

## やさしい天文学シリーズ (IV)

## 星 (2)

## 星の一生\*

尾崎 洋二\*\*

## 5. 星の一生

今回は星の一生について概観してみよう。

## 5.1. 星の誕生

近年、星の誕生についての研究は急速な進展をとげた。これは、電波分子分光学、赤外線天文学といった新しい天文学の分野の発展に負うところが大きい。我々は、これら可視域以外の“新しい目”によって、これまで見ることができなかった星の誕生の現場を観測できるようになったのである。

星の誕生は、分子雲と呼ばれる高密度の星間雲が収縮して、その中に“星の赤ん坊”（原始星）ができるところから始まる。生まれたばかりの星は、星間雲の中にうもれている。このような星から出た光は、星間雲中の塵に吸収され、赤外線の形で再放射される。こうした生まれたての星を示すと思われる赤外線星がオリオン星雲の中などに見つかっている。

一般に、星は一人ぼっちで生まれるのではなく、グループで生まれる。グループで生まれたと考えられる星の集りとして、OB アソシエーションあるいは T アソシエーションがある。これは生まれたての若い星である O 型星 B 型星あるいは、おうし座 T 型変光星が、空間的及び運動学的に一つの集まりを作っているものである。星がグループで生まれるのは、質量の大きな星間雲が収縮する途中でいくつかに分裂し、分裂したそれぞれのかげらが星になったためと考えられる。また、表面温度が高い O 型星が誕生すると、そのまわりに H II 領域という水素電離領域ができる。この電離領域が広がっていく際、まわりのガスとの境界面が圧縮され、高密度層ができる。そこに新しい星が誕生する。この新しい星を中心にして、同様のプロセスが繰り返され、つぎつぎに連鎖反応的に星が誕生する。

## 5.2. 主系列星への進化

生まれたばかりの星は、まだ内部の温度が低く、水素の核融合反応は起らない。このような星では、表面から放射によってエネルギーを失うため、ゆっくり収縮し主系列星へと進化して行く、このような星を重力収縮段階の星と言う。1961 年京都大学の林忠一郎教授は、重力

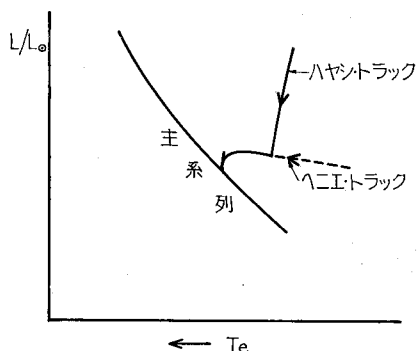


図 3 重力収縮段階の星の進化

収縮段階にある星は星全体が対流平衡にあり、第3図に示すように HR 図上を水平よりもむしろ垂直に近い道筋に沿って収縮してくることを、発見した。現在、この進化の道筋を「ハヤシ・トラック」と呼んでいることは、読者もよく御存知の事と思う。

一方観測の方に目を向けると、このような重力収縮段階にある星として、おうし座 T 型星がある。おうし座 T 型星は、不規則な変光を示す F 型より晩期のスペクトルを示す準巨星である。この星では、水素のバルマ線などが輝線スペクトルになっていて、P Cygni 型と呼ばれる質量放出をしている星に特徴的なスペクトル線の輪郭を示す。また Li などの軽元素が、主系列星にくらべて多い事が知られている。

おうし座 T 型星の表面は、大変不安定で激しい運動が起きていると考えられる。その結果、星は不規則な変光を示し、また表面からガスが放出されている。そして、太陽フレアを大規模にしたような爆発現象が頻繁に起こり、その際宇宙線が加速される。そして、C、O のような元素が宇宙線により壊されて、Li ができると考えられる。

それでは、おうし座 T 型などの生まれたての星はなぜ強い活動性を示すのだろうか？ これには、二つの原因が考えられる。一つはアクリーシオン説である。星が生まれる際、原始星雲の中心部分ほど速く収縮するため外側の物質は取り残されてしまう。その後、取り残された物質は生まれたての星の表面に落下してくる。落下により開放される重力エネルギーが活動の源泉であるとする考えである。もう一つは、原始星の速い自転と強い磁場にその原因を求める考えである。誕生する際、星はその母体である星間ガス中の角運動量、磁場の一部と一緒に

\* Life Story of Stars

\*\* 東大理 Yoji Ozaki

抱き込んで、収縮する。その結果、生まれたての星は速い自転速度と強い磁場を持っている。また、おうし座T型星の場合、深い表面对流層があると考えられる。のちほど述べるが、太陽活動の源泉は自転と磁場と対流の相互作用にある。おうし座T型星は、この点に関しては“三拍子揃った”優等生（星？）ということで、太陽活動をずっと大規模にしたような活動が起きても不思議ではない。

また、生まれたての星が実際活動性に満ちていることが、最近のアインシュタイン天文台によるX線の観測の方からもわかってきた。すなわち、“アインシュタイン”によるオリオン領域の観測で多くのX線源が見つかったが、その中のいくつかが重力収縮段階にあるおうし座T型星類似の不規則変光星と同定されたのである。

### 5.3. 主系列星

重力収縮を続ける星では、星の半径が小さくなるに従って中心温度が増大して行く。やがて星の中心温度が1千万度以上になると、水素融合反応が始まる。そして、中心での核エネルギー発生率と星の表面からのエネルギー放射率が等しくなったところで星の収縮は止まり、HR図上の主系列星に落ち着く。星はその一生の大部分を、中心部分での水素燃焼段階である主系列星として過ごす。主系列星は、星の一生でもっとも安定した“青年時代”と言ってよい。

主系列星はHR図上で左上のO型星から右下のM型星まで長い系列を作っている。これらの星はすべて中心での水素燃焼段階にある星で、HR図上の位置の差は星の質量の違いを表わしている。すなわち高温のO、B型星は、太陽質量の10倍ないしそれ以上の大質量星であるのに対して、M型星は太陽質量の半分以下の小質量星である。しかし星の内部構造と進化について、まだよくわかっていなかった今世紀のはじめ頃、主系列は星の進化の系列であると考えられた。すなわち、星は高温のO、B型星として生まれ、その後主系列に沿ってだんだん冷えていき、ついに低温のM型星になり死んで行くというわけである。そこで、O・B・A型の高温の星を早期型星、G・K・M型の低温の星を晩期型星と呼んだ。現在では、このような考えが間違っていることはよく知られているが、“早期型星”及び“晩期型星”という言葉は現在でもそのままに使われている。

主系列が進化の系列ではなく、星の質量の違いによる系列であることを、最初に理論的に明らかにしたのはエディントンである。1924年に、エディントンは星の内部が放射平衡にあると仮定して、有名な質量-光度関係を理論的に導くことに成功した。質量-光度関係というのは、星の明るさ  $L$  は星の質量  $M$  とともに急激に増

大するという関係で、次のように書かれる。

$$L \propto M^\alpha \dots\dots\dots (2)$$

(ここで  $\alpha$  は3ないし4くらいの定数である。)

すなわち、O・B型の大質量星は光度の大きいエネルギーの浪費家で、その主系列での寿命も約千万年から1億年と短命である。それに対して太陽よりも質量の小さい星は明るさもずっと暗くエネルギーの節約家で、主系列の寿命も100億年以上と大変長くなっている。

主系列星は中心で水素を燃やしている星という点で、O型星もM型星も同じと言える。しかし、その構造をもう少し細かく見ると、主系列星は大質量星 ( $M \geq 1.5 M_\odot$ ) と小質量星 ( $M < 1.5 M_\odot$ ) とに大別できる。これはそれぞれスペクトル型の早期型星と晩期型星とに対応している。主系列星が上述の二つに分類される理由として、星の中心での核反応の仕方及び星の外層でのエネルギー輸送の仕方の二つの異なった原因がある。

主系列星のエネルギー源が水素の核融合反応によるという点では両者とも共通である。しかし、大質量星の場合、この水素燃焼反応はCNOサイクルと呼ばれる炭素・窒素・酸素の原子核を触媒とする核反応である。それに対して、小質量星の場合、pp連鎖と呼ばれる水素原子核同士の反応で重水素を作る水素燃焼反応である。そして、前者の反応は後者の反応よりも温度に敏感であり、そのため、大質量星では核エネルギー発生は星の中心に集中している。このような場合、中心で発生した熱を外層まで運ぶのに対流運動が生ずる。すなわち、第4図に示すように、大質量星は中心に対流の芯（コア）を持つ。それに対して、小質量星の場合は光子によるエネルギー輸送で十分であり、中心部は放射平衡になっている。

次に星の外層でのエネルギー輸送について考えよう。ここで問題になるのは、“水素対流層”である。水素は星を構成する物質の中で一番多い元素で、数でいえば全体の90%を占めている。この水素は星の大気中で温度1万度あたりで電離する。すなわち、1万度を境にして高温側では完全電離の状態にあり、低温側では中性水素

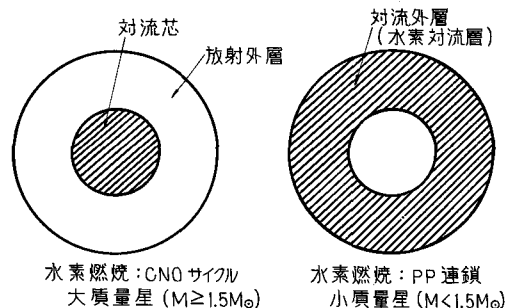


図4 主系列星の内部構造

原子になっている。ここで、表面温度が 7000 度以下の G・K・M 型の晩期型星について考えてみよう。このような星の大気（光球のレベル）では、水素は中性水素原子になっている。しかし光球から少し内部へ入ると、温度が上昇し水素が電離しはじめる。温度 1 万度あたりの水素が部分電離の状態にある層を水素電離層と呼ぶ。水素電離層では光による熱輸送の能率が悪いので、対流が発生する。すなわち、第 4 図に示すように、質量の小さい晩期型星では、水素電離層が原因となり星の外層に対流層ができる。これを“水素対流層”と言う。それに対して質量の大きい O, B, A 型の早期型星の場合、星の大気中ですでに水素は完全電離の状態にあり、水素電離層を持たない。このような場合、星の外層ではもっぱら光によってエネルギーが輸送される放射平衡状態になっている（第 4 図参照）。後ほど見るように、よく発達した水素対流層を持つかどうかで、星の活動性の性質にも大きな差が出てくる。F 型星は、この意味で早期型星と晩期型星とを分ける境界にある星と言える。

主系列星は、中心で水素を燃焼して輝いている“核融合炉”であるという。しかし、核融合反応というのは水素爆弾と同じ原理に基づく反応であるともいう。それでは、星の核融合炉は本当に安全で、暴走することはないのだろうか？ この問題は、星の熱安定性の問題と呼ばれ、色々の星について研究されている。幸い、主系列星の場合、核融合炉の自動制御をする働きが星の内部に備わっていて、核融合炉は安定であることが知られている。

核融合反応は一般に温度変化に敏感で、温度が少し上昇すると急激にエネルギー発生率が増大する。今仮りに、星の内部で核エネルギーが少し出過ぎてしまったとしよう。主系列星のように星の中心に原子炉がある場合、熱が発生しすぎると、星は膨張し逆に温度が下がってしまう。すると核エネルギー発生率も下がり、元の平衡状態に戻る。すなわち、星の内部のガスは丁度比熱が負である物質のように振舞う。その結果、星の内部の核融合炉は精密なサーモスタットで制御したように安定してエネルギーを供給し続けることができる。このように主系列星では安定であったが、核融合炉が不安定になる場合もいくつか知られている。例えば、ヘリウム・フラッシュとかヘリウム・フリッカーとか呼ばれる現象がそれである。

これまで、“主系列星は核融合炉である”としばしば述べてきた。それでは、星の内部の核融合反応を直接観測的に確かめることができるだろうか？ これが、いわゆる“太陽ニュートリノ問題”である。太陽は中心で pp 連鎖と呼ばれる水素融合反応によりエネルギーを賄っている典型的主系列星と考えられている。この核融合反応の際、ニュートリノが発生する。ニュートリノは

物質との相互作用が弱いので、途中を素通りして直接地球に到達する。このようなニュートリノを捕えれば、太陽内部の核反応を直接“見る”ことができる。このような考え方にもとづき、アメリカのブルックヘーブン研究所のデービスは太陽ニュートリノを測定する実験を行ってきた。ところが、これまでの実験結果では、太陽ニュートリノの測定値が太陽の内部構造モデルによる計算値にくらべて、その 1/3 以下しかなく、大問題になったのである。

太陽ニュートリノの観測において、実測値と理論値の間に大きな矛盾があることが明らかになって以来、この困難を解決するための色々の可能性について、検討がなされた。しかし、依然として決め手となる解決策は見つかっていない。これまで提案された解決案の一つに、太陽の核反応点滅説というのがある。この考えによれば、太陽の核融合炉は連続運転されているのではなく、時々火が着いたり消えたりしているというのである。そして、現在は丁度火が消えている時期にあたるため、ニュートリノ測定値が小さいというわけである。

また、これとは別の考え方に、ニュートリノ振動説というのものもある。ニュートリノには電子型ニュートリノ、ミューオン型ニュートリノ、タウ型ニュートリノの 3 種類がある。太陽の核反応の際発生するのは電子型ニュートリノであり、デービスの実験もこのニュートリノを捕えるものである。ところが、ニュートリノが質量を持つとすると、異なった種類のニュートリノ間で、お互いに転換し合うという事が起る。これがニュートリノ振動である。ニュートリノ振動説によれば、太陽中心で発生した電子型ニュートリノが地球まで飛んでくる途中で別の種類のニュートリノに転換してしまったというわけである。

#### 5.4. 進化の進んだ星

主系列星は中心附近で水素を燃焼して輝いている。その結果、星の中心附近では核燃料の水素が徐々に消費され、灰であるヘリウムが溜まってくる。そして、中心の水素が完全に使いつくされると、水素燃焼箇所は中心からコアのまわりの薄い球殻部分に移っていく。これが主系列段階の終了である。その後、核燃料のなくなった中心部分（コア）は収縮していく。それに対して、水素燃焼部位の球殻を境いにして、星の外層は急激に膨張する（第 5 図参照）。その結果、高密度のコアと密度が低く半径の大きい外層部分からなる二重構造の星になる。この時、星は HR 図上で主系列から離れ、赤色巨星へ向けて急速に進化していく。この進化の段階の星は、さしずめお腹の出張りが気になる“中高年層”といったところだろう。

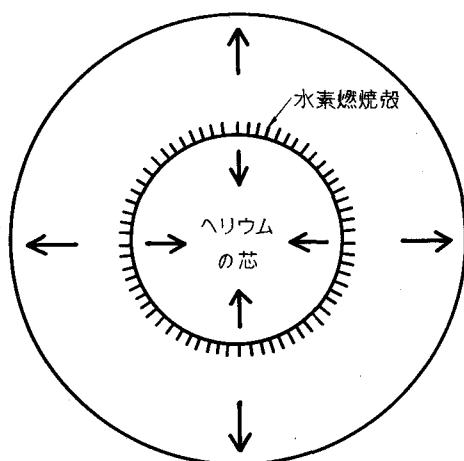


図5 進化の進んだ星の内部構造

その後の進化の細かい点について、星の質量によって異なる。しかし、基本的シナリオは次のようである。中心のヘリウムのコアはさらに収縮を続け、それに伴って中心温度も増大していく。そして中心温度が1億度以上になると、これまで灰として扱ってきたヘリウムにも火が着く。そして、ヘリウムは $3\alpha$ 反応という核融合反応により炭素にかえられる。中心でヘリウム燃焼がはじまると、星のコアの収縮は止まる。すると、これまで膨張を続けてきた星の外層も膨張をやめ、むしろ収縮に向う。その結果星はHR図上で赤色巨星列から離れ、青色巨星、黄色巨星の位置まで一たん逆戻りする。

中心でヘリウムが燃え尽きた後の進化は水素の場合と似た経過をとる。すなわち、ヘリウムの燃焼領域はコアのまわりの球殻に移る。そして、中心の炭素コアは、また収縮を始める。しかし、今度の場合ヘリウム燃焼球殻の外に、水素燃焼殻のある複雑な構造になる。その後の進化は星の質量による。質量の大きい星では、さらに炭素燃焼、硅素燃焼と続き、最後に鉄のコアができるところまで進む。このような星は、丁度たまねぎのように、幾重にも球殻の重なった内部構造を持つことになる。

ヘリウム燃焼及びそれ以後の核融合反応によって発生するエネルギーは、水素燃焼のエネルギーの1/10程度である。従って、主系列以後の進化の進んだ星の寿命は、主系列星の寿命の1/10以下と短い。

HR図上でセフィッド変光星、赤色巨星などは、これら進化の進んだ星に対応している。

### 5.5. 星の死

核燃料を使い果たしてしまった星は、最後に超新星などの爆発を起こして死んでいく。このような星の残骸として、白色矮星、中性子星、ブラックホールなどがあ

ることはよく知られている。星がどのような終末を迎えるかは、その星の質量によって異なる。

すでに述べたように、大質量星では次々と核融合反応が進み、中心に鉄のコアができるところまで達する。鉄はもっとも安定な原子核であるので、これ以上核反応によりエネルギーを発生することはできない。そんな事にはおかまいなく、鉄のコアはさらに収縮を続け、中心温度も上昇していく。中心温度が30億度を越えると、鉄はヘリウムなどの軽い原子核に分解するようになる。この反応は吸熱反応であるので中心の圧力が十分あがらず、ついに星自身の重力をささえきれずに、コアはつぶれてしまう。コアがつぶれる際、莫大な重力エネルギーが遊離される。このエネルギーの一部がなんらかの形で星の外層に運ばれると、星の外側が吹き飛ばされる。これが超新星爆発であると考えられている。超新星爆発のあとに残されたコアは、最終的には中性子星かブラックホールになると考えられる。上述の話は、太陽質量の10~12倍以上の大質量星についてのシナリオである。

それに対して、質量が太陽質量の4倍以下の星の場合、ヘリウム燃焼の後、中心に炭素と酸素からなるコアができる。このコアの中では電子が縮退していて、電子の縮退圧により重力をささえている状態が実現する。一方、星の外層は大きく膨らみ、星は赤色巨星になっている。そして、コアのまわりのヘリウム殻ではヘリウムの燃焼が続き、その灰である炭素と酸素がコアにつけ加わる。このように炭素・酸素のコアがふとっていくと、星は赤色巨星列をさらに上へと昇っていく。赤色超巨星になると、星の外層の重力ポテンシャルの“井戸”は大変浅くなり、星の外層はかろうじて本体にくっついているといった状態になる。そして、ちょっとしたきっかけで、外層は星からはがれてしまうという事が起る。これが惑星状星雲の質量放出であると考えられている。そして、裸になった炭素・酸素のコアはそのまま白色矮星へと冷えていく。

太陽質量の4~12倍の中質量星が最終的にどのような死を超えるかについては、現在も議論のあるところである。専門家でない私としては、この問題に口をはさむのを差し控えるのが適当であろう。

☆ ☆ ☆