

## 4 恒星

### 4.1 恒星からの光

太陽以外の恒星は距離が非常に遠い(最も近い恒星でも3光年以上)ので、どんなに大きな望遠鏡で観測しても点光源としてしか観測されない。(口径の大きな望遠鏡は集光力が大きいので、暗い星でも観測することができる。)点光源としてしか観測されないが、光の強さの時間変化、星の色、星のスペクトルなどの観測から、恒星の表面温度、恒星大気元素組成、恒星の運動や振動、恒星の自転の速さなどいろいろな情報が得られる

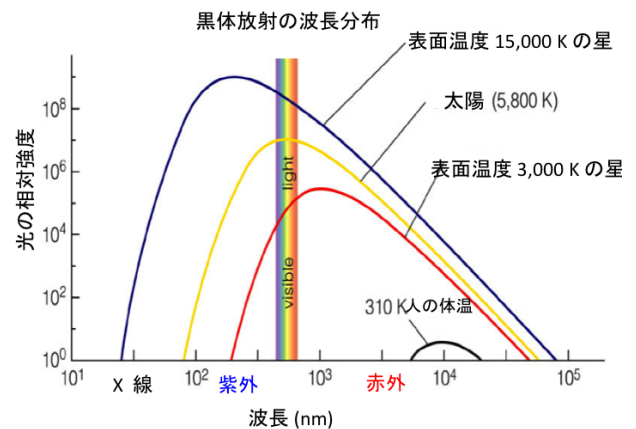
右の写真は、冬の夜空を代表するオリオン座の星々である。明るい星は大きく写っているが、これは明るい星の場合光がにじんで大きく写っているだけで、どの星も点光源である。オリオン座の中の星々は実際の星団を形成しているのではなく、個々の星までの距離はそれぞれ異なっており、それぞれ異なる方向に運動している。そのため、数千〜数万年後には今の星の分布とはことなる分布になってしまうことが予想される。写真中左下の赤っぽい色をした星は、ペテルギウスといわれ、表面温度の低い、太陽半径の二、三百倍程度もある赤色超巨星である。



冬の星座オリオン座の星々

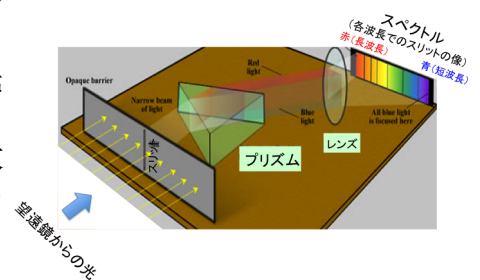
#### 恒星の表面温度と色指数 (B - V)

恒星から発せられる光は、おおよそ黒体放射で、光の波長分布は温度が高いほど波長の短い光を多く出すので、表面温度が低い恒星ほど赤っぽく観測され、逆に温度の高い星ほど青白く観測される。上のオリオン座の星のうち左下の赤っぽく光るペテルギウスの表面温度が3000-3500℃程度であるのに対し、右上にある白っぽい星はリゲルで12000℃程度の表面温度を持つ。この星の色を定量的に表すために、色指数 B - V という量が使われる。これは、波長400nm - 500nmの青い光だけを通すBフィルターを通して測った光の等級Bと、波長500nm - 600nmの黄色い光だけを通すVフィルターを通して測った光の等級Vとの差で、等級は明るい方が小さいので、表面温度の高い星ほど色指数(B - V)の値が小さい。例えば、表面温度3000 Kのペテルギウスの色指数は1.85、5800 Kの太陽の色指数は0.65で、12,000 Kのリゲルの色指数は-0.03である。



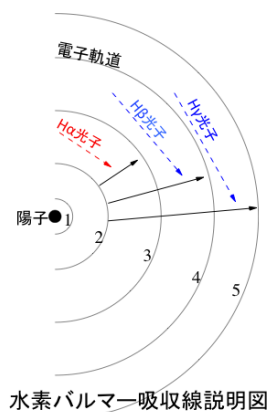
#### 恒星のスペクトルとスペクトル型

恒星からの光を分光器(spectrograph)を使って光の波長に分散させ、光の強さを波長の関数として詳細に調べることによりさらに多くの情報を引き出すことができる。右の図は分光器の原理を表している。望遠鏡で集められた光はスリットを通過後、プリズムまたは回折格子によって波長に対して分散(分光)され、各波長のスリット像が作られる。それが星のスペクトルである。より大きな分散のスペクトルを得るためには、特にくらしい星の場合、大きな望遠鏡でより多くの光を集める必要がある。

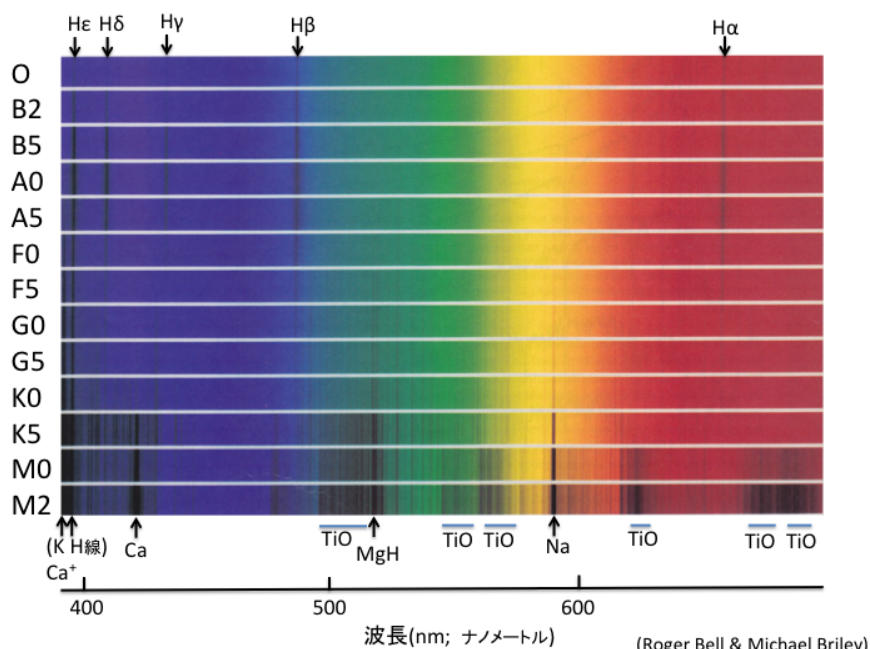


分光器の原理

分光器によって得られる星のスペクトルには、とびとびの波長だけ暗い(光が弱い)吸収線が数多く存在する。これは恒星の表面から出た光がその上にある大気中のガスを構成する原子やイオン中の電子が光のエネルギーを吸収してより高いエネルギー状態(の軌道に乗る)になるためである。量子力学の理論から、原子またはイオンに束縛された電子のエネルギー(軌道)は連続的ではなく、離散的な値を取る。そのため、電子がエネルギーを吸収して高いエネルギー状態になる際、特定のエネルギーの光を吸収する。光のエネルギーは波長に逆比例するので、波長の短い光ほど大きなエネルギーを持っている。したがって、電子がより短い波長の光を吸収すると、より高いエネルギー状態へと遷移する。右の図は、水素原子の電子が2番目のエネルギー状態にあるときに、H $\alpha$ 、H $\beta$ 、H $\gamma$ 線に対応するエネルギー(波長)の光を吸収してエネルギー状態の変化が起こることを示す模式図である。



右の図は、分光観測によって得られる種々の恒星のスペクトルをコンピュータ・シミュレーションしたものである。恒星のスペクトルの様相は、主に恒星の表面温度によって異なり、種々の原子、イオン、分子の吸収線の強さが変化する。そのことから、恒星のスペクトル型が温度が高いタイプから低いタイプへと、O - B - A - F - G - K - M のように設定されている。さらに、隣のスペクトル間は0.12...8.9と細分化され、例えば、A0 A1 A2... A9 F0 F1...のように温度の低いスペクトル型へと並んでいる。



恒星の大気で最も多く含まれる元素は、特別な場合を除いて、水素であるが、水素のバルマー線が最も強く観測されるのはA型でそれよりも温度が高くても低くてもバルマー吸収線は弱まる。これは、温度が高すぎると水素が電離して陽子と自由電子となってしまうので、バルマー線吸収をおこす水素の数が減ってしまうためで、一方温度が低い場合は、水素に束縛されている電子のうちで最も低いエネルギー状態(基底状態)にあるものが増え、バルマー線に関係する2番目のエネルギー状態にある電子の比率が少なくなるためである。(基底状態にある電子が光を吸収して作る吸収線系列は、ライマン系列L $\alpha$ 、L $\beta$ 、などといわれるが、これらの吸収線は、吸収されるエネルギーが大きいためその光の波長が可視光よりも短く紫外線領域に存在するため、可視光のスペクトルには現れない。)

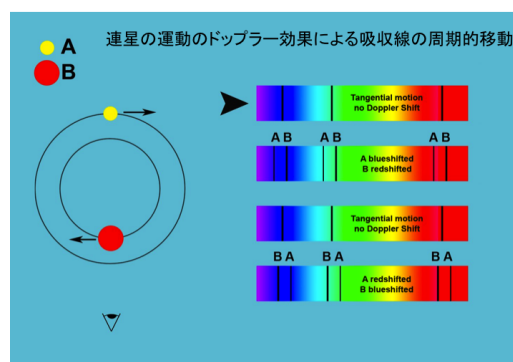
低温の恒星の大気では、複数の原子からなる分子が、ガス粒子の熱運動で壊されず存在できるので、分子が作る吸収線帯が観測される。分子の場合は、電子の軌道運動のエネルギー状態だけでなく、エネルギー状態が密に存在する原子間振動のエネルギー遷移が光の吸収で変化するのでたくさんの吸収線の集まった吸収線帯ができる。とくにTiO(酸化チタン)がつくる吸収帯が低温度星で顕著である。

このように、各スペクトルの特徴は恒星の表面温度で定まるため、各スペクトル型と、表面温度には一対一の対応がある。下の表に見られるように、恒星の表面温度は三千度程度から、十万度程度までの広い範囲にわたる。恒星のスペクトルには、鉄、ニッケル、マグネシウムなどの金属のつくる吸収線も一般に存在する。これらの金属は、恒星大気の温度では原子かイオンの状態、つまりガス粒子として振る舞っている。また、M型星のように低温の星の表面から

十分はなれた低温 (約 1500K 以下) の部分には、SiO、炭素結合体 等からなるダストとよばれる固体微粒子も存在する。

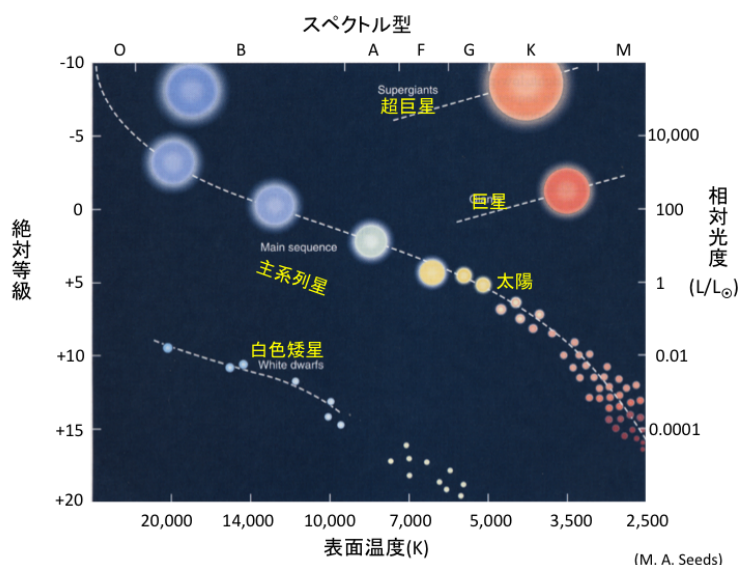
スペクトル型	表面温度 (K)	(B - V)
O	40,000	-0.33
B0	28,000	-0.31
B5	15,000	-0.16
A0	9,900	0.0
A5	8,500	0.13
F0	7,400	0.27
F5	6,580	0.42
G0	6,030	0.58
G5	5,520	0.70
K0	4,900	0.89
K5	4,130	1.18
M0	3,480	1.45

分光器による恒星のスペクトルの観測は、恒星表面の温度や元素組成についての情報を与えるだけでなく、ドップラー効果による吸収線の波長の変化の観測により、恒星の運動についての情報を得ることができる。例えば、連星系をなす二つの星が、遠方であるため一つの光源として見える場合でも、分光観測をすると、(その二つの星の光度が同程度のとき) 二重の吸収線が観測され、互いの共通重心をまわる軌道運動により二つの吸収線の相対位置が周期的に変化することが観測される (右図)。軌道運動の解析により、その二つの星の質量についての情報が得られる。



## 4.2 ヘルツスプルング-ラッセル (HR) 図

恒星の物理状態、進化を議論する上で最も重要な図がヘルツスプルング-ラッセル (HR) 図である。HR 図には、種々のタイプのものがあるが、共通していることは、横軸に恒星の表面温度を表す量 (温度、スペクトル型、B-V 等) を使い、それも左側を高温側とすることと、縦軸には恒星の明るさを表す量 (絶対等級、光度) を採用し、上に向かって明るくなるように目盛をとることである。この決まりに従って描かれた図を HR 図という。右側は簡単化された HR 図の説明図である。



HR 図で最も目立つ特徴は、左上から右下にのびる**主系列**といわれる模様で、大半の恒星は主系列上に位置し、それらは**主系列星**とよばれる。太陽も主系列星の一つである。主系列星の中心付近では、4 個の水素原子核 (陽子) が 1 個のヘリウム原子核になる核融合反応が起こっており、それによるエネルギー発生率がちょうど主系列星の表面から光として出されるエネルギー放出率と釣り合って、安定な状態が長期間続く。

陽子4個の質量は、ヘリウム原子核1個の質量よりもやく0.7%だけ重いので、水素からヘリウムが融合される際に、0.7%の質量分のエネルギー ( $c^2\Delta M$ ;  $c$  = 光速) が放出される。恒星が生まれたときのガスの質量の70%が水素である。中心部の10%にある質量がすべてヘリウムに変えられたとすると、太陽質量の恒星では、

$$0.007 \times 0.1 \times M_{\odot} c^2 \approx 1.3 \times 10^{44} \text{J (ジュール)}$$

のエネルギーが放出される。太陽は毎秒約  $3.9 \times 10^{26} \text{J}$  のエネルギーを出しているので、この放出率で出し続けると

$$1.3 \times 10^{44} \text{J} / (3.9 \times 10^{26} \text{J/sec}) \approx 3.3 \times 10^{17} \text{秒} \approx 1 \times 10^{10} \text{年} = 100 \text{億年}$$

で中心部の水素からヘリウムへの変換で発生するエネルギーを出し切る。このように、水素からヘリウムへの核融合によるエネルギーは膨大なものなので、恒星は生涯の90%程度の長い間主系列星として過ごす。そのため、(HR図上の移動のスピードが非常にゆっくりなので) 主系列上に数多くの星が存在する。

太陽の表面温度は約6000 Kで、G型のスペクトル型をもち、可視光領域の中心の黄色い光を最も多く発する。その太陽の下で生まれて進化してきた人類の目は黄色い光に最も感度がよい。HR図からわかるように、太陽はとくに明るい恒星ではなく、太陽の10万倍も明るい主系列星もある。それらは太陽の100倍もの質量を持っている。一方、太陽よりも非常に暗い星も存在する。

主系列星段階は水素からヘリウムが出来る核融合反応のおかげで長時間安定した段階であるが、中心部の水素の量は有限なので、ある時間経つと中心部の水素が枯渇し、恒星はHR図上、主系列からはなれ、右上に進み、つまり半径が膨らみ、巨星超巨星となる。太陽の現在の年齢は56億年であるので、あと50億年程度で主系列からはなれ、半径が地球軌道程度まで大きくなることが予想される。

恒星が長い時間をかけてその構造、大きさ明るさ等を変化させることを、恒星の進化という。次節で、恒星がどのような進化をするのかを、比較的簡単な原理から理解する。

### 4.3 恒星の構造と恒星が光を発する理由

#### 静水圧平衡

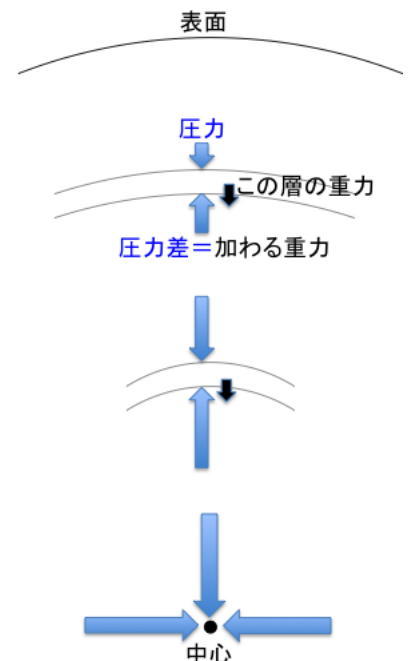
恒星はガスの集合体で、その重さ(重力)は、ガスの圧力が中心に近いほど大きくなっていること(圧力勾配)によって支えられている(右図)。ある点でのガスの圧力はあらゆる方向に同じように働くので、もし圧力が一定であると力は生じない。(我々が気圧の中で暮らしていても力を感じないのは皮膚の内側から気圧と同じ力が外側に向かって働いているからである。)

恒星内部のある薄い層(右図参照)に注目してみよう。その層の単位面積当りの質量を  $\Delta m$  とするとその質量はその場所での重力加速度  $g$ (その層よりも内側にある質量による万有引力)によって  $\Delta m g$  の力で中心に向かって引っ張られる。その層が中心に落ちていかないのは、その層の外側の表面を押している圧力よりも、内側の表面を押している圧力の方がちょうどその層の受ける重力と同じになっているためである。つまり、

$$P(r) - P(r + \Delta r) = (\Delta m)g$$

となっている。ここに  $P(r)$  は中心からの距離  $r$  の場所での圧力を表し  $\Delta r$  は考えている層の厚さを表す。

このガスの重力と圧力勾配との釣り合い(静水圧平衡)によって、恒星内部の圧力は中心に近いほど大きくなる構造が作られる。ガスの圧力は、温度が高いほど、また、ガスの密度が大きい

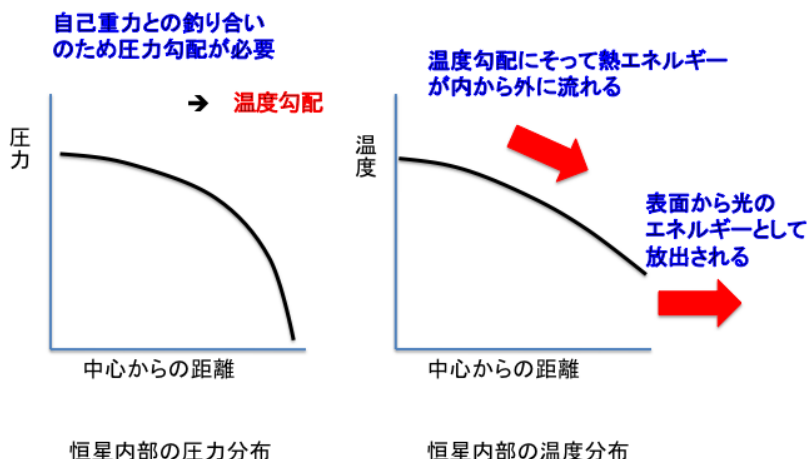


ほど大きくなるので、恒星内部では中心にちかいほど、温度が高く、密度が大きくなっている。この構造が恒星が光を発する原因である。

静水圧平衡が成り立つために圧力、温度及び密度勾配が恒星内部で形成される。温度勾配があると、熱エネルギーが中心(高温側)から外側(低温側)にむかって流れ、表面まで運ばれると光のエネルギーとして宇宙空間に放出される。そのため恒星は光を放つ。

太陽のような主系列星の内部では、運ばれてしまって足りなくなったエネルギーは、中心で起こる水素からヘリウムへの核融合反応によるエネルギーの発生によって補われ、定常状態となっている。

#### 恒星はなぜ光らなくてはならないか



## 4.4 恒星進化の原理

恒星の内部構造とその進化を理解するのにもっとも重要な要素は、恒星内部では、自己の重力(質量)が圧力勾配で支えられていることである。それが原因となって、恒星は光を発し、構造が年とともに変化(進化)する。

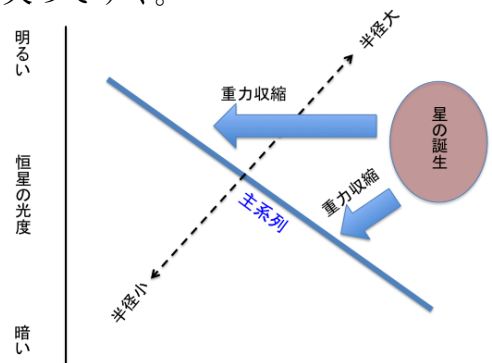


恒星は、銀河の中で星間雲といわれる、空間に漂う星間ガスおよびダスト(塵、個体微粒子)が濃い密度で集まっている領域中、最も密度の濃い場所で、ガス及びダストが自己の重力で集積して誕生する。質量が集積しつつある期間(原始星段階)はまわりにダストが多量に存在していて、可視光は全て吸収されてしまう。そのため恒星の誕生の初期の観測には赤外線または電波が適している。周囲のガス、ダストが薄くなると、可視光でも観測できるようになり、恒星の誕生が完成する。

恒星は、半径が大きく表面温度の低い赤色巨星として誕生する。生まれた当初、中心部の温度は核融合反応が起こるほど高くはなっていない。しかし、内部では静水圧平衡を保つために圧力、温度勾配が出来ているので、熱エネルギーが内部から外側に流れる。その流れは、星の

質量が大きいほど大きく、表面から放出される光も明るい。中心部で核融合反応が起こってなくても、星は自己重力を支えるために輝き、エネルギーを失ってゆく。

中心にエネルギー源がないので、生まれたばかりの星はエネルギーを失うにつれて収縮する。この収縮は、エネルギーの放出に伴ってゆっくりと起こるので、この間静水圧平衡は非常に良い近似で成り立っている。つまり、星は静水圧平衡を保ちながらゆっくり収縮する。このような収縮は重力収縮といわれる。重力収縮で物が中心に向かって移動すると、位置(重力)エネルギーが減少して、その分だけガス粒子の運動エネルギーが増加、つまり熱エネルギーが発生する。



(これは、例えば坂をボールが転がり落ちる場合、ボールの位置エネルギーの減少にともなって、ボールの運動エネルギーが大きくなる現象とおなじである。ガス粒子の場合は、衝突を頻繁に起こすので一方向の運動ではなくランダムな方向の運動エネルギー、つまりガスの内部エネルギーとなる。内部エネルギーが大きい状態が、ガスの温度の高い状態に対応する。) 星が重力収縮すると、質量の集積の度合いが大きくなって内部の重力が大きくなるので、それに対抗してガスを支えるためにより大きな圧力勾配及び温度勾配が必要となる。つまり、中心圧力、温度が上昇する。重力収縮で発生したエネルギーの半分は内部温度の上昇に使われ、残りが温度勾配に沿って流れてゆき星の外に光として放出される。つまり、生まれたばかりの星は、輝くことによりエネルギーを失い、重力収縮し、中心の温度を上昇させる。

重力収縮がすすんで、やがて中心の温度が水素からヘリウムのできる核融合反応が出来る温度(約一千万度;  $10^7\text{K}$ )まで上昇すると、それによるエネルギーの発生率が、静水圧平衡を保つのに必要なエネルギーの流れの速さと釣り合って、重力収縮がとまり、主系列星となる。右の写真は、主系列星になったばかりの若い恒星が集まっている星団スバルである。まだ周囲に残っている薄いガスが星の光に照らされて光っている。



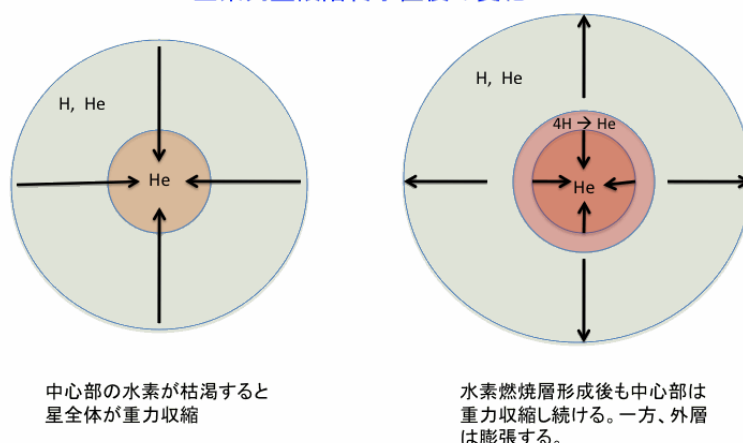
スバル (プレアデス星団  
Pleiades)

主系列星段階では、中心部で水素がヘリウムに変換される際に放出される膨大なエネルギーのため非常に長い期間続くが、水素の量は有限なので、いつか中心部がすべてヘリウムだけになってしまう。そうなると、静水圧平衡を保つために流れるエネルギーの補填が出来なくなるので、星は再び重力収縮を始める。

重力収縮によって内部温度が上昇するので、しばらく重力収縮すると、少し外側で水素がまだ残っている層の温度が一千万度を超え、水素からヘリウムへの核融合反応(水素燃焼)が起こりはじめる。

そこでエネルギーが発生し、外層の静水圧平衡に必要なエネルギーの流れの源になるので、外層の重力収縮は停止する。しかし、ヘリウムだけとなってしまった中心部には熱源がないので重力収縮し続ける。そのため、水素燃焼が起こっている層も中心方向に引き寄せられ、温度が上昇する。核融合反応は温度に非常に敏感で温度が少しでも高くなると、エネルギー発生率が

主系列星段階終了直後の変化



中心部の水素が枯渇すると  
星全体が重力収縮

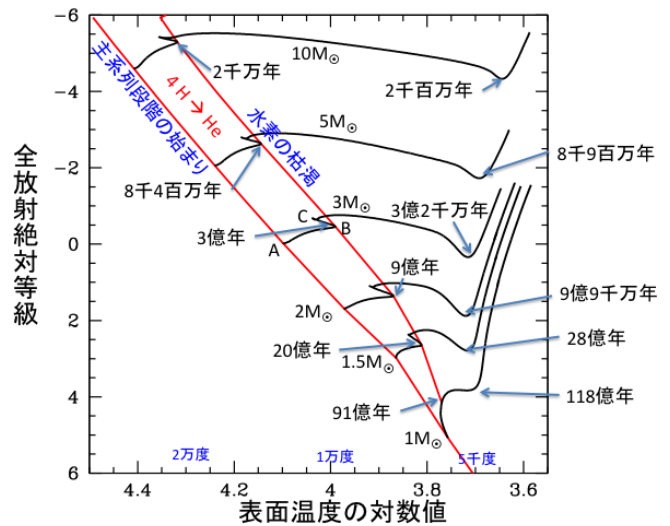
水素燃焼層形成後も中心部は  
重力収縮し続ける。一方、外層  
は膨張する。

急激に増大する。その時点の外層の静水圧平衡の構造に適したエネルギーの流れ以上のエネルギーが作ることになり、エネルギーが外層にたまり、重力収縮とは反対に外層が膨張し始める。このような理由で、恒星はHR図上主系列を離れ、赤色巨星へと進化していく。

右の図は、各質量の星に対し、HR図上で主系列段階から赤色巨星への進化経路と主な点での経過時間を表した図である。図中A点が主系列星段階の始まり、B点で中心部の水素がほとんど枯渇して恒星全体の重力収縮が始まる。C点で外層の収縮が止まるが、中心部が収縮し続けるので、外層が膨張を始める。

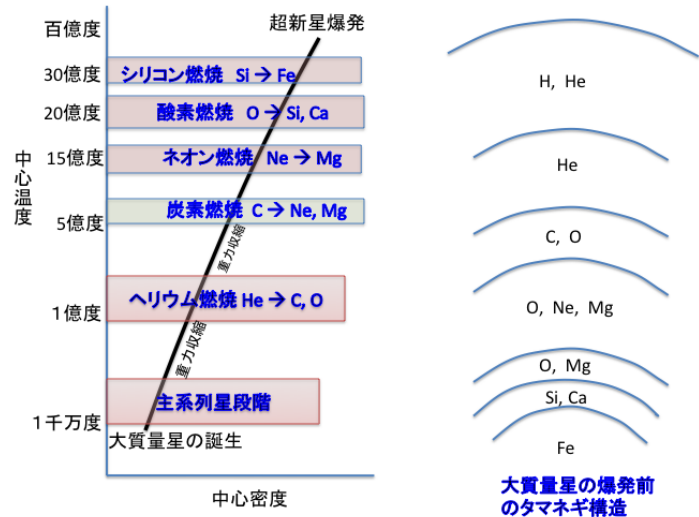
中心部(恒星質量の約10%)の質量の約70%が主系列星段階の水素燃焼で使われる燃料でその量は恒星質量に比例するが、恒星の光度(毎秒放出されるエネルギー)は恒星質量の3～4乗に比例するので、主系列星段階の期間は大質量星ほど短い。そのため、太陽は主系列星段階に百億年以上滞在するが、例えば太陽質量の5倍の質量を持つ星は、8千万年主系列星段階を過ぎた後赤色巨星へと進化していく。さらに質量の大きい星はより短命で、例えば、太陽質量の百倍の星は3百万年足らずで一生涯を終える。

## 主系列からHe燃焼前の進化経路



主系列段階とその後の経路を表す HR 図

外層が膨張して赤色巨星になっても中心部の重力収縮は進行する。やがて中心温度が1億度になると、3個のヘリウム原子核が炭素になる反応(トリプル・アルファ反応)が起こり始める。さらに、生成された炭素の一部が残りのヘリウム原子核と融合して酸素が出来る反応も起こる。これらをヘリウム燃焼という。ヘリウム燃焼が起こりエネルギーの発生が中心部の静水圧平衡を保つのに十分となると中心部の重力収縮がとまり、ヘリウム燃焼の進化段階となる。



ヘリウム燃焼によってヘリウム単位質量当りのエネルギー発生量は、単位質量の水素からヘリウムが生成(水素燃焼)される場合に比べ十分の一の発生量でしかないので、ヘリウム燃焼段階は水素燃焼段階(主系列段階)の20～10%しか続かない。

やがて、中心部のヘリウムがすべて炭素と酸素となってしまうと中心部は重力収縮を始める。重力収縮による温度上昇が次の核燃焼である炭素燃焼を起こすまで進むか否かは、恒星の質量に依存する。

## 大質量星 ( $M \gtrsim 8 - 10 M_{\odot}$ ):

大質量星の場合、重力収縮による中心部の温度の上昇が進み、約5億度になると、二つの炭素が融合反応を起こすことを発端とし種々の反応が起こって、ネオン、マグネシウムが生成される反応(炭素燃焼)が起こりしばしのあいだ重力収縮は止まる。やがて中心部で炭素が消費され尽くすと再び重力収縮が始まり中心温度が上昇し次の核燃焼が起こってより重い原子核が生成される……というプロセスを繰り返し、最終的にはシリコン燃焼によって、最も安定な原子核である鉄が生成される。(炭素燃焼以後は人間の歴史と同じくらいの期間で各燃焼が起こり、後になるほど加速度的に燃焼期間が短くなる。炭素燃焼の期間は約300年、ネオン燃焼、酸素

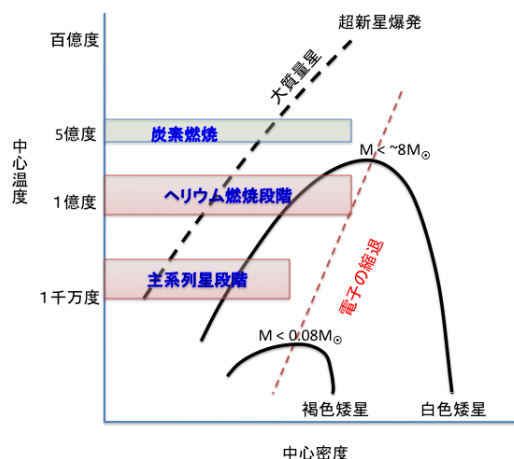
燃焼はそれぞれ半年程度、シリコン燃焼期間は数日である。) 鉄の中心部が生成された段階は、中心に近いほど重い原子核からなる多くの層からなる構造をしており、タマネギ構造ともいわれる(上図参照)。

鉄の中心部は百億度の高温になる。そのような高温では、エネルギーの非常に高い光子によって、鉄の原子核が壊され、エネルギーが吸収され、急激にガス圧力を失うので、中心部は重力に対する支えを失い、中心に向かって落下する。中心部に集まった物質は1グラムで1000億kg物高密度の中性子星になって、その反動で外側の物質は吹き飛ばされ、**超新星爆発**が起こる。

### 中小質量星:

質量が $\lesssim 8M_{\odot}$ の中小質量星の中心温度は、ヘリウム燃焼後の重力収縮で炭素燃焼が起こるまで(約5億度)は上昇しない。

それは、非常に高密度(温度が高いほど高密度が必要であるが、1億度程度だと1cc(1立方センチ)当り100kg以上の密度)になると、ガス粒子の約半分の**電子ガスが(フェルミ)縮退**を起こし始めるからである。通常の恒星の半径 $R$ は質量 $M$ が大きいほど大きいので、平均密度、 $\sim M/R^3$  質量が大きいほど小さく、逆に小質量星ほど恒星の平均密度は大きい。そのため、中小質量星の中心部の密度が重力収縮で大きくなると電子の縮退の影響を受けるようになる。

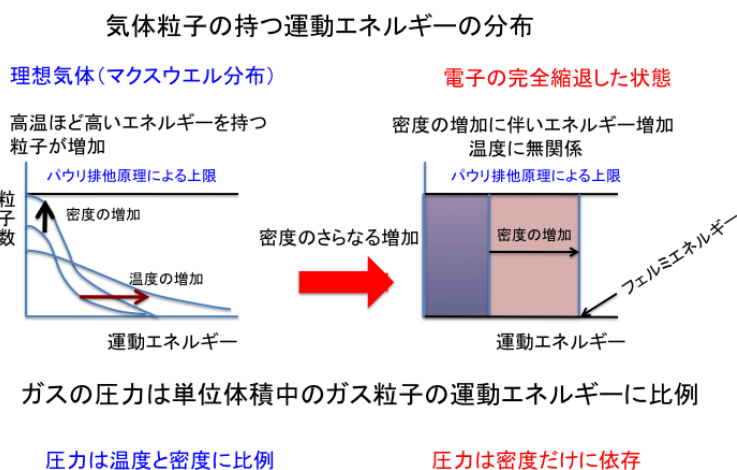


### 電子ガスの縮退:

右図は電子ガスの縮退の説明図である。電子はフェルミ粒子であるので、「同じ場所に同じエネルギー状態をもつ二つ以上フェルミ粒子が存在できない」というパウリ排他原理に従うが、通常の気体(理想気体)の状態では密度が小さいので、この原理に抵触することなく、ある温度での粒子のもつエネルギーは、エネルギーの低い粒子が最も多く存在し、エネルギーの高い粒子の数は急激に少なくなるというマクスウエル分布に従う。この分布では、温度が高いとエネルギーの高い粒子の割合が多くなるのでガスの圧力(単位体積当りのガス粒子の運動エネルギーに比例する)は、温度が高いほど大きい。

密度が大きく、または、温度が低くなると、もっとも割合の多い低エネルギー粒子が、マクスウエル分布のもとでは、パウリ排他原理に抵触するようになる。排他原理によって、低いエネルギーを持てない粒子は、マクスウエル分布で期待されるエネルギーよりも高いエネルギーをもつ。さらに密度が大きくなると、排他原理で制限を受けるエネルギー領域が増加してゆき、極端な場合は、全ての粒子のエネルギー分布が排他原理制限によって決まっていて、あるエネルギー(フェルミエネルギー)までのエネルギー状態がみたまされている状態となる。これが完全に縮退した状態である。

単位体積当りの粒子のエネルギーはフェルミエネルギーが大きいほど大きく、想像できるように、フェルミエネルギーはガスの密度が大きくなるほど大きくなる。そのため、縮退したガスの圧力は温度には依存せず、密度が増加すると大きくなる。



ガスの圧力は単位体積中のガス粒子の運動エネルギーに比例

圧力は温度と密度に比例

圧力は密度だけに依存

### 中小質量星の中心温度の進化:

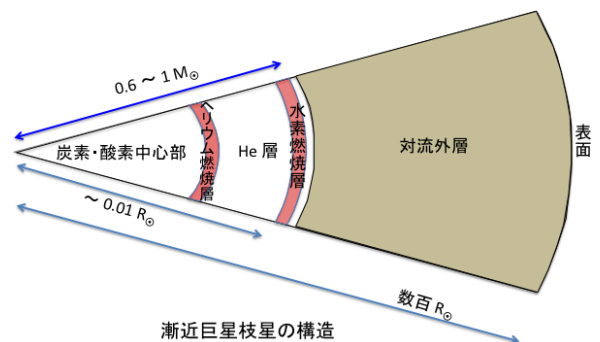
中小質量星のヘリウム燃焼後の中心部の重力収縮では、中心温度の上昇がにぶり、さらに進むと逆に温度が下がる。これは、重力収縮による重力(位置)エネルギーの減少で出てきたエネルギーがフェルミーエネルギーの上昇のためにも使われるようになるからである。

電子が強く縮退した状態では、圧力は密度だけに依存し、大きな圧力がでるので、電子の分圧が原子核の分圧(理想気体)に比べて非常に大きくなっている。そのため静水圧平衡において、恒星の中心部の自己重力は電子の分圧の勾配で支えられている。強く縮退した状態では、圧力は温度に依存せず、必要な圧力勾配は密度勾配によってだけでえられるので、温度勾配は存在せず(等温)で、エネルギーが流れないので、重力収縮は起こらない。ここに来て、自己重力との戦いによる恒星進化はおわる。このような状態は、中小質量星が、その外層を失って最終的に行き着く白色矮星の状態である。白色矮星は、重力収縮せず表面から余熱を放出しながら冷えてゆく。

## 4.5 中小質量星の一生

中小質量星は、中心部でヘリウム燃焼が終わった後、電子の縮退の影響で、重力収縮による温度上昇が十分でなく、炭素と酸素からなる中心部でそれ以上核融合反応は進まない。中心部は縮退した電子の圧力の勾配で支えられ重力収縮はしない。炭素酸素の中心部の質量は、ヘリウム層との境界で起こるヘリウム燃焼によって増加し、一方ヘリウム層と水素の残る外層の間では水素燃焼が起きている。この二つの燃焼層により、ヘリウム層とそれより内側にある質量が増加し、光度が上昇していく。このような構造を持つ星は、**漸近巨星枝星**といわれ、太陽半径の2、3百倍の半径を持つ表面温度3000 K程度の赤色超巨星である。

ヘリウム層とそれより内部の部分の質量は太陽質量程度( $1 \sim 0.6 M_{\odot}$ )であるが半径は太陽半径の百分の一程度である。その外側には太陽半径の百倍以上のまで広がる外層が存在する。外層の質量は、漸近巨星枝星段階初期では数太陽質量あるが、外層の体積は、百倍の3乗で百万倍なので、平均密度は1立方メートル当たり1グラム程度となっており、地球の大気(約 $1 \text{ kg/m}^3$ )よりも格段に密度の薄い状態となっている。このように低密度でも、外層内部では、地球大気と異なり、ガスが電離して原子核と電子にわかれており、光との相互作用が大きいので不透明である。そこでは、エネルギーは対流によって運ばれている。



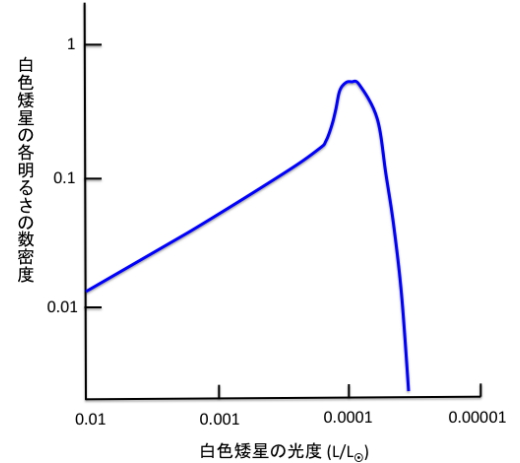
このような希薄な外層は不安定で、大きな振幅の脈動(周期約百日ー1年)を起こすと同時に、外層の質量を急激に失ってゆく。1ー10万年で外層のほとんどを失うと、残りの外層は重力収縮し表面温度が上昇し、赤色超巨星から青色超巨星へと進化する。表面温度が数万度以上になると、エネルギーの高い紫外線が発せられる。その光により、漸近巨星枝星段階で放出されたガスの一部が電離し、電子が再結合するときに蛍光が放出され、ガスが光を発する。それを惑星状星雲という。(惑星とは全く関係ないが、大きさのある天体という意味で付けられた歴史的な名である) 惑星状星雲には、いろいろな形の物が存在するが、その中心には必ず青白く光る天体(惑星状星雲中心星ともいわれる)が存在する。

中心星の外層はさらに収縮して高温となり、表面温度が10万度くらいにまでなるが、周りのガスはやがて散逸して惑星状星雲は消えてゆく。この段階までは、ヘリウム燃焼層、水素燃焼層ではエネルギーの発生が起こっていたが、表面温度が10万度程度までになると、外層の質量が非常に薄くなり、それらの燃焼層の温度が保たれず、エネルギーの発生はとまる。その後は、何も核燃焼エネルギー源を持たない白色矮星として、中心温度と表面温度が冷えながら暗くなってゆく。電子は強く縮退して、そのエネルギーは密度で決まっているので、変化はな

いが、原子核は理想気体に近く、そのエネルギーが表面から出てゆき、冷やされてゆく。

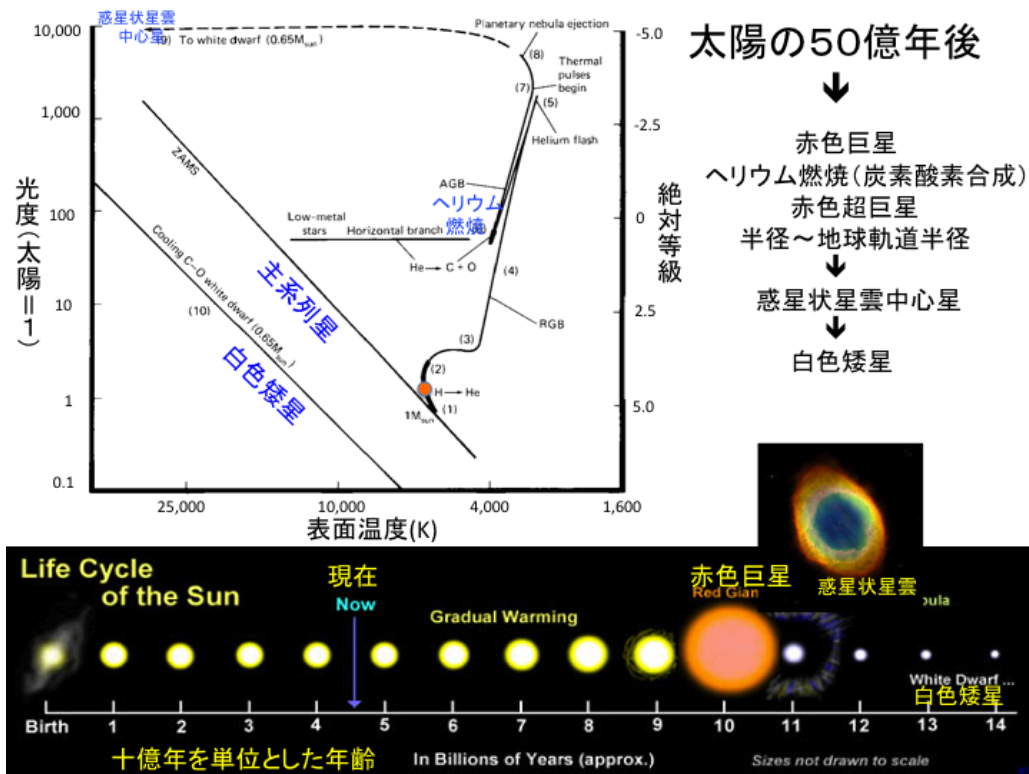
地上で、熱い物がさめてゆく時と同様、白色矮星の内部温度が高い( $\sim 1$  億度)時代ほど冷却の速さが速く、白色矮星が明るい、冷えていくにつれ、暗くなり、ゆっくりと冷却が進む。我々の銀河円盤は約百億年前に生まれたが、最初にできた白色矮星もまだ、太陽の約3万分の1の明るさで冷えてつつある。暗くなるにつれて、ゆっくりと変化が起こるので、太陽近傍の白色矮星の数と明るさとの関係は、暗くなるにつれて数が増加して、限界の暗さ( $L_{\odot}/30000$ )で急激に存在しなくなる。(右図参照)

逆に、限界の暗さと、理論的な白色矮星冷却進化モデルとの比較から我々の銀河円盤がどのくらい以前に形成されたかを知ることができる。



## 太陽の一生:

中小質量星の一例として太陽の一生が下の図に説明されている。



太陽は約56億年前に、星間雲の中で生まれた。重力収縮によって中心温度が約1千万度になると、水素からヘリウムへの核融合反応(水素燃焼)が起こり始めて、表面から毎秒放出されるエネルギーと水素燃焼によるエネルギー発生率が等しくなり、主系列星となった。主系列星になった当初は、一様に質量の約72%が水素、26%がヘリウムであったが、56億年の間の水素燃焼の結果、現在の太陽の中心での水素の量は当初の半分程度になっている。

約50億年後には、中心部の水素が全てヘリウムに変わって、中心でのエネルギー源がなくなるため重力収縮し、それに伴ってヘリウム中心部と水素を含む外層の境界でおこる水素燃焼が活発化し、外層が膨張して赤色巨星となる。水素燃焼層の活動で水素がヘリウムに変えられるにつれて、ヘリウム中心部の質量が大きくなってゆき、それに伴って明るさと半径が大きくなってゆき、その半径は、地球の軌道半径程度になる。

ヘリウム中心部の質量が $\sim 0.5M_{\odot}$ になると、中心部の温度が1億度になり、中心でヘリウム燃焼が急激に始まる(ヘリウムフラッシュ)。中心でエネルギーの発生が急激に大きくなると、そのエネルギーは中心部に吸収され、ヘリウム中心部を膨張させる。中心部の膨張は、その外

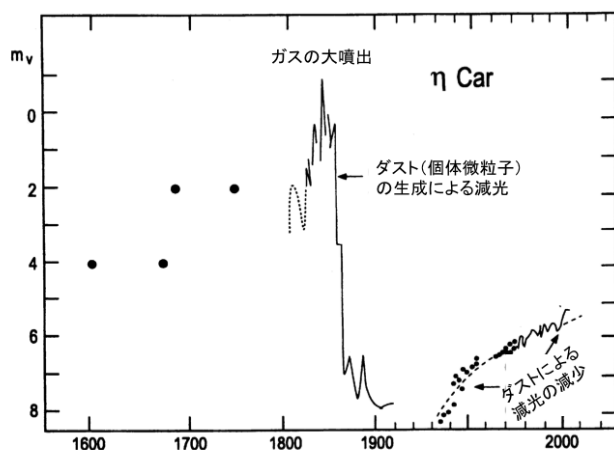
側にある水素燃焼層をおしあげ、その温度を下げるので、水素燃焼によるエネルギー発生率が急激に減少する。そのため、外層は収縮し、光度は、2500 太陽光度から 50 太陽光度程度まで急激に暗くなる。そのような急激な構造の変化の後、中心のヘリウム燃焼、および、ヘリウム中心部と外層との境界の水素燃焼による二つのエネルギー源をもつ安定な構造となり、数億年の間、中心でのヘリウム燃焼段階が続く。

中心部のヘリウムが全て炭素・酸素に変えられると、縮退した炭素・酸素中心部とヘリウム燃焼層、水素燃焼層をもつ漸近巨星枝星となり、再び光度をあげ、赤色超巨星となり、急激に外層を失う。外層のほとんどを失うと(星全体の質量がほとんど中心部の質量 $\sim 0.6M_{\odot}$ となり)、ほぼ光度一定で収縮し表面温度が上昇する、表面温度が数万度になった段階で、放出したガスを光らせて惑星状星雲の中心星となる。ガスはやがて散逸し、さらに進化が進むと白色矮星となって冷却するだけとなり、太陽の一生が終わる。

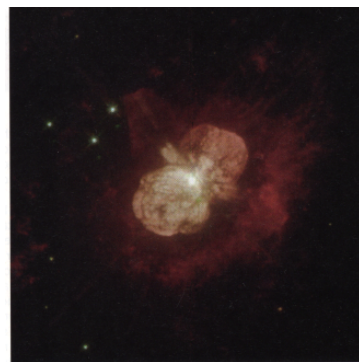
## 4.6 超大質量星の進化

生まれた時の質量が太陽質量のおよそ 50 倍より大きい星は、太陽の 10 万ー百万倍明るく輝く。(その質量を支えるための静水圧平衡の構造の温度勾配のために多量のエネルギーが内部で流され、表面から出てゆく。) その非常に強い放射のために外層が吹き飛ばされてゆく(恒星風)、主系列の期間でも初期の質量の大きな割合が失われる。

このような、明るい恒星は時折大きな質量の質量の噴出をおこす。その、もっともよく知られている星が、 $\eta$  Car とよばれる星である。 $\eta$  Car は見かけの等級は 5 等級であるが、約 8000 光年の彼方にあるので、実際の光度は非常に明るい。 $\eta$  Car の質量は太陽の 100 倍程度と見積もられ、最も質量の大きな恒星の一つである。 $\eta$  Car のハッブル宇宙望遠鏡による写真には二つのボールをつなげた様な形をした星雲が見られる。これは、19 世紀の半ばに現在の明るさの 100 倍の明るさに観測された時期があり、その際に何らかの原因で太陽質量程度の質量が噴出されそれが、2 方向に現在も飛び去りつつある姿であると説明される。実際、ガスの運動速度をドップラー効果で計測しきかのぼると、19 世紀の半ばに放出されたガスである結論されている。



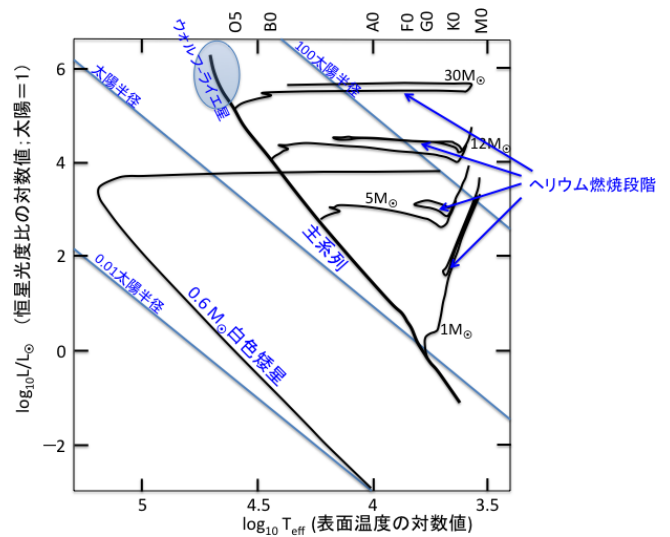
$\eta$  Car の歴史的光度変化



現在ハッブル宇宙望遠鏡で観測される  $\eta$  Car

このような、超大質量星は、質量放出によって水素を含む外層のすべてを失い、水素燃焼によって生成されたヘリウムからなる中心部が表面に出てくる。このように表面が主にヘリウムとなってしまった星は、ウォルフ-ライエ星とよばれる。ウォルフ-ライエ星もはやいスピードで質量を空間に放出している。

右の図は種々の質量を持つ恒星のHR図上での進化経路を表した図である。約8太陽質量より小さく生まれた星は、赤色超巨星段階で水素を多く含む外層を失い、最終的には太陽質量の0.6~1倍質量をもつ白色矮星となる。



## 4.7 星団のHR図と年齢

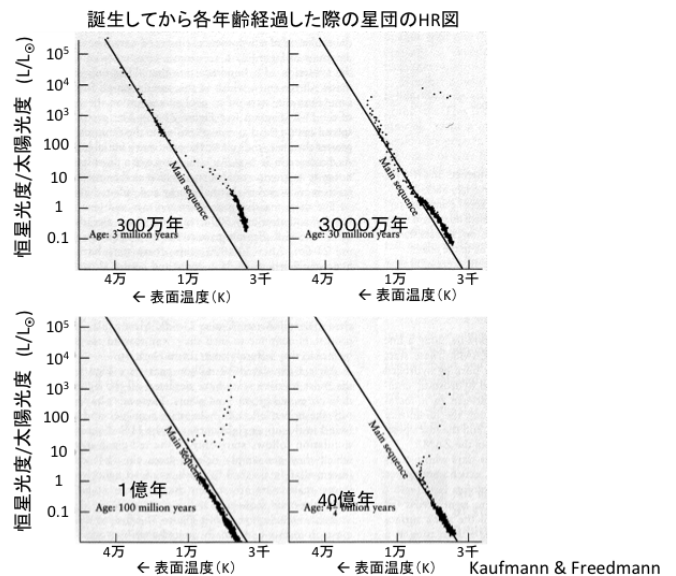
恒星は集団で生まれ星団を作っていることが多い。星団には大きく分けて散開星団と球状星団とがある。散開星団は銀河の円盤部に存在し、若い(数百万年の)星団から、古い(百億年の)星団まである。一方、球状星団は我々の銀河の形成初期に形成された星団で、年齢は百億年以上である。球状星団は、我々の銀河を取り囲むハローといわれる球状の領域に存在する。



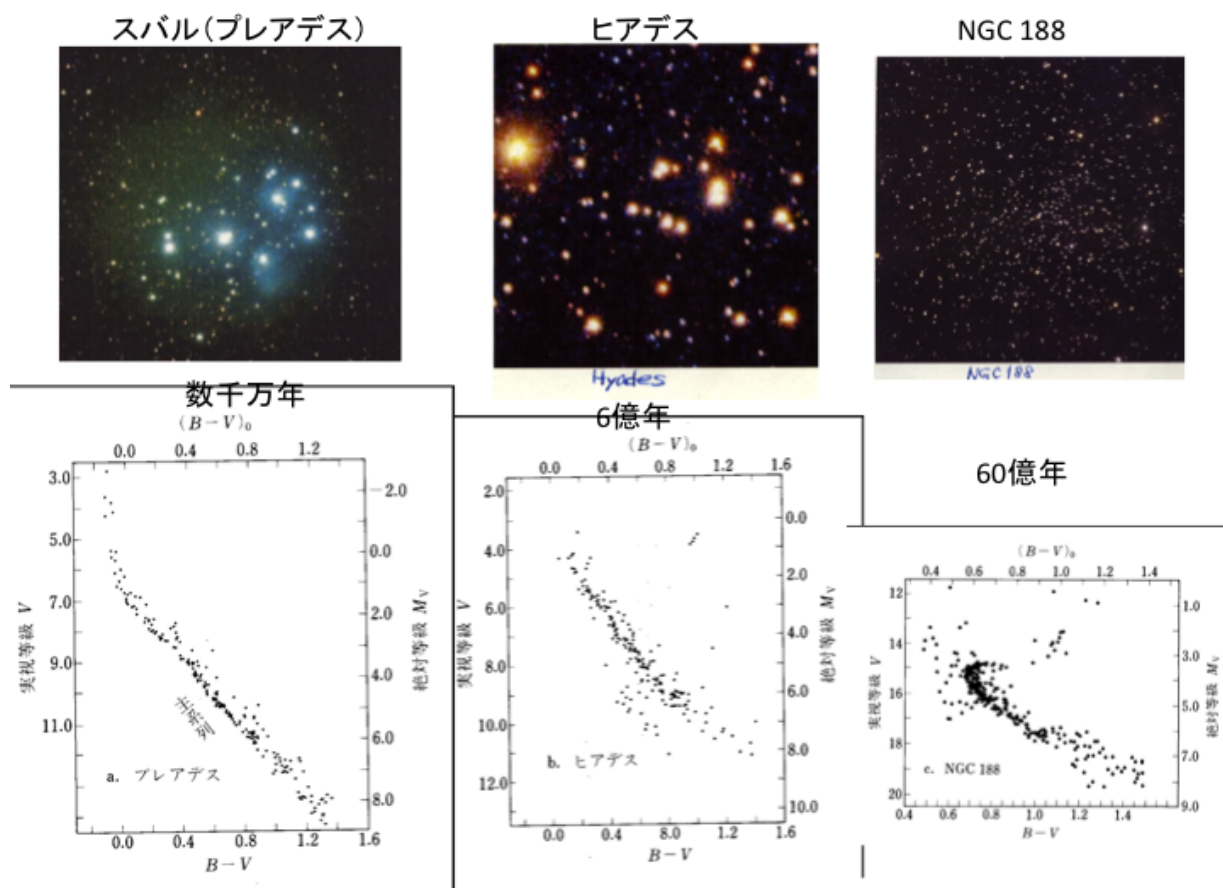
散開星団 (左) と 球状星団 (右)

右の図は、恒星がある領域でほぼ同時に誕生して星団を構成し、各年齢が経過したときに予想されるHR図中の恒星の分布を表している。恒星は誕生時、内部温度も表面温度も低いのでHR図上右側に存在する。重力と圧力勾配の釣り合い(静水圧平衡)構造によって出来る温度勾配を流れるエネルギー(星の光)は、収縮によって重力エネルギーを熱エネルギーにかえることによってまかなわれる。収縮すると恒星内部と表面温度が上昇するので、星はHR図上左(高温)側にほぼ光度一定で移動し、中心温度が千万度になって水素からヘリウムができる核融合反応が起こる主系列(main-sequence)まで達する。重力収縮は、質量が大きくて明るい星ほど速く進むので、若い年齢の星団のHR図(例えば300万年の図)では、明るい星は既に主系列星になっているのに暗い星はまだ主系列星よりも表面温度が低く、重力収縮の途中である。

主系列星の進化も質量が大きくて明るい星のほうが速く進み、先に主系列から離れ赤色巨

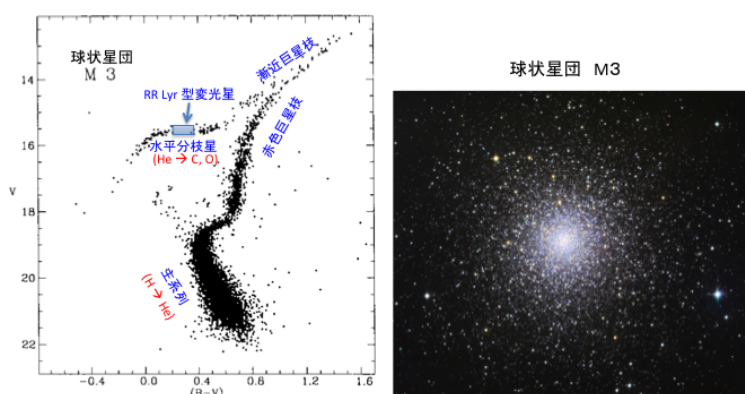


星となってゆく。そのため、年齢が大きい星団ほど、最も明るい主系列星の明るさが暗い。この特徴を使って、星団の年齢を知ることができる。下の図では、プレアデス星団、ヒアデス星団、NGC 188 と、年齢が若い散開星団順に HR 図が並べられている。



右の図は、我々の銀河内の球状星団のひとつである M3 の写真と HR 図である。年齢は、110 億年程度なので、主系列星として残っているのは太陽質量の 80% 以下の星である。球状星団の HR 図の特徴の一つは、水平分枝で、そこにある星の中心部の温度は 1 億度以上で、ヘリウムが炭素および酸素になる核融合が起こってエネルギーが発生している。水平分枝の中間の位置には周期が約半日の RR Lyr 型脈動変光星が位置する。

中心のヘリウムが全て炭素、酸素に変えられてしまうと、漸近巨星枝星となり、そこで外層のほとんどを失い、白色矮星へと進化する。

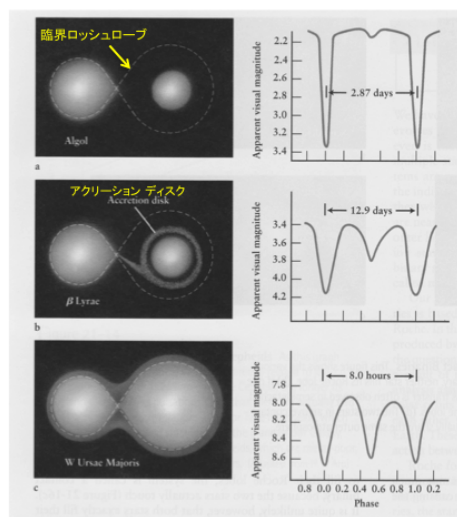


#### 4.8 近接連星系内の恒星の進化

恒星の半分またはそれ以上は伴星と連星系を形成している。そのうち、伴星との距離が近く、恒星進化の途中で星の半径が大きくなり伴星の重力圏内に入って、質量の移動が起こるような連星系を近接連星系という。近接連星系ないでの恒星の進化では、臨界ロッシュローブと云われる、二つの星の重力圏の境界を表す曲面が重要である。

質量の大きいほうの星(主星)が速く進化するので、主系列段階後膨張して半径が大きくなって臨界ロッシュローブを満たすと、二つの星の臨界ロッシュローブが接する点(ラグランジュ点)を通して質量の移動が起こる。伴星の半径が比較的小さい場合は、移動してきたガスは直接伴星にぶつからず、回転のための遠心力と星からの重力が釣り合って、アクリションディスクを形成する。アクリション中で回転するうちに、角運動量を失って、ガスは伴星に降積する。主星の半径の増加率が大きく、伴星への質量の移動率が大きすぎると伴星も膨張しロッシュローブを満たす場合がある。このような場合は、二つの星の一部が接触している接触型近接連星系となる。このような近接連星系を、軌道面方向からあまりかけ離れてない方向から観測している場合、二つの星が互いに隠して(食を起こして)特徴的な変光を示す。

#### 近接連星系の食による変光



Kaufmann & Freedmann

近接連星系を構成する二つの恒星の質量とその比、および、二つの星の重心間の距離によって、質量移動が起こる際の恒星の進化段階が異なり、それによって質量移動率も異なるので、近接連星系内の恒星進化は多様である。例えば、近接連星系内での進化の最終段階で両方とも白色矮星となり、二つの白色矮星からなる近接連星も多数発見されている。それらの軌道周期は短く数日以下で、半日以下の場合も見つかっている。

## 4.9 脈動変光星

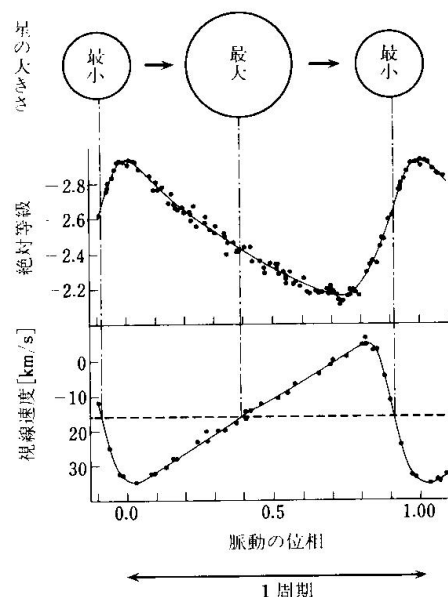
恒星の多くは周期的に変光を示す。その中には、共通重心の周りを軌道運動する近接連星系の片方の星(または惑星)が一方の星の前面に来ることによる変光をする場合と、恒星自体が振動(脈動)することに表面温度の変化に起因する変光とがある。この節では後者の脈動変光星について学ぶ。

恒星が脈動(振動)によって変光していることは、恒星表面の運動がおこすドップラー効果によって、恒星のスペクトル中の吸収線の波長が周期的に変動することから知ることができる。

右の図は、シンプルで典型的な脈動変光星である**セファイド変光星**の  $\delta$  Cephei の脈動を表している。吸収線の波長変化から得られる速度(視線速度)の周期的変化と、それに対応する大きさの変化と、明るさの変化を表している。

視線速度は、慣習上、我々から遠ざかる方向を正の方向にとる。視線速度には、脈動による恒星表面の運動に起因する成分と、恒星自体と我々との相対運動に起因する成分があることに注意する必要がある。この星の脈動1周期の平均の速度が約  $-15 \text{ km/s}$  なので、この星は毎秒  $15 \text{ km}$  のスピードで我々に近づきつつある。この速度よりも視線速度が大きい期間は、星は脈動により収縮しつつあり、逆に小さい期間(星の表面が我々に近づきつつあるので)星は膨張しつつあると理解できる。星の平均視線速度に等しい時、星の半径が極小または極大時である。

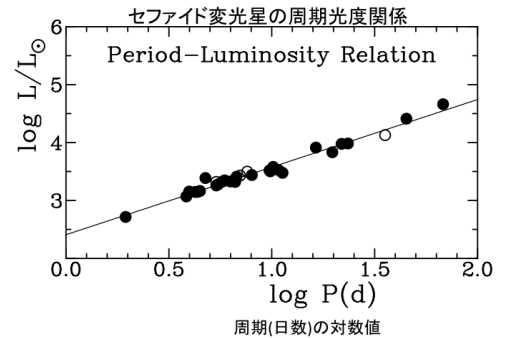
脈動星の光度が極大になるのは、表面温度が極大になった時で、それは圧縮によって起こり、半径の極小付近で起こる。(セファイド変光星の場合は、光度の極大が半径極小時より少しだけ遅れることが知られている。) 恒星の表面(光球)は大雑把に言って黒体放射をしており、単位体積当りのエネルギー放出率は温度の4乗に比例するため、圧縮によって表面温度が高くなっ



たときに星の光度は大きくなる。(恒星の光度は単位面積当りのエネルギー放出率に表面積をかけたものであり、半径の2乗にも比例するが、脈動による変光の場合、表面積の変動の効果よりも温度の変動の効果の方が大きい場合が多い。)

上の図で、光度や視線速度の時間変化がノコギリの歯のような形をしており、時間変化のスピードが速い時と遅い時があることがわかる。これは、星の大きさによって時間変化のスピードが違いうことに起因する。この図にも現れているように、星の半径が大きい時はゆっくりと変化が起こり、逆に半径が小さい時は変化が速い。恒星の脈動は、静水圧平衡の外層の構造が不安定であるため、重力が優勢な収縮時と圧力勾配の外向きの力が優勢な膨張時が交互に現れる現象である。この現象は、半径が小さいと、半径の逆二乗に比例する重力が強いために収縮のスピードが速く、また強い重力のもとでは、それに対抗するために、急な圧力勾配ができて、外向きの力が強いので、膨張のスピードも速いことから理解できる。

この、大きい星の変化が小さい星の変化よりゆっくり起こるという傾向は一般的な法則で、脈動星の変動周期も平均半径が大きい星の場合ほど長い。この関係は、セファイド型変光星の**光度周期関係**(右図)に現れている。セファイド型変光星の表面温度はどの場合も大差ないので、平均光度の大きいセファイドほど平均半径が大きく、周期が長い。セファイド変光星の周期光度関係は、遠方銀河までの距離の決定に使われ、重要な関係である。

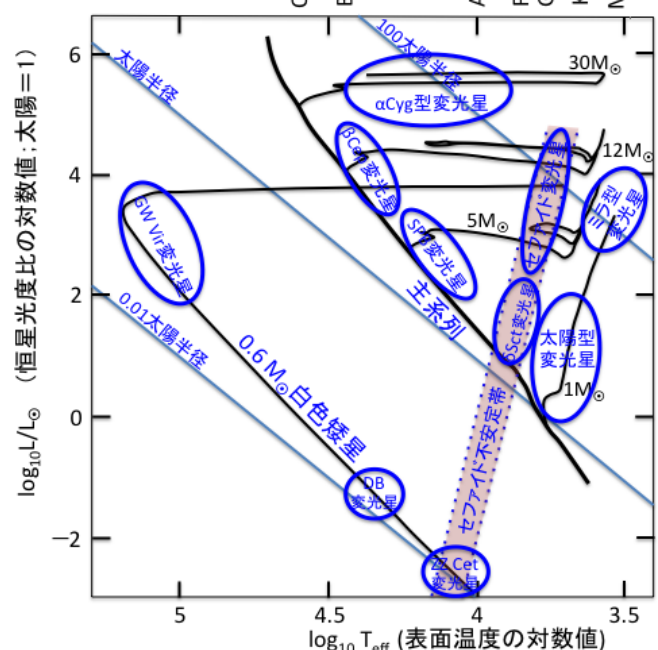


Turner et al. (2011)

セファイド型変光星は、太陽光度の千倍から十万倍の明るさを持ち、比較的近傍の銀河内にあるセファイド変光星も観測することが出来る。もし、ある銀河内にセファイド変光星が観測され、その周期が決められると、周期光度関係からそのセファイド変光星の平均光度がわかる。それと、その星の見かけの明るさとの差からその星、つまりその銀河までの距離を知ることができる。この方法で、およそ数千万光年までの遠方の銀河の距離を知ることができる。

右の図は、種々のタイプの脈動変光星グループのHR図上の位置と、星の進化経路との関係をあらわしている。セファイド変光星は、主系列星段階は既に終え、中心でヘリウム燃焼が起こっている進化段階にある。我々になじみ深い**北極星**もセファイド型変光星で、約4日の周期で脈動しており、太陽と違いヘリウム燃焼段階の恒星である。

セファイド型変光星はHR図上、右上から、あまり表面温度を変えずに低い高度にのびる細い带状領域(**セファイド不安定帯**)の最も光度の高い領域に位置する。恒星がHR図上、セファイド不安定帯に位置すると、その外層の静水圧平衡が不安定で、重力が勝る収縮期間と圧力勾配が勝って膨張する期間とを交互に繰り返す脈動を起こす。

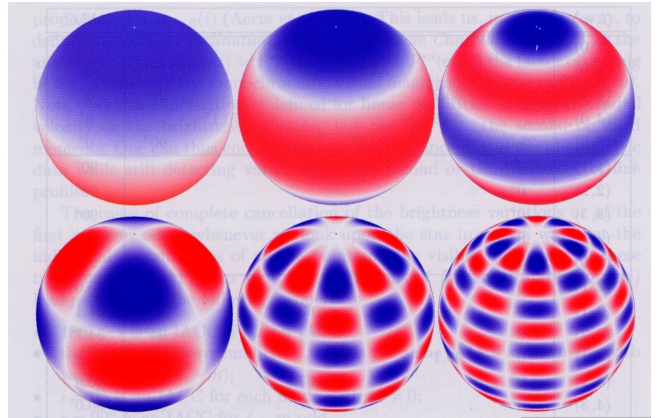


セファイド不安定帯が主系列と交差する所では、不安定帯内にある主系列星が脈動を起こす。それらは、 $\delta$  Sct 型変光星といわれ、おもに数時間の周期の脈動を示す。セファイド型変光星よりも半径が小さいので、セファイド型変光星の数日から百日の周期に比べて非常に短い。

セファイド不安定帯は、さらに暗い所で白色矮星の冷却進化経路と交差する。そこには、ZZ Cet 型変光星といわれる、白色矮星変光星が存在する。白色矮星のサイズは主系列星の半径よりさらに小さいので、周期は百秒から千秒程度である。さらに、重力が非常に強い(太陽表面

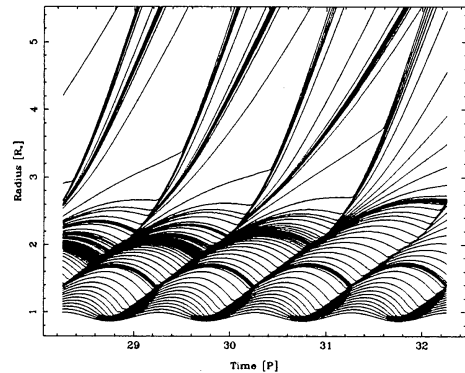
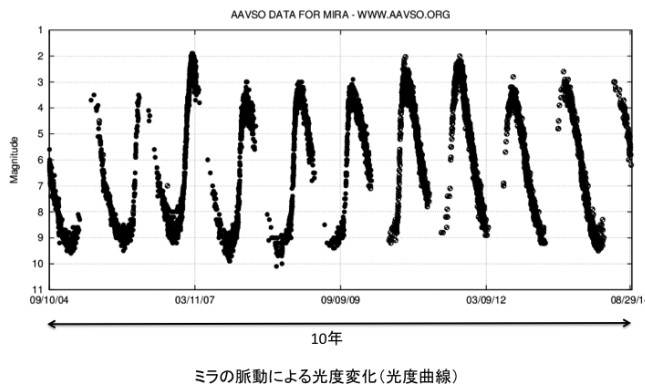
の1万倍、地上の十万倍)ので、球対称的な膨張収縮はできず、表面の分割された領域での、おもに表面に沿った周期的な運動によるガスの収縮膨張によって温度変化ができて周期的な変化を起こす。

球対称的な膨張収縮ではなく、表面の分割された領域内で膨張収縮が起こるような脈動を、非動径脈動 (nonradial pulsations) または非動径振動 (nonradial oscillations) という。それに対して、球対称の脈動のことを動径脈動または動径振動ということもある。一般に、セファイド型変光星のような巨星の起こす脈動は球対称的な脈動を起こすのに対し、主系列星、白色矮星などは、非動径振動を起こす場合が多い。



### ミラ型変光星:

ミラ型変光星は、質量が数太陽質量以下の中小質量星の進化末期段階である漸近巨星枝星が起こす大きな振幅で、長周期 (~ 1 年) のほぼ規則的な脈動である。平均半径が太陽の百倍以上と非常に大きいので、脈動周期もこのように長くなる。この脈動の振幅が非常に大きいので、膨張した際、最外層のガスが星からはなれて戻ってこない現象が起こる。従って、ミラ型変光星の外層の質量は急激に減少していく。その質量放出率は、およそ1万年で太陽質量程度が失われる程度と見積もられている。したがって、漸近巨星枝星がミラ型脈動を起こし始めると、数万年で外層のほとんどの質量を失い、重力収縮して白色矮星へと進化していく。



上の左図は、10年間のミラの変光曲線を表している。1年弱の周期で7等級(約600倍の光の強さの変化に相当)もの変光を示す。右図はミラ型変光星脈動の数値シミュレーションの一例で、最も外側に位置するガスが外側に移動して戻ってこない現象をあらわしている。

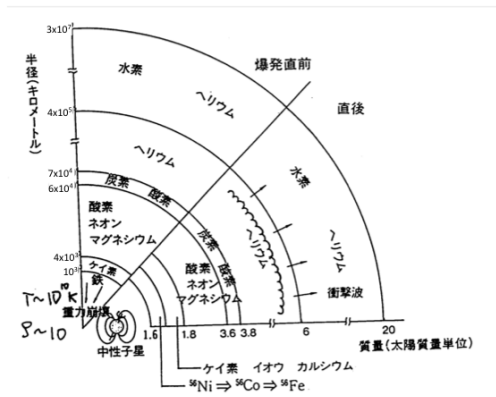
### 太陽型振動

太陽と同じ程度の比較的低い表面温度をもつ小質量星では、太陽型振動が発生する。多くの脈動変光星では、外層が自発的に振動を起こし、多くても数個の比較的振幅の大きい固有振動が励起されるのに対し、太陽型振動は、外層で起こっている対流運動によって引き起こされる非常に多くの固有振動である。太陽型振動は、振幅は小さいが、わずかずつ周期の異なる非常に多くの振動が起こっているため、太陽振動で太陽内部についての情報が得られたのと同様に、振動から小質量星の内部の状態についての情報を知ることが出来る。

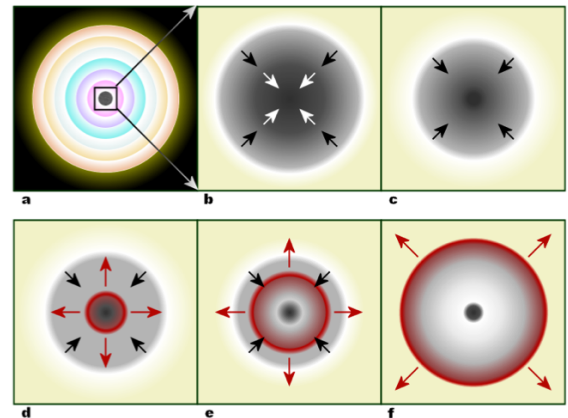
太陽と異なり、恒星は点光源なので、表面波長が小さい振動は観測することができず、恒星表面を2-3分割する程度の波長以上の大きなスケールの振動しか観測することができない。そのため観測される振動周波数の数は太陽の場合に比べて格段に少なく、太陽の場合ほど詳細な情報は得られない。

## 4.10 恒星の爆発現象

### 4.10.1 大質量星の超新星爆発



### 大質量星の超新星爆発



大質量星の進化の最終段階での層(タマネギ)構造と鉄の中心部が崩壊して中性子星となり外側は飛ばされ超新星爆発が起こる。

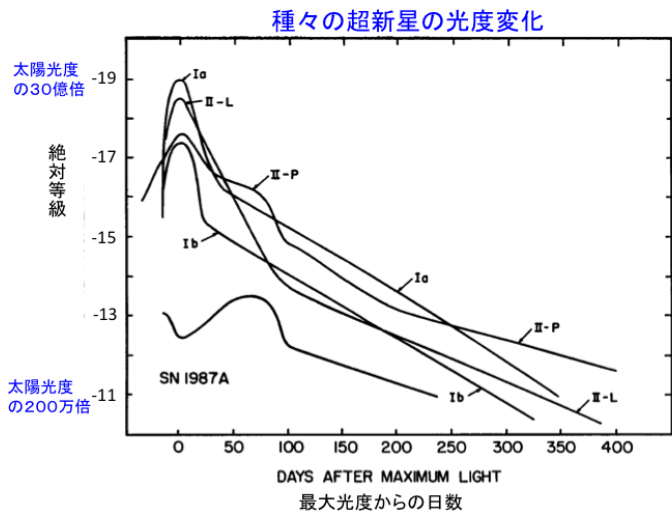
生まれた時の質量が10太陽質量程度より大きい恒星の中心部では、ヘリウム各燃焼が終わって、炭素、酸素から成る中心部が形成されても電子が縮退することなく、さらに重力収縮段階と核燃焼段階(炭素燃焼、ネオン燃焼、酸素燃焼、シリコン燃焼)を交互に繰り返して、ネオン、マグネシウム、シリコン...と重い原子核が生成され、最終的には最も安定な原子核である鉄が生成される。

その最終段階での星の内部は、鉄の中心部の上にケイ素(Si)層、その上に、マグネシウム、酸素、ネオン層、その上に、炭素、酸素層、その上にヘリウム層、さらにその上には生まれた時の組成とあまり変わらない水素を多く含む層が乗った、層構造(タマネギ構造)をなし、それぞれの層の境界では、上の層をなす元素から下の層の元素を合成する核燃焼が起こっている。

シリコン燃焼は非常に高温で起こり数日で鉄から成る中心部の質量が2太陽質量程度になり、温度が百億度程度になると、非常にエネルギーの高い光子が発生し、衝突して鉄の原子核を壊す。鉄の原子核は非常に安定で最も低いエネルギーを持つ原子核なので、鉄の原子核が壊されて、よりエネルギーの高いヘリウム原子核の集合に変わることにより、多量の熱エネルギーが吸収される。そのため、圧力勾配による重力とのバランスがとれなくなり、中心部は半径千分の1(約10km)の**中性子星**ができるまで崩壊する。

支えを失った外層は中心に向かって落下していき、生成された中性子星の表面にぶつかり、圧縮され非常に高温になり衝撃波となる。衝撃波は非常に高温高圧なので、核反応を起こしながら外側に向かって伝播していき外層の質量を宇宙空間に吹き飛ばす。これが大質量星が進化の最後に起こす超新星爆発である。

超新星の最大光度は、太陽の5億倍から30億倍にもなり、発生した銀河と同程度の明るさに輝く。超新星は数百日かけて暗くなって行く。すぐに暗くならないのは、衝撃波の通過の際に形成された $^{56}\text{Ni}$ がコバルトを経て安定な鉄の原子核に成っていく際にエネルギーが放出されるためである。



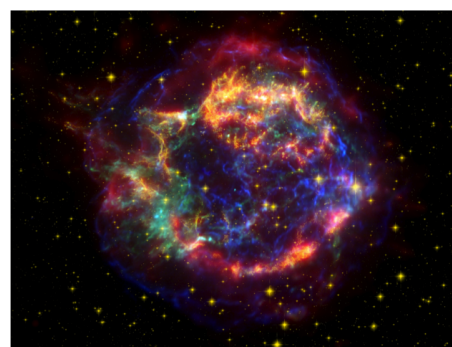
種々のタイプの超新星の光度曲線。Ia型超新星は白色矮星が爆発する超新星で、それ以外は大質量星の進化の最後に起こる超新星である。

大質量星の超新星爆発によって、これまで星の内部で作られてきた炭素、酸素、マグネシウムなどの元素や、衝撃波の通過の際に起こった核融合反応によって作られたより重い元素、鉄、カルシウム、ケイ素、硫黄、等々が宇宙空間にばらまかれる。



超新星 SN 1987 A の残骸

NASA



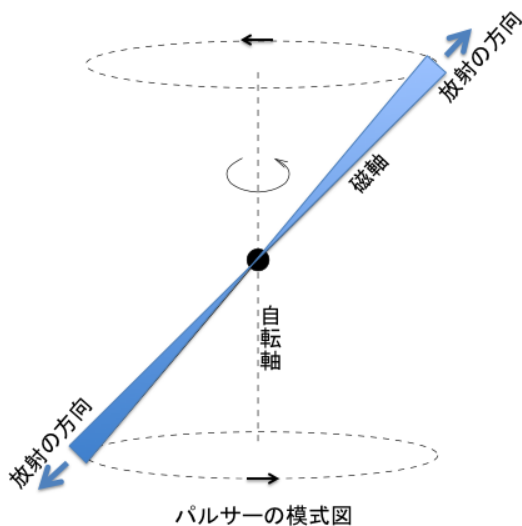
超新星残骸 Cassiopeia A

超新星爆発の後には、吹き飛ばされたガスが超新星残骸として観測される。上の左の写真は、隣の矮小銀河大マゼラン雲に1987年1月に出現した超新星SN1987Aの残骸。なぜ、環の形が出来たかはまだはっきりしていない。上の右の写真は、記録には残っていないが、約300年前に地球で見られたと想像されている超新星の残骸カシオペアAである。これらの超新星残骸のガスはいまも外側に向かって飛び続けている。

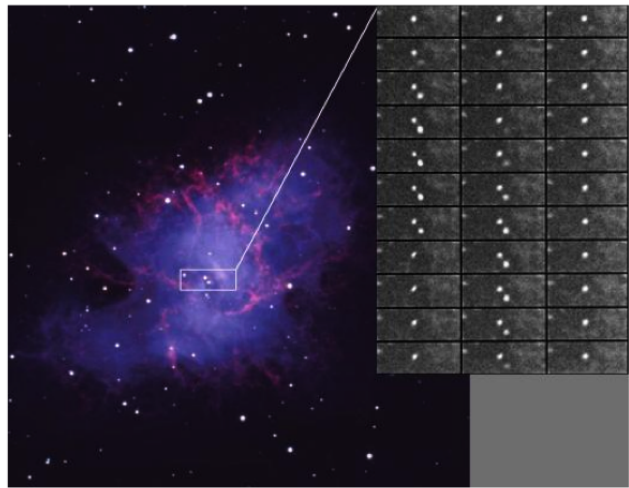
## 中性子星

大質量星進化の最後の超新星爆発の際、半径約12kmの中に1.4太陽質量が詰め込まれた中性子星が形成される。その平均密度を計算してみると、1立方センチメートル(1cc)当り約 $4 \times 10^{11}$  kgという膨大な密度となる。中性子星の存在は、1967年に**パルサー**として発見された。

中性子星は形成時強い双極磁場をもち、両極の方向に強い電磁波を放射する。また、中性子星は1秒に数十回も回転する非常に速い自転をしている。一般に磁場の軸は自転軸と傾いているので、磁場の軸から発せられたビームは灯台の光のように、自転とともに変化する方向に発せられる。我々が、そのビームに照射される方向にいる場合、一秒間に数十回の非常に規則正しいパルス的な電磁波を受信する。それを**パルサー**という。



パルサーの模式図



超新星爆発残骸のかに星雲の中心にあるパルサー：33.367ミリ秒の周期で変光

NOAO/NSF

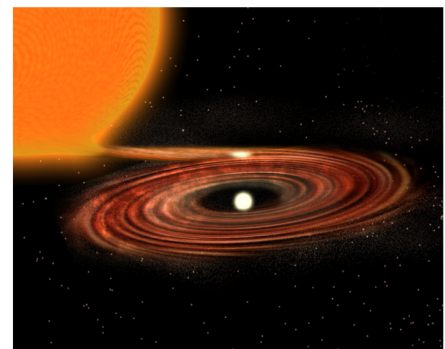
右上の写真は、1054 年に出現した超新星 (SN1054; 中国及び日本の記録 (名月記) により出現した年が知られている) の残骸とその中心にあるパルサー (周期 33 ミリ秒) の高速連続写真。

#### 4.10.2 白色矮星の起こす爆発現象

##### 新星爆発

中小質量星の進化の最終段階は白色矮星となってしだいに冷えてゆくのであるが、それが近接連星系をなし、伴星が存在する場合には状況が異なる。中小質量星から成る連星系の場合、質量の大きい星 (主星) のほうが進化が速いので、白色矮星にまで進化する。その後、最初に質量が小さかった星の進化が進み、半径が大きくなっていくと、やがてその半径が、白色矮星との重力圏の境界の半径 (ロッシュローブ) まで大きくなる。

さらに進化が進んで半径が大きくなり、白色矮星の重力圏内に入ったガスは、白色矮星の重力に引かれて白色矮星に近づいてゆく。しかし、ガスは角運動量を持っているので、白色矮星に直接ぶつからないで、白色矮星の周りを公転しながらすこしずつ白色矮星に近づいてゆく。そのようなガスによって円盤 (アクリーション ディスク) が形成される。がすは、アクリーション ディスク内をなんども回りながらしだいに白色矮星に近づいて行き、最終的には白色矮星表面に降り積もる。



アクリーションディスクの想像図

NOAO/AURA/NSF

白色矮星の重力は強いので、降り積もったガスは圧縮されその底は高温になる。ある程度ガスが積もると底の温度が1千万度になり、ガスに多量に含まれている水素からヘリウムができる核融合反応 (水素核燃焼) が起こってエネルギーが発生し始める。白色矮星の表面の薄い層でおこる水素核燃焼は不安定で暴走し、一度に多量のエネルギーが発生する。そのエネルギーの大半は外層半径の膨張に使われるが、それでも太陽光度の1万倍程度まで増光する。そのような現象を新星爆発という。新星爆発は、超新星爆発に次いでエネルギーの高い現象である。

爆発の強さは、白色矮星の質量と質量降積 (アクリーション) の速さに依存し、白色矮星の質量が大きいほど、また、質量降積率が低いほど激しい爆発となる。非常に激しい新星爆発の場合は降り積もった質量のすべてを放出してしまうが、比較的穏やかな新星爆発の場合は降り積もった質量 (水素核燃焼によってヘリウムになっている) のある割合が白色矮星に残って少し白色矮星の質量を増加させる。一回の新星爆発がおさまると再び白色矮星は冷えながら暗くなっていくが、アクリーションによって、水素を多く含む層の質量が十分大きくなると再び新星爆発をおこす。すべての新星爆発は周期的に起こるが、その周期はほとんどの場合、百年以上でその周期性は観測されない。しかし、中には10～20年の周期性 (知られている最短の

周期は約1年)を持つ新星も観測されており、それらはとくに回帰新星とよばれる。

### 白色矮星の超新星爆発 (Ia 型)

連星系内の白色矮星が伴星からのガスを降積 (アクリーション) し、質量が太陽質量の1.4倍の白色矮星となると、中心で炭素原子核同士の核反応とその連鎖反応 (炭素燃焼) が爆発的に起こり、放出されるエネルギーにより白色矮星全体が飛び散ってしまう爆発、Ia型超新星が起こる。この核反応爆発により、白色矮星の半分の質量は鉄に変えられ、シリコン、硫黄などもつくられ、空間に飛び散ってゆく。

Ia型超新星の最大光度は太陽光度の約30億倍で非常に明るく、どのIa型超新星の最大光度もほぼ同じであるので、標準光源として重要である。つまり、ある遠方銀河でIa型超新星が観測されると、その最大光度時の見かけの明るさから、その銀河までの距離を知ることが出来る。

### 4.10.3 超新星爆発と我々との関わり

太陽とその惑星系、さらに地球の生物が存在することと、超新星爆発とは強い関わりを持っている。我々の銀河が形成された際、物質の約76%は水素で残りはヘリウムであり、酸素、炭素、鉄、シリコン、などは存在していなかった。そのような物質から最初の恒星が重力のはたらきで形成され、その中の核融合反応及び超新星爆発によってヘリウムより重い原子核がつくられそれが空間にまき散らされる。それらは、星間に漂うガスと混ざり合い、そこから再び恒星が誕生し、重い原子核が合成され、空間に放出され、星間空間と混ざる。このように、超新星爆発に何回か影響を受けた物質から、太陽と惑星が形成された。つまり、地球上の炭素、酸素、鉄、シリコン、等々は全て恒星中心部の核融合反応および超新星爆発で出来た原子核である。その意味で、我々は超新星爆発のおかげで存在できているといえる。