

恒星の進化について

～ゼミナール宇宙科学(第三章)を中心に～

茨城大学理学部理学科物理学コース 4 年

07s2006h 勝又賢治

2011/03/24

1. HR図と星の進化

・ 太陽近傍の星の三角視差 p と V バンドにおける等級 V が与えられている(観測量)ので、

(公式 1) 距離 $d = 1/p$

を用いて、距離 d を計算し、単位のパーセク(1 天文単位の長さが 1 秒角の角度を張るような距離を 1 パーセクと定義する)をメートルに換算するため 3.1×10^{16} をかけた。

与えられている見かけの等級 V と得られた距離 d (m)を、

(公式 2) 絶対等級 $M = m + 5 - 5 \log d$

に代入して、絶対等級 M_V を求め、

(公式 3) $L = 3.0 \times 10^{28} \times 10^{-0.4 M_V (W)}$

に代入して、光度 L (w)が求められた。

次に、与えられている色指数と図 2.6 のグラフを再現した関数 $7200/(色指数+0.6)$ から星の表面温度を求め、

(公式 4) $R = (L / 4 \pi \sigma T^4)^{1/2}$

に値を代入して、星の半径を計算した。また、 $R_{\odot} = 6.96 \times 10^8$ (m)で割って、太陽半径を単位として表した。このように、天文学では太陽を基準にして考えることが多々あります。

太陽近傍の星のHR図を作るため埋まった表の値を用いたところ、絶対等級-色指数、絶対等級-温度の対数、光度の対数-色指数、光度の対数-温度の対数の4種類のグラフが得られた。(図 1 ~ 4)これまでの過程の様に、星の質量など実際に測ることが出来ない物理量を関係から求めることができるというのは、大変意義深いことと言えます。

・ HR図とは

大部分の星はおおよそ同じ化学組成をもっていると言えますが、光度(=ルミノシティ)や表面温度の二つの性質は、星々によって異なっています。1911年デンマークの天文学者 Ejnar Hertzsprung は星の絶対等級(光度を測る)が色指数(表面温度を測る)に対してプロットされると規則的なパターンが現れることを発見し、また1913年アメリカの天文学者 Henry Norris Russell は代わりにスペクトル型(もう1つの表面温度の基準)を用いて類似したグラフの規則性を発見しました。このことから、この種のグラフは今日 Hertzsprung Russell 図または、HR図と呼ばれています。

HR図の最もはっきりした特徴はデータの点がグラフ上に不規則に分散しておらず、数個のはっきりとした領域にまとめられているということです。

☆図 1 ~ 4 を見てください。

大部分の星はHR図上で左上から右下に伸びる帯状の場所に分布します。この帯を主系列と呼びます。我々にとって最も身近な恒星である太陽も主系列星です。主系列星では星の中心域で水素からヘリウムに変換する核融合反応が起こっています。また、主系列では左上の明るくて高温の星は質量が大きく、右下の暗くて低温の星は質量が小さい星です。したがって、主系列星の質量が大きくなればなるほど、光度・表面温度・等級は大きくなることがわかります。

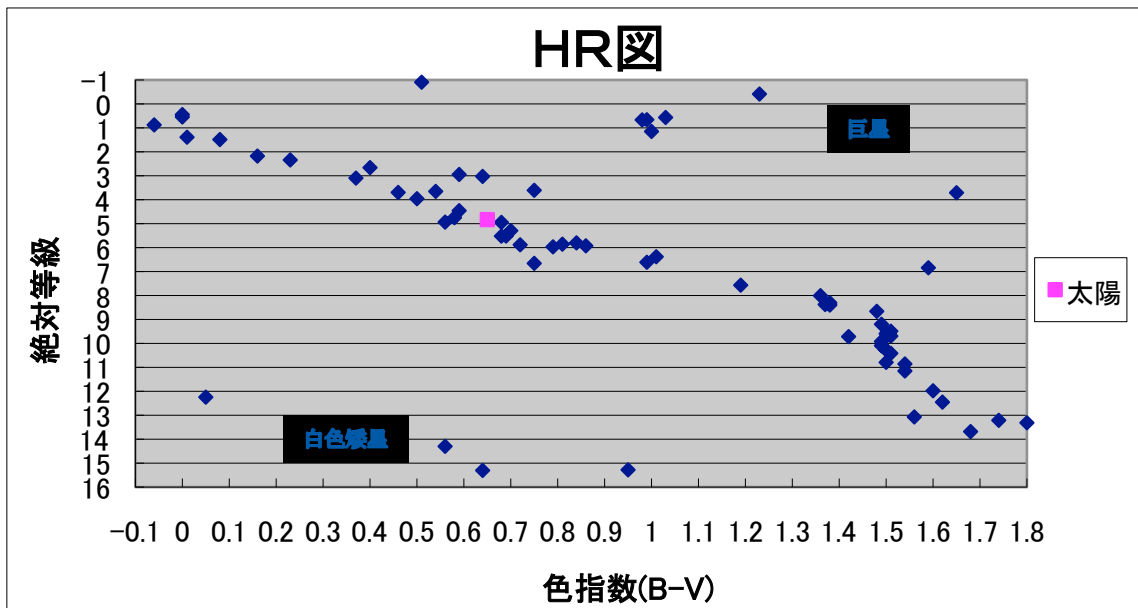


図1

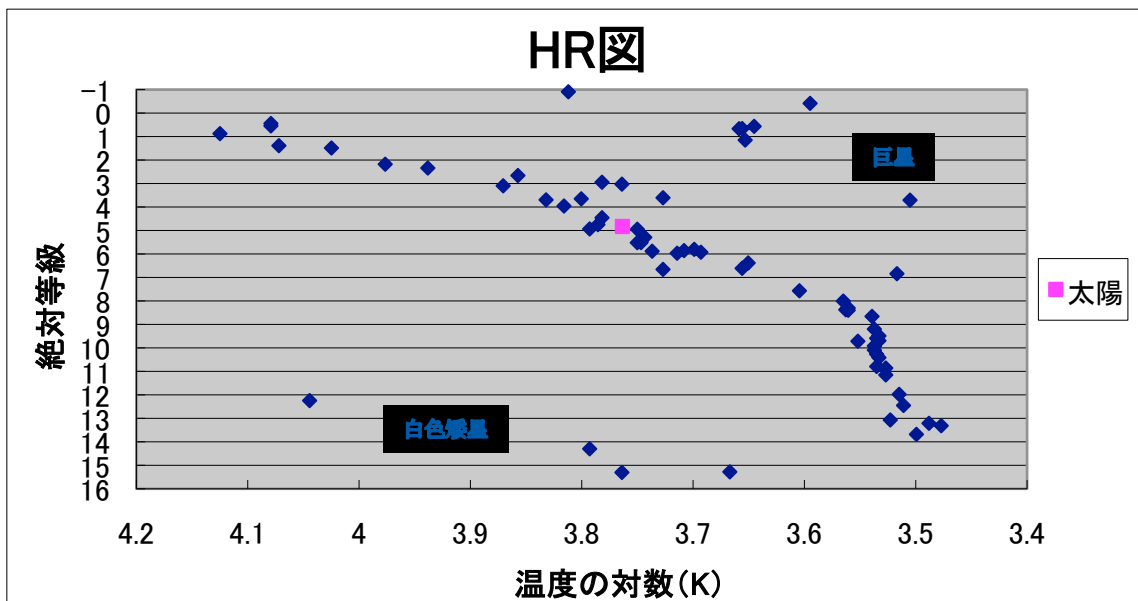


図2

水素が中心でなくなると、エネルギー源がなくなるわけですから、星はこれまでのように輝けなくなります。ここで進化が起こります。星の中心で水素がなくなるとその燃えかすであるヘリウムのコアが形成され、このとき水素燃焼は中心からヘリウムコアの縁に移動します。こうなるとヘリウムコアの外に広がる水素に富む層が大きく膨張します。光度があまり変わらずに表面積が増加するので表面温度は低くなって赤い星になります。これらの進化した星は、HR図上で同じ温度を持った主系列星に比べるとずっと明るく、半径も大きいので赤色巨星と呼ばれます。図1～4のグラフでは、右上に分布している星という

ことになります。また、HR図の左下に分布している、表面温度が高く・光度が低い性質を持つ星は白色矮星と呼ばれています。これらの星はとても暗いため望遠鏡でしか見ることができませんが、大きさはおよそ地球と同じくらいです。白色矮星内では、どんな核反応も起こってはいません。かつて巨星だったときの燃え残りで輝いているのです。

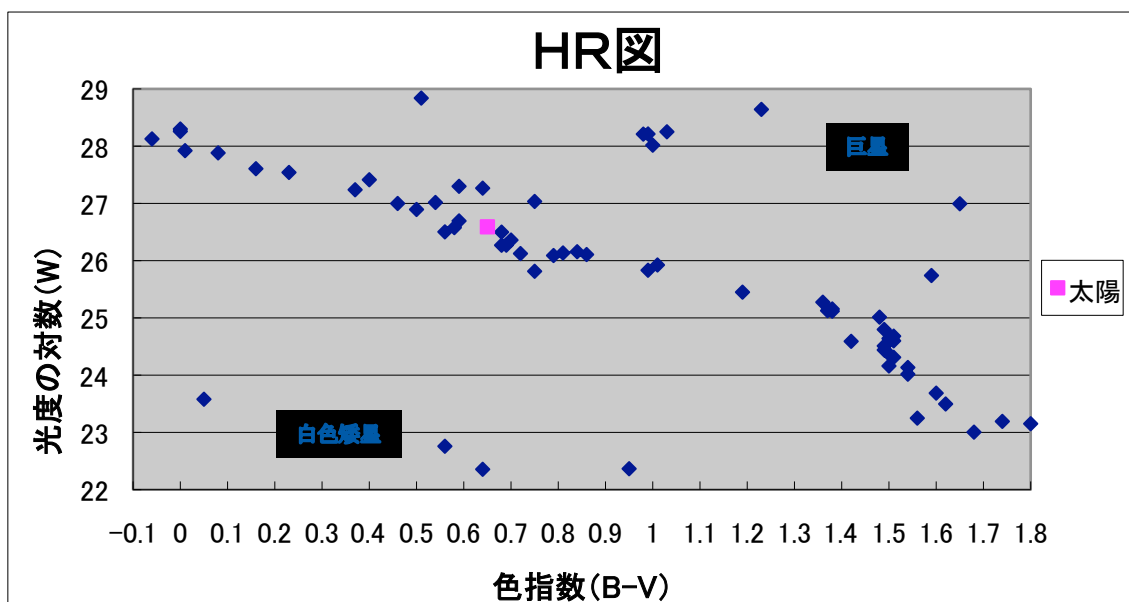


図3

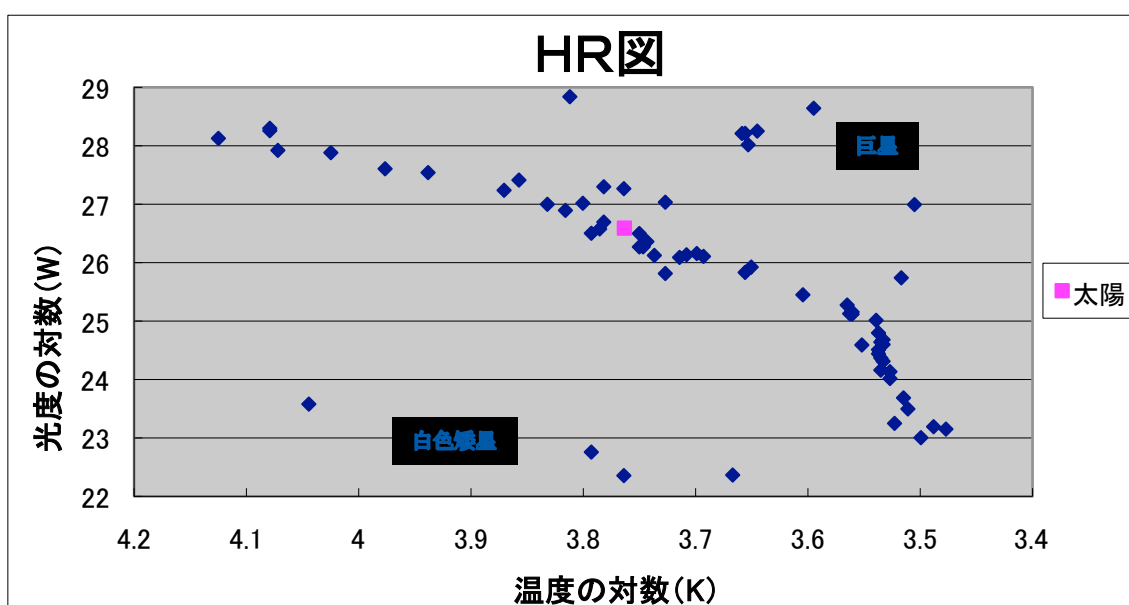


図4

※対数は値が何桁も違う数を扱うとき、大変便利です。

“対数は天文学者の友”

2. 星団について

たくさんの星が集まった星団では星の距離が共通なので、見かけの明るさと色指数だけでHR図をつくることができます。星団のHR図は星の内部構造や進化の理論を観測と比較するときになくてはならない道具になっています。また、HR図を使って星団の年齢や距離を推定することができます。球状星団は銀河ができると同時に形成されたと考えられています。このため、球状星団のHR図は宇宙の年齢や初期の銀河の姿を調べる重要な手がかりになっています。星団は大きく散開星団と球状星団に分類されます。

・散開星団

散開星団は球状星団に比べると星の密集度が低いので、時間がたつにつれてばらばらになっていく運命にあると思われていて、平均寿命は約2億年とされています。

散開星団は、若く青い星を多数含んでおり、主に銀河面に集中して存在しています。

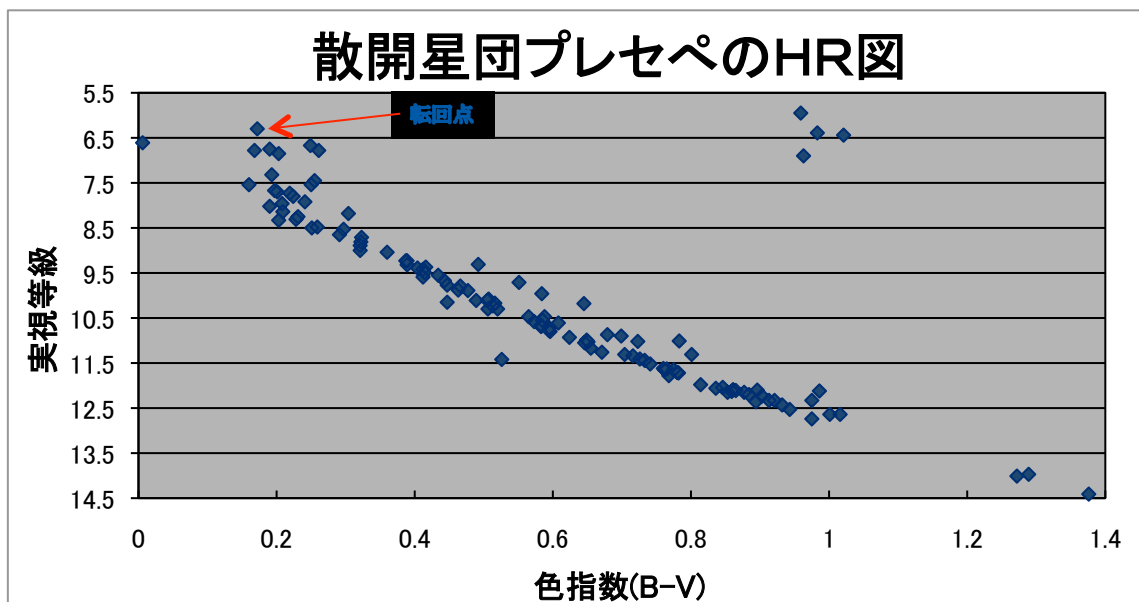


図5

プレセペにはB-Vが0.0以下の主系列星が存在しません。それよりも大質量の短命の星は赤色巨星に進化してしまっていると考えられます。主系列の上端の点を転回点と呼んでいます。古い星団ほど転回点が右下にあります。転回点にある星は、今まさに中心で水素を消費しつつ赤色巨星に進化しはじめているのです。

- ・球状星団

球状星団はその名のとおり球状な分布をしており、散開星団に比べると星の密集度が高いので、長い時間ばらばらにならず存在できます。球状星団は年をとった星ばかりで構成されていて、銀河面に集中せず、広く球状に分布しています。

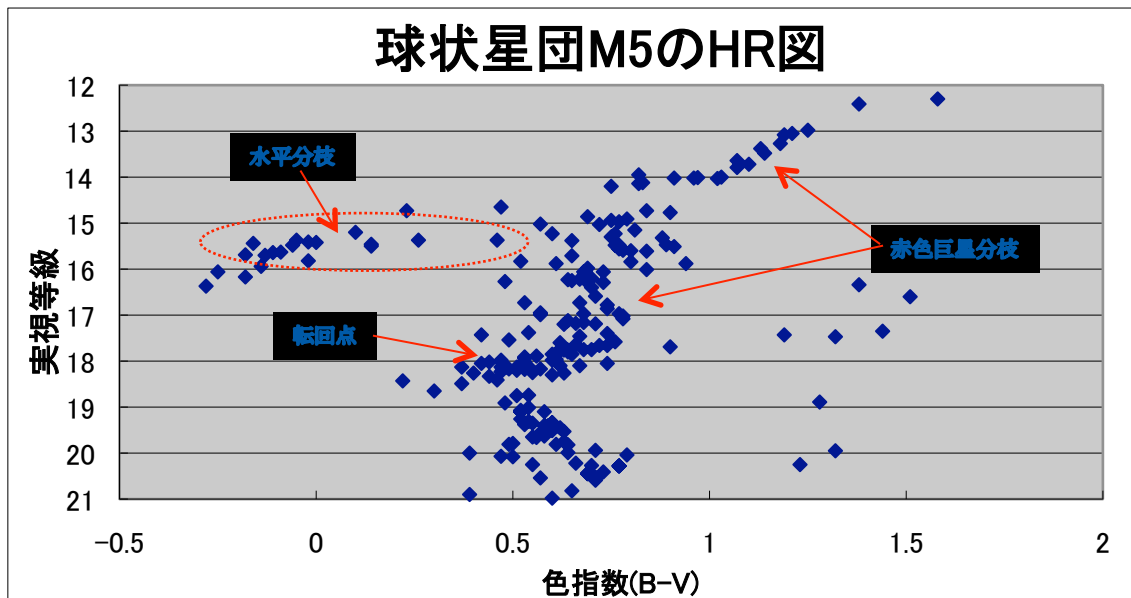


図6

M5は年をとっているので多くの星が赤色巨星に進化しています。このため、転回点から右上に伸びる赤色巨星分枝がHR図に現れます。これらの赤色巨星では中心で水素が消費し尽くされて、その燃えかすのヘリウムコアの縁で水素燃焼が起こっています。ヘリウムコアの質量はこの水素燃焼で少しずつ大きくなってきます。その結果、中心の温度と密度が次第に上昇します。それらが十分高くなると、ヘリウムが炭素になる核融合反応が始まり、エネルギーが解放されます。これをヘリウム燃焼と呼びます。中心でヘリウム燃焼が始まると、膨張していた外層が収縮して青くなります。このとき、星の光度はヘリウム核の質量だけで決まり、全質量や年齢によらず、一定になります。このように、中心でヘリウム燃焼が起こっている星はHR図上で水平に並ぶ(明るさが一定)ので水平分枝星と呼ばれます。図6のM5では $V=15$ あたりに、水平分枝があることがわかります。

図7のきょしちょう座47のHR図をみると、M5に比べて水平分枝が長くないことがわかります。球状星団にも個性があるのです。

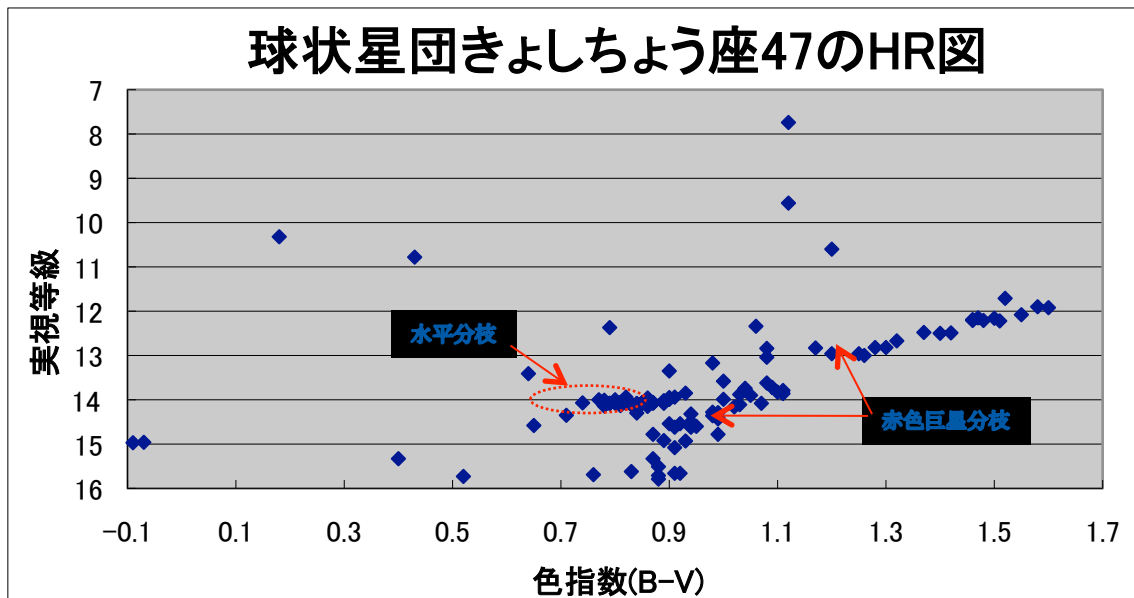


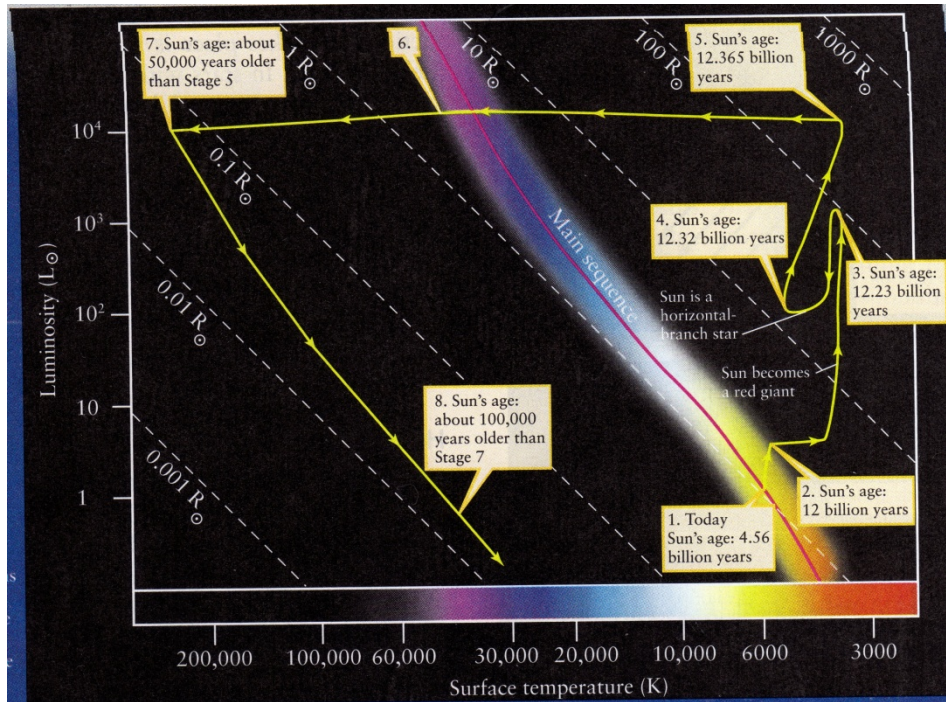
図7

ヘリウム燃焼で単位質量あたりに解放されるエネルギーは水素の10分の1程度なので、ヘリウム燃焼段階(水平分枝)は水素燃焼段階の10分の1の長さで終わります。中心でヘリウムが消費し尽くされると、中心にヘリウム燃焼の灰である炭素と酸素のできたコアができ、ヘリウム燃焼はその縁に移ります。このとき再び星の外層が膨張して赤色巨星となります。その後は次々と中心に重い元素がつくられ、最後には中心に鉄ができます。鉄は最も安定な原子核です。つまり、これ以上融合してもエネルギーが発生しません。ここに至って星の進化は最終段階を迎えます。

星の進化はその星の質量で決まります。質量が太陽の約5倍以上の星の場合は劇的な死をとげます。それよりも小さな星は、星の質量が小さいために星の中心部の温度と圧力が十分に上昇せず、重い元素の燃焼段階には至りません。このような軽い星はその質量に応じた燃焼段階でストップします。このとき、星の内向きの重力は電子の縮退圧と釣り合います。中心で縮退圧が高まるにつれて赤色巨星となっている星の外層はますます膨張し、最後にはその外層の大部分を外に放出してしまい、その芯の白色矮星がむき出しになります。放出ガスがそのまわりに漂い、白色矮星から放出される紫外線を受けて、様々な輝線を放出するようになります。これが惑星状星雲です。時がたつにつれて、惑星状星雲のガスは次第に飛散してしまい、中心の白色矮星が残ります。白色矮星はエネルギー源を持たず余熱で輝いています。白色矮星は次第に冷えそれに応じて暗くなっていきます。

3. 恒星の進化の一例

最後に、太陽の進化の過程についてご説明します。



1. 主系列時代

現在の太陽の状況を表わしていて、コアで水素核融合をしています。

2. 赤色巨星になる

主系列時代の終わりになると、コアの水素核融合反応はストップします。そして、コアの周りの殻で水素核融合が起こるようになります。

3. ヘリウムフラッシュ

コアのヘリウムが炭素や酸素にかわる核融合反応が起こっています。コアの殻では水素核融合が依然として起こっています。

4. 赤色巨星の第二段階

コアのヘリウムが消費されると、コアの内部は炭素や酸素でこうせいされるようになり、コアは輝き暖かくなっていきます。ヘリウムの融合反応は殻に移行します。

5. 太陽の大きさが最大

主系列時代の太陽の 100 倍以上の半径になっています。膨らんだ外層部分は星の中心から遠いために、重力が強くないので、外層部分にあるガスは重力を振りきって宇宙空間に流れ出ていきます(恒星風)。

6. 惑星状星雲

外側から流れ出したガスは惑星状星雲になり、中心星が放つ紫外線によって電離され、以前は星の外層だった元素特有の波長で光っています。

7.核反応の終わり

外層がなくなってしまったため、コアの周りの殻の圧力は核反応が起こるためにはあまりに小さくなってしまいます。その後、高温なため星は激しく成長しますが、エネルギーが電磁波放射されると、星はゆっくりと冷えていきます。

8.白色矮星へ

反応がストップしているので、半径はもはや変化しません。

※図では、 $R_{\odot}$ は一次関数的に表されていて、べきが等間隔になるようにグラフが描かれています。これはべき乗則を対数のグラフで書くと直線になるという性質のためです。

(参考文献)

ゼミナール宇宙科学

UNIVERSE

JAXA ホームページ宇宙情報センター (<http://spaceinfo.jaxa.jp/>)