

ハヤシ・フェイズが発見された頃

杉本 大一郎

〈東京大学教養学部宇宙地球科学教室 〒153 東京都目黒区駒場 3-8-1〉
e-mail: sugimoto@chianti.c.u-tokyo.ac.jp

ハヤシ・フェイズは星と太陽系の形成に関して新しいパラダイムを開いたが、副産物として発見された。理論研究の進め方について、多くのことを示唆している。

さる11月、林忠四郎先生は京都賞を受賞された。そのときの様子は本号の観山正見氏の記事に詳しく述べられる。それ以前にも、林先生は文化勲章に至るまで何度も顕彰されておられる。天文月報では、その都度、林先生の研究業績が紹介されてきた。最近のご研究の様子については、これも観山氏がふれてくれる。ここでは繰返しを避けて、昔の話を書いて見る。林先生の業績を語るとき、まず最初に引合いに出されるのがハヤシ・フェイズの発見であるが、その場に居合わせた私なども、もうすぐ定年の年齢になってしまう。このあたりで書いておかないと、記事にすることが出来なくなってしまいそうだからである。それにハヤシ・フェイズの発見は、理論研究の展開という面でもひとつの興味深い例になっているからである。以下では、なるべく事実に即したように書くつもりであるが、たんに私の解釈にすぎないことを最初に断っておきたい。もし間違いが含まれていれば、その責任は私自身にある。

1. わずか3ページの論文

「副産物が出たよ」。1960年のある朝、研究室に顔を出した私に、林先生がそうおっしゃったのを、私ははっきりと覚えている。

その「副産物」は、後にハヤシ・フェイズとして、星の誕生と太陽系の形成史を書き変えると共に、新しいパラダイムを開くもととなった。いわば副産物が主産物のひとつに転化したわけであ

る。そのもっとも大切なところは、図1に示されている（この図には歴史的意義があるので、林先生の論文から、手を加えずにそのまま引用した）。これはHR図とよばれ、星の光度の対数を表面温度の対数に対してプロットしたものである。星間ガスが収縮して星が生まれるとき、それまではヘニエイ収縮（L. G. Henyeyによって最初に提唱された）といって、星は図のC点からP、Dを通過して静かに主系列星（M. S.）に落ちつくものと考えられていた。それに対し、林先生の新しい説では、星の内部は急激に収縮するが、星の表面の収縮は遅く、星は半径Rをほぼ一定に保ったまま、 $R = \text{Const}$ と書かれた点線に沿って移行し、AP線上に忽然と現れた後、P点へ向かって収縮する（この線はハヤシ・トラックともよばれる）。そして、P点より後は、以前からの考えどおり、ヘニエイ収

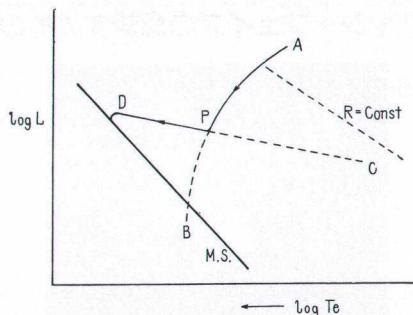


図1 ハヤシ・フェイズとヘニエイ収縮の進化をHR図上で比較する概念図。ハヤシ・フェイズ発見の論文に掲載されたもの。

縮をして主系列星に至るというのである。

この新しい考えは、翌1961年8月15~24日、アメリカのパークレーで開催された国際天文学連合 (IAU) 総会における研究会で発表された。話によると、この新説は聴衆には殆ど理解されなかったようだが、座長のシュバルツシルド (M. Schwarzschild) は理解し、その重要性を指摘してくれたのだそうである。論文は天文学会の欧文報告誌 (Publ. Astron. Soc. Japan) に投稿された。そして、1961年8月28日に受領され、レフェリーを通すのは省略して12月号 (Vol. 13, No.4, pp. 450-452) に出版された。林先生は、それまでは殆どの論文を物理学の研究誌であるプロGRESSに投稿されていたのだが、この論文は内容が天文学により近かったからであろう。当時の編集長であった海野和三郎氏の勧めもあったようである。この論文が天文学会の欧文報告誌に掲載されたことは、海野先生ご自慢のひとつである。

論文の題名は、「初期重力収縮段階の星の進化 (Chushiro HAYASHI: Stellar Evolution in Early Phases of Gravitational Contraction)」で、その長さはわずか3ページであった。この論文が、その後、これほど重要なものになるとは、海野編集長以外には、必ずしも気づかれていなかったようである。

2. ハヤシ・フェイズの意味するもの

林先生のこの新説が重要なのは、それまでの星の誕生に関する理解を大きく変えたばかりではなく、その後に研究すべき新しい問題を数多く提起することになったからである。まず第1に、それは生まれたばかりの星団のHR図を説明した。図2も林先生の1961年の論文からそのままってきたものである。この図に実線や点線で示されているのは等時曲線 (isochrone) と呼ばれるもので、星団が生まれてから経過した時間 (年単位) で表

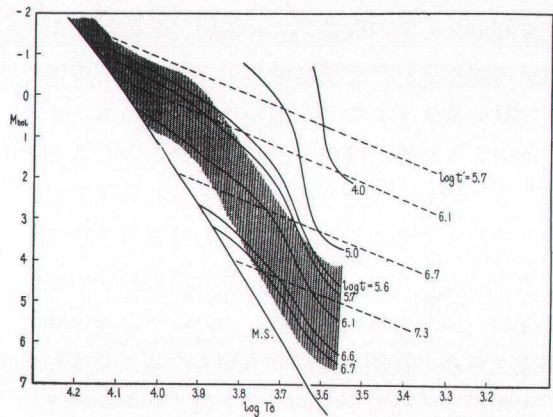


図2 ハヤシ・フェイズの等時曲線 (実線) が若い星団 NGC2264の HR 図とよく合っていることを示す図。ヘニエイの等時曲線 (点線) は合っていない。ハヤシ・フェイズ発見の論文に掲載されたもの。

した星団の年齢の対数がそれぞれの線の端に示してある。星団の星ぼしの HR 図は、この線のひとつに乗ることになる。

この図に実線で示された等時曲線は、ハヤシ・フェイズを考慮に入れて計算されたものであり、マゼラン星雲に観測された若い星団 NGC 2264の星ぼしについて斜線で示された HR 図とよく一致している。特に、図の下側で、観測された星の系列が右に湾曲している様子が再現されている。この図から、星団の年齢は50-400万年であることが分かる。これに対し、点線で示されているヘニエイ収縮の等時曲線は、観測とはまったく関係のないところを走っているのである。こうして、ハヤシ・フェイズという考えは観測によって検証されていたのである。

この発想の転換がもたらした影響はいろいろあった。星が生まれるとき、その後に落ちつくべき主系列段階に比べて、数10倍から数100倍の明るさという高光度の時期を経たことは、星団のHR図の形を変えるだけでなく、生まれたばかりの星の発見にも関係する。その後、オリオン座FU星とか一角獣座R星など、数週間で見えなくなった星の

観測と結びつけられた。生まれたばかりの星の周りは星間ガスと塵が取巻いているが、それが高光度の星に照らされて急速に晴れ上がり、星が可視光線で見えるようになったというわけである。また、そのような高光度の時代があったということは、そこで形成されたと考えられる原始太陽系星雲に、それまで考えられていたのとは異なる環境を与えることになる。そして、高光度の時期の進化は速い(図2の数値を参照)から、そこで惑星が形成されるのに使える時間も短くなる。こうして、太陽系形成論も全面的に考え直す必要が起ってきた。それは、その後、京都モデルと呼ばれる太陽系起源論に結実することになるのである。

図1でAからPへの曲線に沿って原始星が収縮していくとき、星の明るさが減少するにつれて、進化の速さは次第に遅くなる。そして、明るさが最低のP点では進化がもっとも遅い。そこでは、主系列星へ向かう道に渋滞が起り、P点に近いところには比較的多くの星が観測されることになる。これが、おうし座T星をプロトタイプとするT・タウリ星に対応することは、林先生の1961年の論文ですでに指摘されていた。この星は、まだ完全にはヘニエイ収縮に落ち着いていないし、その表面にはそれまで凍結されていた磁場を持っていることになる。こうして大規模フレアーなど、T・タウリ星表面に観測される電磁流体现象が説明される。そして、このフレアーから吹き出す星風(太陽風の大規模なもの)は、原始太陽系星雲からガスを吹き飛ばし、惑星の形成過程を終了させるものとして位置づけられるようになる。

3. 最初の研究目標

林先生は1959年から60年にかけて、米科学アカデミー(NAS)の研究員として、米国航空宇宙局・ゴダード宇宙航行センター(NASA/GSFC)に滞在された。そこに導入されていたIBM 7090という計算機は最新のものであった。当時のアメリカは、科学計算にコンピュータを使ってみよう

という気風にあった。大口の課題としては気象学と星の内部構造論があったが、その中心の一つとしてプリンストン高等研究所(IAS)とプリンストン大学があり、シュバルツシルドと協力者ハーム(R. Härm)がその方向で研究を進めていた。林先生はそれに対抗して、NASAでも星の進化のコンピュータによる計算を始められ、話題になったのだそうである。NASAに行かれる前から、坂下志郎氏らと日本で電動式歯車計算機や手計算で研究を進めておられた、太陽質量の15.6倍という重い星の進化の計算である。

コンピュータを使うことで、その研究は大きく進んだ。それまでは主系列星の水素燃焼段階が中心課題であったが、それに続くヘリウム燃焼段階まで明らかにされ、ペルセウス座の二重星団h+χの進化が分かってきた。計算は、星の中心部でヘリウムが消費されてしまうところを過ぎて、中心で炭素が燃焼を始める段階まで進められたが、そこで困った問題が起った。星の外層が放射平衡にあって、内部から流れてくるエネルギーが放射で運ばれているとすると、星の半径は赤色超巨星の半径に比べて何桁も大きいという計算結果になるのである。

一方、ホイール(F. Hoyle)とシュバルツシルドは1955年に球状星団の軽い星の進化について、アストロフィジカル・ジャーナル(Ap.J.)のサプリメント第2巻に、すでに大論文を書いていた。ここでは、球状星団の巨星分枝がなぜ観測される赤色巨星の位置にくるのかという問題も論じられていた。M3など種族IIの星団に比べてM67という同じく軽い星からなる銀河星団も同様なHR図を示している。その巨星分枝がなぜM3のものよりも低温のところにあるのかについても、M67は金属元素がより多く、光に対する不透明度(opacity)が強いからだという説明を与えていた。それが意味するのは、赤色巨星では星の半径は星の内部構造よりも、むしろ星の表面近くの条件で決まっているということである。そして、そのよ

うな赤色巨星にほどほどの半径の値が実現されるためには、星の外層は放射平衡ではなく、外層の大部分で対流が起こっている対流平衡になればならないことも分かっていた。そこで問題は、対流のことも考えて、赤色巨星の表面条件を求めるといことであつた。林先生は、星の進化の研究を赤色巨星の段階まで進めるために、まずそのような星の表面条件を明らかにしようとされていたわけである。

この問題を難しくする主な要因は2つあつた。ひとつは、表面条件とはいうものの、それを決定するには対流層がどのくらい深くまで入り込んでいるかを知る必要があつた。そして、それを知るためには、星の内部構造も同時に解かなければならず、そのためには表面条件を知っていなければならなかつた。もうひとつは、星の表面近くではガスの密度が低すぎて、対流だけでは星の内部から流れてくるエネルギーを運びきれず、(地球の大気の場合と同様に)対流による熱の輸送と放射による輸送とが共存することである。しかも対流の理論は不十分なものしかなく、対流による輸送を定量的に扱う確たる根拠がないのである。

そこで他の研究者が行なっていたのは、次のようなアプローチであつた。第1の問題については計算機を駆使して、全体を一挙に解いてしまおうとする。第2の問題については、対流の混合距離理論を使い、混合距離とガスの圧力が有意に変化する高さ (pressure scale height) との比をパラメーターにして、計算機プログラムに組み込んでしまふ。そのようなアプローチは、計算が大変になるだけでなく、結果が得られても数値的に複雑すぎて、どんな物理過程が本質であるかを理解することが難しいものであつた。この状況は、今日の計算機を使った研究でも、多くの場合に当てはまる。もっとも当時の日本では、かりにそのようなアプローチをとろうとしても、計算機事情がそれを許さなかつたことも事実であつた。

林先生のアプローチは次のようなものであつ

た。簡単な第2の問題から述べる。どうせパラメーター化するのなら、対流による輸送の効率としてのパラメーターにして、星の内部の圧力分布に係するものから切り離してしまわれた。さらに、対流と放射のそれぞれが部分的に受け持つところを詳しく計算するのはやめて、どちらかひとつだけだと近似し、適当なところで対流と放射を切り換えることにされたのである。

第1の点については、星の外層の解を無次元の変数で表すと、 E というひとつのパラメーターで表せることに注目された (E は星の質量の平方根と半径の $3/2$ 乗の積に比例し、粒子1個当りのエントロピーを e の指数に上げたものに反比例する)。そして、 E をパラメーターとする解は、すでにハームとシュバルツシルドによって、1955年のAp.J.サプリメント第1巻に表として載せられていた。ちなみに、それは星の外層や内部の解をいろいろな場合について積分したのを表にまとめたもので、私も当時は重宝した。1962年に出版され、その後広く引用されることになった183ページの論文、いわゆるHHS(林・蓬茨・杉本)でもそのような積分をいろいろと拡張したものである。そのような表では、独立なパラメーターの数を減らすために、構造のホモロジーに合わせた無次元変数で記述し、次元をつける段階でいろいろな解に当てはめることが必須である。そして対流層のある解も、そのようになっていた。

大切なことは、無次元変数で表現したために、とりうる E の値は45以下でなければならないと分かっていることであつた。 E の値がそれより大きいとして、星の構造の式を外部から内部へ向かって積分していくと、半径がまだ有限値なのに、それより内部に存在すべき質量がゼロになってしまうという、崩壊型の解になってしまうのである。そのような解は、現実の星にはあり得ない。だから $E=45$ を上限値として考えておけばよいのである。逆に、他の研究者が計算機でやっていたように、次元のついた変数で考えていたのでは、そ

のような上限値の存在に気づかないことになる。

林先生は、そのような枠組みで、赤色巨星の表面層を積分された。そして、幸いなことに、結果として得られる赤色巨星の HR 図上での位置は、それらの近似には僅かしか影響されないことが分かったのである。もっとも大切な発見は次のことであった。星の光度が等しいとき、 E の値が小さいと星の半径は小さく、 E の値が大きいと半径は大きい。だから、 $E=45$ の解が与えるものより大きい半径をもつ解は存在し得ない。その半径をいろいろな光度に対してプロットすると、図 1 の A-P-B という曲線が得られる。

こうして、今後はこの曲線を赤色巨星の表面に対する境界条件として使いましょうということになった。進化の進んだ星の構造を解くとき、その光度さえ分かれば、星の半径のことは気にしなくても良いということで、進化の研究を先に進めることができるようになり、所期の目的を達したというわけである。そして、いろいろな質量の星について、そのような表面条件が計算された。その結果は、ハヤシ・フェイズの論文が掲載されたのと同じ号に、その 1 つ手前の論文「表面对流層をもつ巨星の外層 (C. HAYASHI and R. HOSHI: The Outer Envelope of Giant Stars with Surface Convection Zone)」として掲載されている。

4. 副産物から主産物へ

しかし、ここに留まらなかったのが、林先生の偉いところである。 $E=45$ より大きい解がないのなら、HR 図上の A-P-B という線より右側に星が存在する筈はない。そこで、「(ハヤシの) 禁止領域」と名づけられた。しかし、図 1 のヘニエイ収縮による進化の軌跡は禁止領域を通っているではないか。だから C から P への進化は、重力収縮という穏やかな進化ではありえない。禁止領域では力学平衡解がないのだから、星は重力で潰れる動的 (dynamical) な進化をするであろう。しかし、潰れる速さは星の内部の場所によって異なる。密

度の高い中心部は密度の平方根に比例して急速に収縮しても、密度の低い星の表面近くはゆっくりとしか収縮しない。だから、中心部が収縮する間、星の表面の半径は一定値に留まると見なしてよい。こうして描かれたのが、図 1 の $R=Const$ と書かれた点線なのである。星が最初にどこで生まれるかは分からないが、星間ガスのエントロピーは高いから、星が最初に落ち着くのは、ヘニエイ収縮の場合より明るい、A-P のどこかであろう。こうして、星が生まれるときには急激に明るくなり、フレアー・アップすること、重力平衡の解に達した最初の段階では、星の内部の殆どの領域で対流が起こっていること、そして星の内部のエントロピーが汲みだされるにつれて星が暗くなると同時に、中心部に放射平衡の領域が現れて成長し、表面对流層は薄くなって星は P 点に近づき、ヘニエイ収縮に移って行くという、ハヤシ・フェイズの描像を作られたのであった。

このように、ハヤシ・フェイズは赤色巨星の表面境界条件を求めていくなかで、その副産物として生まれた。そして、主産物と同等かそれ以上に大きいテーマに成長した。図 1 で $R=Const$ のところに相当する、星間ガスから原始星への動的な進化は、その後のコンピュータの発展を待って、主要な研究課題のひとつになった。太陽系起源論に新しい局面を生み出すことになったのは、すでに述べたとおりである。こうして副産物を見つけ、もうひとつの主産物に育て上げられたところに林先生のスケールの大きさを見るのである。

最初の目的であった第 1 次主産物の方はどうなったであろうか。そのころ、赤色巨星の光度は、進化した星の中心核と外層との境目のあたりの条件から決まるということが分かった。それは、先に述べた $E=45$ の話で現れた崩壊型の解に対し、半径が小さくなるころまで積分していってもその中に有限の質量をもつ芯が残るといふ、凝縮型の解がもつ性質から決められる。こうして、進化した星の内部構造は、中心核の問題と外層の問題

が分離できること (separable) になったのである。そして、外層のことは気にせず中心核の進化を研究し、他の研究者に先駆けて超新星直前の段階まで進化の研究を押し進めることができた。そのあたりのことは、天文月報の1995年12月号に私が書いたので、ここでは繰返さない。

5. 理論研究について思うこと

こうして林先生の研究室では、星の進化の初期段階の研究と進化の後期の研究という2つの流れが出来てきた。それに、林先生が1940年代の終わり頃から研究されていた膨張宇宙での元素の起源などとも関連して、宇宙論の流れが加わった。こうして、主系列星近くを詳しく計算して観測と詳細に比較するという種類の研究は他のグループにまかせて、新しい局面を開拓していくことが中心となった。

研究室の運営で林先生が気を使っておられたと私が思うのは、それぞれのメンバーがそれぞれのテーマをもって研究を進めること、そして、どれかの研究がうまく進むと、他の研究を進めるのに役立つことになるように、全体のテーマとその流れを組むことであった。そんなに分野や対象が広がると、すべてを理解することが難しくなる。それでも全体の研究が有機的に進むためには、お互いのコミュニケーションが大切である。毎週土曜日の午後全部がそれに割り当てられた。

研究を進めるに当たって林先生が強調されていたのは、次のようなことであった。第一義的に大切なことは、これまで必ずしも知られていなかったり明確でなかったりした原理的なこと、基礎過程、方法をきちんと押さえ、解明することであった。そうして、それを武器にすると、他人では出来ない事柄を研究し、解明することができる。研究はスポーツではないから等しい条件のもとで競争するのではなく、いい条件をつくり、いい道筋を見つけた競争の方が大切なのである。

そのようにして開拓できるテーマが決まった

ら、まずは問題を広げられる限り広げておき、その中で差し当りの課題を位置づける。これは、広い視野をもって研究を展開し、新しいパラダイムを作っていくために必要なことである。そして、その課題が一山越えるまで進める。世間の秀才がよくやるように、誰もが考えている問題を器用になし、難しい山にさしかかると他の問題に移って代わり身の速さを誇示するのは、違うやりかたなのである。だからといって、代わり身が遅いわけではない。一山越えた後、誰でもが出来る課題になると、それらは人にまかせて、新しいテーマに、それも、それまでの成果が生かせるものに、接続的に移行しながら広げていくというわけである。それに対し、最近では、関連した事柄は細かいことまで全部解明して、きれいな表にまとめるところまでやるほうが、世間の評価を得るのに良いという考えがある。しかし、それをしていると、次の新しい研究が始められなくなる。

ここに述べたことは私の勝手な解釈かもしれない。しかし、林先生の研究と研究室は、今回の京都賞の贈賞理由説明の最後の段落で、次のように述べられている。「このように、博士は宇宙物理学に新しい統一的な知見をもたらし、宇宙の基礎的構成物である星と惑星の一貫した理論を構築することに成功した点で、今世紀を代表する宇宙物理学の巨人である。また、これらの研究の過程で、多くの優れた研究者を育成したことも高く評価されており、博士は第11回京都賞基礎科学部門地球科学・宇宙科学の分野の受賞者に真に相応しい。」

林先生がもうひとつ強調されていたことに、研究結果は単純明快に(数式や計算を細かくたどるのではなく図に描いて)説明しなければならないし、重要な事柄ならそのように説明できるはずだということがあった。最近の問題が複雑な非線形システムになったこともあって、そのような説明が難しくなっている。それに論文を読んでも、計算結果を表す(計算機の描いた)複雑な図がたくさん出てきて、何がもっとも主要な過程

として何を決めているかが分からなくなってきた。最後までは詰められないとしても、著者自身が限界まで追い詰めているとは思えないことが多い。論文を投稿すると、細かいプロセスについて、あれが入っていない、これが考慮されていないとか言って来る。そこで、著者がレフェリーに、それらは取り入れても影響がないことを言い聞かせる必要が起こる。しかし、それよりも、影響がないことまでも取り入れておいて、「それは入っています」と答えたほうが、(どうせ計算時間が少し長くなるだけだから)簡単だという人もある。こうして、何が本質であるかは、ますます分からなくなる傾向がある。

このような傾向は、最近の計算機万能時代にますます甚だしくなっている。もしかすると、生まれたときから計算機が存在する環境で、新人類に進化し、新しい認識方法が生まれつつあるのかもしれない。しかし、同様な問題は昔にもあった。ハヤシ・フェイズが最初に発表されたとき、シュバルツシルド博士しか理解してくれなかったということを先に書いた。それが信じられるようになったのは、その後、すべての過程を取り入れた計算が計算機を使ってなされるようになり、それらがどれも林先生の予言どおり、ハヤシ・フェイズを通る進化をたどる結果を出したからであった。

6. 星の構造と進化の簡単な説明

星の進化については、「なぜそうなるか」がとくに分かりにくいと言われる。ある専門家が大学院生に講義をしていて、彼自身が必ずしもよくわかっているとは言えないと告白していた。そこで、この昔話を終わる前に、関連するいくつかの事柄について、原理的で簡単な説明を与えておこう。そうしないと、計算機だけがその訳を知っていると思われる時代になりそうだからである。以下の説明は基本概念と次元解析だけで理解できるから、興味ある人は少しだけ手を動かしてみしてほしい。

1) 禁止領域からハヤシ・フェイズに入ったとき、星全体で対流が起こっているわけ。星間ガスの単位質量あたりのエントロピー(以下では、たんにエントロピーという)はヘニエイ収縮の星がもつべきエントロピーよりもはるかに高い。このため、生まれたばかりの星の半径は大きく、表面層の密度は低い。そこで、表面層は放射によって急速に冷える。すると星の内部で上層の方が下層よりエントロピーの低い状態が出現する。重力向きとは逆の方向にむかってエントロピーが下がっている状態は、トップ・ヘビーの状態であり、レーリー・テラー不安定が発生して物質混合が起こる。対流が発生するわけである。星の中心部のエントロピーでさえ星の表面条件から要求されるエントロピーより高いので、この現象は対流が星の中心部に到達するまで続く。その後は、星が光を放射してそのエントロピーが低くなるのに対応して、ガスの密度が上がり、放射が外部へ流れ出るのが遅くなって星は暗くなり、ハヤシ・トラックを下がっていくのである。

2) ヘニエイ収縮に近づいたとき放射平衡の部分が星の中心部から現れ始めるわけ。星の内部の対流平衡にあるところではエントロピーがどこでも一定、放射平衡のところでは外へ向かって増大しているものである。だから中心部のエントロピーが下がると、外層から放射平衡になっていくと思うかもしれない。しかし、実際は、放射によるエネルギー輸送の効率によって決まる。星が暗くなって輸送すべき熱(より正確にはエントロピー)が減ったとき、中心部の方が先に放射だけで熱を運べるようになるから、中心部から放射平衡のコアが現れて、成長していくのである。そのことは、次の次元解析で分かる。星の内部の半径 r の球面上の温度と圧力を T および P 、その球面より内部に含まれている質量を M_r で表す。その球面を通過して単位時間あたりに流れ出るエネルギー L_r は(対流平衡の領域ではエントロピーは空間的に一定だから)、 $L_r \sim \langle T \rangle M_r$ という比例関係にある。

ここで $\langle T \rangle$ は、それより内部の温度の平均値を表す。それと比較すべき、放射によって運ばれるエネルギーは、不透明度を κ とすると、 $L_r \sim T^4 M_r / \kappa P$ に比例する（対流が起こっているときの断熱温度勾配は一定としてよい）。星のホモロジーの変化は無視できるから、 $T^4 / \kappa P$ は（理想気体の場合には）、 κ を一定だとすると T の1.5乗、 κ をクラマース型だとすると T の3.5乗に比例する。したがって、温度の高い中心部のほうが、先に放射だけで熱が運べるようになるので、中心部から対流が消え、放射平衡になっていくのである。

3) 進化した星の中心核が収縮したとき、外層が膨張して星が赤色巨星になるわけ。進化の後期の星のことであるが、これはよく出される疑問なので、ここで述べておく。進化した星の中心核は水素を含んでいない。それが水素をもつ外層を被っていると、外層の底の薄い球殻で、水素がヘリウムになる反応が起こり、核エネルギーが解放される。これは水素殻燃焼とよばれる。中心核で核エネルギー源がなくなったとき、中心核は重力収縮する。このとき水素燃焼殻も同時に収縮すると、その温度が上がって、核反応が強くなりすぎる。したがって水素燃焼殻の位置は一定に留まるとしてよい。中心核の占める体積は一定だというのに、中心部では重力収縮が進んで密度が高くなる。その結果、水素燃焼殻のすぐ内側の密度が必然的に下がる。温度が一定で密度が下がると、圧力も下がる。星はこの低い圧力で外層の重さを支えなければならないので、外層を膨らませ、重力の弱いところに追いやって、軽くして支えるのである。逆に、圧力が足りないのだから少し収縮して密度と圧力を上げ、それで支えればよいではないか。そのほうがふつうに起こる現象だ、と思うかもしれない。しかし、そうすると、核反応が速くなり、エネルギーが出すぎる。核反応の速さは温度に強く依存するからである。エネルギーが出すぎると、それは外層を重力に抗して持ち上げる、すなわち外層を膨張させることに使われる。こうして、上

に述べた平衡解は、それに至る変化と辻つまが合っているのである。

4) 赤色巨星の光度が中心核の質量だけで決まるわけ。水素燃焼殻のすぐ外側では、圧力の対数に対する温度の対数の（空間）変化率（放射温度勾配、 $d \ln T / d \ln P$ ）は一定（ $=1/4$ ）とみなしてよいから、そこを流れる光度は $L_r \sim (1-\beta) M_r / \kappa$ という比例関係にある。ここで β はガスの圧力の全圧力（ガス圧と放射圧の和）に対する比である。不透明度には電子散乱の過程が効いているので、 κ は一定である。さきに述べたように、水素燃焼殻の温度は一定値に留まるから、重力収縮が進むと密度が下がり、 β が減少して星が明るくなる。一方、星の外層の凝縮型の解の性質から、水素燃焼殻では $M_r \beta / r T$ は一定値であるとみなしてよい。そこで、球状星団の巨星分枝の星や中質量で炭素燃焼が始まる前の星など、電子の量子力学的縮退で中心核の力学平衡を保っている（ので重力収縮が本質でない）星では、中心核の質量 M_r が大きくなると β の値が下がり、星は明るくなる。その影響は β の値が1に近いときほど大きい。これをある範囲内に限って経験式で表したのが、パチンスキー（B. Paczyński）の「中心核質量と光度の関係式」として有名になったものである。この式は、理屈抜きで応用できるので、そちらの方が有名になった。これまでに述べた私の主義にやや反するが、結果を普及させるためには、そのような表現も必要だということになる。

When Hayashi Phase was Discovered

Daiichiro SUGIMOTO

Hayashi Phase opened a new paradigm in the theory on birth of the stars and origin of the solar system. It was, however, found as a by-product during his research on the surface boundary conditions for red giant stars. It is very much suggestive in theoretical researches—how they should be performed and conducted.

Affiliation: Department of Earth Science and Astronomy, College of Arts and Sciences, University of Tokyo