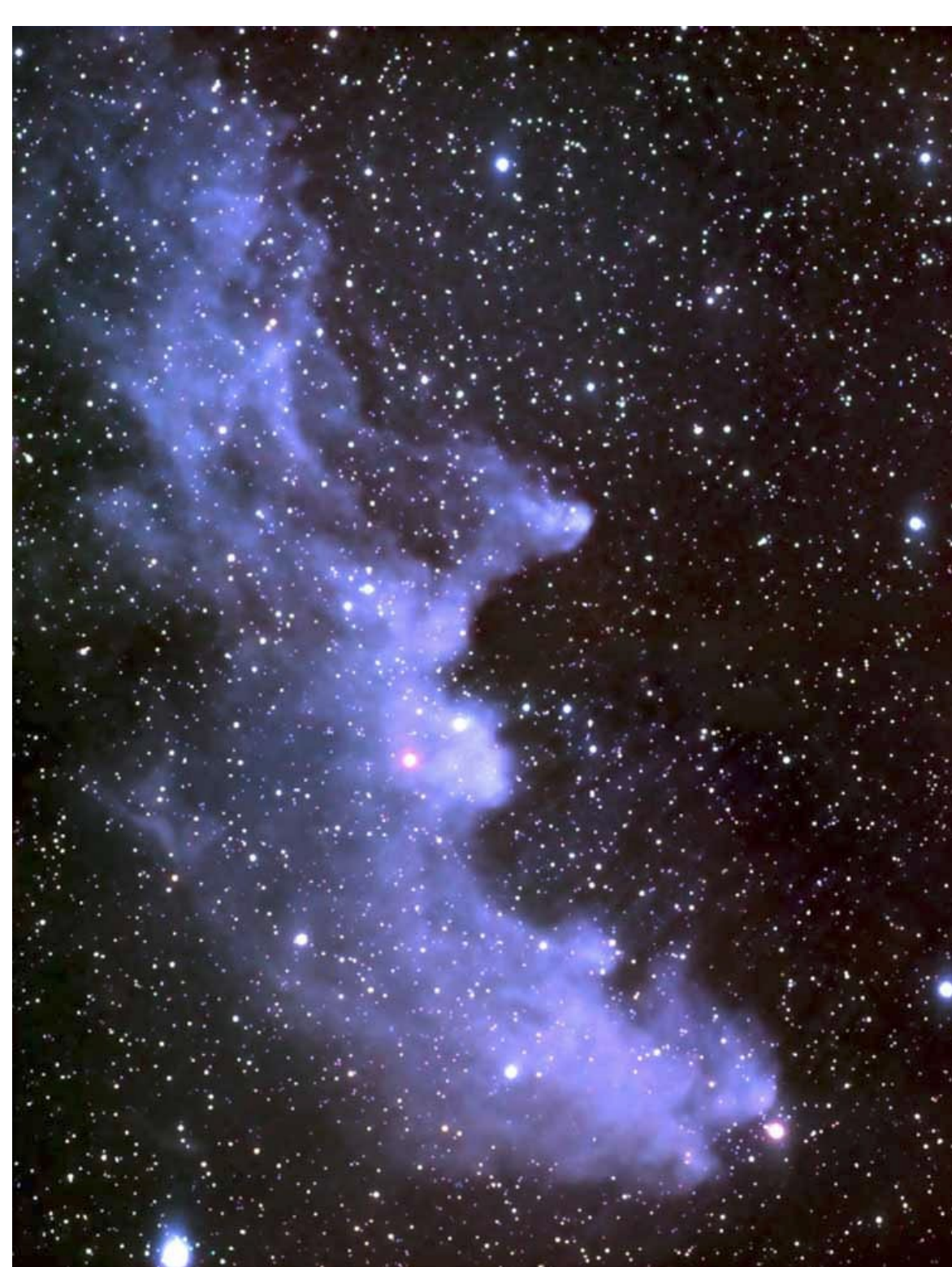
Kuğu Takımyıldızı'nda (Cygnus) Kuzey Amerika Bulutsusu
n=3 düzeyinde bir hidrojen atomu elektronunun n=2 enerji durumuna geçişi nedeniyle 656,3 nm'de oluşan H_{α} emisyon çizgisi kaynaklı, kırmızı renkte parlayan bir emisyon bulutsusu.

fritz kleinhans, 2009



Credit: NASA

Lacerta (Kertenkele) Takımyıldızı'ndaki LBN438 tipik bir karanlık bulutsunun çok güzel bir örneğidir. Mikroskobik toz taneciklerinin yüksek yoğunluklu konsantrasyonları arkadaki yıldızlardan gelen ışıkları soğurarak görülmelerini engeller.



IC2118 (Cadı kafası) yansıma bulutsusu , Dünya'dan yaklaşık 900 ışık yılı uzaklıkta bulunan bu bulutsu, Orion takımyıldızındaki parlak yıldız Rigel ile ilişkilidir. Bulutsu görüntünün sağ üst köşesinin hemen dışında bulunan Rigel'den gelen ışığın bulutsunun içindeki ince toz ışığından yansımasıyla parlar. Mavi renk yalnızca Rigel'in mavi renginden değil, aynı zamanda toz taneciklerinin mavi ışığı kırmızıdan daha verimli yansıtmasından da kaynaklanır. (wikipedia)

Yıldızlararası Kızarma ve Sönümlenme

Uzaktaki bir yıldızdan çıkan ışık yıldızlararası ortamda ilerlerken...

...kısa dalgalı boylardaki mavi ışık, toz taneleri tarafından soğurulur ya da saçılır...

...daha uzun dalgalı boylardaki kırmızı ışık toz tanelerinin içinden geçebilir.

Yıldızın gerçek rengi

Uzak bir cisim

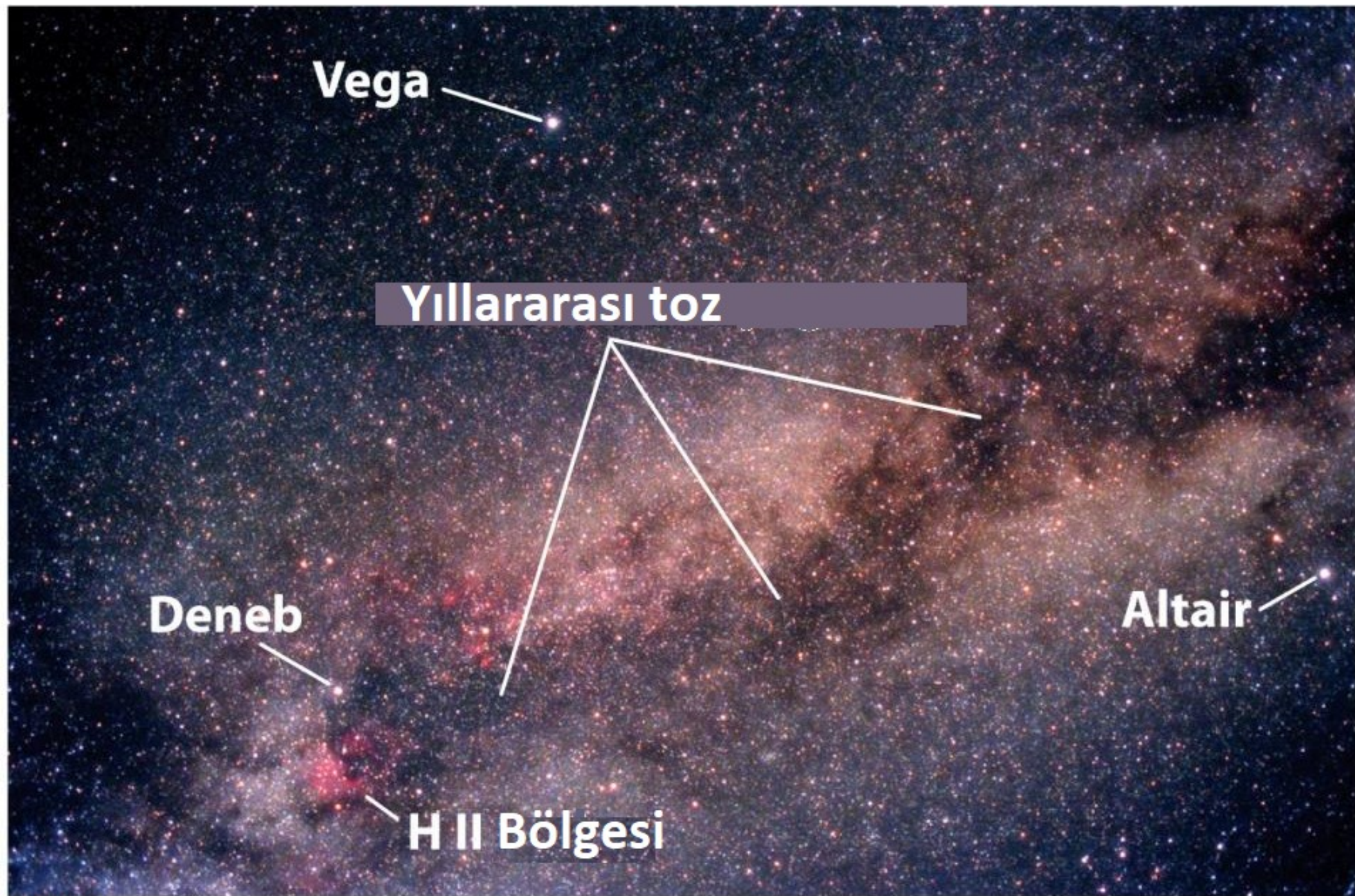
Toz taneleri

Uzaktaki cisimler yıldızlararası kızarma nedeniyle normalden daha kırmızı görünür.

Tozlar yıldızlararası kızarmaya nasıl sebep olur

Şekil 18-6a

Universe, 10. Baskı



Şekil 18-7
Universe, 10. Baskı



Pillars of Creation, Yıldız oluşum bölgesi
HST WFC3/UVIS görüntüsü (solda), HST WFC3/IR görüntüsü (sağda)



Pillars of Creation JWST görüntüsü



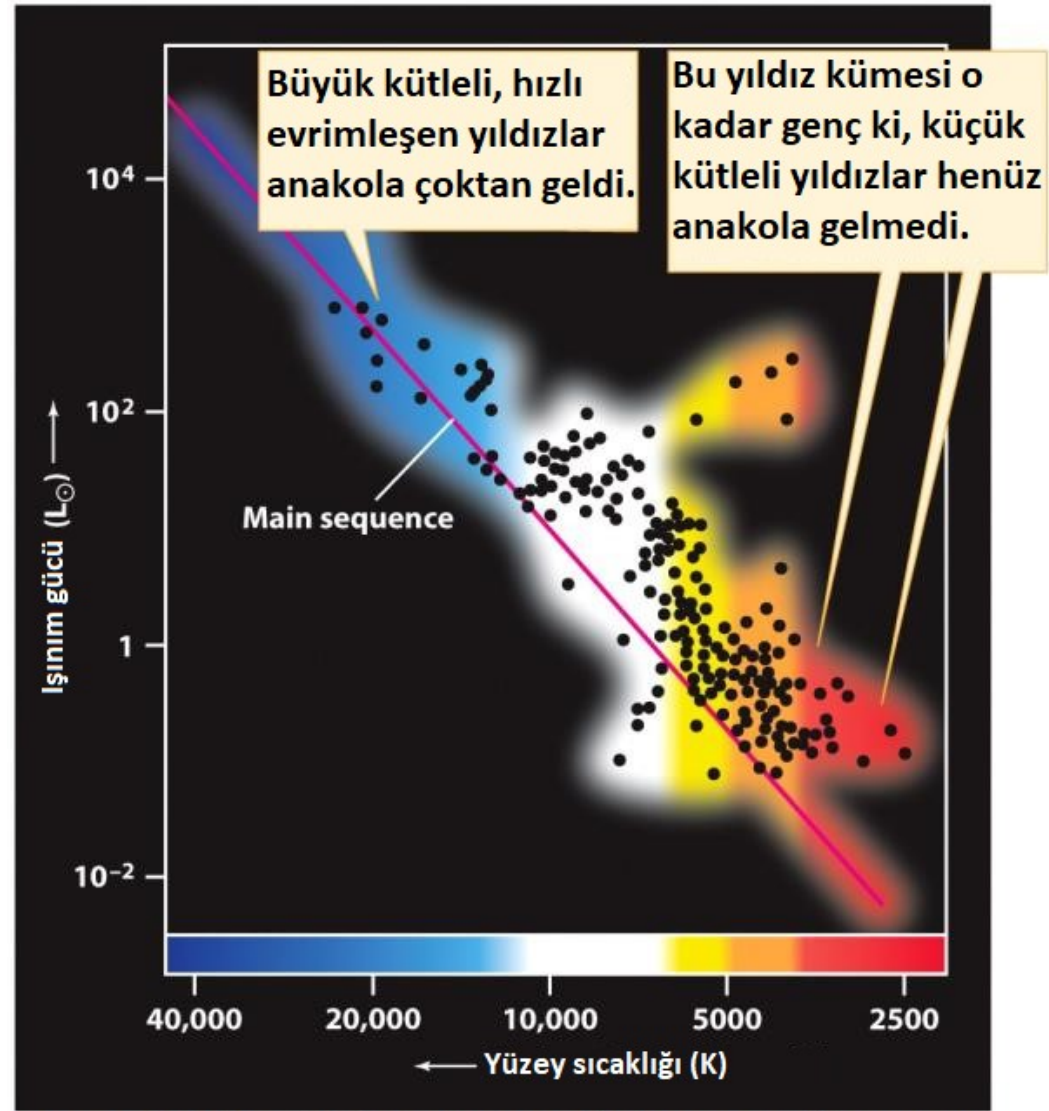
Yer'e an yakın (390 ışık yılı) yıldız oluşum bölgesi Rho Ophiuchi bulutsusu
James Webb Uzay Teleskobu'nun "Doğum Günü" Görüntüsü (12 July 2023)



NGC 2264 Yıldız Kümesi

Şekil 18-20a

Universe, 10. Baskı



NGC 2264 kümesinde bulunan yıldızların H-R diyagramı

Şekil 18-20b

Universe, 10. baskı

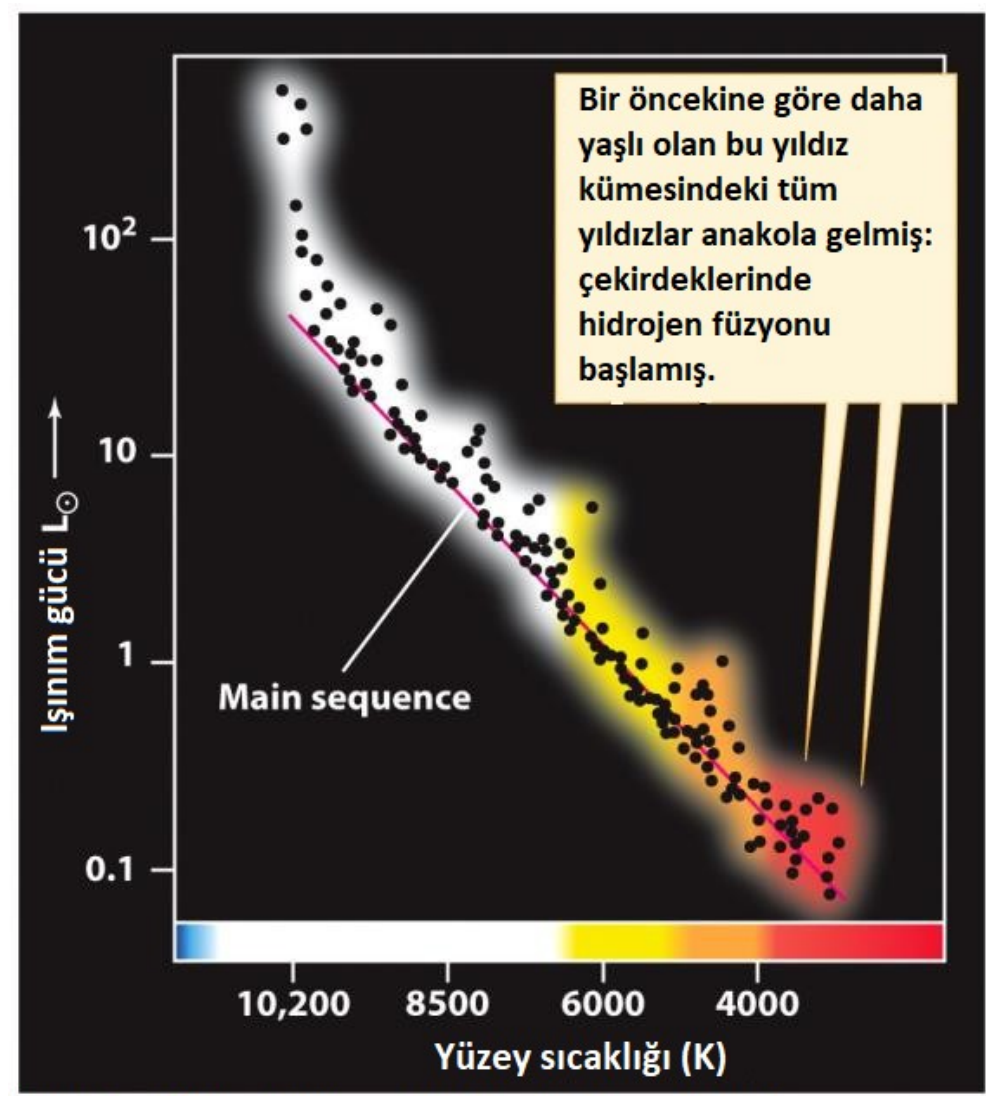
(Solda) Bu fotoğraf, Tekboynuz (Monoceros) takımyıldızındaki bir H II bölgesini ve genç yıldız kümesi NGC 2264'ü göstermektedir. Dünya'dan yaklaşık 800 adet (2600 ışık yılı) uzaklıkta yer alır. **(Sağda)** Bu H-R diyagramında çizilen her nokta, NGC 2264'te parlaklığı ve yüzey sıcaklığı belirlenen bir yıldızı temsil etmektedir. Bu yıldız kümesi muhtemelen sadece 2 milyon yıl önce oluşmaya başladı. Yüzey sıcaklıkları 20.000 K civarında olan en sıcak ve en büyük yıldızların anakola bu bulunduğu dikkat ediniz. Ancak yaklaşık 10.000 K'den daha soğuk yıldızlar henüz anakola tam olarak ulaşmamışlardır. Bunlar, anakol öncesi büzülmenin (Kelvin-Helmholtz büzülmesi) son aşamalarındaki daha az kütleli yıldızlardır ve merkezlerinde termonükleer reaksiyonları henüz başlatma aşamasındadırlar.



Pleiades (Ülker) Yıldız Kümesi

Şekil 18-21a

Universe, 10. Baskı

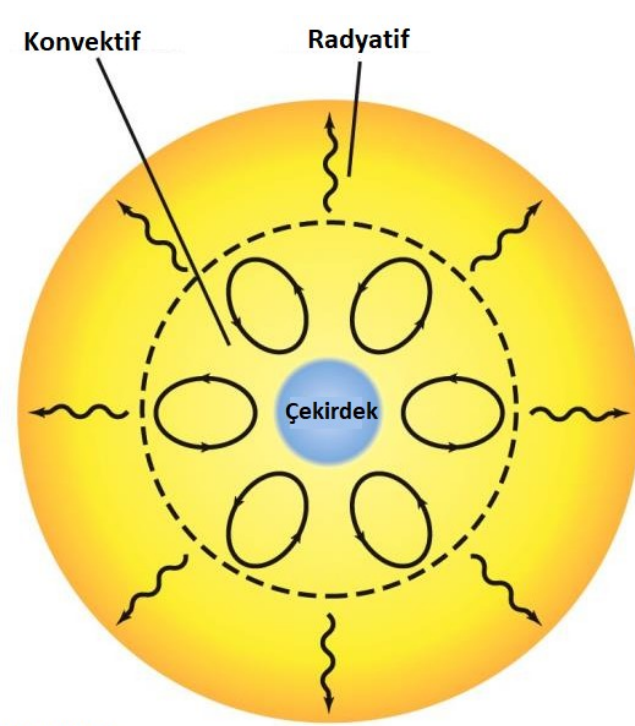


Pleiades (Ülker) kümesindeki yıldızların H-R diyagramı

Şekil 18-21b

Universe, 10. Baskı

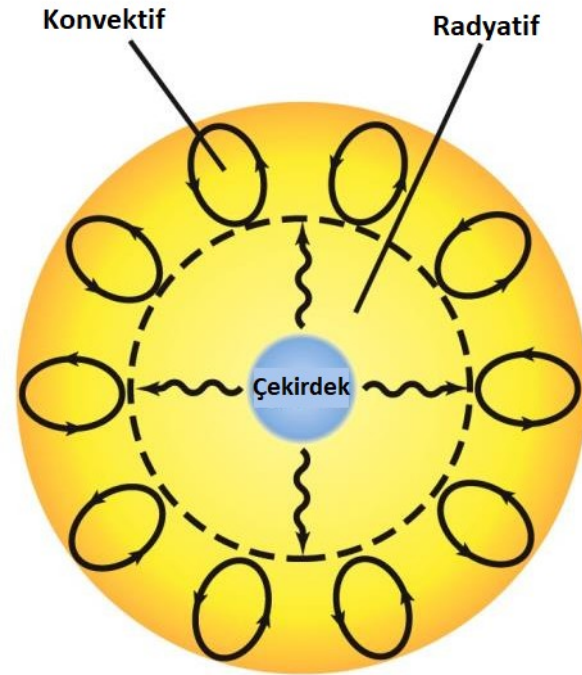
(Solda) (a) Ülker açık yıldız kümesi, Boğa takımyıldızında Dünya'dan 117 pc (~380 ışık yılı) uzaklıkta olup çıplak gözle görülebilmektedir. Fotoğraf, bir zamanlar bu kümenin çevresinde bir H II bölgesi oluşturmuş olması gereken ve yıldızlararası uzaya dağılarak yalnızca kümenin yıldızlarının etrafında yansıma bulutsuları oluşturan tozlu malzemenin izlerini bırakan gazı göstermektedir. Bu, Ülker'in NGC 2264'ten (bir önceki slayt) daha yaşlı olması gerektiği anlamına gelir. **(Sağda)** Bu H-R diyagramında çizilen her nokta, Pleiades'te parlaklığı ve yüzey sıcaklığı belirlenmiş bir yıldızı temsil etmektedir. (Not: Bu H-R diyagramındaki ölçekler önceki slayttakilere farklıdır!) NGC 2264'ün H-R diyagramının aksine, Ülker kümesindeki yıldızların neredeyse tamamı anakoldadır. Kümenin yaşı yaklaşık 50 milyon yıldır; Bu yaş değeri, kümede hidrojen füzyonunu başlatan en küçük kütleli yıldızların yaşına karşılık gelir.



Kütlesi 200 Güneş kütlesinin (**Eddington limiti**) üzerinde olan önyıldızlar, serbest kalan gravitasyonel enerji kaynaklı olarak ürettikleri çok yüksek ışınım basıncı nedeniyle dış katmanlarını dışarı atarak çökmeyi başlatamaz ve yıldız oluşturamazlar.

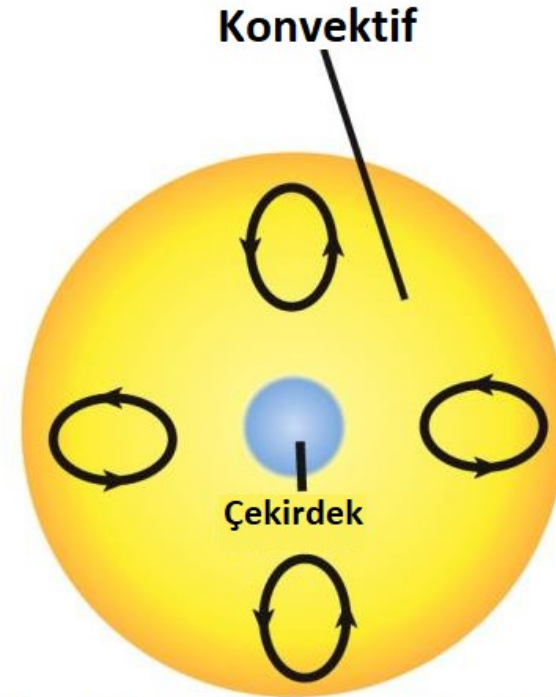
Kütlesi $4 M_{\odot}$ 'ten büyük yıldızlarda: Enerji iç katmanda konveksiyonla, dış katmanda ışınımla taşınır.

Şekil 18-12a
Universe, 10. Baskı



Kütlesi $4 M_{\odot}$ ile $0.4 M_{\odot}$ arasında: Enerji iç katmanda ışınımla, dış katmanda konveksiyon ile taşınır.

Şekil 18-12b
Universe, 10. Baskı



Kütlesi $0.4 M_{\odot}$ 'ten daha küçük: Yıldızın içerisinde enerji tamamen konveksiyon ile taşınır.

Kütleleri 0,08 Güneş kütlesinden ($\sim 80 M_{\text{jup}}$) daha az olan cisimleri, içleri hiçbir zaman termonükleer reaksiyonları başlatacak sıcaklığa ulaşamazlar ve **kahverengi cüceler** olarak adlandırılırlar.

Bu nedenlerle yıldızların bir üst ($\sim 200 M_{\text{sun}}$) ve bir alt ($0.08 M_{\text{sun}}$) kütle limiti vardır!

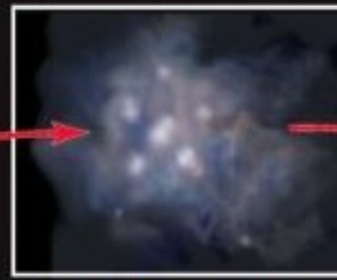
Başlangıç Kütlesi [$M_{\text{Güneş}}$]	Büzülme Zaman Ölçeği [10^6 yıl]
60	0.0282
25	0.0708
15	0.117
9	0.288
5	1.15
3	7.24
2	23.4
1.5	35.4
1	38.9
0.8	68.4

Bernasconi &
Maeder (1996)

1 $M_{\text{Güneş}}$ kütleli bir yıldız için büzülme Kelvin-Helmholtz zaman ölçeğinde gerçekleşir. Kütleli 0,4 $M_{\text{Güneş}}$ 'ten küçük olan yıldızların çekirdekleri hiçbir zaman CNO döngüsüyle hidrojeni dönüştüremez, bunlardaki termonükleer reaksiyonlar p-p zinciridir. Dolayısıyla çekirdek hiçbir zaman radyatif hale gelmez. 0,08 $M_{\text{Güneş}}$ 'ten (80 $M_{\text{Jüpiter}}$) daha küçük kütleli cisimler, kendi enerjilerini üretebilmek için nükleer reaksiyonları kararlı bir şekilde başlatmak için gerekli kütleye sahip değildir. Ancak kararsız bir şekilde döteryumu zaman zaman dönüştürürler. Bunlara **Kahverengi Cüceler** denir. Y, L ve T tayf türleri, yaşlarına bağlı olan yüzey sıcaklıklarına göre belirlenir. 13 $M_{\text{Jüpiter}}$ bu nesnelerin alt kütle sınırıdır. HR diyagramının yüksek kütleli yıldızlarının bulunduğu tarafta CNO çevrimi reaksiyonları aktif olduğundan Hayashi yolu çok kısa sürede katedilir. CNO döngüsü, hidrojen füzyonunun baskın mekanizması olduğundan dış katmanlar hızla radyatif hale gelir, yıldız çok kısa bir sürede termal dengeye ulaşılır ve çok yüksek bir parlaklıkla anakola girer!



Bu karanlık ve soğuk bulutsudaki gaz ve toz parçacıkları o kadar yavaş hareket ediyor ki kütle çekimi onları bir araya getirebilir.



Gaz ve toz yoğunlaşarak kümelenmeye başlayarak önyıldızların çekirdeklerini oluşturur.

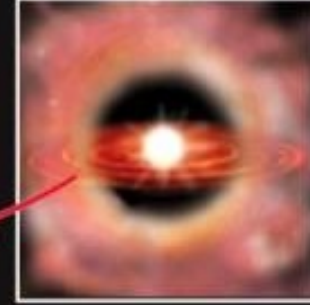


Çekirdek yoğunlaştıkça özkütlesi ve sıcaklığı artar.



Önyıldızlar ısınmaya ve bulutsudan madde biriktirmeye devam ettikçe, sıcaklığın artmasından dolayı parlamaya başlar.

T-Tauri evresindeki genç yıldız, her iki kutbundan uzaya madde atar. Yıldız rüzgarları bulutsudan gerye kalan maddeyi uzağa iter ve yıldız açığa çıkar.



Önyıldızın çekirdeğindeki sıcaklık yeteri kadar yükeldiğinde, hidrojeni helyuma dönüştürecek termonükleer tepkimeler başlar.



Dışarı atılan kütle etraftaki maddede şok dalgaları yaratır ve başka yıldızların oluşumunu tetikler.



Yıldızın kütle kazanmasını veya atmasını sağlayan süreçler bitmiştir ve yıldız hidrostatik dengede bir anakol yıldızı olmuştur. Birikim diskinin kalıntıları öngezegen diski olarak kalabilir ve burada yıldızın etrafında dolanacak gezegen sistemleri oluşabilir.

Anakol ve Sonrasında Yıldız Evrimi



0.4 M_{Güneş} ve Daha Büyük Kütledeki Yıldızların Anakol Evrimi



(a) Güneş'in içindeki hidrojen

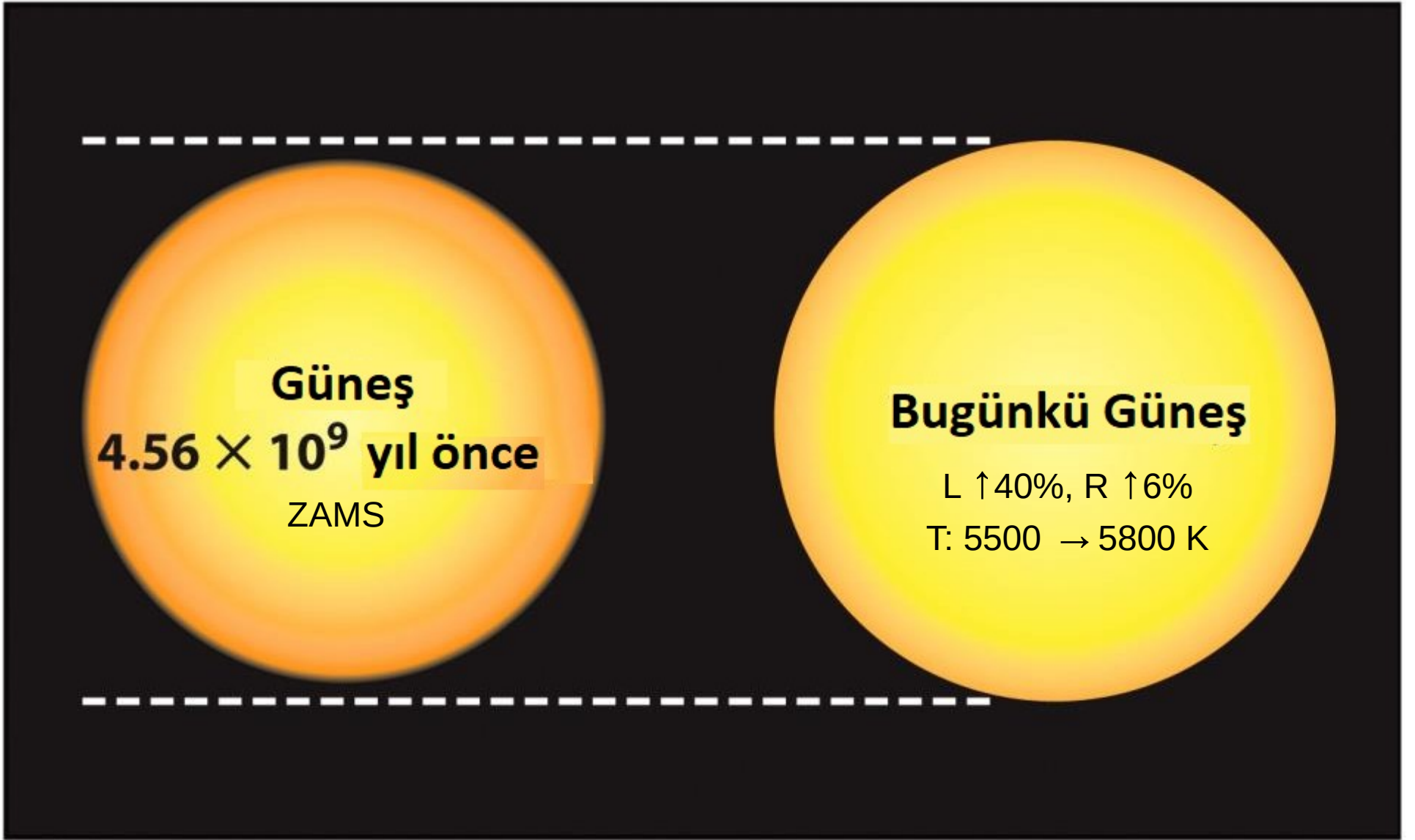


(b) Güneş'in içindeki helyum

Şekil 19-1

Universe, 10. Baskı

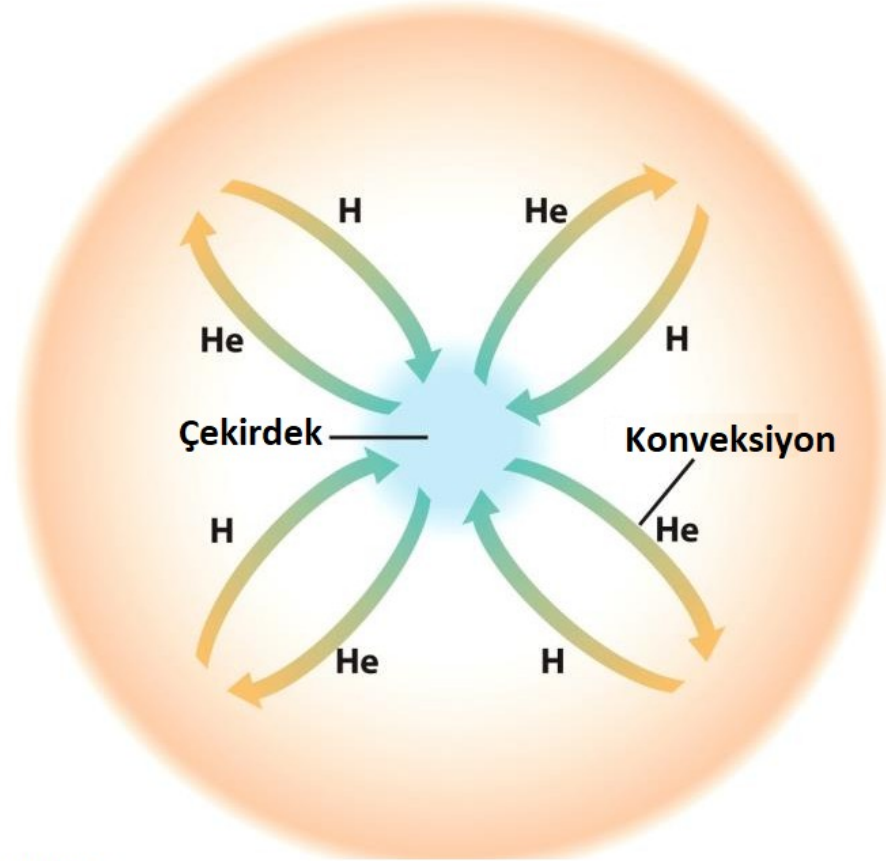
Bir **önyıldız**, çekirdeğinde kararlı bir şekilde hidrojen füzyonu başladığında ve hidrostatik dengeye (içeride doğru yerçekimi kuvveti ile hidrojen füzyonunun ürettiği dışarı doğru gaz basıncı arasında bir denge) ulaştığında bir **anakol yıldızı** haline gelir. Böyle yeni oluşmuş bir anakol yıldızına **sıfır yaşlı anakol yıldızı** (Zero Age Main Sequence, ZAMS) adı verilir. Başlangıçta, yıldızın her yerindeki kimyasal bolluk tekdüzedir, ancak hidrojen termonükleer reaksiyonlarla helyuma dönüştükçe; çekirdekteki bolluk oranları değişir! Çekirdekteki atom çekirdeklerinin toplam sayısı da azaldığından; daha fazla çökme için yer açılır ve çekirdek, dış katmanların ağırlığı altında daha da büzülür. Bu çökme sonucunda çekirdekte yoğunluk ve sıcaklık artar; hidrojen füzyon reaksiyonlarının hızı ve verimliliği arttığından birim zamanda üretilen enerji de artar, Böylece **yıldızın parlaklığı bir miktar artar**. **Yıldızın yarıçapı da artar** çünkü termonükleer reaksiyonlar sonucu çekirdekteki basınç yükselir ve yukarıdaki katmanları dışarı doğru iter. Yıldızın daha fazla enerji aktararak yüzeyden salması nedeniyle **yüzey sıcaklığı da artar!**



Şekil 19-2

Universe, 10. Baskı

0.4 $M_{\text{Güneş}}$ 'ten Küçük Kütledeki Yıldızların Anakol Evrimi



Şekil 19-3
Universe, 10. Baskı

Helyum küçük yıldızların çekirdeklerinde birikmez, yıldız tamamen konvektif olduğundan **konveksiyon**la dışarı sürüklenir. Konveksiyon aynı zamanda **dış katmanlardak hidrojeni içeri çekerek çekirdekte yanmasını da sağlar**. Bu nedenle yıldız, hidrojeninin tamamını tüketerek Helyum'ca eşit oranda zenginleştirilir! **Termonükleer reaksiyonların hızı düşük olduğundan, bir M cücesi enerjisini çok yavaş üretir** (ve dolayısıyla tüketir). Bugün gördüğümüz tüm M yıldızları yüz milyar yıl boyunca anakol evrimlerini sürdürecekle.

0,08 – 0,4 $M_{\text{Güneş}}$ kütle aralığındaki yıldızlar hiçbir zaman Helyumu yakmaya yetecek basınç ve sıcaklığa sahip olamayacaktır. Dolayısıyla termonükleer reaksiyonlar sona erdikten sonra bile iç ısılarından dolayı sahip oldukları enerjiyi yüzeylerinden salarak zamanla soğuyacaklardır. Bu yavaş “ölüm”, bir kırmızı cücenin nihai kaderidir.

Tablo 19-1

Yaklaşık anakol yaşam süreleri

Kütle (M_{\odot})	Yüzey sıcaklığı (K)	Tayf türü	Işınım gücü (L_{\odot})	Anakol yaşam süresi (10^6 yıl)
25	35,000	O	80,000	4
15	30,000	B	10,000	15
3	11,000	A	60	800
1.5	7000	F	5	4500
1.0	6000	G	1	12,000
0.75	5000	K	0.5	25,000
0.50	4000	M	0.03	700,000

Anakol yaşam süresi $t \propto 1/M^{2.5}$ bağıntısı ile hesaplanmıştır (bkz Kutu 19-2)

Tablo 19-1

Universe, 10. Baskı

$$E = f M c^2 \longrightarrow L = \frac{E}{t} \longrightarrow E = L t \longrightarrow f M c^2 = L t \longrightarrow t = \frac{f M c^2}{L}$$

E : Bir yıldızın toplam kütesinin (M) bir kısmının (f) dönüştürülmesiyle üretilen enerji

f : Yıldız kütesinin hidrojen füzyonu yoluyla helyuma dönüştürülen oranı

L : Yıldızın ışınım gücü (birim zamanda (1 sn) yüzeyinden salınan toplam enerji)

$L = E / t$ (anakol ömrü boyunca ışınım gücünün sabit olduğu varsayılarak)

t : Bir yıldızın anakol ömrü (çekirdeğinde hidrojen füzyonunun meydana geldiği süre)

$$t \propto \frac{M}{L}$$

Çift yıldız
gözlemlerinden
bulunan
Kütle-Parlaklık ilişkisi

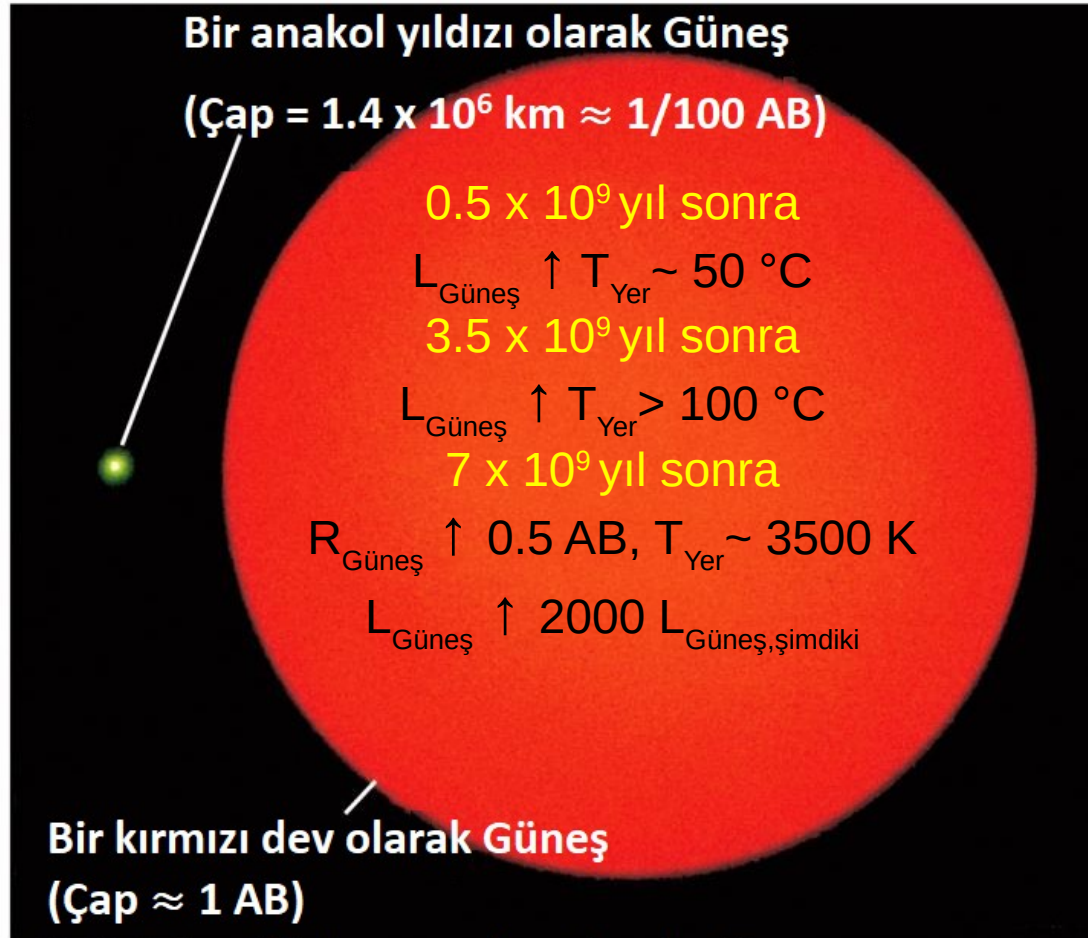
$$\longrightarrow L \propto M^{3.5} \quad \text{ve} \quad t \propto \frac{M}{L} \longrightarrow t \propto \frac{M}{M^{3.5}} = \frac{1}{M^{2.5}} = \frac{1}{M^2 \sqrt{M}}$$

İfade Güneş'in anakol ömrü (12 milyar yıl) referans alınarak kullanılabilir. $4 M_{\text{Güneş}}$ kütesinde bir yıldızın anakol ömrü $t_{\text{MS}} = 1 / 4^{2.5} = 1 / 32 t_{\text{MS,Güneş}} = (1 / 32) 1.2 \times 10^{10} \sim 4 \times 10^8$ (400 milyon) yıldır.

Anakol Sonrası Yıldız Evrimi



Güneş'in Evrimi

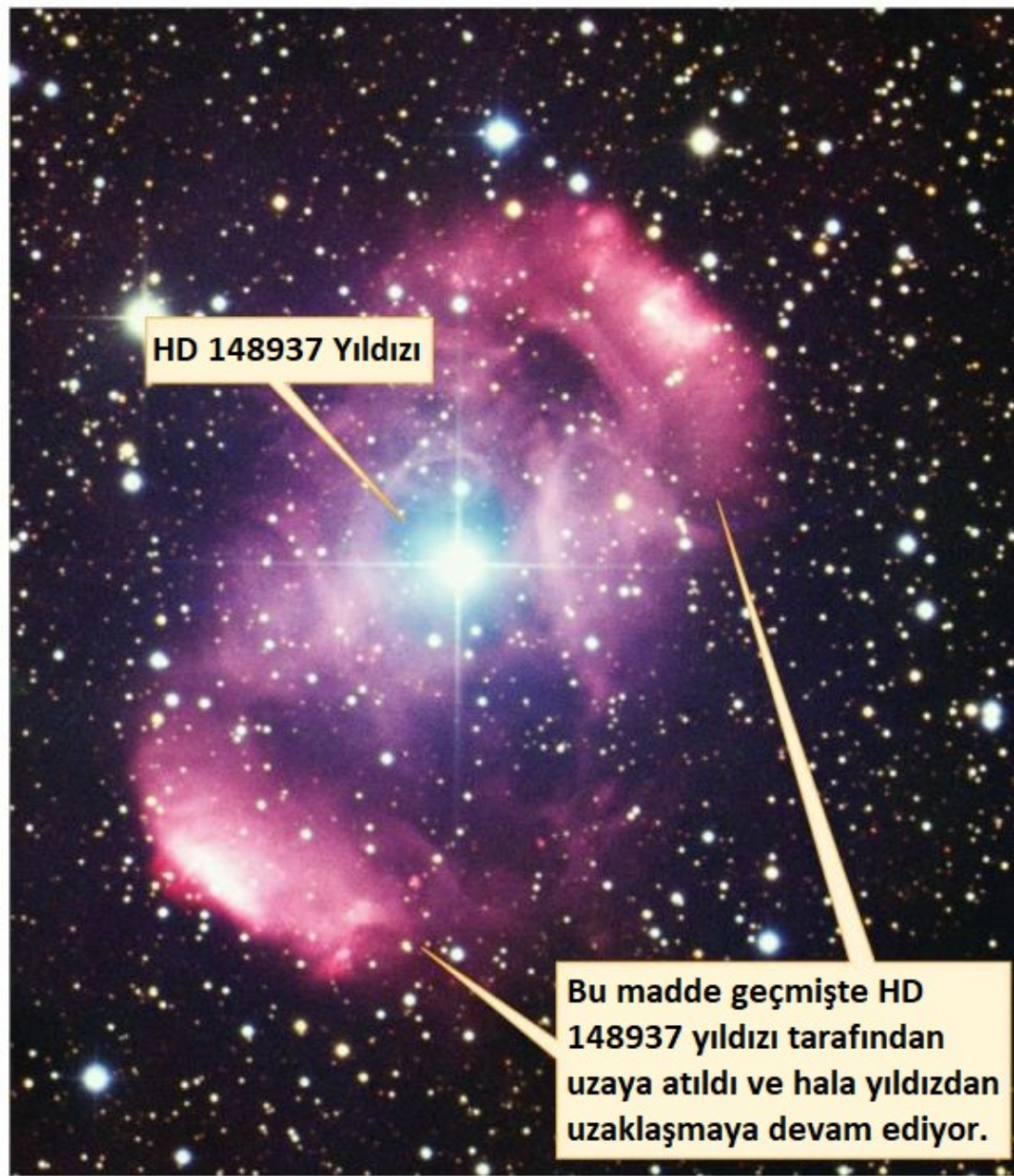


Bugünkü ve bir kırmızı dev olarak Güneş

Şekil 19-4a

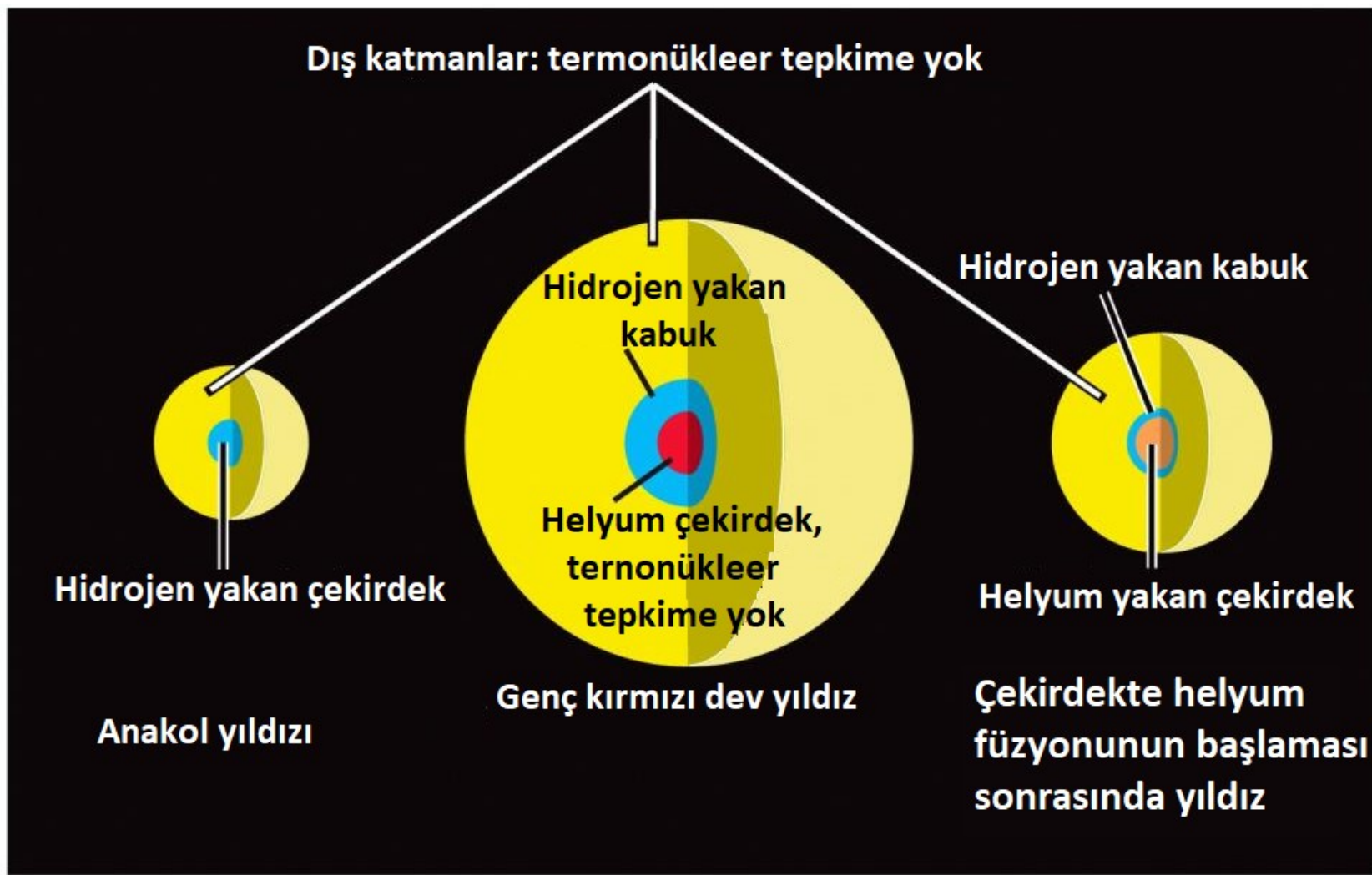
Universe, 10. Baskı

Kütlesi $0,4 M_{\text{Güneş}}$ 'ten daha büyük olan bir yıldızın çekirdeğindeki **tüm hidrojen tükendikten sonra**, hidrojen füzyonu yalnızca çekirdeğin hemen dışındaki hidrojen açısından zengin bir kabukta devam eder; bu durum **"kabukta hidrojen füzyonu"** olarak adlandırılır. Çekirdek hidrojenin tükenmesi sonrası çöktüğünden ısınır ve artan sıcaklık yakındaki katmanları (kabuk) da ısıtır. Bu ısıyla gerçekleşen hidrojenin füzyonu sonucu açığa çıkan helyumca zenginleşen kabuk giderek genişler; bu sırada çekirdek ağırlığı nedeniyle büzülmeğe devam etmektedir. Yıldızın ışınım gücü önemli ölçüde artarak iç basıncın yükselmesine ve yarıçapın artmasına neden olur. Yıldızın dış katmanları dramatik ölçüde genişler ve yüzey sıcaklığı düşer. Yıldız **KIRMIZI DEV** aşamainsa ulaşır. Kırmızı dev yıldızlar, evrimleşmiş eski anakol yıldızlarıdır.



Şekil 19-5
Universe, 10. Baskı

Kırmızı dev aşamasında yıldız muazzam bir şekilde büyür, dolayısıyla yüzeydeki yerçekimi düşer ve en dış katmanlardaki materyal kolayca uzaya kaçar. Bu kütle kaybı, böyle dev bir yıldızın tayfında daha kısa dalga boylarına doğru Doppler kaymasına uğramış dar soğurma çizgileri üzerinden belirlenir. Tipik maviye kaymalar 10 km/s mertebesinde ve bu da yılda yaklaşık $10^{-7} M_{\text{Güneş}}$ 'lik bir kütle kaybına karşılık gelir.



(a)

(b)

(c)

Şekil 19-6
Universe, 10. Baskı

(a) Yıldızın anadol ömrü boyunca hidrojen, çekirdekte helyuma dönüştürülür. (b) Çekirdekteki hidrojen tükendiğinde, hidrojen füzyonu kabukta devam eder. Çekirdekte, büzülme nedeniyle sıcaklık yükselir, bu da kabuğu daha da ısıtır ve termonükleer reaksiyon hızını artırır. Kabukta üretilen helyum çekirdekte biriktikçe, çekirdek daha da büzülür ve sıcaklık artar, kabuğun üst kısmı daha da fazla ısınır. Kabuk dışarı doğru büyür, daha fazla enerji üretir ve bu enerji üst katmanları genişletir. Bunun sonucunda yıldız genişleyerek **kırmızı dev** haline gelir. (c) Kırmızı devin çekirdeğindeki sıcaklık, büzülme nedeniyle yeterince yükseldiğinde, çekirdekte helyum füzyonu başlar (**sağda**). Bu arada çekirdeği çevreleyen kabukta hidrojen füzyonu devam etmektedir.

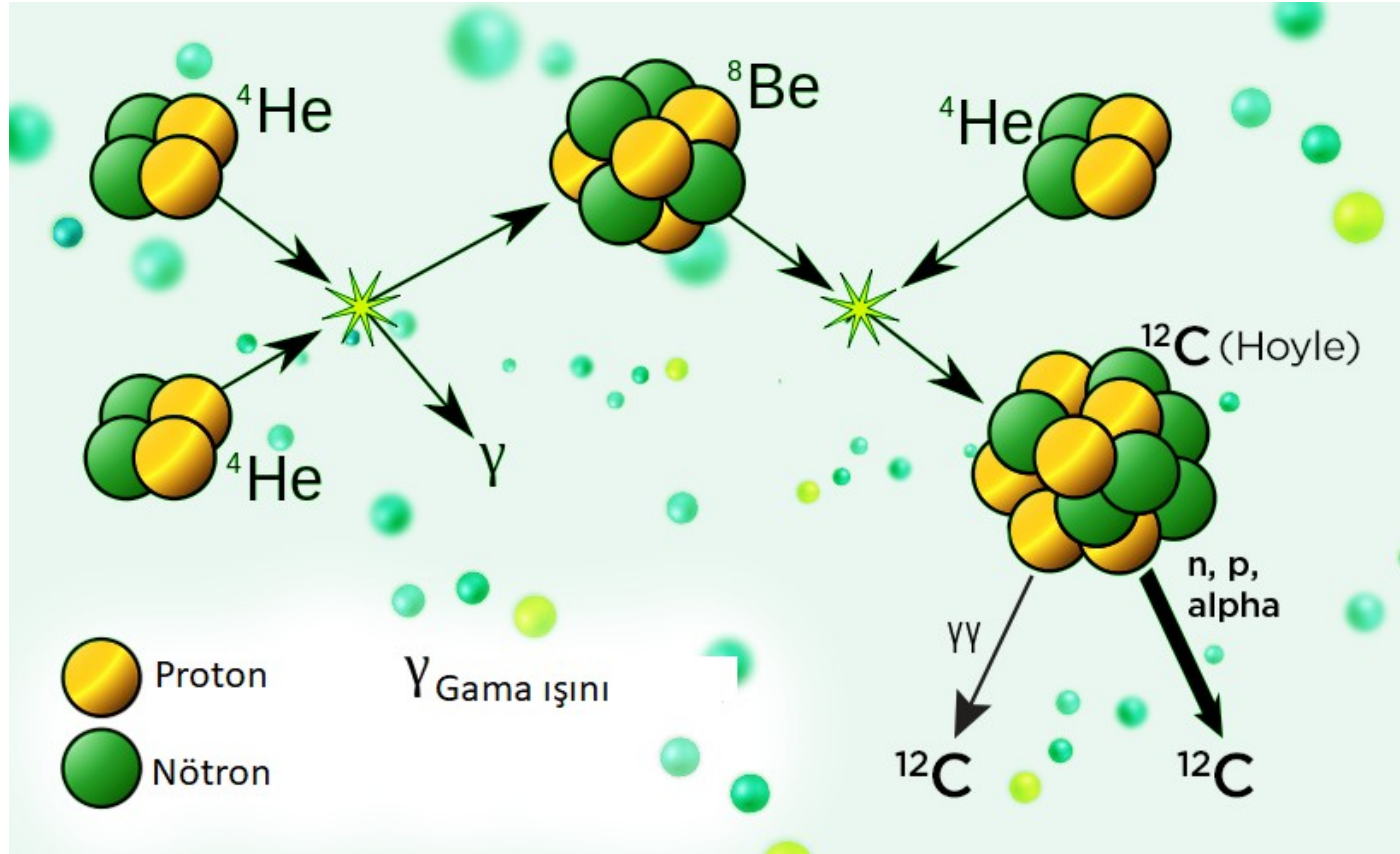
Helyum Parlaması (Helium Flash)



Kırmızı dev kolunda zarfta hidrojen yakılır

Kütleleri $0,4 M_{\text{Güneş}}$ ile $2-3 M_{\text{Güneş}}$ arasında olan yıldızlar için çekirdek, herhangi iki parçacığın aynı kuantum durumunu aynı anda paylaşamayacağını ifade eden **Pauli dışarlama ilkesi** nedeniyle daha fazla sıkıştırılmayacak bir sınıra kadar büzülür. Pauli dışarlama ilkesinin bir sonucu olarak birbirine yakın “paketlenmiş” parçacıkların sıkıştırmaya direndiği bu olguya **elektron dejenerasyonu** denir ve çekirdek daha sonra plazmanın sıcaklığından bağımsız hale gelen **dejenere elektron basıncı** tarafından desteklenerek daha fazla çökmez. Bu kütle limitleri arasındaki yıldızlarda helyumu “tutuşturmak” için gerekli sıcaklığa ulaşıldığında helyum bir parlamayla (**helyum parlaması**) tutuşur!

Helyum Parlaması



Sıcaklık, üçlü α -proseslerinin başlamasına yetecek kadar yüksek olduğunda, maddenin dejenere halinde sıcaklığa bağlı olmadığından basınç yükselmez. Bu nedenle yıldızın çekirdeği genişleyemez ve soğuyamaz, bunun yerine termonükleer reaksiyonlar çok artan bir hızda ve çok verimli gerçekleşir. **Helyum parlaması** adı verilen, yalnızca birkaç saniye süren ve ardından yüksek sıcaklığın dejenerasyonu ortadan kaldırarak parlamayı sonlandırdığı bir olgu gerçekleşir. Daha sonra yıldızın çekirdeği kararlı bir şekilde helyumu C, N ve O'e dönüştürmeye başlar. Helyum parlaması sırasında enerjinin büyük kısmı çekirdeğin ısıtılmasına ve elektronların dejenerasyonunun sona erdirilmesine harcanır. Çekirdekten kaçan enerji dış katmanlar tarafından emilir ve yüzeye hemen ulaşamaz. Yani aslında **çekirdekte meydana gelen bu şiddetli olayın yıldızın yüzeyinde gözlemlenebilir bir etkisi yoktur.**

TABLO 19-2

Farklı Kırmızı Devlerde Çekirdekte Helyum Füzyonunun Başlangıcı

Yıldızın Kütlesi	Çekirdekte helyumun yanma başlangıcı
0.4'ten yüksek ancak 2-3 Güneş kütlesinden düşük	Helyum parlaması
2-3 Güneş kütlesinden yüksek	Kademeli
Kütlesi 0.4 Güneş kütlesinden düşük yıldızlar kırmızı dev olamazlar (bkz: bölüm 19-2)	

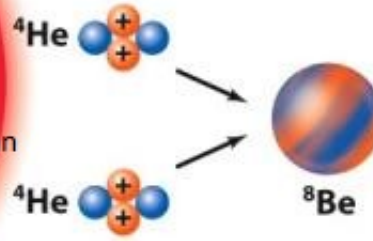
Tablo 19-2

Universe, 10. Baskı

Çekirdekteki helyum füzyonunun başlangıcında, kabukta hala devam eden hidrojen füzyonuna ek olarak yeni bir enerji kaynağı olmasına rağmen yıldızın parlaklığı bir miktar düşer. Helyumun tutuşması sonrası çekirdekteki büzülme (2-3 $M_{\text{Güneş}}$ 'in altındaki yıldızlar için dejenerasyon) durur ve çekirdek genişleyerek soğur. Çekirdek etrafındaki sıcaklığın düşüşü, kabuktaki hidrojen yanmasını daha az verimli hale getirir, dolayısıyla yıldızın ışınım gücü azalır! Güneş kütleli bir yıldız için, çekirdekte hidrojeni dönüştüren reaksiyonlar (anakol evresi) 12 milyar yıl sürerken, kabukta hidrojen füzyonu yalnızca 250 milyon yıl sürer ve çekirdekte Helyum füzyonu daha da kısa bir sürede (~100 milyon yıl) sona erer.

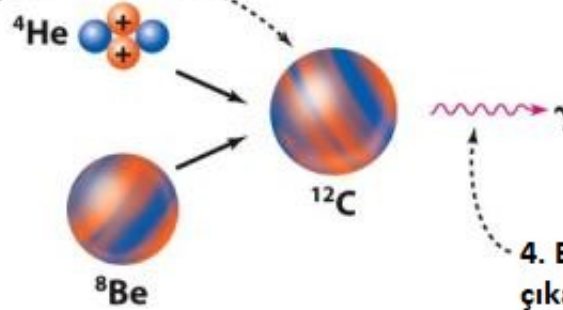


1. Kırmızı devin helyumca zengin çekirdeği, helyum çekirdeklerinin birbiriyle çarpışmasını ve birleşmelerini sağlayacak sıcaklık ve basınca ulaşır.



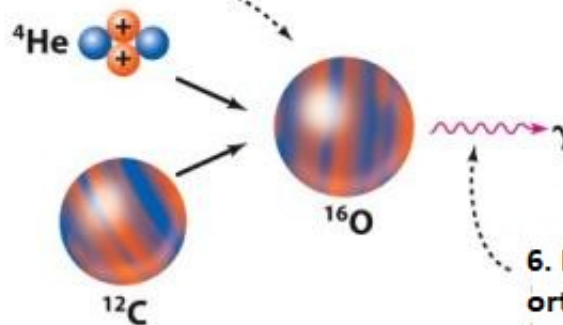
2. İki helyum çekirdeği birleşerek 4 proton ve 4 nötrondan oluşan berilyum çekirdeğini oluşturur. Berilyum çekirdeği oldukça kararsızdır: yarılanma ömrü olan 7×10^{-7} saniyede parçalanır ve tekrar iki helyum çekirdeği ortaya çıkar.

3. Ancak üçüncü bir helyum çekirdeği, bu kısa sürede berilyum ile çarpışırsa kararlı bir çekirdek olan ve 6 proton ve 6 nötrondan oluşan karbon çekirdeği oluşur.

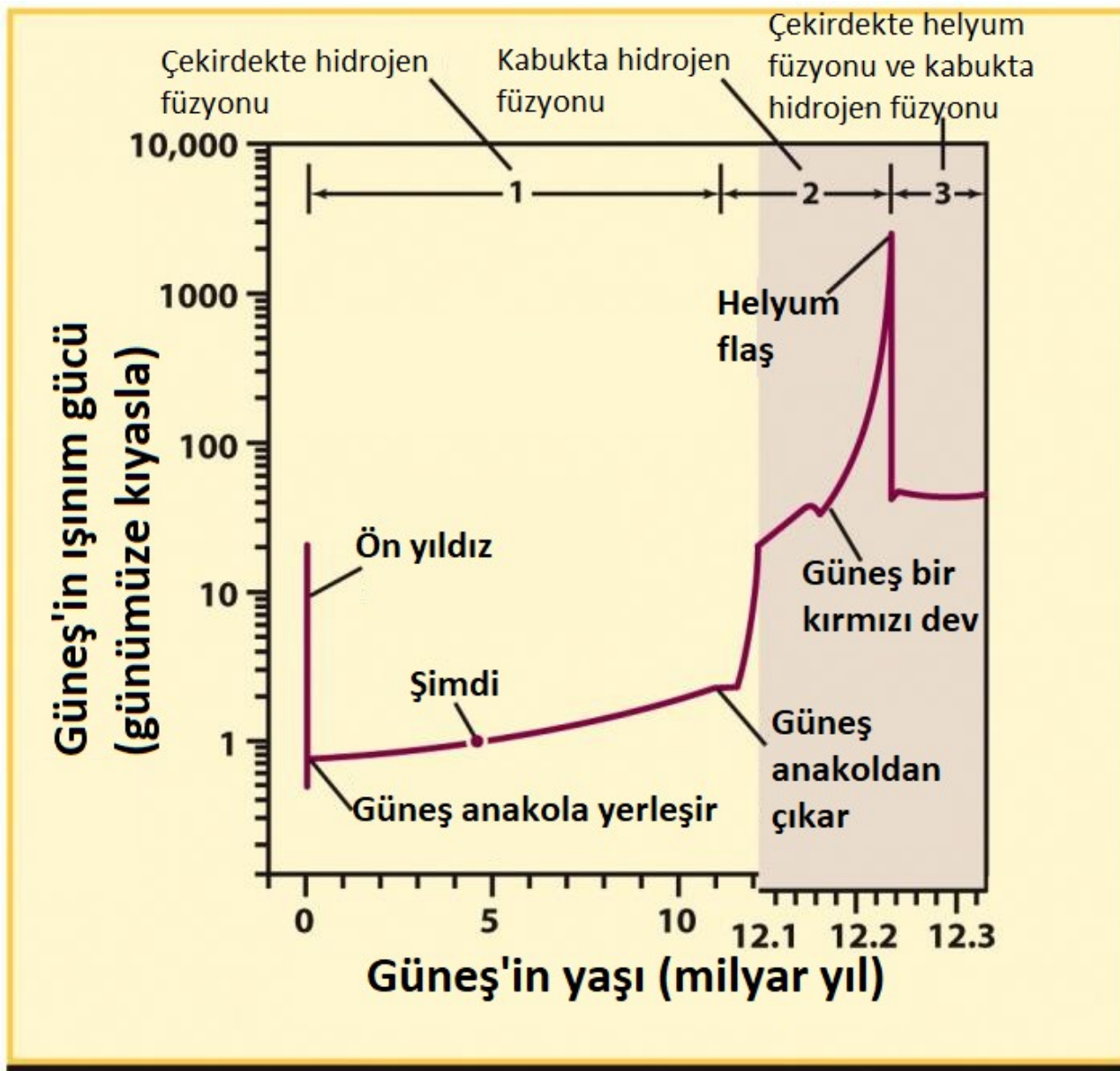


4. Bu nükleer reaksiyon sonucu gama ışını ortaya çıkar. Gama ışınının enerjisi, yıldızın iç ısını koruyabilmesi için harcanır.

5. Bazı karbon çekirdekleri tekrar bir helyum ile çarpışarak 8 proton ve 8 nötrondan oluşan oksijen atomuna dönüşür.



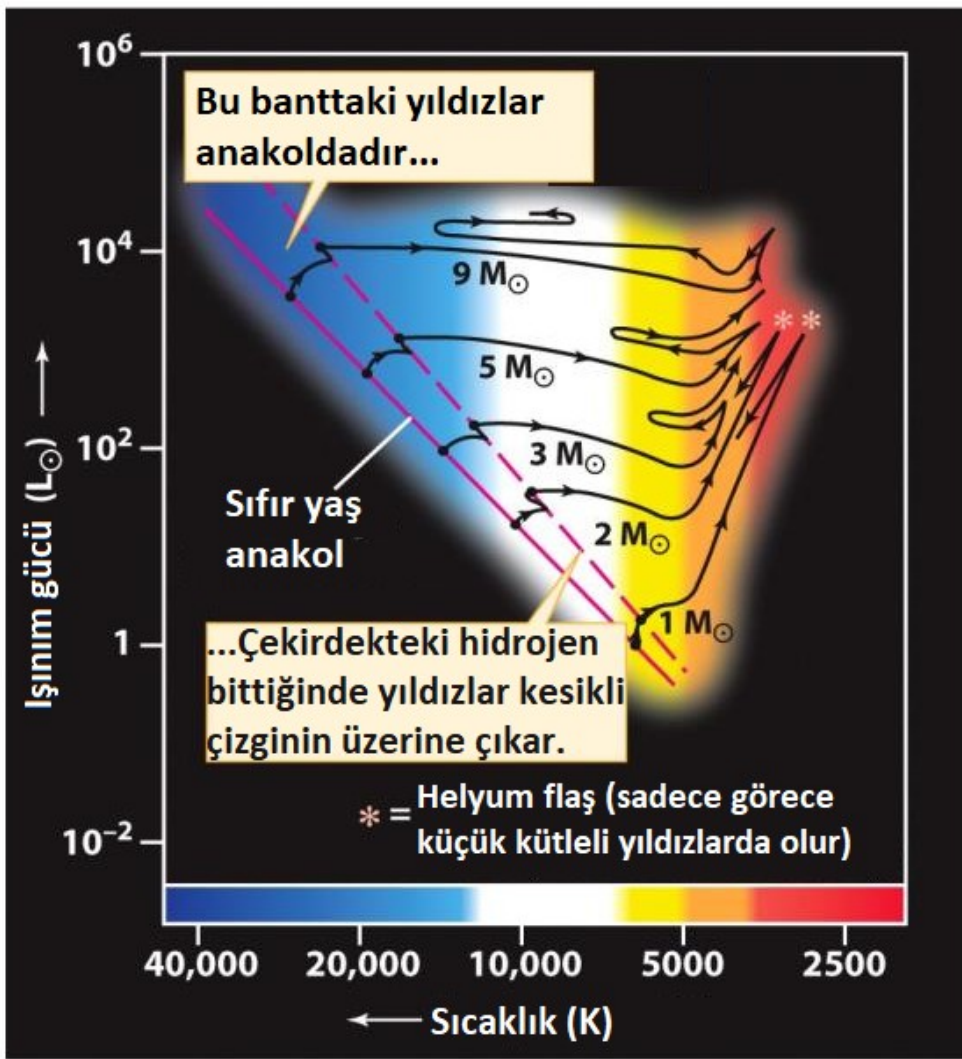
6. Bu reaksiyon sonucu da bir gama ışını ortaya çıkar ve bu foton da yıldızın iç ısını korumasına katkı sağlar.



Şekil 19-8

Universe, 10. Baskı

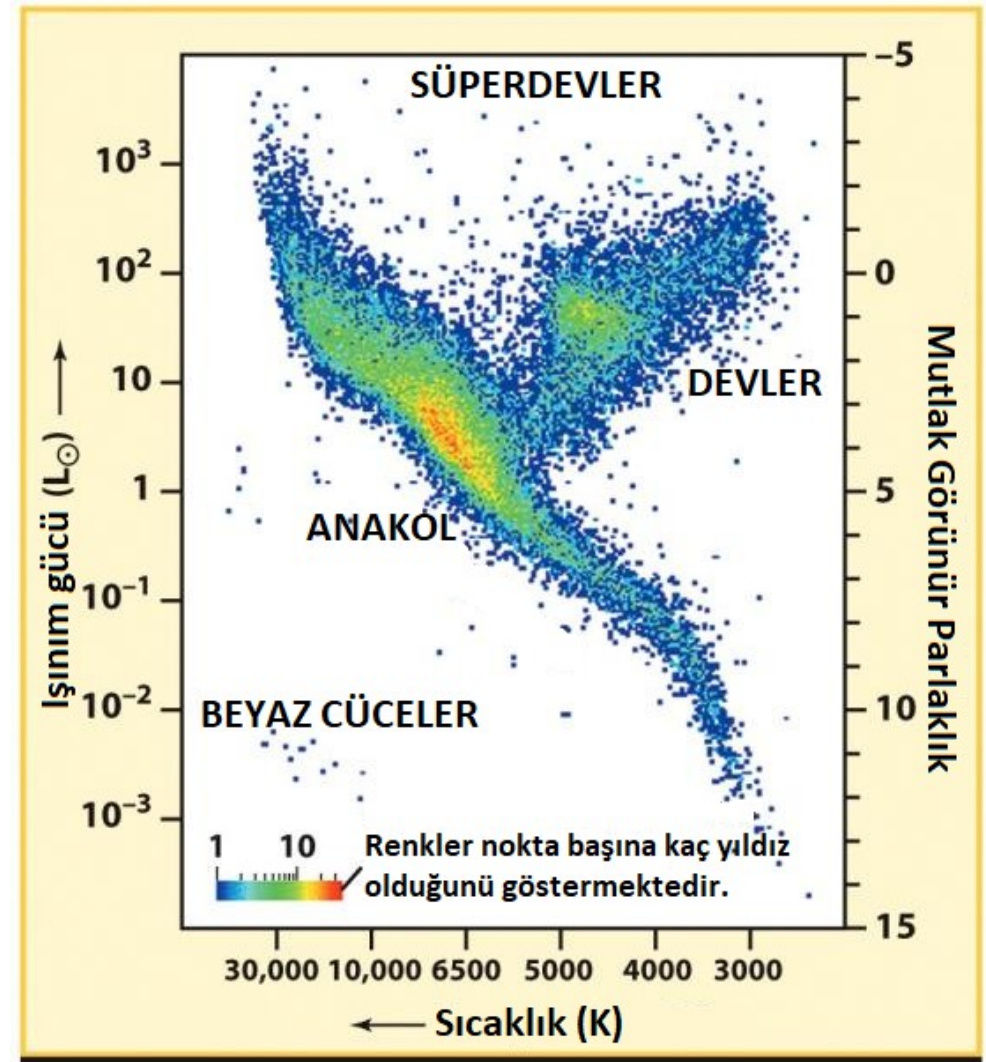
Bu diyagram Güneş'in ($1 M_{\text{Güneş}}$) ışınım gücünün zaman içinde nasıl değiştiğini göstermektedir. Güneş hayatına büzüldükçe ışınım gücü H^+ opasitesi nedeniyle hızla azalan bir önyıldız olarak başladı. Çekirdekte hidrojen füzyonunun başlamasıyla anakola oturup, tüm hidrojen atomlarının iyonize olmasıyla enerji dengesi de kurulduktan sonra Güneş'in ışınım gücü milyarlarca yıl içinde yavaş yavaş artmıştır. Anakol sonrası evrim çok daha hızlı olduğundan grafiğin sağ kısmında farklı bir zaman ölçeği kullanılmıştır.



Farklı kütleyle sahip 5 yıldızın anakol sonrası evrim yolları

Şekil 19-9a

Universe, 10. Baskı



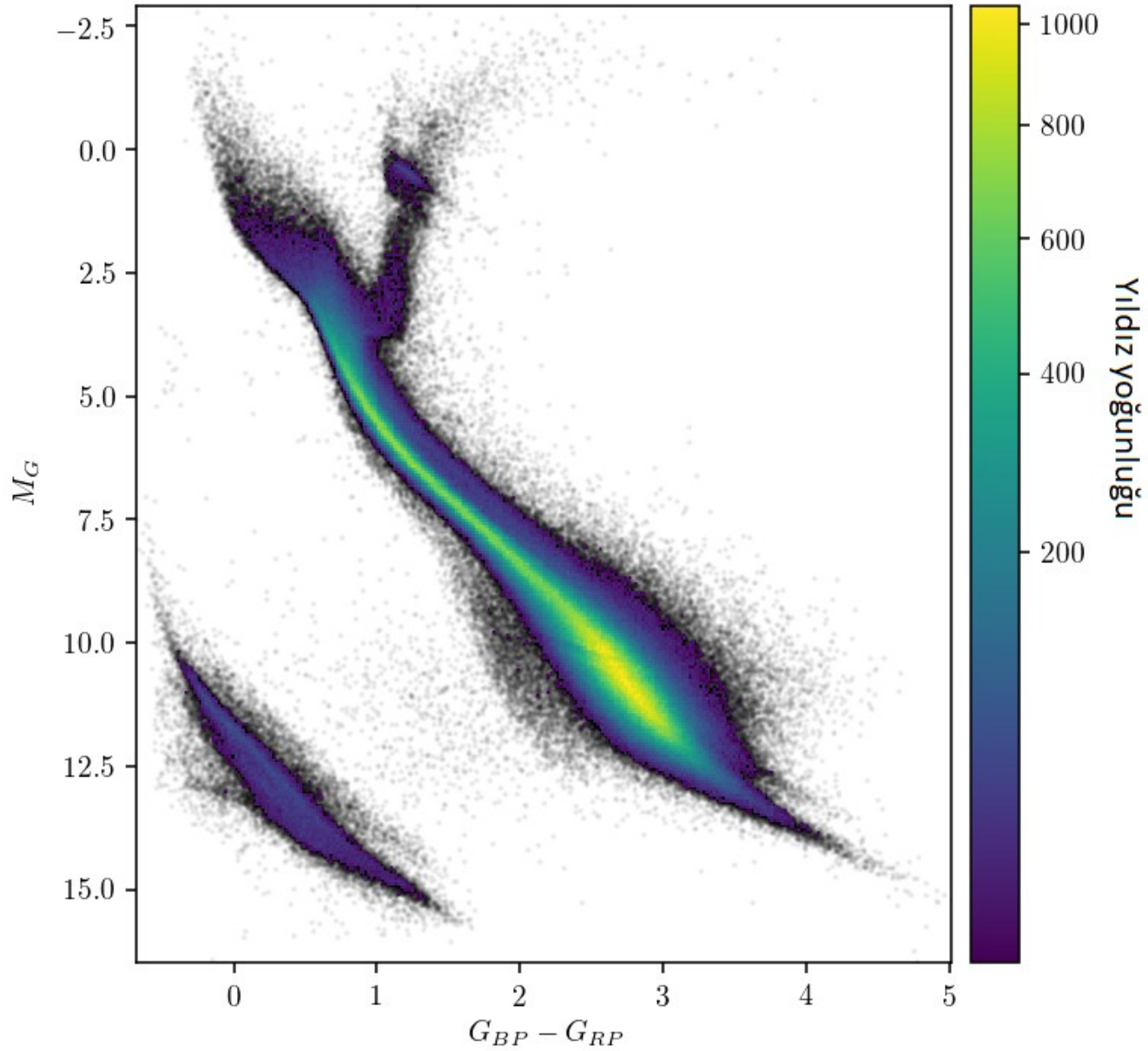
29853 yıldızdan oluşan H-R diyagramı -- anakolun kalınlığına dikkat ediniz

Şekil 19-9b

Universe, 10. Baskı

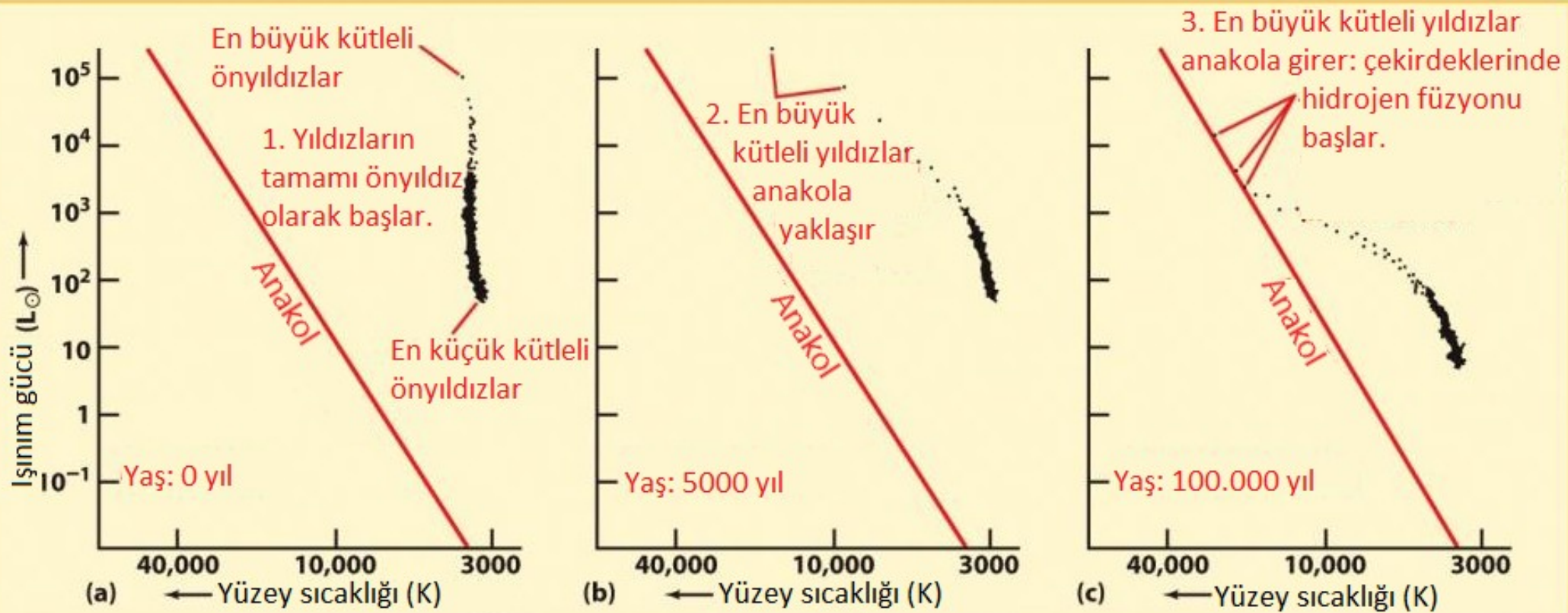
Burada yıldız işaretleriyle gösterilen en düşük kütleli iki yıldız (1 M_{Güneş} ve 2 M_{Güneş}), bir helyum parlamasına maruz kalırken, yüksek kütleli yıldızlarda çekirdekte helyum füzyonu, sakın bir şekilde gerçekleşir. Genişlemiş yıldızda tekrar enerji dengesi kurulduğundan yıldız büzülür, ışınım şiddeti düşer, ancak bu sırada yüzey sıcaklığı artar.

Bu H-R diyagramını oluşturmak için HIPPARCOS uydusundan alınan veriler kullanılmıştır. Anakolun kalınlığı büyük ölçüde anakol evriminin sonucu olmakla birlikte. Gözlemsel belirsizlikler ve yıldızların kimyasal bollukları da bunda rol oynamaktadır.



Gaia Uzay Teleskobu ile elde edilen verilerle oluşturulan bir HR diyagramı.
 $G_{BP} - G_{RP}$, yüzey sıcaklığına ölçekli Gaia rengidir.
 M_G , ışınım gücüne ölçekli Gaia bandındaki mutlak parlaklıktır.
Sağ tarafta verilen renk skalası yıldızların sayısını göstermektedir.

Bir Kümedeki Farklı Kütlelerden 100 Yıldızın Simüle Edilmiş Evrimi – I Önyıldız Evrimi



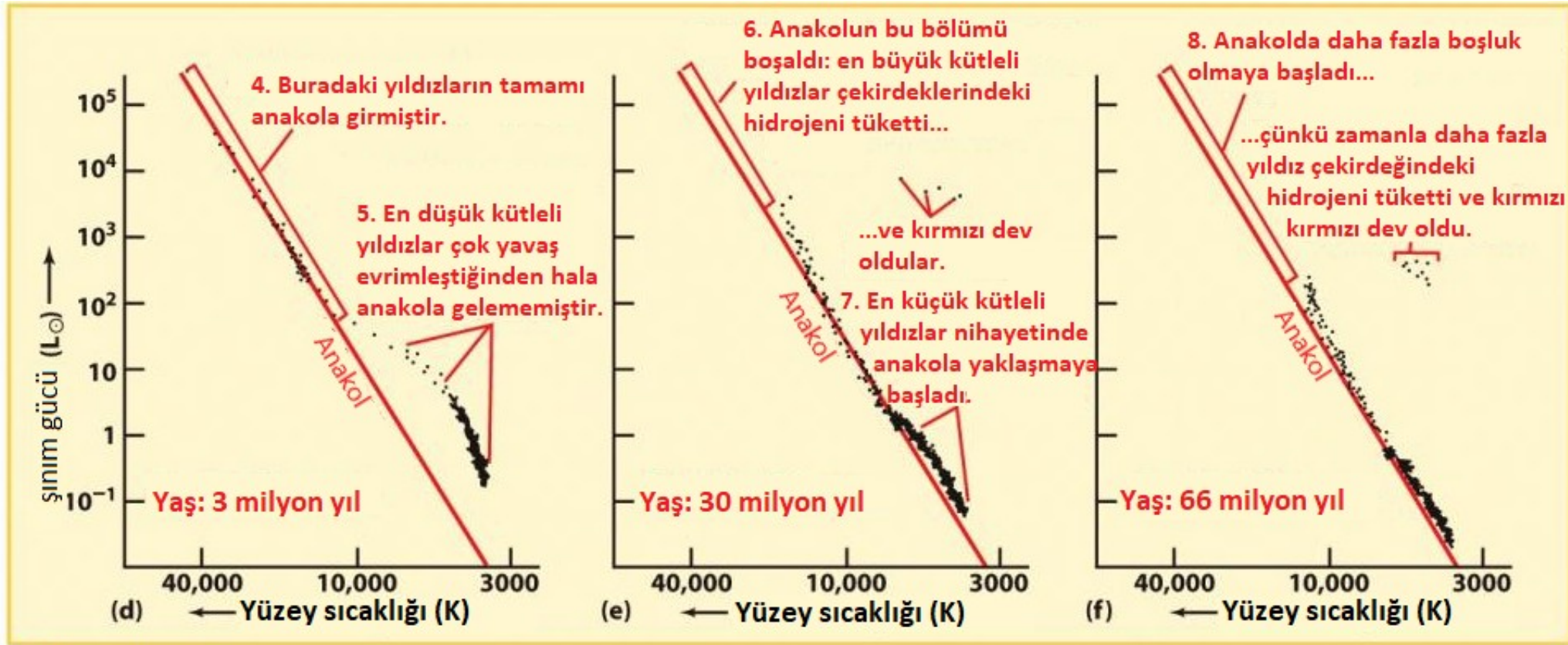
Şekil 19-10 kısım 1

Universe, 10. Baskı

- (a) 100 yıldızın tümü hayatlarına H-R diyagramının sağ tarafında, soğuk ön yıldızlar olarak başlar. Önyıldızlar diyagramda kütlelerine göre dağılmışlardır ve kütle ne kadar büyük olursa, önyıldızın başlangıçtaki ışınım gücü de o kadar büyük olur. Bir önyıldızın ışınım kaynağı yıldız büzülürken termal enerjiye dönüşen, serbest kalan kütleçekim enerjisidir (**Kelvin-Helmholtz Büzülmesi**).
- (b) En büyük kütleli önyıldızlar çok hızlı bir şekilde büzülür ve ısınır. Sadece 5000 yıl sonra, H-R diyagramı üzerinden anakola doğru ilerlerler.
- (c) 100.000 yıl sonra bu büyük kütleli yıldızlar, çekirdeklerindeki hidrojen füzyonunu başlatarak anakola O yıldızları olarak yerleşirler.

Bir Kümedeki Farklı Kütlelerden 100 Yıldızın Simüle Edilmiş Evrimi – II

Anakol Evrimi



Şekil 19-10 kısım 2

Universe, 10. Baskı

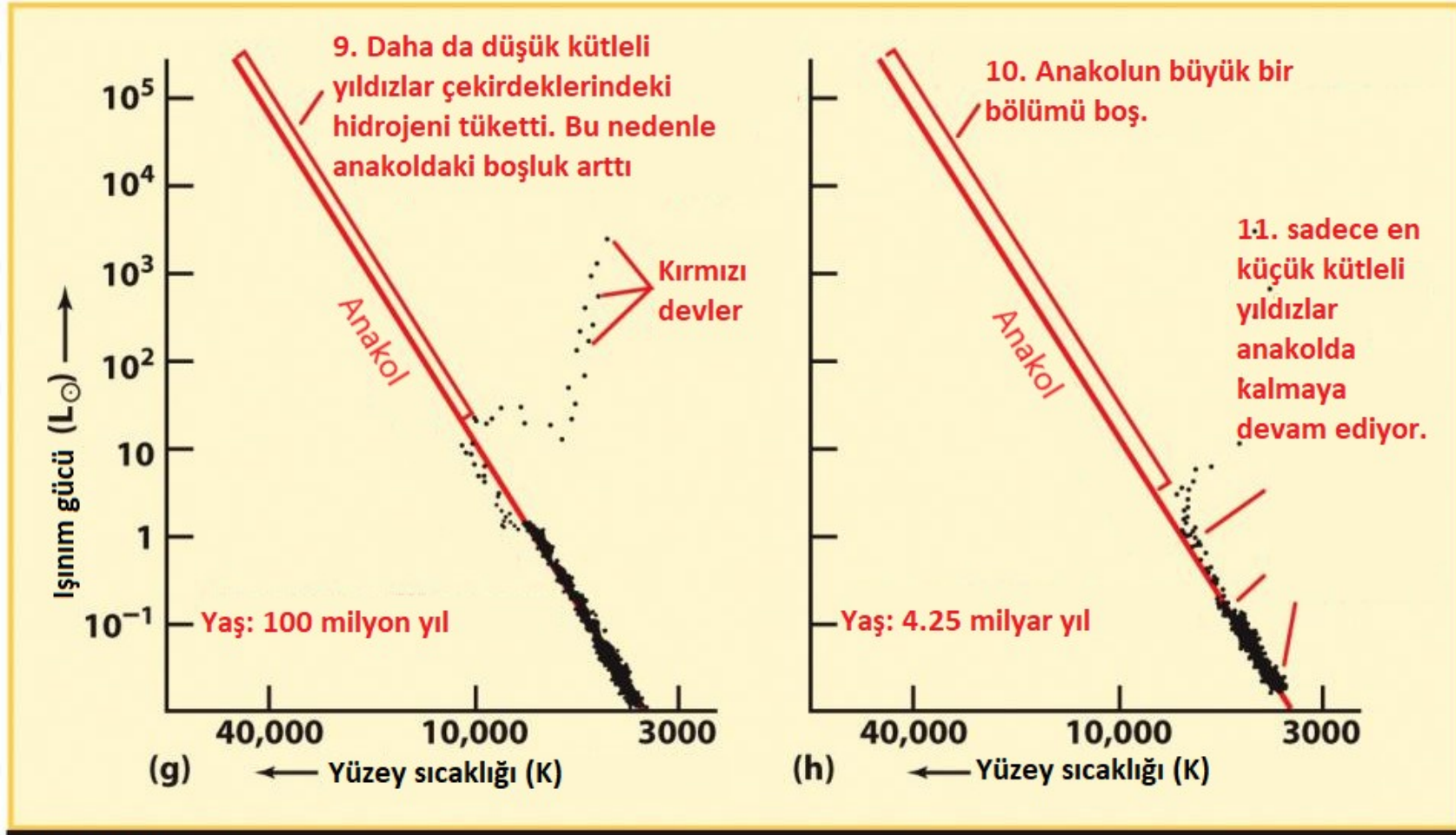
(d) 3 milyon yıl sonra, orta kütleli yıldızlar da çekirdek hidrojen füzyonunu başlatır ve B ve A tayf türünden yıldızlar da anakol yıldızları haline gelirler.

(e) 30 milyon yıl sonra en büyük yıldızlar çekirdeklerindeki hidrojeni tüketerek kırmızı devlere dönüşürler. Bu yıldızların yüzey sıcaklığı genişlemeye düştüğü için anakolun sol üst ucundan H-R diyagramının sağ üst köşesine doğru hareket etmişlerdir.

(f) 66 milyon yıl sonra en düşük kütleli önyıldızlar bile sonunda çekirdek hidrojen füzyonunu başlatırlar ve anakola soğuk, sönük, M yıldızları olarak yerleşirler. Bu en düşük kütleli yıldızlar yüz milyarlarca yıl boyunca çekirdeklerindeki hidrojeni helyuma dönüştürmeye devam edebilir.

Bir Kümedeki Farklı Kütlelerden 100 Yıldızın Simüle Edilmiş Evrimi – III

Anakol Sonrası Evrim

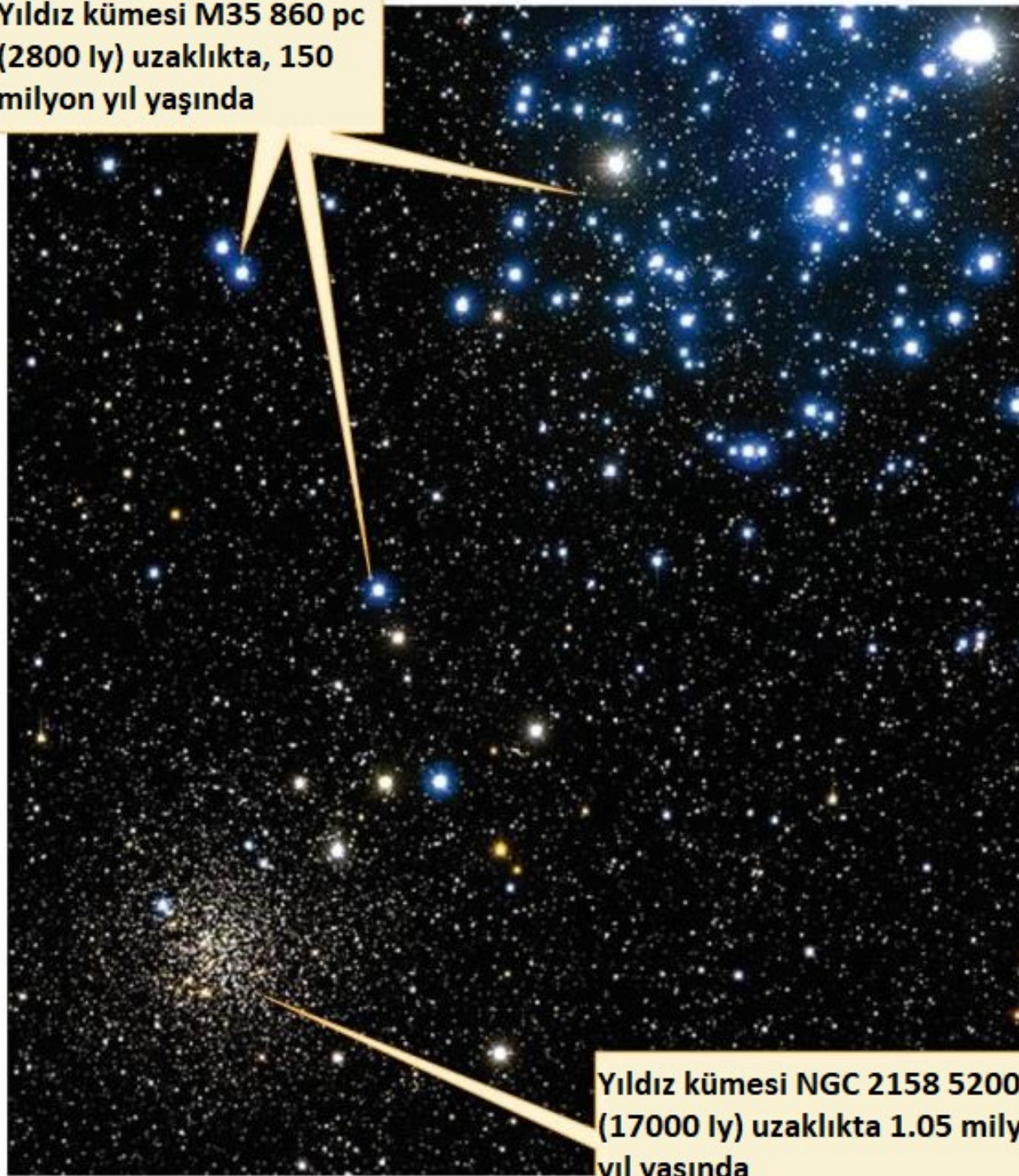


Şekil 19-10 kısım 3

Universe, 10. Baskı

Yıldızlar çekirdeklerindeki hidrojen kaynaklarını tüketip kırmızı devlere dönüştükçe, anakol sol üstten sağ alta doğru yavaş yavaş oluşur. Şekil 19-10g ve Şekil 19-10h arasında anakoldan ayrılan yıldızların kütleleri yaklaşık $1 M_{\text{Güneş}}$ ile $3 M_{\text{Güneş}}$ arasındadır ve çekirdeklerinde helyum parlamasına maruz kalırlar. Bu simülasyondaki tüm yıldızlar için dev aşaması, yıldızın anakol ömrüne kıyasla çok kısa bir süre alır. Bu nedenle herhangi bir zamanda yıldız popülasyonunun yalnızca küçük bir kısmı dev aşamasından geçmektedir. Dolayısıyla yıldızların çoğu anakol yıldızlarıdır, o nedenle anakol, HR diyagramında yıldızların ~%90'ının bulunduğu konumdur.

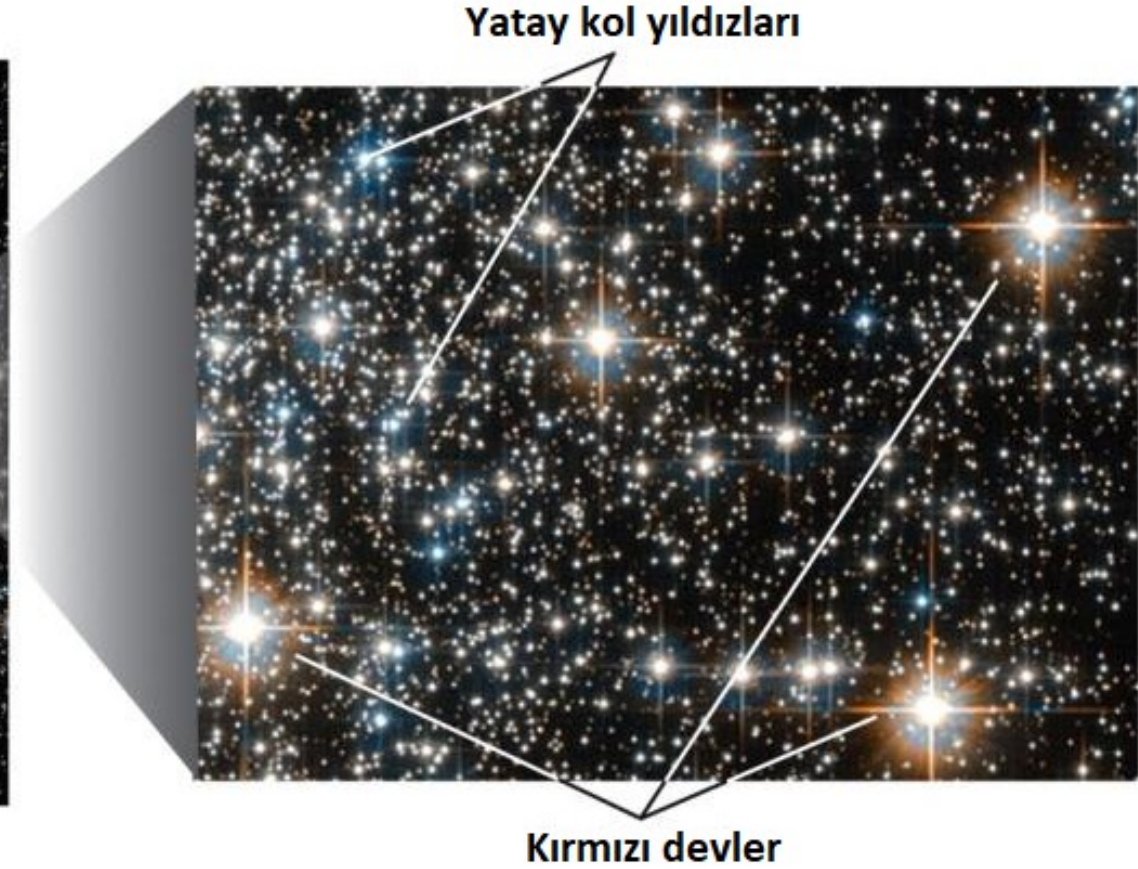
**Yıldız kümesi M35 860 pc
(2800 ly) uzaklıkta, 150
milyon yıl yaşında**



**Yıldız kümesi NGC 2158 5200 pc
(17000 ly) uzaklıkta 1.05 milyar
yıl yaşında**

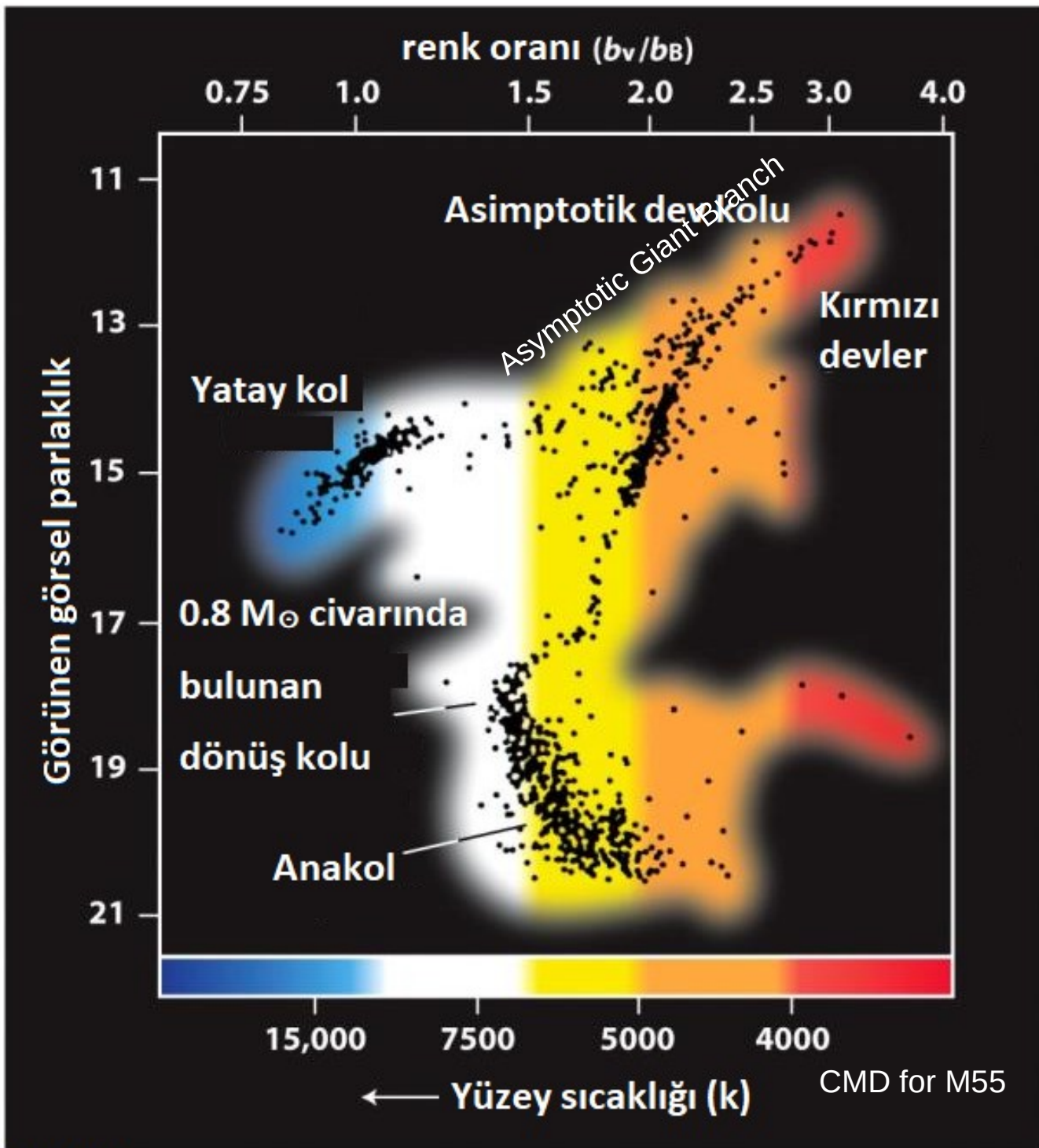
Bu görselde İvizler takımı yıldızındaki iki yıldız kümesi, M35 ve NGC 2158 görülmektedir. Daha yakın olan M35 kümesi, yüzey sıcaklıkları 10.000 K civarında olan bir dizi parlak mavi anakol yıldızının yanı sıra birkaç kırmızı deve de sahiptir. Dolayısıyla H-R diyagramı Şekil 19-10g'de gösterilene benzemektedir ve yaşı yaklaşık 100 milyon yıldır (daha doğrusu 150 milyon civarındadır). Daha uzaktaki küme NGC 2158'in mavi anakol yıldızı yoktur. Çok uzun zaman önce bu devasa yıldızların tümü anakol yaşamlarının sonuna gelerek devlere dönüşmüş olmalıdır. NGC 2158'in H-R diyagramı, Şekil 19-10g ile Şekil 19-10h'da verilen simüle kümelerin arasında bir yere denk düşer ve yaşı da (1,05 milyar yıl) bu ikisinin arasındadır.

Şekil 19-11



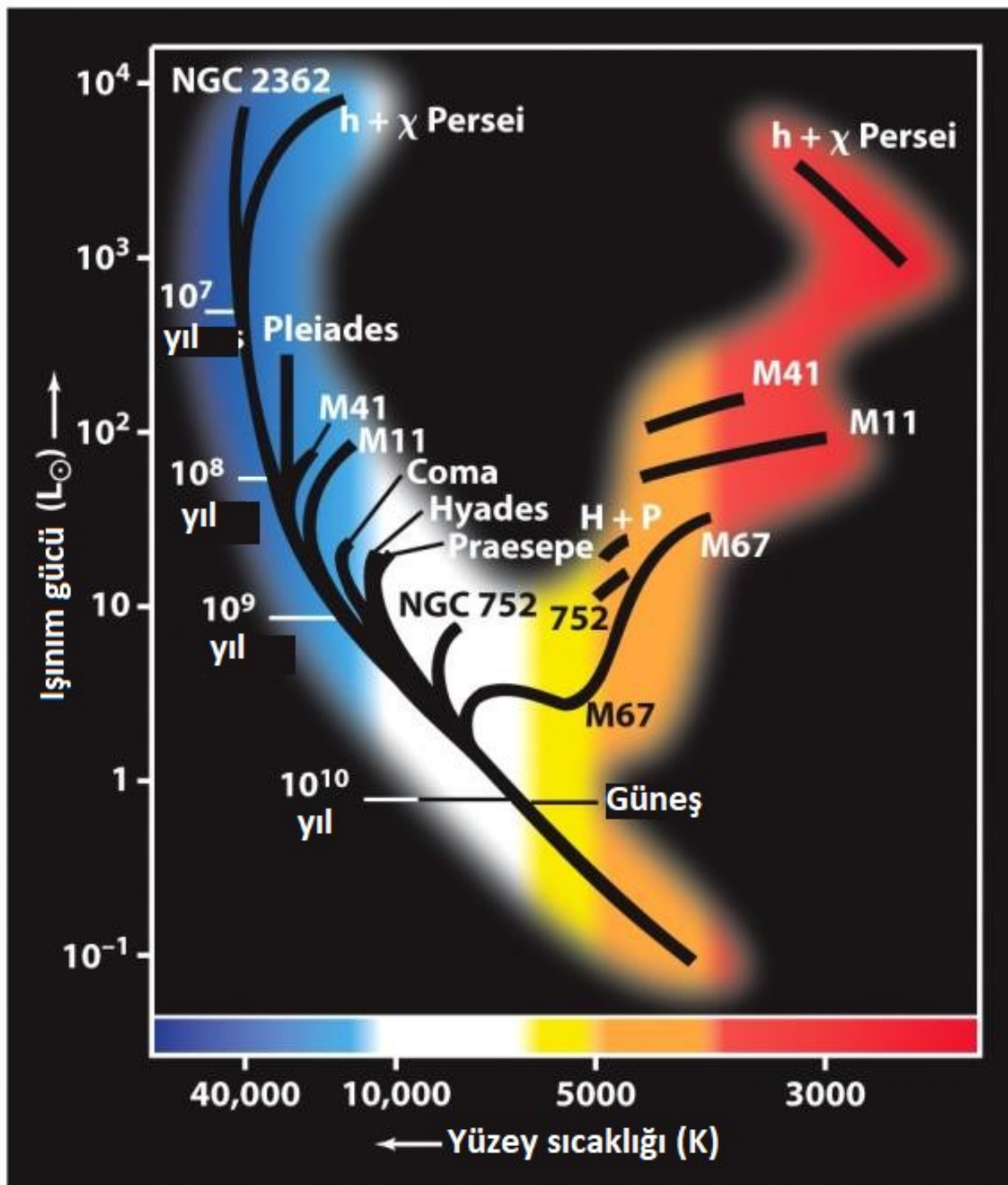
Şekil 19-12
Universe, 10. Baskı

Yatay Kol Yıldızları, kırmızı dev aşamasını geçmiş ve helyum parlaması geçirmiş, nispeten küçük kütleli yıldızlardır. Dolayısıyla hem çekirdeklerinde helyum füzyonu, hem de kabukta hidrojen füzyonu gerçekleşmektedir. Helyum parlaması öncesi yaklaşık $1000 L_{\text{Güneş}}$ olan ışınım güçleri parlamadan sonra yaklaşık $50 L_{\text{Güneş}}$ 'e kadar düşer. Bu sırada yıldızın dış katmanları büzülme sonucu ısınır. Dış katmanlardan ciddi miktarda kütle de kaybedildiği için sıcak iç katmanların gözleniyor olması nedeniyle bu yıldızlar buldukları konumdaki anakol yıldızlarına göre çok daha sıcak ve bu nedenle mavi görünürler. Bu yıldızlar helyum yakıtları tükendikten sonra kırmızı dev bölgesine doğru tekrar hareket edeceklerdir.



Şekil 19-13

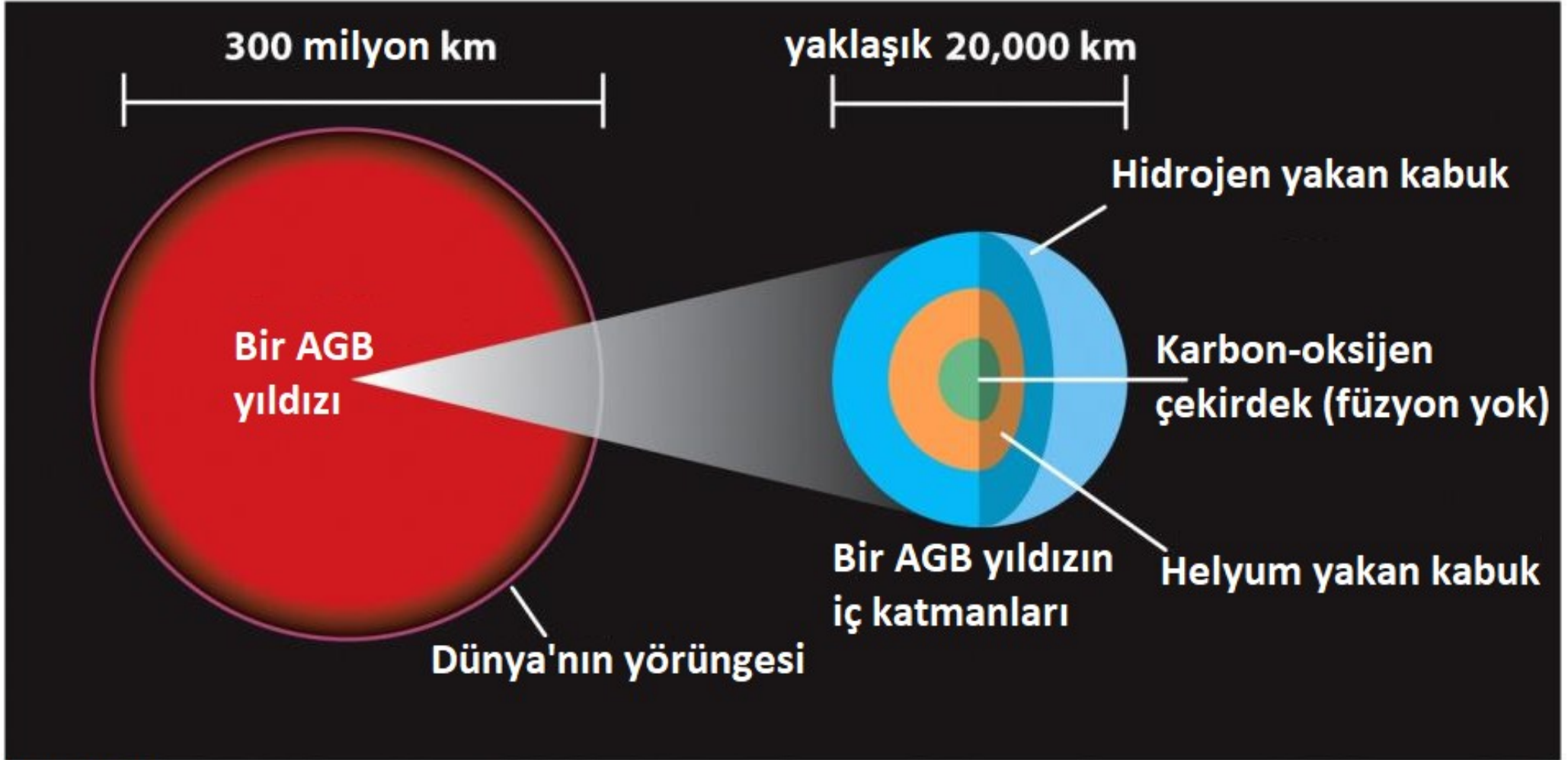
Universe, 10. Baskı



Şekil 19-14

Universe, 10. Baskı

Asimptotik Dev Kolu Aymptotic Giant Branch (AGB)

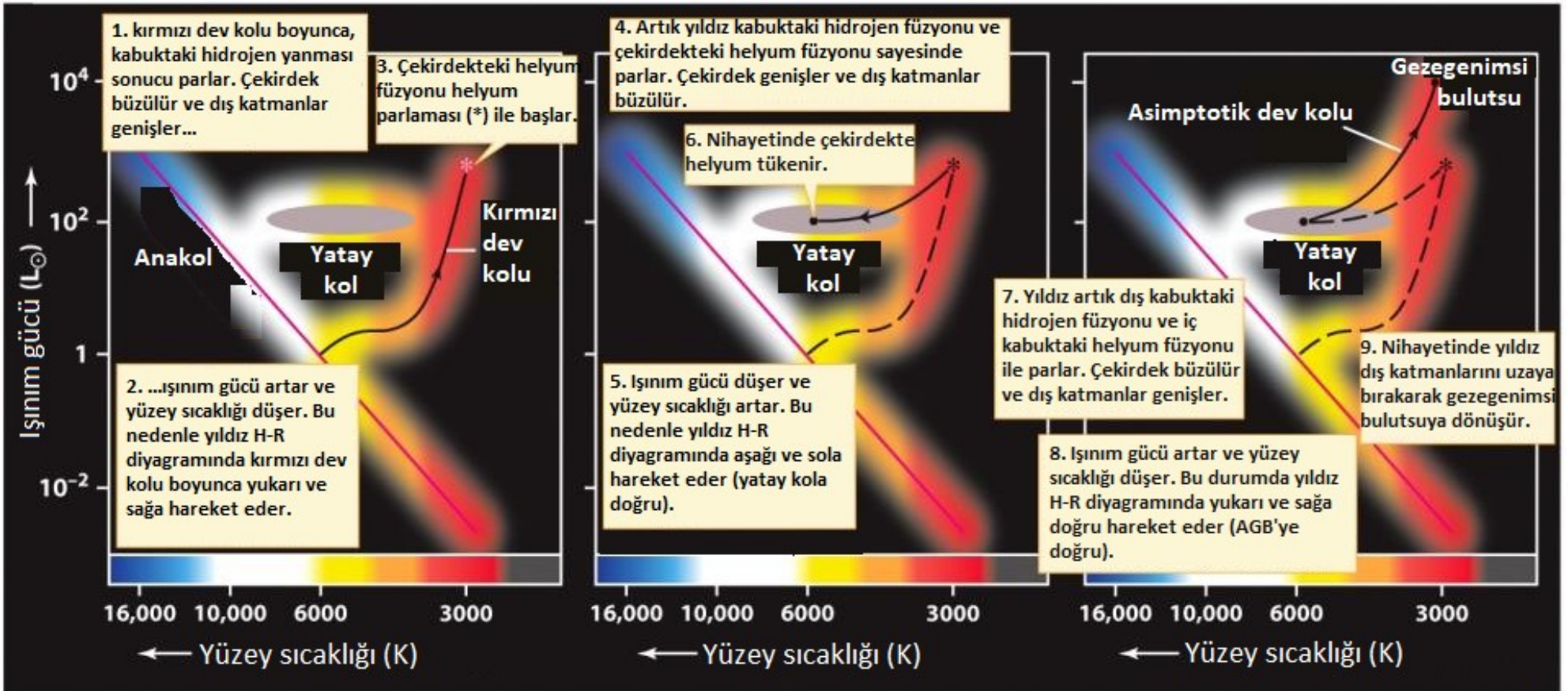


Şekil 20-2

Universe, 10. Baskı

Yaşamının sonuna doğru, Güneş gibi bir yıldız **asimptotik dev kolu (AGB) üyesi devasa, kırmızı bir yıldız** dönüşür. Yıldızın **termonükleer reaksiyonların bittiği aktif olmayan çekirdeği**, **helyum dönüştüren aktif kabuğu** ve **hidrojen dönüştüren kabuğunun** tümü, kabaca Dünya'nın yörüngesinin büyüklüğünde bir hacim içinde yer alır. Helyum füzyonunun gerçekleştiği kabuktaki termonükleer reaksiyonlar o kadar hızlıdır ki, yıldızın ışınım gücü günümüz Güneş'ininkinin binlerce katıdır.

1 $M_{\text{Güneş}}$ Bir Yıldızın Anakol Sonrası Evrimi



(a) Helyum parlamasından önce: Bir kırmızı dev yıldız (b) Helyum parlamasından sonra: Bir yatay kol yıldızı (c) Çekirdekteki helyum füzyonu bittikten sonra: Bir AGB yıldızı

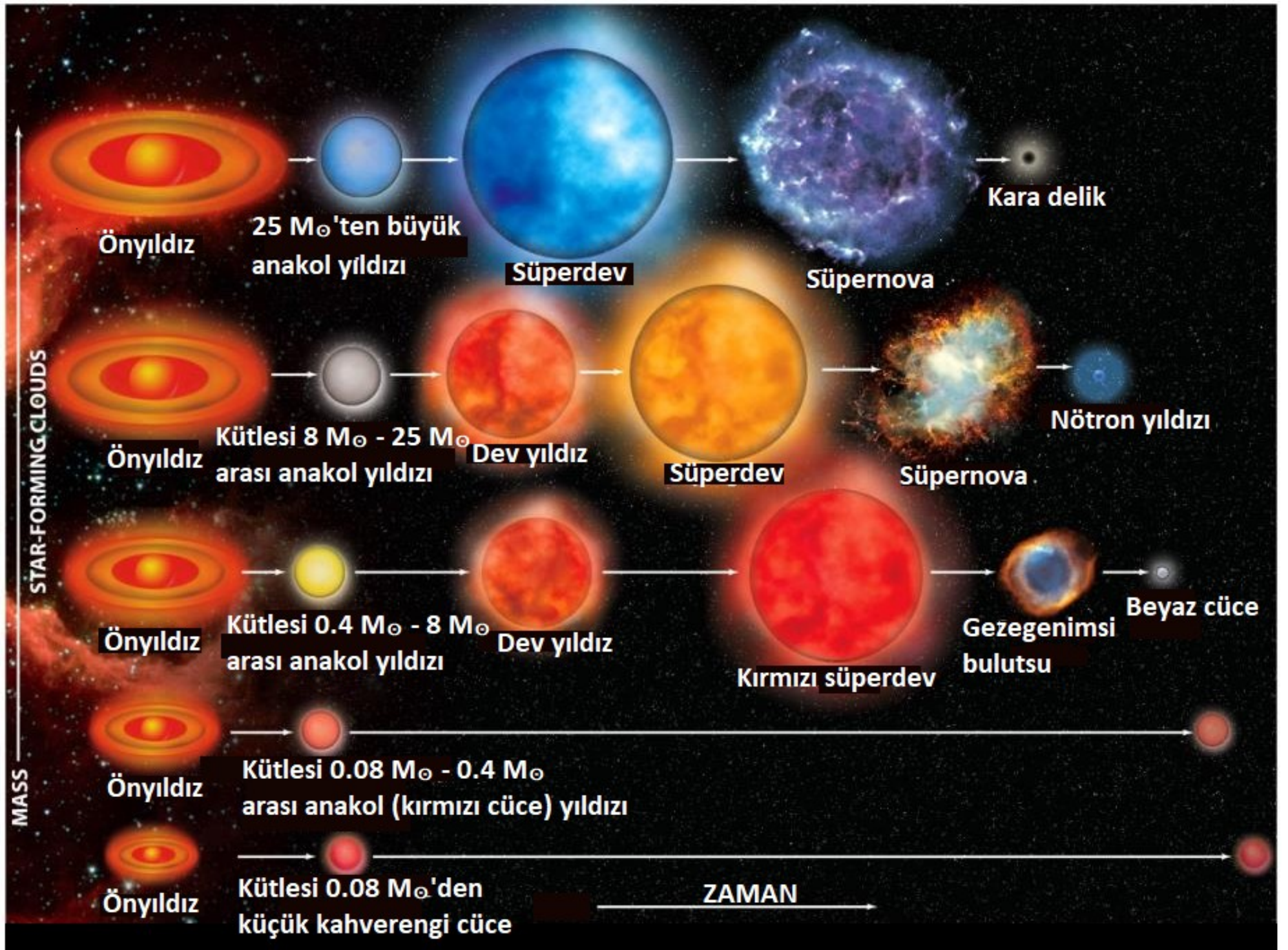
Büyük Kütleli Yıldızların Evrimlerinin Son Aşaması

$M > 8 M_{\text{Güneş}}$ yıldızlar için Neon, Oksijen ve Magnezyum'un bolluğunu daha da artıracak şekilde termonükleer reaksiyonlara girer. Neon füzyonu sona erdiğinde çekirdek büzülür ve sıcaklık silikon üretmek üzere oksijeni "tutuşturacak" kadar yüksek bir değer olan 10^9 K'e ulaşır. Daha da yüksek kütlelerde çekirdek bir kez daha büzülür ve silikonu birleştirerek kükürttten demire ve nikel kadar çeşitli büyük çekirdekler üretir.

Artan yoğunluk ve sıcaklık, her reaksiyonun bir öncekinden daha hızlı olmasını sağlar. Aşağıda her bir füzyon aşamasının teorik zaman çizelgelerini görebilirsiniz. Aynı zamanda kabuklardaki daha ağır elementler "yanarak" yıldızın yarıçapını giderek büyütüyor. Sonuç süper dev bir yıldızdır. Demire kadar tüm elementleri sentezleyebilen böyle bir yıldızda dahi demir füzyon reaksiyonlarına girmez; zira bu tepkime dışarıdan enerji gerektirir ve çekirdek son bir kez çöker.

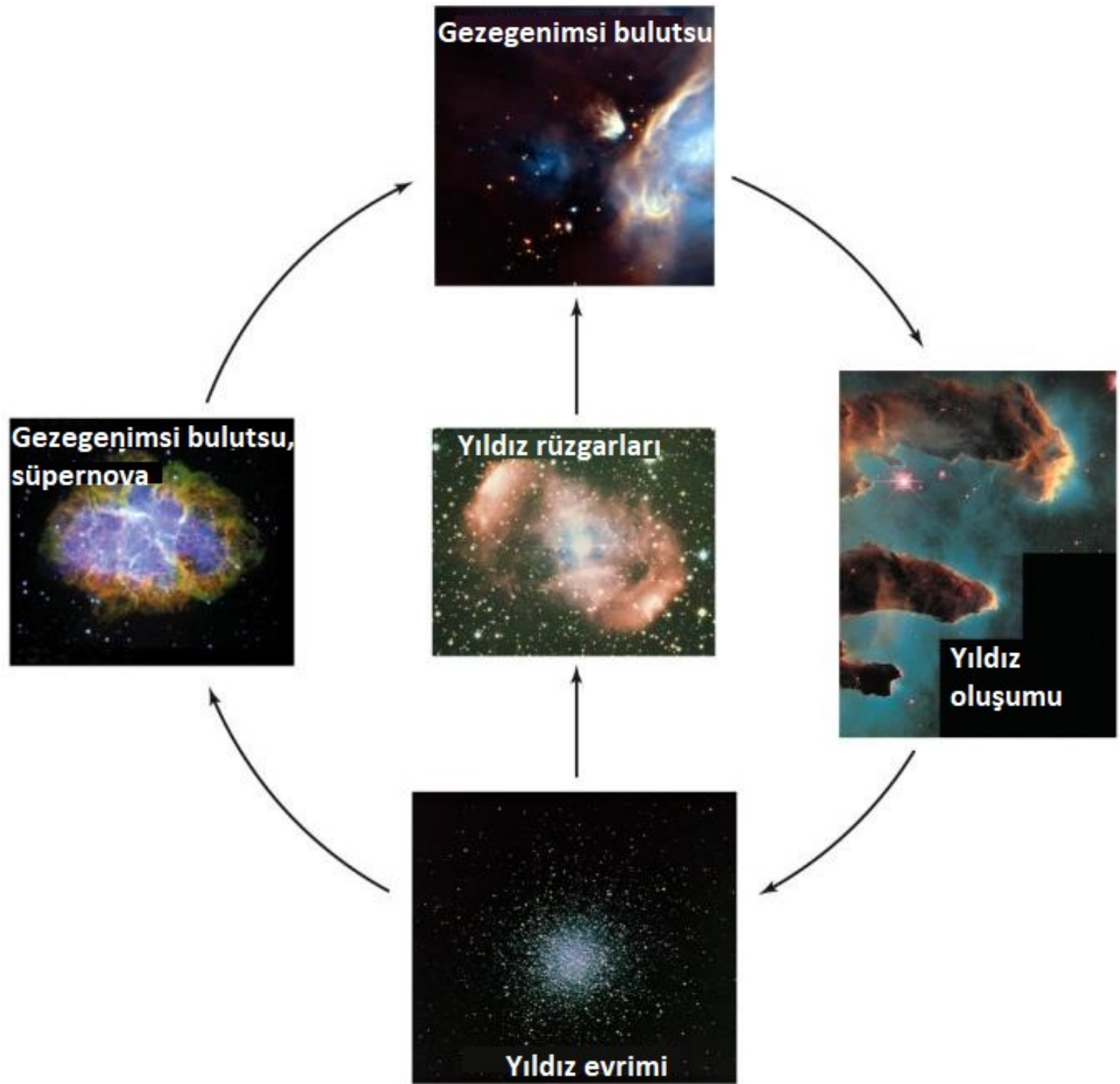
TABLO 20-1 25 Güneş Kütlelerine Sahip Bir Yıldızın Evrim Aşamaları

Evre	Çekirdek sıcaklığı (K)	Çekirdek yoğunluğu (kg/m^3)	Evre'nin süresi
Hidrojen füzyonu	7×10^7	10×10^3	10^7 yıl
Helyum füzyonu	2×10^8	2×10^6	10^6 yıl
Karbon füzyonu	8×10^8	10^9	1000 yıl
Neon füzyonu	1.6×10^9	10^{10}	3 yıl
Oksijen füzyonu	1.8×10^9	10^{10}	3.6 ay
Silisyum füzyonu	2.5×10^9	10^{11}	5 gün
Çekirdeğin çökmesi	10^{10}	10^{13}	$\frac{1}{4}$ saniye
Süpernova	yaklaşık 10^9	değişken	10 saniye



Şekil 20-24a

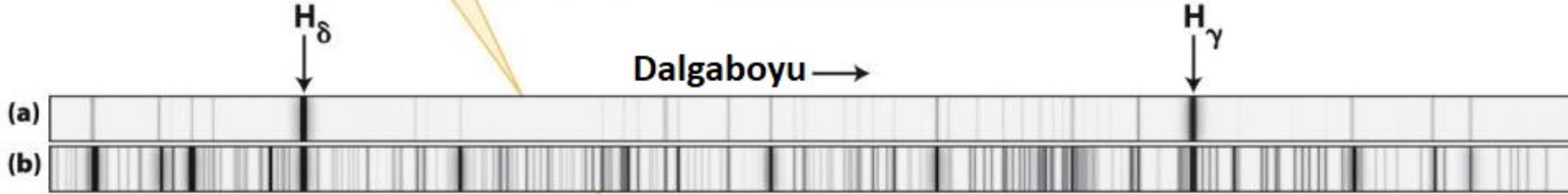
Universe, 10. Baskı



Şekil 20-24b
Universe, 10. Baskı

Metal Bolluđu (Metalisite) ve Yıldız Popölasyonu

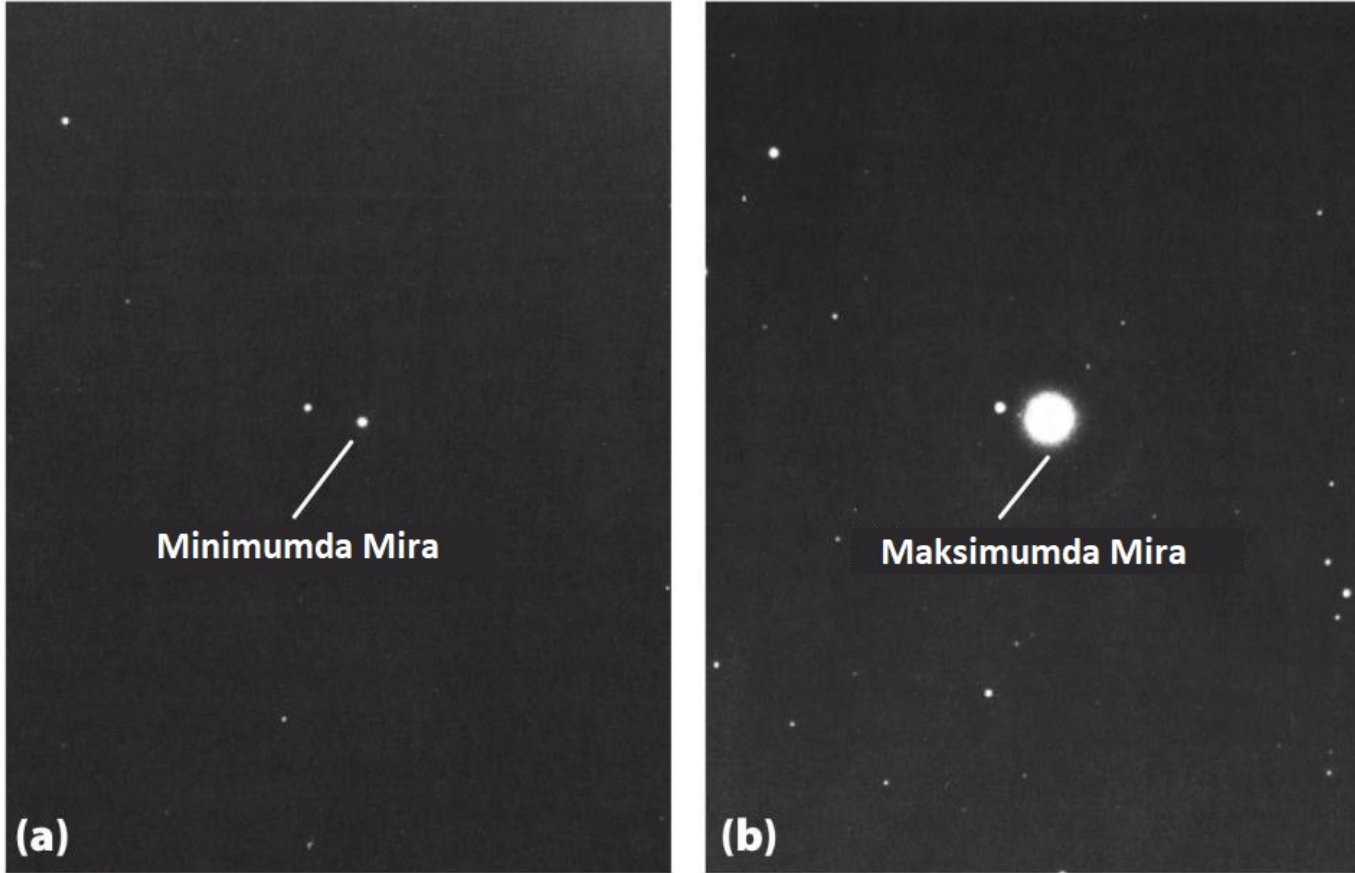
Bu Pop II yıldızının tayfında hidrojene ait soğurma çizgileri görölmektedir ancak metal çizgileri çok zayıftır. Bu yıldızlara metalce fakir yıldızlar denilir.



Bu Pop I yıldızının tayfındaki metal çizgileri daha güçlüdür. Bu tür bir yıldız metalce zengindir.

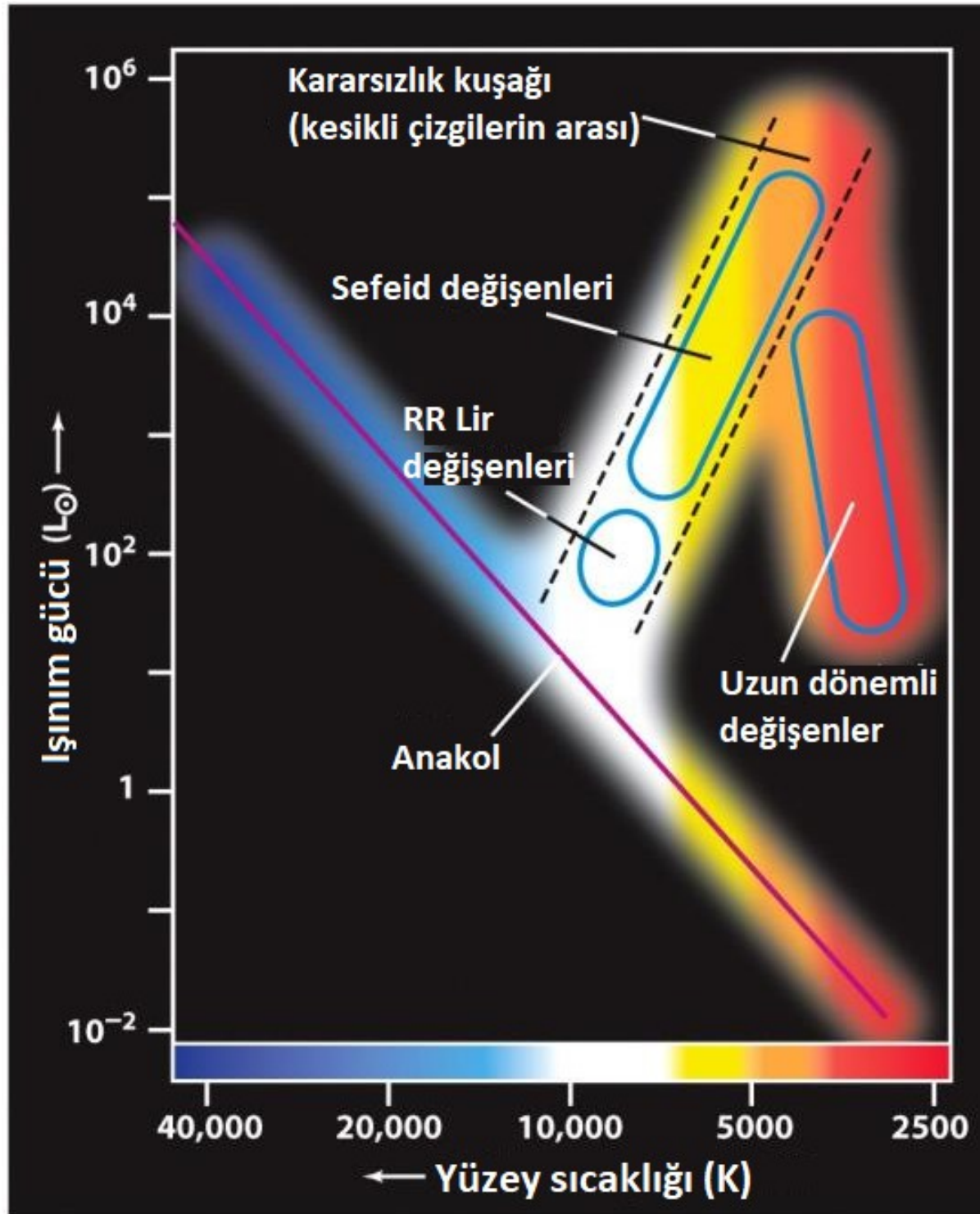
Şekil 19-15
Universe, 10. Baskı

Değişen Yıldızlar (Sınava Dahil Değil)



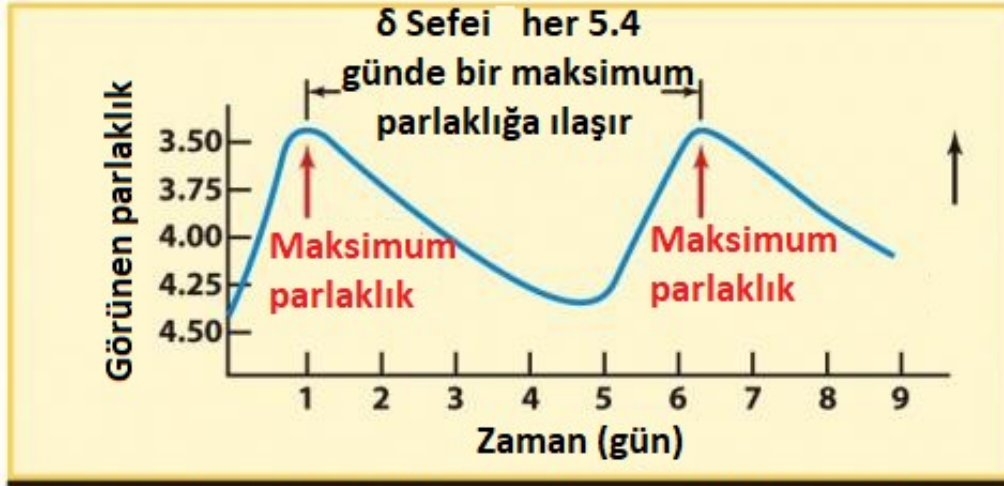
Şekil 19-16
Universe, 10. Baskı

Mira veya o (omikron) Ceti, parlaklığı 332 günlük bir dönemle değişen bir **değişen yıldızdır**. (a)'daki gibi en sönük haliyle (Fotoğraf Aralık 1961'de çekilmiştir), Mira, (b)'deki (Ocak 1965) maksimumdaki parlaklığının %1'inden daha az parlaktır. Bu parlaklık değişimleri Mira'nın zonklamaları (pulsasyonları) nedeniyle meydana gelir. HR'deki **kararsızlık kuşağı** üzerindeki yıldızların zonklamaları, enerjinin çoğunun Helyum ve metallerin iyonizasyonu için kullanılması sonucu, yıldızın içindeki bir katmanda (**kısmi iyonizasyon katmanı**) enerji transferinin geçici olarak engellenmesinden kaynaklanmaktadır. Zonklamaların doğası, dönemi ve genliği büyük ölçüde bu iyonizasyon katmanının derinliğine ve iyonize olan materyale bağlıdır. Çekirdekte üretilen enerjinin belli bir katmandaki maddeyi iyonize etmesi engellenirken, dış katmanlar büzülür. Bu maddenin tamamı iyonlaştığında enerji dış katmanlara aktarılır, yıldız genişler ve soğur. Bu zonklamalar nedeniyle yıldızın parlaklığı periyodik olarak değişir. Bu mekanizmaya **k-mekanizması (kappa)** adı verilir.



Şekil 19-17
Universe, 10. Baskı

Sefeid Değişenleri (Sınava Dahil Değil)



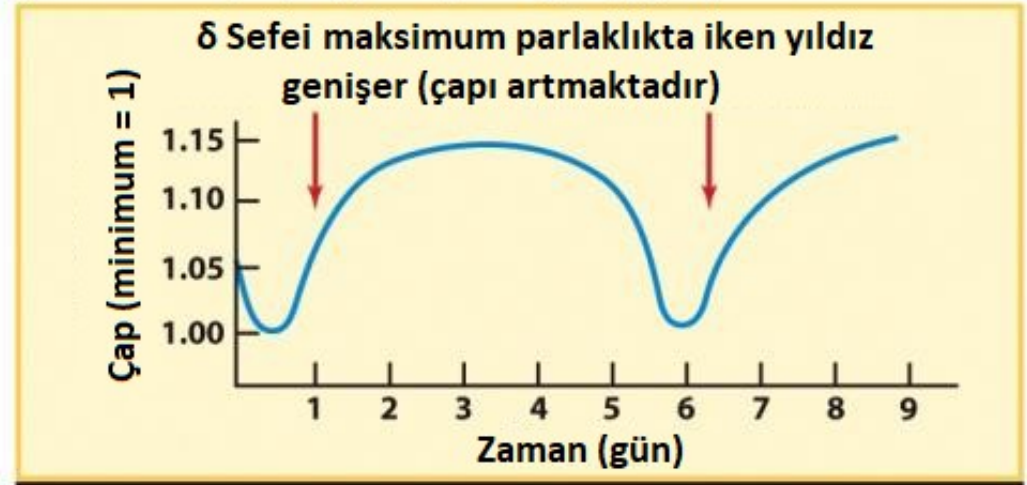
(a) δ Sefei'nin ışık eğrisi (zamana karşı parlaklık grafiği)



(b) δ Sefei'nin zamana göre dikine hızı (pozitif: yıldız büzülüyor, negatif: yıldız genişliyor)

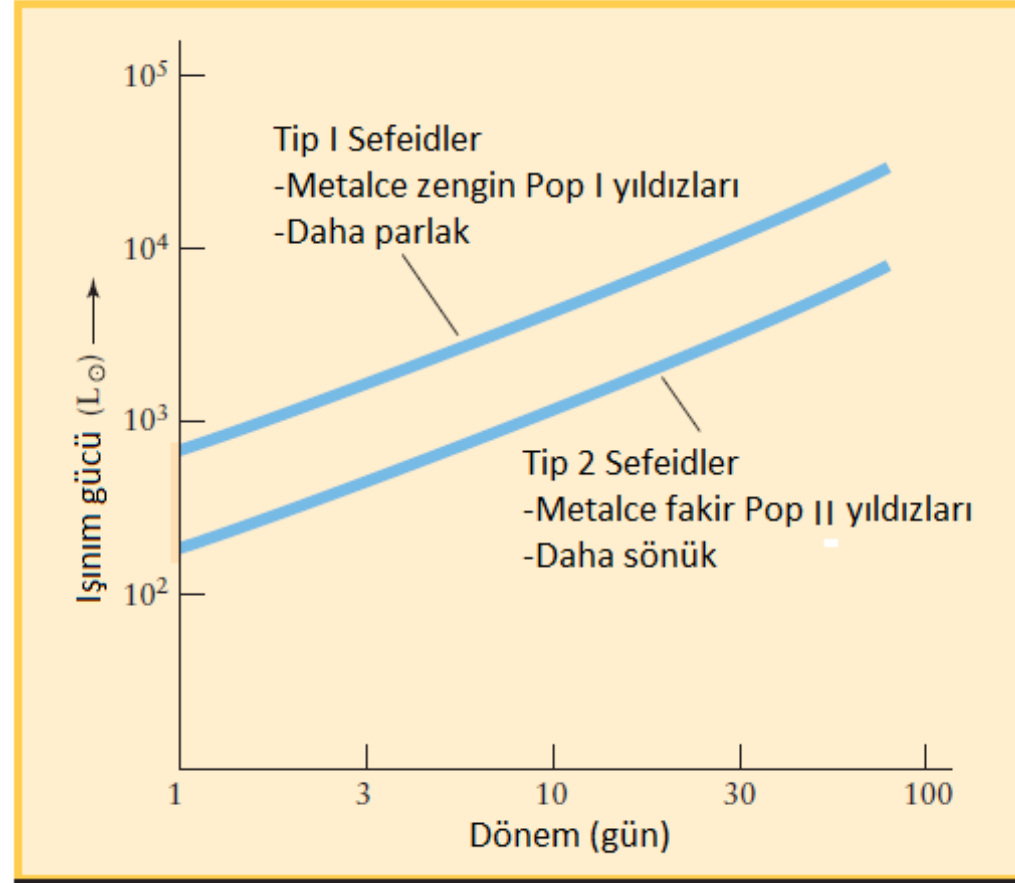


(c) δ Sefei'nin zamana göre yüzey sıcaklığı



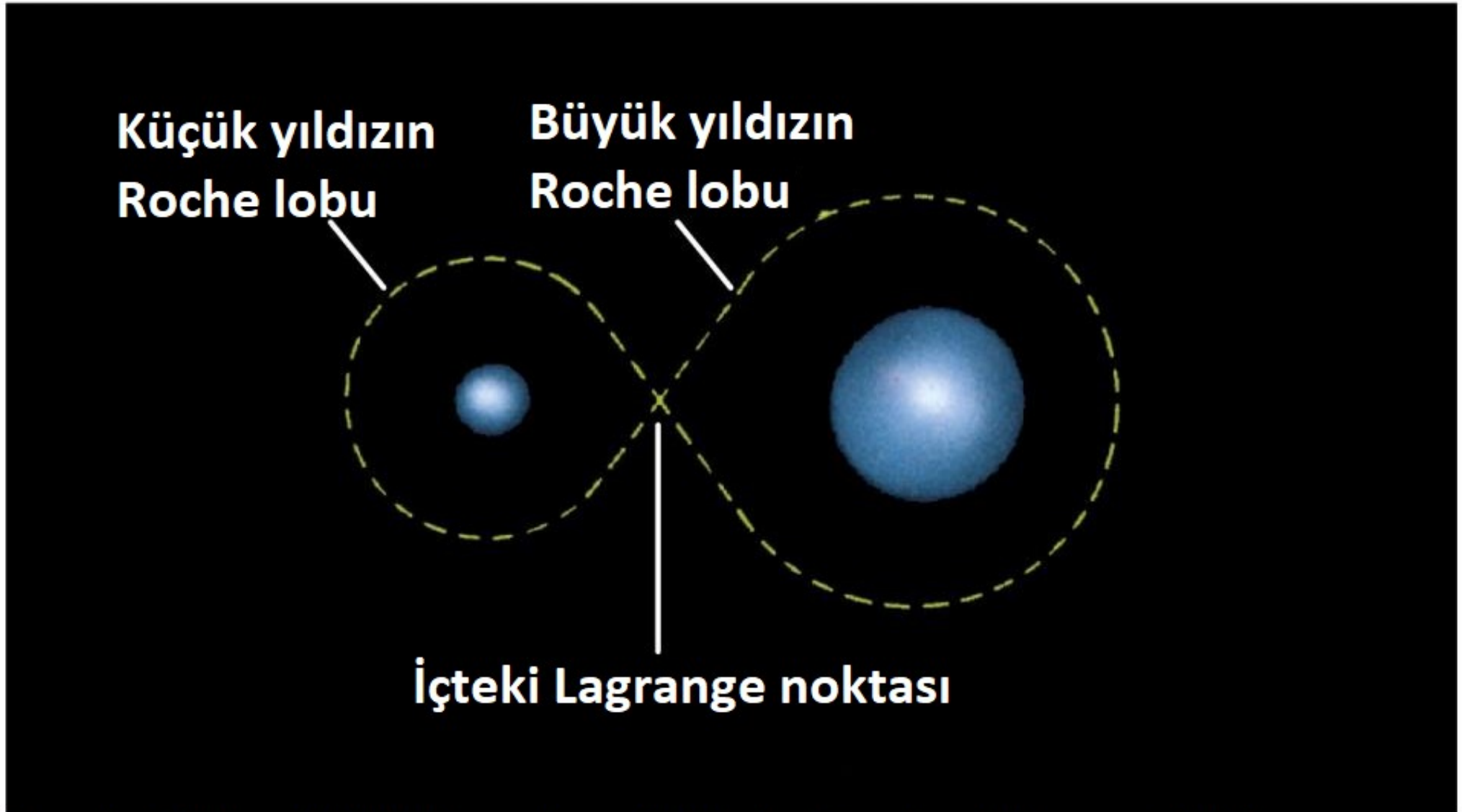
(d) δ Sefei'nin zamana göre çap değişimi

Sefeidler İçin Dönem-Parlaklık Bağıntısı (Sınava Dahil Değil)



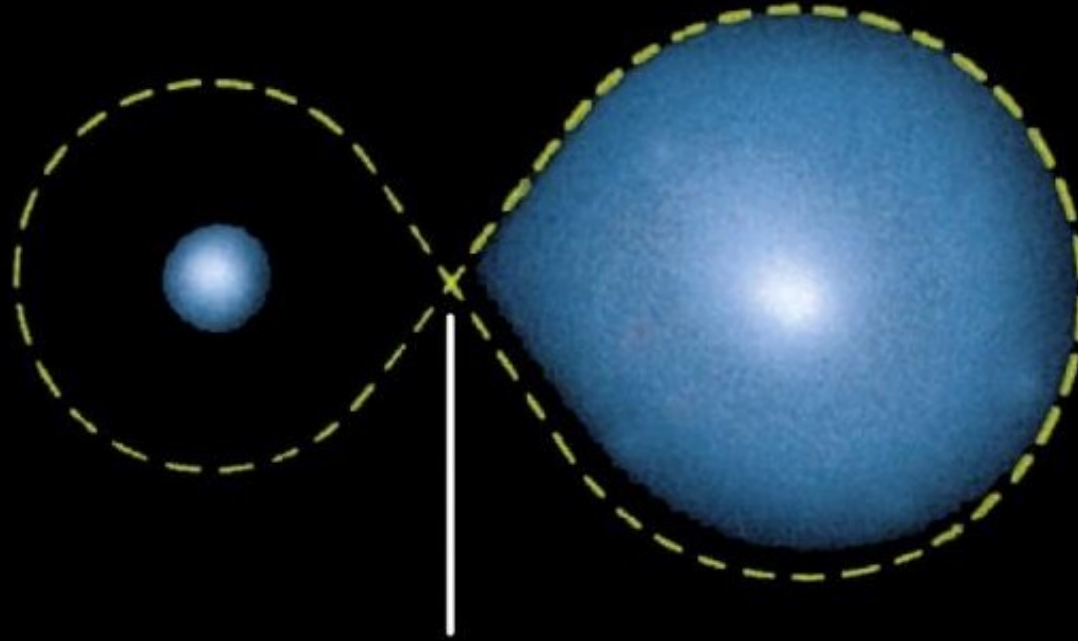
Gökbilimciler, bir Sefeid değişkeninin türünü metal bolluğunu ölçerek belirledikten sonra, bir yıldızın mutlak parlaklığını belirlemek için ilgili **Dönem-Parlaklık İlişkisini** kullanırlar. Yıldızın görünen parlaklığı da bilindiğinden bu yıldızların uzaklıkları **uzaklık modülü** kullanılarak kolaylıkla hesaplarlar. Sefeid değişkenleri çok parlaktır, dolayısıyla uzak mesafelerden gözlenebilirler. Bu özellikleri nedeniyle galaksilerin (gökadaların) uzaklıklarının ölçülmesinde ve Samanyolu'ndan başka galaksilerin bulunduğu anlaşılmasında çok önemli bir rol oynamışlardır.

Çift Yıldızların Evrimi (Sınava dahil değil)



Ayrık çiftler: Yıldızların her ikisi de Roche lobunu doldurmamış

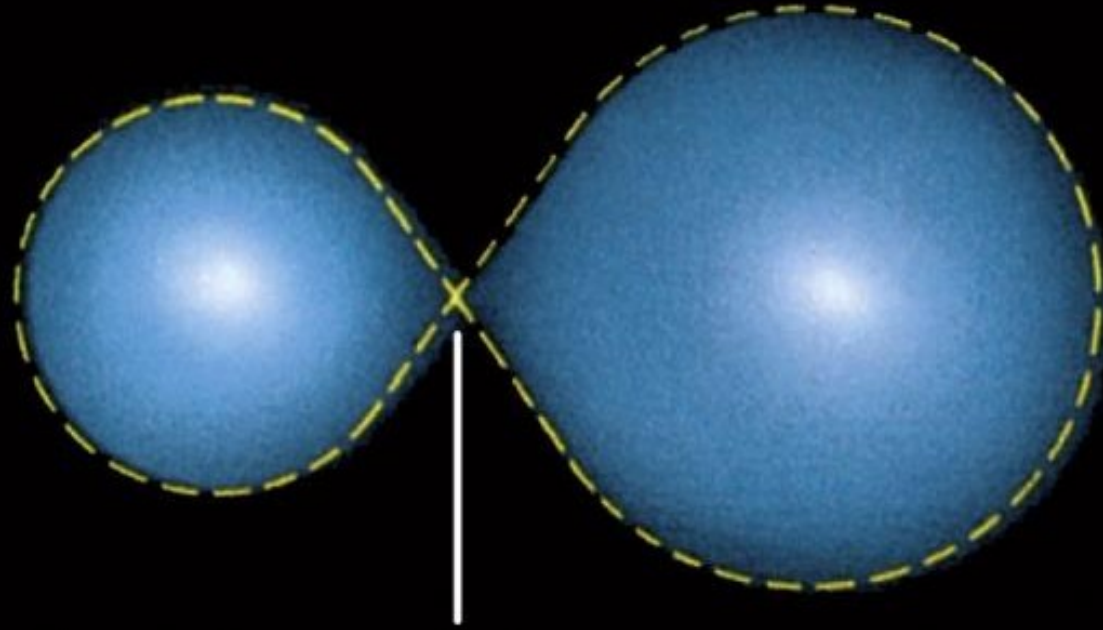
Çift Yıldızlarda Kütle Transferi (Sınava dahil değil)



İçteki Lagrange noktasından büyük yıldızdan küçük yıldızla madde aktarılır

Yarı-ayrık çiftler: Yıldızlardan biri Roche lobunu doldurmuş

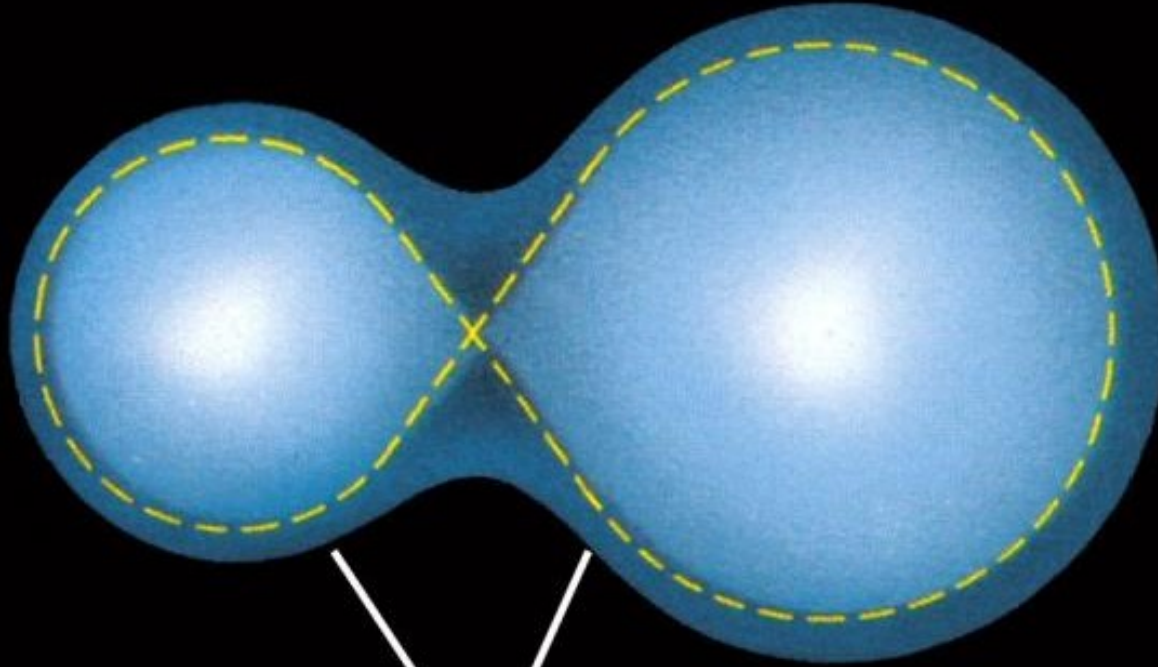
Çift Yıldızlarda Kütle Transferi (Sınava dahil değil)



İçteki Lagrange noktasından yıldızlardan herhangi birinden diğerine madde aktarılabilir

Değen çiftler: Her iki yıldız da Roche lobunu doldurmuş

Çift Yıldızlarda Kütle Transferi (Sınava dahil değil)



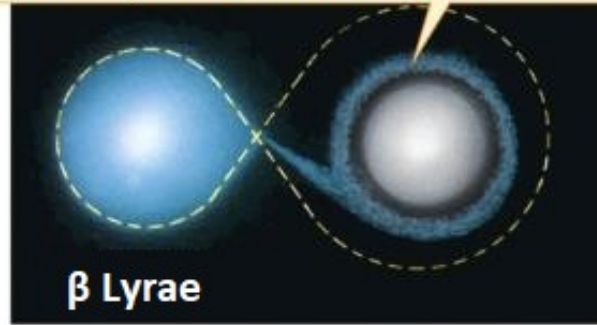
Yıldızlar aynı atmosferi paylaşır

Aşırı değen çiftler: Her iki yıldız da Roche lobundan taşmıştır

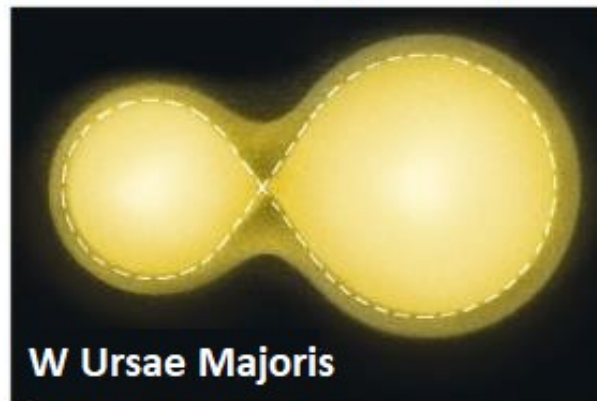


(a) Yarıyirik çift

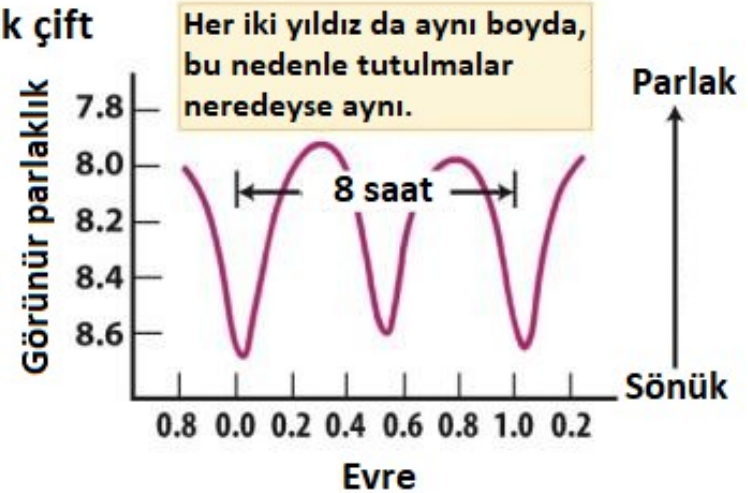
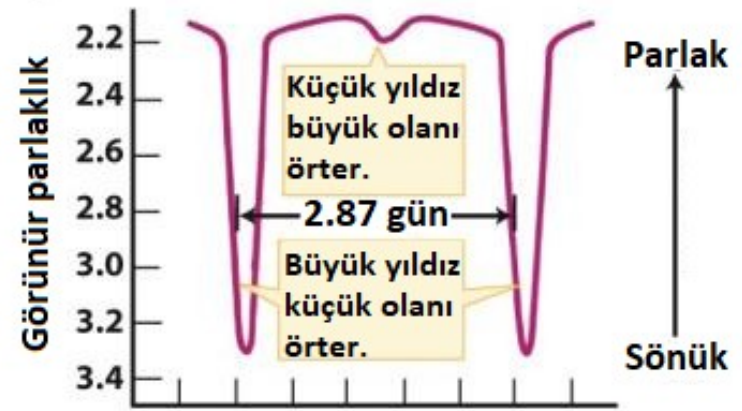
Madde büyük yıldızdan küçük olana aktarılır, birikim diski oluşur.



(b) Kütle transferi yapan bir yarıyirik çift



(c) Aşırı degen çift



Alıştırma Soruları

- 1) Yarıçapı 1 ışık yılı ve kütlesi $100 M_{\text{Güneş}}$ olan bir karanlık bulutunun yoğunluğunu (santimetre küp başına atom cinsinden) bulunuz. Sonucunuzu birim hacim (cm^3) başına 80 ila 600 atom içeren tipik bir H II bölgesinin yoğunluğuyla karşılaştırınız (Bulutsunun tamamen hidrojen atomlarından oluştuğunu varsayınız.)
- 2) $1 M_{\text{Güneş}}$ kütleli bir anakol yıldızının iç yapısı, $5 M_{\text{Güneş}}$ kütleli bir anakol yıldızının iç yapısından hangi açılardan farklıdır? Güneş $5 M_{\text{Güneş}}$ kütleli bir anakol yıldızına mı $0.5 M_{\text{Güneş}}$ kütleli bir anakol yıldızına mı daha çok benzer. Tüm bu yıldızların ortak özellikleri nelerdir?
- 3) Oluşumunun bir aşamasında “Ön Güneş’in” parlaklığı $1000 L_{\text{Güneş}}$, yüzey sıcaklığı yaklaşık 1000 K idi. Bu sırada yarıçapı ne kadardı? Cevabınızı Güneş'in bugünkü yarıçapının katı olarak, kilometre cinsinden ve Astronomik Birimi cinsinden ifade ediniz.
- 4) Yeni oluşan bir önyıldız ve bir kırmızı dev, H-R diyagramında aynı bölgede yer almaktadır. Bu iki cisimi birbirinden nasıl ayırt edebileceğinizi açıklayınız.
- 5) (a) Bugünkü Güneş'in yüzeyinden ve (b) bugünküyle aynı kütleye sahip ancak 100 kat daha büyük bir yarıçapa sahip kırmızı bir dev haline geldiğinde Güneş'in yüzeyinden, maddenin kaçış hızını hesaplayınız. (c) Sonuçlarınız, kırmızı devin bir yıldızın anakol yıldızına göre kütle kaybı konusunda ne söyler?
- 6) Güneş'in $1,2 \times 10^{10}$ yıllık anakol ömrü boyunca ne kadar hidrojen kütlesini helyuma dönüştüreceğini hesaplamak için Güneş'in ışınım gücü değerini ($3,90 \times 10^{26}$ Watt veya saniyede $3,90 \times 10^{26}$ joule) kullanınız. (Güneş'in ışınım gücünün $1,2 \times 10^{10}$ yıl boyunca hemen hemen sabit kaldığını varsayınız) Bu miktar başlangıçta Güneş'te bulunan toplam hidrojen kütlesinin ne kadarına karşılık gelir?

Review Questions

- 7) (a) Anakol yıldızları olan Sirius (A1 tayf türü), Vega (A0), Spica (B1), Fomalhaut (A3) ve Regulus (B7) gökyüzündeki en parlak 20 yıldız arasındadır. Tüm bu yıldızların Güneş'ten daha genç olduğunu söyleyebilir misiniz? Açıklayınız. (b) Gökyüzündeki üçüncü en parlak yıldız, yalnızca 29° kuzey enleminin güneyinde görülebilmesine rağmen, (alfa) Centauri A'dır. Bu, Güneş ile aynı tayf türünden (G2) bir anakol yıldızdır. Buradan Centauri A'nın Güneş'ten genç mi, aynı yaşta mı yoksa daha yaşlı mı olduğunu söyleyebilir misiniz? Gerekçenizi açıklayınız.
- 8) (a) $9 M_{\text{Güneş}}$ yıldızın ve (b) $0,25 M_{\text{Güneş}}$ bir yıldızın anakol ömürlerini hesaplayınız. Bu yaşam sürelerini Güneş'inkiyle karşılaştırınız.
- 9) Bir Cepheid değişeninin renginin, yıldızın salınım dönemi sırasında değişmesini bekler misiniz? Açıklayınız.