

星の進化

蓬 茨 靈 運*

1. はじめに

1963年頃を境として星の進化の理論にある種の変化がおきた。理論の内容に大きな変化があったというのではない。理論を立てる上で欠くことの出来ない数値計算の方法が、指先からエレキへと大変化したのである。ことのおこりは1959年にアストロフィジカル・ジャーナル誌にのった10ページたらずのヘニエたちの論文に始まる。電子計算機を使って星の進化を時間を追って自動的に計算させようというものであった。大型電子計算機の出現やプログラムの開発に数年を要し、1964年頃には自動計算による結果がいろいろと発表されはじめた。内部構造家の多くは一度は自動計算に手を染めるほどの流行をきたしたものである。とにかくこの方法が星の進化の研究に大きな影響を及ぼしたことはたしかである。1963年以前とそれ以後において星の進化の理論がいかん展開されてきたかを、筆者の片よった見方ではあるが述べてみたいと思う。

2. 1963年頃の理論

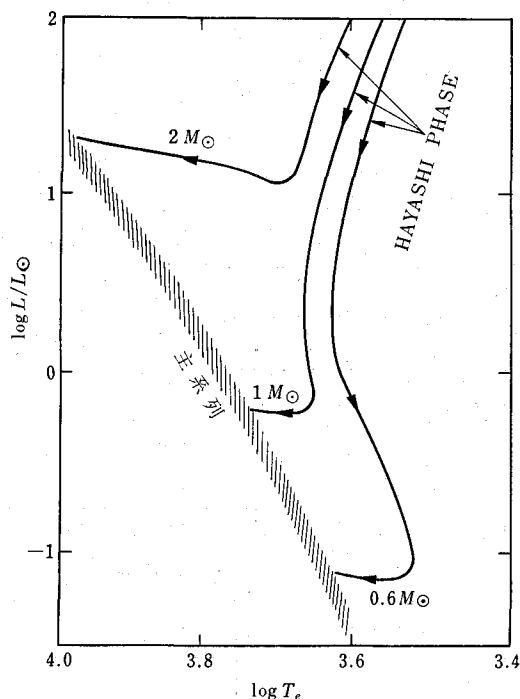
1962年にプログレス誌のサプリメントにのった林・蓬茨・杉本の Evolution of the Stars (以下 HHS と省略する) でいわゆる前期は終わったという人がある。前期最後というのは、多分、あまり評判のよくなかった(わかりにくいということ) $U-V$ curve と、数値計算は主に機関銃のような音のする電動計算機でなされた最後のものという意味であろう。ここでは上記の HHS の論文をもとにしてその当時の程度星の進化がわかっていたかをふり返ってみる。

星の誕生: 星の誕生から主系列星までの進化は非常に興味ある理論の展開があった。この分野の研究は太陽系の起源の問題と関連して今後大いに発展が期待される。最後の節でくわしくのべるのでここでは省略する。ただ、この当時は主系列星への進化は *HAYASHI Phase* と呼ばれる進化の段階を経過することがすでにわかってきた(後述)。

水素燃焼段階: 新しくこの世に誕生した星は *HAYASHI Phase* にそって HR 図上を進化する(第1図)。この段階は収縮の段階であり、中心温度、中心密度は共に増大する。やがて中心で $H \rightarrow He$ の熱核反応がおこる

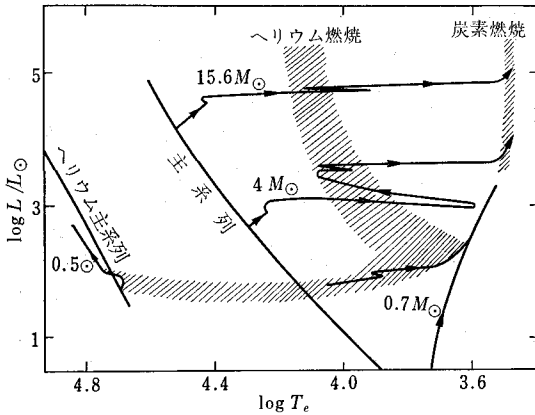
(水素燃焼段階)。中心で水素燃焼の状態にある星が主系列星と呼ばれる。質量が太陽質量の約0.1倍より小さい星では、収縮につれて中心付近の電子が縮退を始め、中心温度は水素燃焼に必要な温度まで上昇することができず、白色矮星へと進化していく。水素燃焼段階にある星の中心付近では水素が徐々にヘリウムに変る。中心付近の水素が完全に消費されると、水素の燃えかすであるヘリウムの中心核が成長する。ヘリウムの核をとりまくごくうすい殻で水素燃焼がおきている。この段階の星は主系列をはなれ巨星の領域へと HR 図上を進化する。

ヘリウム燃焼段階: 水素殻状燃焼のために進化につれてヘリウムの中心核は成長をつづける。このさい、中心核は重力収縮により釣り合いを保っている。そのため中心温度、中心密度は共に上昇する。中心温度が 10^8 °K を越えると中心で $He \rightarrow C$ 熱核反応(ヘリウム燃焼)が始まる。このさいほぼ太陽質量の3倍の星を境として進化の様子が非常に異なる。太陽質量の3倍以下の星では、ヘリウムの中心核では電子は縮退を始めている。電子の縮退した領域で熱核反応がおきると、このエネルギー放出



第1図 主系列に到達するまでのHR図上の進化。
縦軸は太陽の光度を単位にした光度の対数、横軸は表面温度の対数

* 京都大学理学部物理学第二教室
R. Hoshi: Evolution of the Stars



第2図 水素燃焼およびそれ以後の進化の段階にある星のHR図

による中心温度の上昇は電子の縮退が解けるまで続く。ヘリウム燃焼は爆発的におこることになる。これをヘリウム・フラッシュと呼んでいる。HHSによると、星の質量に無関係にヘリウム中心核の質量がほぼ $0.5 M_{\odot}$ (M_{\odot} は太陽質量) に達したときに上記のフラッシュが始まる。もし星の質量が $0.5 M_{\odot}$ より小さければヘリウム燃焼はおこらず、あとは白色矮星へと進化していく。 $3 M_{\odot}$ より質量の大きい星ではヘリウム燃焼はおだやかに始まる。

エネルギー源がヘリウム中心核をとりまく殻状水素燃焼から中心におけるヘリウム燃焼へと移行するさい、星は収縮してHR図上で表面温度の高い領域へと進化する(第2図)。特に太陽質量程度の星ではHR図上で水平分枝と呼ばれる領域がこのヘリウム燃焼段階であることがわかった。

進化が進むにつれて中心付近でヘリウムが炭素(C)と酸素(O)に転化する。やがて、C+O から成る中心核とそれを取りまくヘリウムの中間層および水素の外層をもつような構造の星となる。C+O 中心核が成長するにつれて星は赤色巨星へと進化する。赤色巨星の段階では星の表面に対流領域が成長する。この対流領域は進化とともにますます深く星の内部へ侵入する。最近、この対流領域が星の進化に思わぬ影響をおよぼすことが明らかになった(後述)。しかし当時はまだそこまで進化の理論は明らかにはなっていないかった。

炭素燃焼段階: C+O 中心核の内部で電子が縮退を始

めるか否かによってその後の進化は違ってくる。質量がほぼ $6 M_{\odot}$ 以下の星では、C+O 中心核の内部で電子は縮退する。このような星では炭素燃焼時(中心温度は約 $5 \times 10^8 \text{K}$) にヘリウムの場合と同様なフラッシュ現象がおきる。炭素フラッシュのおきるときのC+O 中心核の質量は約 $0.7 M_{\odot}$ である。質量が $0.7 M_{\odot}$ より小さい星は炭素燃焼段階を経験せず白色矮星へと進化していくであろう。また $6 M_{\odot}$ より大きい星では炭素燃焼はおだやかにおこる。このような高度に進化した段階の星はHR図上では赤色超巨星の領域にある。表面の対流領域は星の内部深く侵入している。それゆえ、内部でのエネルギー源がヘリウムから炭素に変る変化があったとしてもHR図上での位置はほとんど変化しない。

以上が非常に大ざっぱな1963年当時の理論の展開である。当時、星の進化と関連して次に述べるニュートリノの問題が大きくクローズアップされていた。

3. ニュートリノの問題

もし星の内部で何らかの過程でニュートリノが作られたとすると、このニュートリノはたちまち星の内部エネルギーの一部をもち逃げしてしまう。ニュートリノは他の物質とほとんど反応しないため、作られるやいなや星から逃げ去ってしまうからである。

進化の進んだ星の内部で電子を媒介としてニュートリノが発生することを1959年にポンテコルボが指摘し、チウたちによって反応率が計算された。ある種の元素が β 線(電子)を出して崩壊することはずっと以前からわかっている。その際ニュートリノが発生するという話は有名である。 β 崩壊は素粒子反応のうちでもっともゆっくりした反応の一つであり、弱い相互作用という分類の内にいられている。弱い相互作用の理論はファインマンとゲルマンによって1958年に提案された。この理論では相互作用の強さをあらわす結合定数は、現在実験室で実験できる弱い相互作用をする反応については、実験誤差の範囲で全て等しい値をとっている。チウたちの計算は、実は電子とニュートリノの相互作用はこの理論および結合定数の値がそっくりそのまま使えるであろうという仮定の上立っている。実験室でまだたしかめられたわけではない。

1962年に林・カメロンは、もし以上のことが事実であ

第1表 $15.6 M_{\odot}$ 星の寿命 (単位は 10^5 年)

元 素	ヘリウム中心燃焼	ヘリウム殻状燃焼	炭素中心燃焼	それ以後
ニュートリノなし	12	0.5	2.5	~6
ニュートリノあり	12	0.6	~0.2	0
観測される星 の数の比 ($h+\chi$ Persei)	1.5~2 (青色巨星)		1 (赤色巨星)	

るなら、進化の進んだ星ではこの影響が大きくあらわれることを示した。炭素燃焼段階以後の星では中心温度は $5 \times 10^8 \text{K}$ 以上に上昇しており、大量のニュートリノの発生が予想される。これらのニュートリノは星の内部のエネルギーを大量にもち去る。そのため、ニュートリノの発生を考慮する場合としない場合とでは星の寿命は大幅に変ることになる。林たちは $15.6 M_{\odot}$ の星について計算を行なった。結果は第一表に示されている。

星団 $h+\chi$ ペルセイの星は質量がほぼ $16 M_{\odot}$ 程度であることが知られている。第1表のヘリウム中心燃焼段階はこの星団の青色巨星に対応し、ヘリウム殻状燃焼段階およびそれ以後の段階は赤色巨星に対応することがわかっている。 $h+\chi$ 星団で青色巨星として観測される星の数と赤色巨星のその比は、ヘリウム中心燃焼段階とヘリウム殻状燃焼段階およびそれ以後の進化の段階の寿命の比をあらわしている。観測からはこの比は 1.5~2:1 がえられる。この結果はニュートリノを考慮しない場合の進化で説明できる値である。

このことは、電子-ニュートリノの結合定数が β -崩壊のそれより小さいのではなからうかという結果をもたらす。その後この問題についていくつかの試みがなされている。ある場合には、結合定数は β -崩壊のそれと同じである方がよいという結果もえられている。

星の進化の理論はいろいろの物理過程の総合として得られるものである。上記のニュートリノもそのうちの一つとして進化に影響を及ぼしている。ある観測事実がたしかにニュートリノによる影響であるといい切ることとはなかなかむずかしいことである。

4. 自動計算による星の進化

1964年頃より、ヘニエの方法による自動計算の結果がいろいろと発表されてきた。わが日本においては大型電子計算機がわりと自由に使えるようになるのが1965年頃以後である。日本でも自動計算のプログラムに興味がある

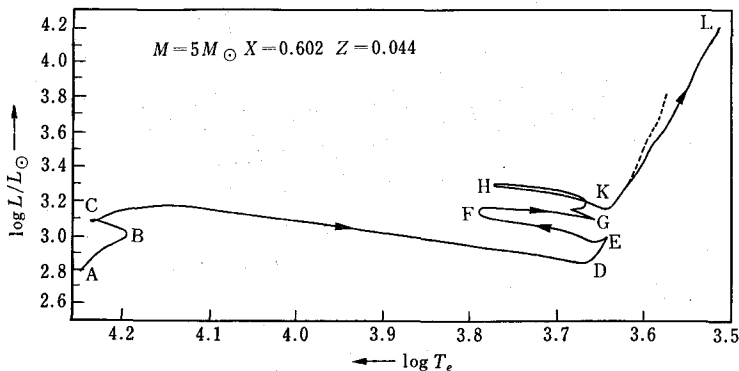
もたれ始めたのがこの頃であったようである。

ヘニエの方法とは、簡単にいえば、星の釣り合いの状態をあらゆる圧力、温度等のもっともらしい値を計算機に入れてやり逐次近似を上げていこうという方法である。進化の計算でやっかいな点の一つは、星の構造を記述する式の中に時間微分が入っていることである。つまり、星の進化には過去の歴史の影響がきいてくることになる。そのため、星の進化を計算する場合には過去の歴史の影響を考慮しながらある時間間隔後の構造を決定しなければならない。特別な場合を除いて一足飛びにうんと進化の進んだ段階の星の構造を計算することはできない。

ヘニエのアイデアのすばらしさは次の点にある。今時刻 t における星の構造が決定されたとする。それより Δt 時刻後の星の構造を決定する場合、時刻 t の星の圧力、温度分布等をもっともらしい値として計算機にあたえ、逐次近似を上げて Δt 時刻後の星の構造を決定できるといことである。最初にもっともらしい圧力、温度等の分布を計算機に入れてやるだけで自動的に時刻を追って星の進化を計算してくれることになる。

このようにして自動計算による結果がいろいろと発表された。特にドイツのキッペンハーンたちのプログラムは非常にうまくできているらしい。彼らの結果の一例は第3図に示されている。自動計算による方法は星の進化の理論の横幅を大いに広めてくれた。いろいろの質量の星についての進化がきわめて精密に計算されている。しかし、もっとも進化の進んだ星の計算はキッペンハーンたちによる炭素フラッシュの所までで終りとなっている。星の進化とはあくまで先へ先へと理論を展開することであると信じている単細胞の人間にとっては何かものたりない気がする。

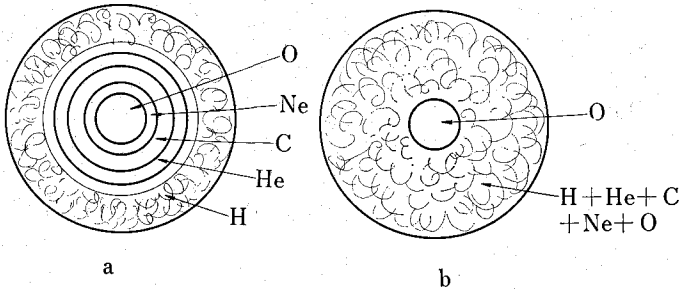
例外はないわけではない。1967年にラカビーたちによって、最初炭素と酸素から成る星が最も安定な元素である鉄の中心核ができるまでの進化を計算した仕事がある。



第3図 キッペンハーンたちによって計算された $5 M_{\odot}$ 星の HR 図上での進化

る。私たち京都のグループでも超新星の爆発段階までの進化を明らかにすべく自動計算を進めている。

ヘニエたちやキッペンハーンたちの計算方法とラカビーやわれわれの計算方法とは違ったやり方をとっている。進化の進んだ段階では星の寿命は短くなる。もしニュートリノの存在を仮定すると寿命は極端に短くなる。ヘニエたちの方法は寿命の短い進化の段階の計算にはが手であるらしい。一方ラカビーやわれわれの方法は寿命の短い進化の段階の計算は得意である。水素燃



第4図 進化の進んだ星の構造の概略図

焼段階やヘリウム燃焼段階のような寿命の長い進化の計算はヘニエたちの方法で非常にうまく計算が行なわれる。以上のようなことがほぼ明らかとなった。もしこの両方の特徴を取り入れ、寿命の大小によってどちらかの方法になるようなプログラムを作ることができれば一ということが考えられる。もうそういうプログラムが杉本によって完成されている。

星の進化の理論を精密にすることも進化を先へ進めることと同様に大切なことである。星の進化の理論を書き改めなければならないような新しい事実がどこにひそんでいるかわからないからである。割愛させていただいたが、フリッカーと呼ばれる新しい不安定性がみつかったのは、シュバルツシルドたちによるヘリウム燃焼段階のくわしい計算の結果である。

流体力学分野では電子計算機による数値実験でしばしば新しい事実が発見されている。非線型微分方程式を解かなければならない星の進化の分野でも、計算機によって新しい事実が明らかにされる可能性は十分考えられる。

5. 最近の動向

ストザースは今でも古典的な方法で星の進化の計算を行なっている。古典的というのは自動計算でない方法とと思っていただきたい。彼は炭素燃焼段階以後の進化の進んだ段階では表面の対流領域が非常に深く侵入し、これまでは第4図 a のように進化するであろうと考えられていたものが、実は b のようにごくわずかの芯の部分を除いてほとんど対流によってかきまぜられるという結果を得た。その後杉本によりくわしい計算が行なわれ、この事実は確実なものとなった。ただ、ニュートリノの存在を考慮した場合には進化の寿命が極端に短くなるため、対流外層が内部深く侵入できなくなる。この場合は、今まで予想されていた星の構造がわずかの修正のみでそのままあてはまることになる。

ニュートリノなしの場合には、表面の対流領域は内部に存在した核反応生成成分を巻きこみ、この対流領域での重元素の量はふえる、重元素の多い晩期星の観測と上記

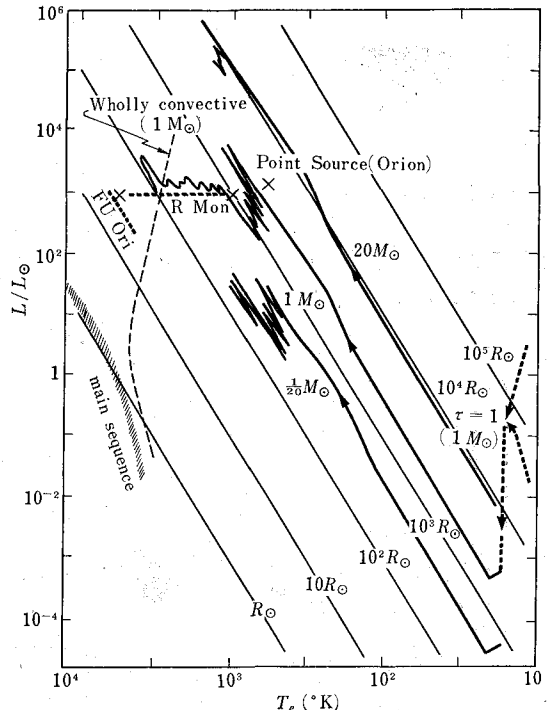
の結果からニュートリノの存否に関する情報を得ることができるかも知れない。

上記の結果を前超新星段階まで延長して考えてみる。星は多分鉄の中心核と対流外層から成る単純な構造をしていることが予想される。鉄の光分解、または電子捕獲による不安定性が引き金となって始まる超新星爆発の機構はわりあい単純であるかも知れない。

6. 原始星の進化

ホイル・シュバルツシルド (1955) によって、赤色巨星の外層には水素の不完全電離に起因する対流外層が存在することがわかっていた。1961年に林は中心までこのような対流領域の存在する星の平衡状態を調べた。その結果、このような星は第1図で示されるように表面温度はあまり変わらず、光度を減少しながら進化することが明らかになった。このような進化の段階を HAYASHI Phase と呼んでいる。さらに、HR 図上で HAYASHI Phase より低温度の領域では平衡な星は存在できないことがみつげられた。

今星間雲から原始星が誕生する場合を考えてみる。誕生した原始星は多分表面温度は低く半径は非常に大きいであろう。もしこのような星を HR 図上にプロットすれば、HAYASHI Phase より低温度領域にくることは明らかである。そうだとすれば、このような原始星は平衡



第5図 HR 図における原始星の進化 (成田・中野・林による)

な状態にはあり得ないことになる。

林・中野によって雲の収縮から星が誕生するまでの進化がくわしく調べられた。初期には雲は透明であり、その温度はまわりの星からの光と雲に含まれているグリーンによる光の放射とのつり合いで決まる。その温度はほぼ 15°Kである。この温度は非常に低く、圧力は重力より著しく小さい。つまり雲は重力的な陥没の状態にある。陥没状態が続くと雲は不透明になり、輻射は雲の内部に閉じこめられて原始星の誕生をみる。原始星がさらに陥没状態を続けると、中心近くの領域ほど急速に圧力が上

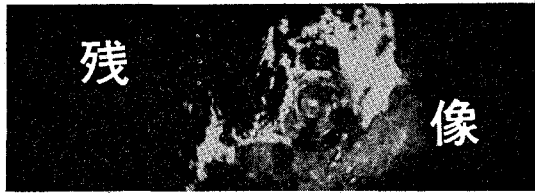
昇して重力と釣り合うようになる。そのため衝撃波が発生し、外層に向かって伝播する。衝撃波が表面に達すると、星の光度はたちまち増大する。やがて表面に対流領域が出現し、あとは HAYASHI Phase にそっておだやかな進化を開始する。成田・中野・林によって上記のようなダイナミカルな原始星の進化が電子計算機により計算された。太陽質量の原始星は 10 日間くらいの間に現在の太陽の 2,000 倍も明るくなる(第5図)。太陽についてもこのような時期があったであろう。太陽系の起源に対して無視できない影響をあたえるものと思われる。

**マクドナルド天文台の
2.7 m 反射鏡**

2 月中ごろ、一部の国内新聞紙上に、マクドナルド天文台の 2.7 m (107") 反射望遠鏡が破壊されたというニュースがのり、憂慮されていたが、このほど国際天文学連会の回報第 2209 号に、スミス天文台長が報告を寄せている。それによると、2 月 5 日

の主鏡に向かって 9 mm 口径のピストルの弾丸 7 発を発射した。鏡面には直径 3~5 cm のクレーター(複数)が生じたが、そのための集光力の減少は約 1%、ごくわずかの量の回折が

が起っていないことがわかった。観測は次の夜から再開され、準星を写した星野写真は、それまでにこの望遠鏡で得られた最上質の写真の部類に入るそうである。新聞に誤って報じられたような致命的な損害でなかったのは何よりのことであるが、巨大科学のなかでの技術職員的位置づけの問題について、一つの警告を投げかけるものを含むように思



おきるにすぎないという。フーコー われる。テストその他によっても、鏡に変形

**宇宙の謎を聞く
電波望遠鏡**

マイクロ波帯よりミリ波帯まで
東京天文台の御指導を仰ぎつゝ、
この道十余年……

性能の一例

- 周波数 7000±100MHz
- パラボラ直径 1.5 m
- ビーム幅 1.8度
- 雑音指数 11.2
- 中間周波 70 MHz
- 標準雑音レベル 300°K



島田理化学工業株式会社

本社 東京都調布市柴崎町 4 1 5 TEL 042483-2111