

講義テーマ：恒星の誕生と進化 ... HR図、恒星の大きさ、恒星の質量、恒星のエネルギー源、恒星の寿命、恒星の進化、種族IとIIの星たち

### 7.1 HR図

個々の星を、温度（スペクトル型）と光度（絶対等級）を2つの軸とする2次元の図上にプロットしたものを、発見者であるヘルツシュプルング(1905)およびラッセル(1913)の名を冠して**ヘルツシュプルング・ラッセル図**、頭文字をとって**HR図**といいます。図7.1に位置天文衛星ヒッパルコスにより観測された太陽近傍（約500光年）の恒星、図7.2に球状星団47 Tucanaeの恒星のHR図、図7.3にHR図上で星々が占める位置を模式的に示します。同一のスペクトル型(温度系列)に属している星でも、星の明るさ(光度)が非常に異なるものがあります。個々の星々は、HR図上であちこちに群をなしたようにして分布します。図中で左上から右下へ並ぶ星のグループが主系列星です。右上のグループは赤色巨星、左上のグループは白色矮星です。HR図は星の進化や星団の研究には非常に便利な表現として用いられてきました。

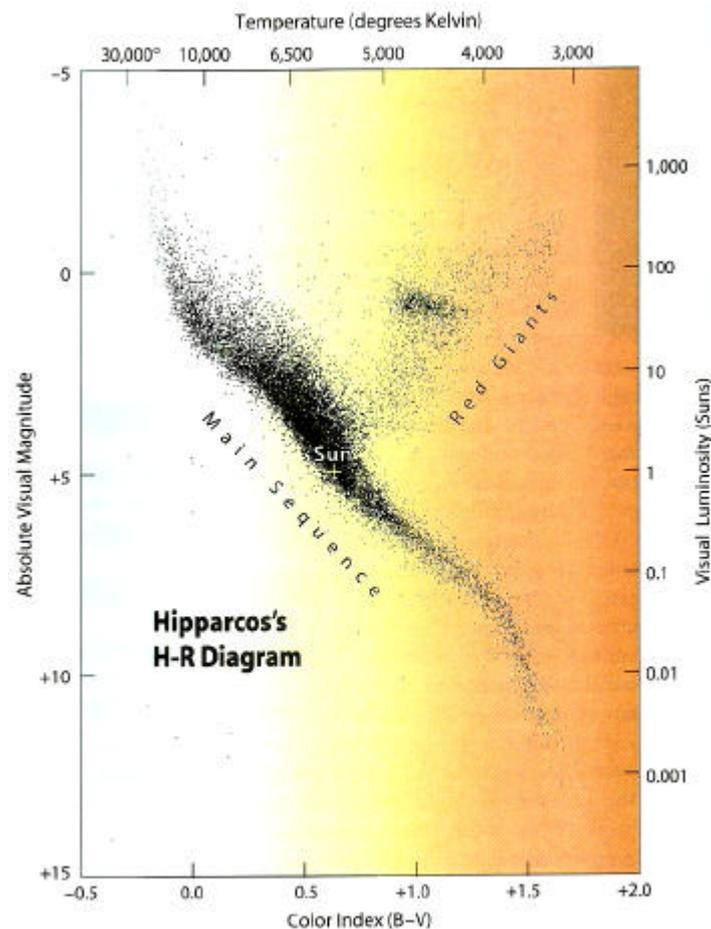


図 7.1 ヒッパルコス衛星で測定した太陽近傍の恒星の HR 図

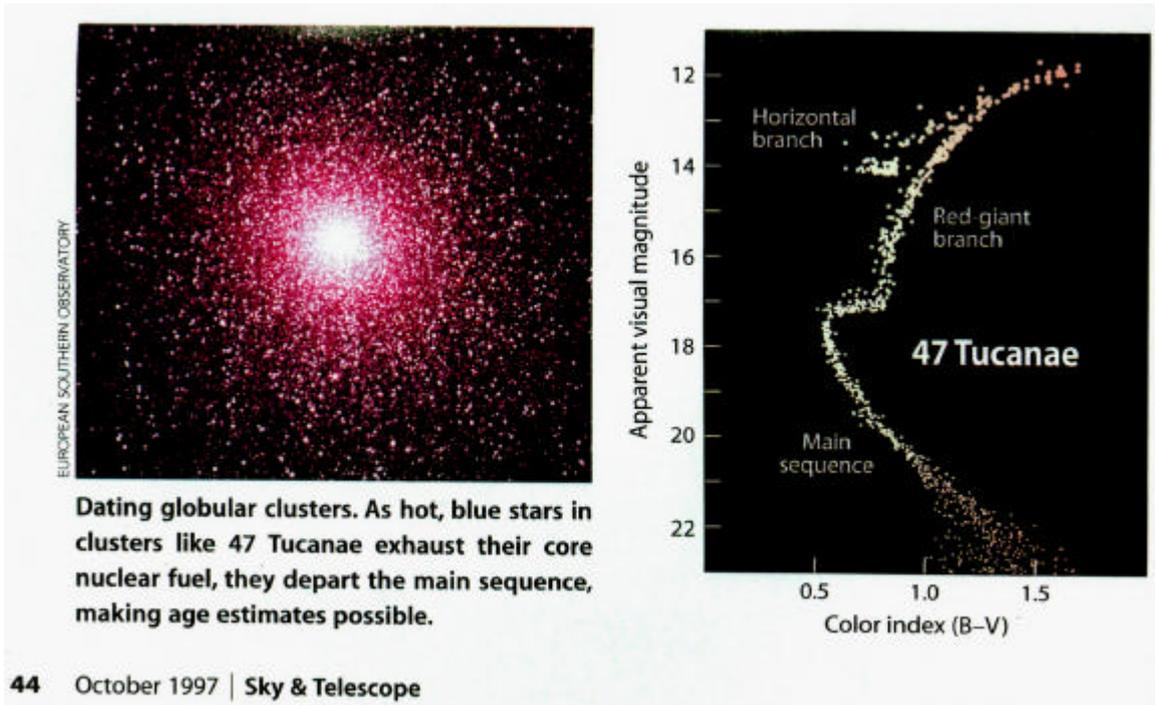


図 7.2 球状星団きょしちょう（巨嘴鳥）座 47 番星の HR 図

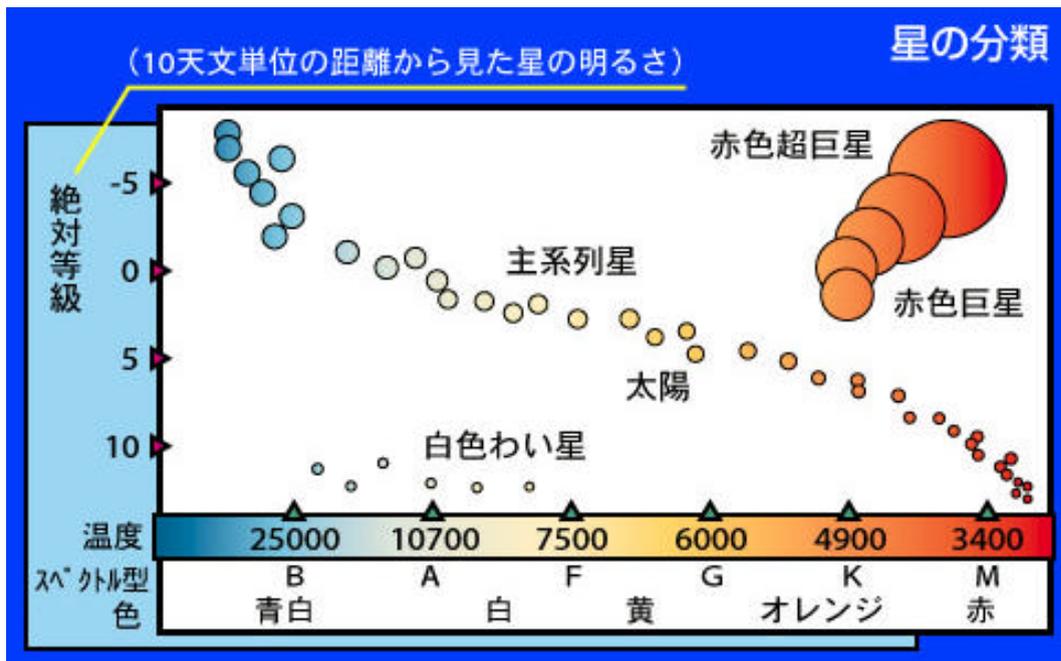


図 7.3 模式的に示した HR 図（参考：NASDA Online Space Note）

## 7.2 恒星の大きさ

これまで学んできたように、恒星の表面温度は、恒星のスペクトルから推定することができます。一方、恒星の MK 分類型が決められれば、その恒星の光度階級（その星が巨星か矮星か）がわかります。このようにして決めた恒星のスペクトル型と光度階級を HR 図にあてはめると、恒星の絶対等級、すなわち恒星の明るさを推定することができます。

恒星の明るさを決めるのは、毎秒放射される全エネルギー  $L$  です。  $L$  は、単位表面積から毎秒放射されエネルギー  $E$  と表面積の積になっており、恒星の半径を  $R$  とすると、

$$L = 4\pi R^2 E \tag{7.1}$$

と書けます。一方、恒星の単位表面積から毎秒放射されエネルギー  $E$  [ J ] は、恒星の表面温度  $T$  { K } の 4 乗に比例するという関係、すなわち、シュテファン・ボルツマンの法則、

$$E = s T^4 \tag{7.2}$$

で表されます。ここで、  $s$  は比例係数です (  $s = 5.67 \times 10^{-8}$  )。この 2 つの式から、恒星から毎秒放射される全エネルギー  $L$  は、

$$L = 4\pi s R^2 T^4 \tag{7.3}$$

と書けます。この式を半径  $R$  について解くと、

$$R = \sqrt{\frac{L}{4\pi s T^4}} \tag{7.4}$$

と表すことができます。したがって、恒星の明るさ  $L$  と表面温度  $T$  から、半径  $R$  を推定することができます。

(7.4)式から、恒星の表面温度が同じ、すなわち同じスペクトル型の恒星では、明るいものほど半径が大きいこと、逆に明るさが同じであれば、表面温度の低いものほど半径が大きいことがわかります。このことを HR 図上で言うと、右上に行くほど恒星の半径が大きく、左下に行くほど恒星の半径が小さいこととなります。

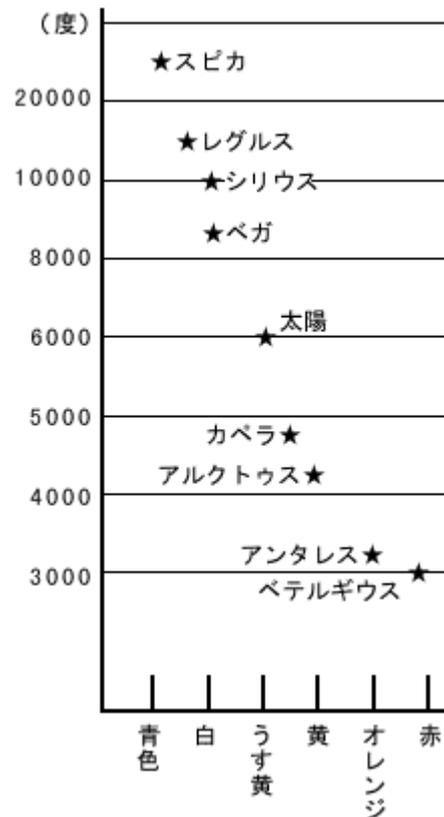
表 7.2 恒星の大きさ

恒星名	スペクトル型	絶対等級	半径(太陽半径の倍数)
ベテルギウス	M 2	-5.5	約 550 倍 ( )
アンタレス	M1.5	-5.0	230
シリウスの伴星	A 2	11.2	0.02 倍以下
シリウスの主星	A 1	1.42	1.76
ベガ	A 0	0.6	3.0
レグルス	B 7	-0.3	3.8

高等学校・地学 B (啓林館) に示された値, 290 倍というデータもある

図 7.4 恒星のスペクトルと表面温度の関係 (岐阜市科学館 web ページより)

色と温度の関係



### 7.3 恒星の質量 (質量光度関係)

恒星の質量は、単独の星からもとめることはできません。そのため、連星から求めます。連星は、

ケプラーの法則に従ってお互いに共通重心を中心に公転しているため、伴星の公転周期と主星・伴星の平均距離がわかれば、ケプラーの第3法則から主星・伴星の質量の和を求めることができます。また、主星と伴星の軌道半径の比が分かるとそれぞれの質量も求まります。

このようにして質量と絶対等級の関係を求めると、主系列星については、質量の大恒星ほど明るく、明るさは質量の約4乗に比例しています。この恒星の質量と明るさの関係を**質量光度関係**といいます。連星以外の主系列星についてもこの関係が成り立つと仮定すると、恒星の質量を、その絶対等級から推定することができます。

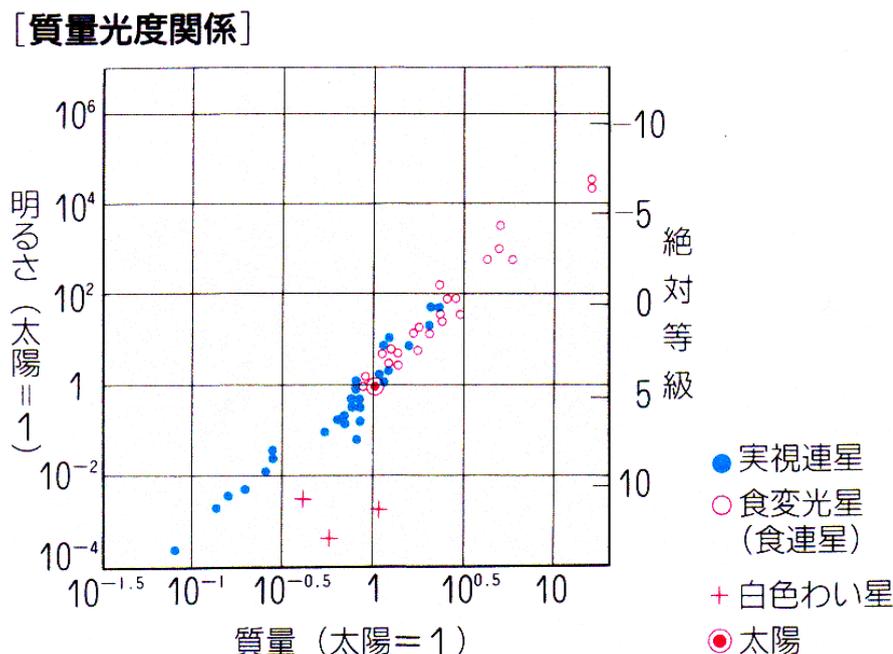


図 7.5 質量光度関係

### 7.5 恒星のエネルギー源

太陽のような主系列星の星々のエネルギーは、中心部で行われている水素の核融合反応によって生成されています。この反応では4個の水素の原子核が融合して、1個のヘリウム原子核をつくっています ( $4\ ^1\text{H} \rightarrow\ ^4\text{He}$ )。このとき、水素の原子量は1.0079で、ヘリウムの原子量は4.0026なので、差し引き  $4 \times 1.0079 - 4.0026 = 0.029$  だけ質量欠損が起こります。アインシュタインの相対性理論より、質量はエネルギーと等価であり、光速度を  $c$  ( $= 3.00 \times 10^8\ \text{m/s}$ )、質量を  $m$  とすると、放出されるエネルギー  $E$  は、

$$E = m \cdot c^2 \tag{7.5}$$

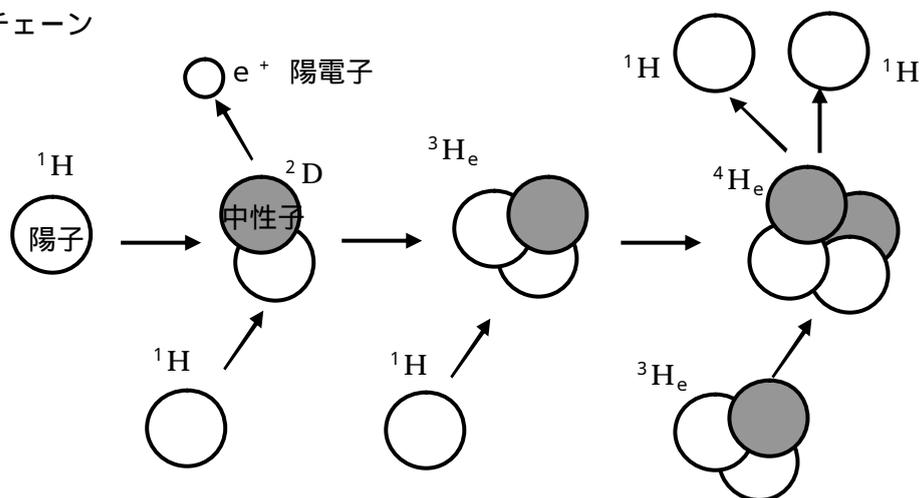
で与えられます。水素 1kg が核融合反応すると、質量欠損は 0.0072kg であり、放出されるエネルギーは  $0.0072\ [\text{kg}] \times 3.00 \times 10^8\ [\text{m/s}] \times 3.00 \times 10^8\ [\text{m/s}] = 6.48 \times 10^{14}\ [\text{J}]$  のとなります。

恒星の内部で核反応が起こるまでの過程をもう少し詳しく説明すると以下ようになります。主系列星の中心部は高温のため、原子どうしが激しく衝突し、原子核の周りを回っている電子がはじき飛ばされ、原子核と電子がバラバラに存在するプラズマ状態になっています。水素原子核は正の電荷を

もつ陽子1個からなっているので、原子核同士が近づこうとすると強い反発力が働き、低温状態では融合することはありません。しかし、温度が高くなり、陽子の運動エネルギーが大きくなると、正の電荷をもつ陽子間で核力（原子核同士を結び付けている力）が強く働く距離、すなわち合体可能な距離まで近づくことができるようになります。このような状態では、次々と陽子が合体を繰り返し、最終的に水素原子核がヘリウム原子核に変わります。

水素がヘリウムに変わる核融合反応の起こり方には、比較的低温（約2000万度K以下）の場合に起こりやすいP-Pチェーンと、より重い星（したがって、中心の温度がより高温の星）の場合に起こりやすいCNOサイクルがあります（図7.6）。CNOサイクルでは、炭素、窒素、酸素の原子核を触媒にして核反応が起こります。炭素、窒素、酸素は原子核の電荷が水素に比べて大きいので、反発力はそれに比べて大きくなり、核力が働くまで近付けるには大きな運動エネルギー、すなわち高い温度が必要となります。星の質量が太陽の1.1倍よりも軽い星（太陽もこれに含まれる）は、中心温度が低いので、P-Pチェーン反応が主体となります。これに対し、星の質量が太陽の1.1倍よりも重い星では、CNOサイクルがエネルギー発生の主体となります。

### P - Pチェーン



### CNOサイクル

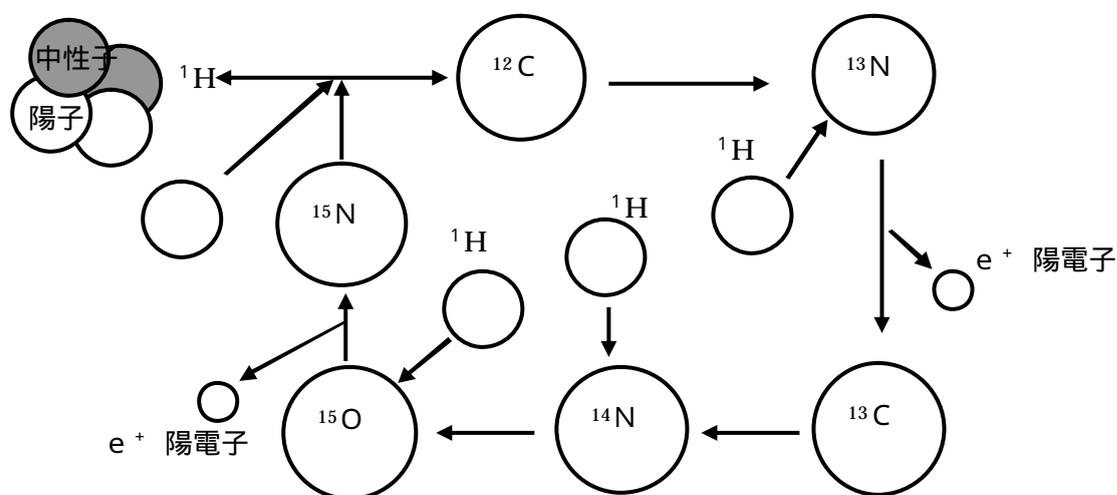


図 7.6 核融合反応の起こり方

## 7.5 恒星の寿命

HR図上で主系列星を見ると、明るい恒星は比較的少なく、太陽よりも暗い恒星が非常に多い。このことから、以下の2つのことが推測できます。すなわち、(1) 明るい恒星の方が誕生する確率が小さい、(2) 明るい恒星は寿命が長く、暗い恒星は寿命が短い。以下で、このうちの(2)について確認します。

恒星が全部水素でできているとすると、恒星の寿命（主系列星に滞在する時間） $t$ は、

$$t = \frac{\text{恒星の質量（水素の量）}}{\text{単位時間に反応する水素の量}} \quad (7.6)$$

ここで、単位時間に反応する水素の量は、恒星の明るさに比例します。

一方、恒星の質量と明るさの関係が、連星と呼ばれる2つ以上の恒星がお互いに公転し合っている場合について調べられています（図5参照）。これによると、恒星の明るさは質量の3.5乗に比例していくことがわかります。この関係を上の式に入れると、恒星の寿命 $t$ は、

$$t = \frac{\text{恒星の質量}}{\text{恒星の明るさ}} = \frac{\text{恒星の質量}}{(\text{恒星の質量})^{3.5}} = \frac{1}{(\text{恒星の質量})^{2.5}} \quad (7.7)$$

となり、質量の2.5乗に反比例する関係となります。すなわち、質量の大きい星ほど急激に寿命が短くなることがわかります。たとえば、質量が太陽の10倍の星の寿命は、太陽の約300分の1、すなわち約3千万年になります。一方、質量が太陽の10分の1の星の寿命は、太陽の300倍、すなわち3兆年になります（宇宙が誕生してからこれまでに経過した時間よりはるかに長い！）。

以上のことから、明るい主系列星は少ないということがわかります。逆にいうと、明るい主系列星、すなわち青い恒星はすべて若い星であるといえます。

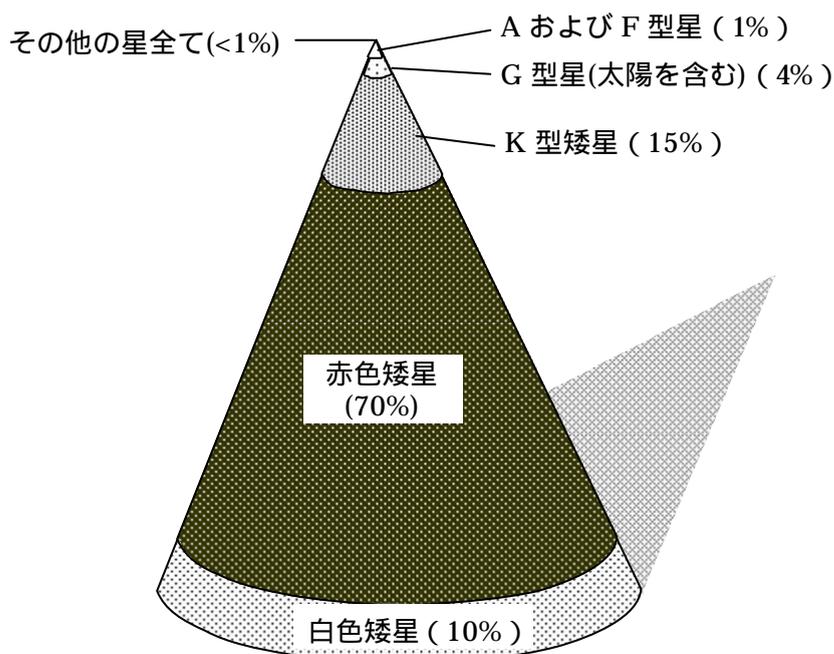


図 7.7 星のピラミッド。暗い星の数は明るい星の数を大きく上回る  
(参考文献:「何が宇宙をつくっているか」、丸善)

## 7.6 恒星の進化（太陽と同程度の質量を持つ星の場合）

太陽と同程度の質量を持つ星を小質量星と呼びます。小質量星における恒星の進化を HR 図上の軌跡として表したものを、図 7.8 に示します。小質量星では、恒星で発生するエネルギーの主要燃料である水素原子を恒星の中心で使い切ってしまうころ、核燃料の廃棄物であるヘリウムを主要成分とするヘリウム中心核が形成され、これが次第に成長してくるとともに、ヘリウム核の周りで水素が燃焼（核融合反応）する水素殻燃焼の段階に入ります。詳しい説明は省略しますが、この段階では、ヘリウム核が成長するに従って水素燃焼によるエネルギー放出率は大きくなり、星は明るくなるとともに、星の半径が増加します。この段階の星を赤色巨星と呼び、HR 図上での恒星の位置する部分を赤色巨星分枝（あるいは赤色巨星分岐）と呼びます。

その後、ヘリウム中心核の質量が太陽質量の半分弱（太陽質量の 0.47 倍）になり、中心温度が 1 億度以上になると、3 つのヘリウム原子核が 1 個の炭素原子に変わるトリプルアルファ反応と呼ばれる燃焼（核融合反応） 更には炭素とヘリウム原子核が融合し酸素原子となる反応が始まります。トリプルアルファ反応は安定な燃焼ではなく、一気に進むのでヘリウムフラッシュと呼ばれます（ただし、単位質量当たりのエネルギー生成量は水素燃焼に比べて 10 分の 1 程度と小さい）。このため、ヘリウム核の中心部に反応生成物である炭素、酸素の核が形成され、炭素・酸素の核の周りでヘリウムが、その外の薄いヘリウムの層の周りで水素が燃焼するという状態（二重燃焼核の状態）になります。この段階の星を漸近赤色巨星段階（Asymptotic Giant Branch）の星、あるいは AGB 星と呼びます。

AGB の段階にある星は、恒星表面から極めて強い恒星風が吹き出し、水素の外層を吹き飛ばしていると考えられています。吹き飛ばされた外層は惑星状星雲として観測されます。外層を吹き飛ばした後、中心には炭素・酸素の核が残り、白色矮星となります。太陽程度の恒星では、太陽質量の 0.55 から 0.6 倍程度の質量の白色矮星が残ると考えられています。白色矮星は、内部に熱源を持っていないのでやがては冷えていき、黒色矮星となっていきます。

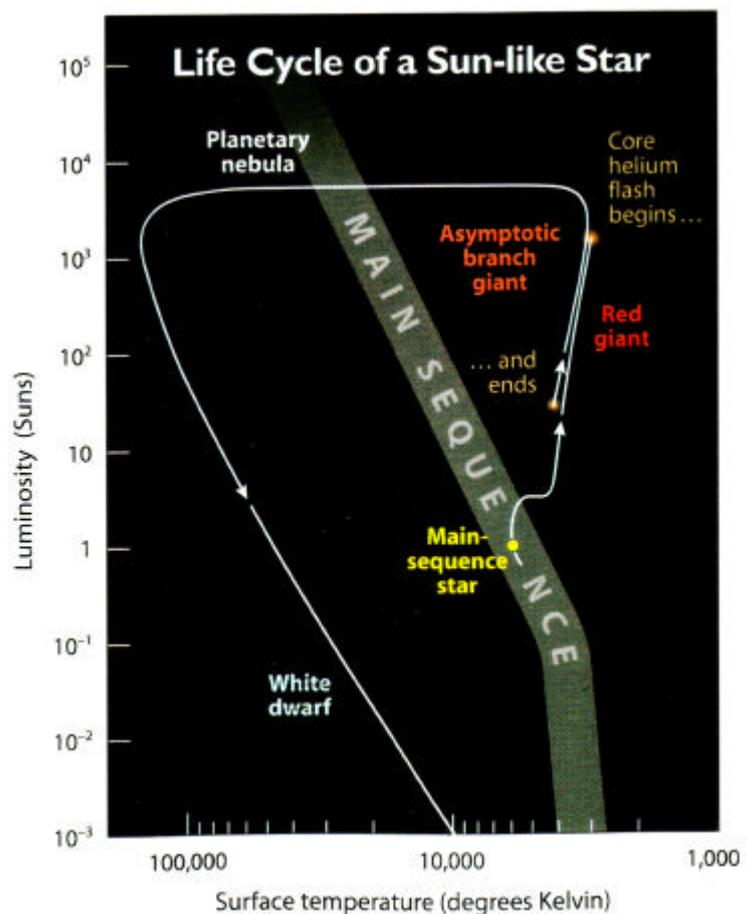


図 7.8 太陽質量程度の主系列星の HR 図上での進化

## 7.6 恒星の進化（太陽の10倍以上の質量を持つ星の場合）

太陽の10倍以上の質量を持つ星を、大質量星といいます。これらの星では、中心核においてヘリウム燃焼、炭素燃焼、ネオン燃焼、酸素燃焼、シリコン燃焼と、次々重い原子核による核融合反応が進行していき、もっとも中心に鉄の核をもつタマネギ状の構造ができます。鉄はもっとも安定な原子核で、これ以上核融合反応を起こさせることができません。しかし、鉄の中心核の温度が重力収縮によって100億度を超えると、ガンマ線を吸って鉄の原子核が、ヘリウム原子核(アルファ粒子)や陽子、中性子に分解を始めます。これは、「鉄の光分解」と呼ばれます。鉄の光分解は、高エネルギーの光子(ガンマ線)を吸収してしまう反応、すなわち吸熱反応なので、中心部の温度は下がり、鉄の中心核は一気につぶれてしまいます。これをきっかけとして、星は中心部の中性子星を残し、残りの外層は中性子星を形成するときの反動で飛ばされてしまいます。これが、超新星爆発です。太陽の20倍程度の質量の星では、上記のような過程を経て中性子星が形成されますが、これよりもずっと質量の大きい星(太陽質量の40倍以上)ではブラックホールが形成される。なお、太陽質量の8倍から10倍程度の質量の星では、上記とは若干ことなる過程を経て、中性子星が形成されると考えられています。

## 7.8 種族 I、II の星たち

星に二つの種族が存在することは、半世紀も前にバーデ(Baade,W.)が明らかにしています。重元素を多量に含む星が種族 I、重元素の少ない星が種族 II です。種族 I の星は、主として銀河円盤に分布し、その典型的な星は青白く輝く若い星です。太陽は種族 I の星です。種族 II の星は、主として銀河円盤のまわりのハローや中心部のバルジに分布し、その典型的な星は赤い色の年をとった星で、年齢は100億年以上に達しています。種族 I と種族 II の関係については、種族 II の星が超新星爆発を起こしたときに生じた重元素を取り込んで、種族 I の星が生じたというのが一般的な考え方です。

一般に使われている用語ではありませんが、この考え方を過去に延長し、種族 II の星に先立って宇宙で最初に形成された星を種族 III と呼ぶ研究者がいます。これは、ビッグバン後に最初に生まれた星で、水素、ヘリウム、ごくわずかのリチウムを含むだけで、それ以外の重元素をまったく含んでいない星たちを指します。ハーバード・スミソニアン天体物理学研究所のエイベルたち( Abel,T. et al., Science 295 )や別のもう一つのグループによるシミュレーションから、この星が太陽の100倍もの質量をもつ巨星だったことが示唆されています。現在、これらの星を探すさまざまな努力が現在も続けられており、銀河系のハロー内や宇宙の果てに近い領域から、種族 III にごく近い星が検出されてきています。

## 参考文献

(1) ヒッパルコス衛星による HR 図

<http://astro.estec.esa.nl/Hipparcos/TOUR/tour-hrdiagram.html>

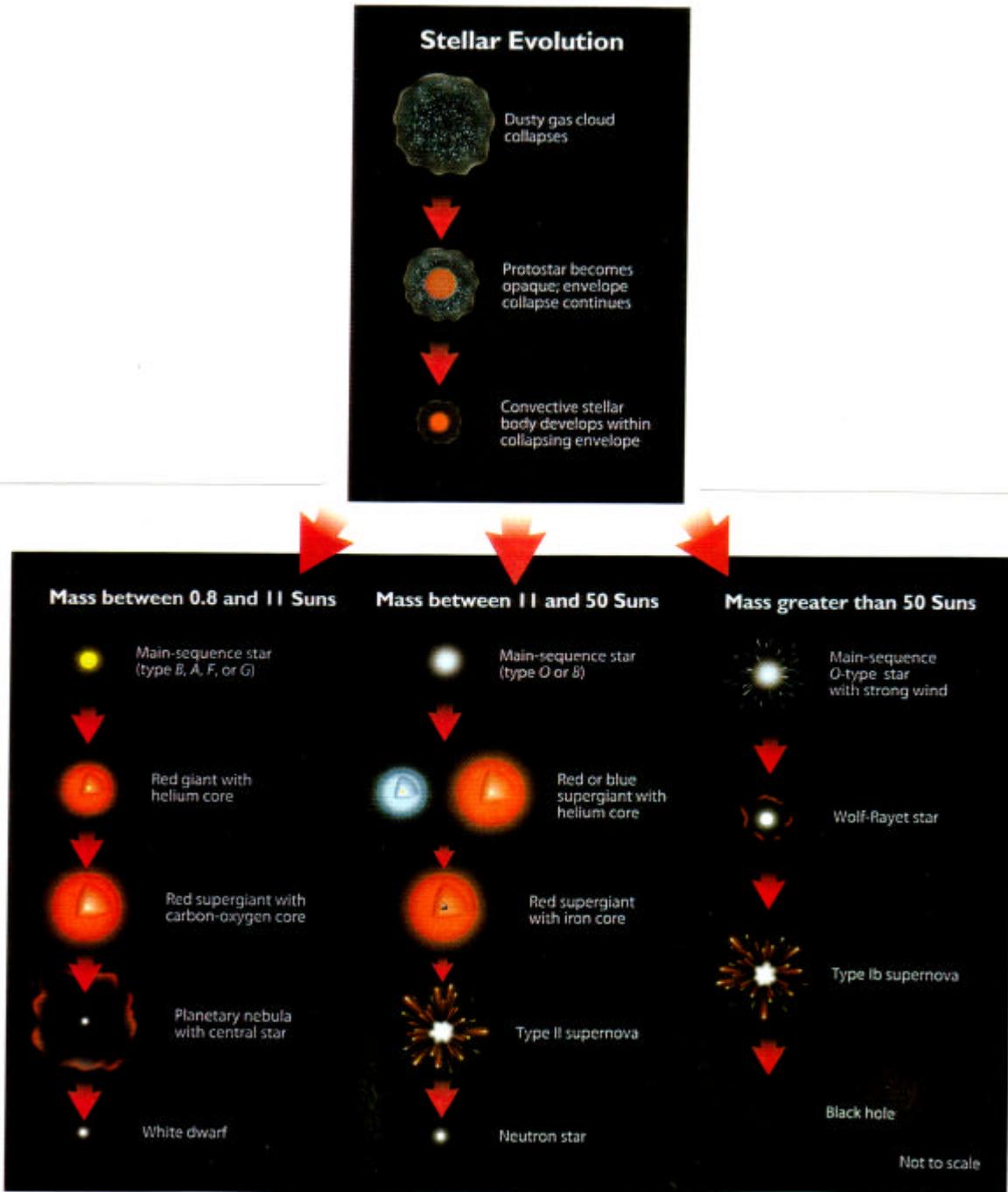
(2) 天体の明るさ <http://www.fujinon.co.jp/jp/club/husigi.htm>

(3) スペクトルによる星の分類 『宇宙スペクトル博物館』CD、裳華房

(4) 恒星の大きさ 地学 B、啓林館

(5) 星のピラミッド Pop Sciece 『何が宇宙をつくっているか』、Richard Fifield 編、土居恒成編・訳、丸善

(6) 恒星の進化 宇宙科学 1、蜂巢泉(東京大学教養学部宇宙地球科学教室 / 講義資料)



SI 図 7.9 恒星の質量の違いによる進化の違い。質量の違いにより、進化の過程及び中心核として形成される天体が異なります。本文とは、質量の区分が若干異なっていますが、これはシミュレーションの条件による違いです（参考：Sky and Telescope）。

