

林先生と恒星進化論

杉本大一郎*

1. 恒星進化論の夜明け

恒星進化論がいつ始まったかを決めるのは難しい。エムデン (R. Emden) が「ガス球 (Gaskugeln)」という本を書いたのが 1907 年のことだから、恒星の内部構造が議論されたのはそのころまで遡る。しかしその頃は、ガスの密度と圧力の間にポリトロープという関係を仮定して、恒星の内部構造を論ずるものであった。

次の時期を画するのは、エディントン (Sir A. S. Eddington) の「恒星の内部構造 (The Internal Constitution of the Stars)」という書で、1926年に初版が出された。ここで進んだのは、恒星内部でのふく射による熱の流れを考慮にいたしたことである。その結果、恒星内部の温度分布が定まり、それを媒介にして、密度と圧力の関係も決まる。こうして、ポリトロープという仮定はいらなくなったわけである。最近あまり聞かなくなったが、ここで提出されたのがエディントン・モデルである。

第3の進歩を代表するものは、1939年にチャンドラセカール (S. Chandrasekhar) が著した「恒星内部構造論入門 (An Introduction to the Study of Stellar Structure)」である。その少し以前に、ファウラー (R. H. Fowler) は、シリウスの伴星のような白色わい星の内部では電子ガスは量子力学的に縮退しているということを指摘していた。チャンドラセカールはその理論を詳しく、特殊相対性理論の効果を考えると、恒星内部構造論を数学的に整備して、白色わい星の限界質量、チャンドラセカール限界を見つけたのである。

しかし、これらの話はまだ恒星「内部構造論」であって、「進化論」ではなかった。実際、恒星のエネルギー源が原子核反応によるものであるとは、1920年にペラン (J. Perrin) とエディントンによって推測されていた。しかし、その反応が具体的に分かるようになったのは 1938~9年のことで、ベーテ (H. A. Bethe) やワイツェッカー (C. F. von Weizsäcker) が水素をヘリウムに転換する pp チェインや CN サイクルを理論的に示してからである。それによって、恒星の進化を議論する材料がそろったことになったわけである。

林先生が大学を出られたのは 1942年というから、それはちょうど、恒星の内部構造論が進化論になろうとしているころであった。その年に、「恒星の中心部で水素

がヘリウムに転換されてヘリウム中心核ができるが、その大きさが恒星の質量のおよそ 10 パーセントを越えると、恒星の内部構造の解が存在しない」という論文をシューンベルグ (M. Schönberg) とチャンドラセカールが書いた。その限界値がシューンベルグ・チャンドラセカール限界と呼ばれるものである。そして、解のなくなった恒星は、その後、どうなるのだろうかというのが大問題であった。

もうひとつの大問題は、赤色巨星のように半径の大きい星は、いったい、どのような構造になっており、どのようにして出来るのだろうかという疑問であった。ポリトロープやエディントン・モデルのような星では、半径の大きい星は低温の、まだ原子核反応の起こっていない星に対応する。ところが、そのような星では寿命が短すぎて、観測される赤色巨星の数を説明できないことになるからである。

これら2つの問題は結びついて、ヘリウム中心核のまわりに水素の外層があるという、化学組成の不均一な星は赤色巨星のような半径の大きい星になるのではないかということが研究された。その可能性を最初に指摘したのは、ガモフ (G. Gamow) とケラー (G. Keller) で 1945年という、第2次大戦の終わった年のことであった。このことを定量的に計算して確かめられたのが林先生で、1947年と 1949年に論文を書いておられる。当時はまだ終戦直後の混乱の時期だったから、その意味でもずいぶん早く始められたものである。

その後、林先生は素粒子の非局所場理論のほうへ移られた。そして、天体核物理のほうへ戻られたのは 1955年ころのことである。その間に、赤色巨星の問題はマーチン・シュバルツシルド (M. Schwarzschild) が中心になって、アメリカのプリンストン大学で進められた。彼は今日いうブラックホールのシュバルツシルド解を最初に求めたカール・シュバルツシルドの息子である。マーチンは 1952年から 1953年にかけて、赤色巨星の構造に関する3篇の論文を発表した。その第2論文で、ヘリウム中心核がさき述べていたシューンベルグ・チャンドラセカール限界を越えた星では、中心核が自分自身の重力で収縮すると、外層は逆に膨張し、星は赤色巨星に向かって進化することを示している。こうして、恒星進化論は、原子核反応で化学組成が変わっていくほかに、星の中心核が重力で収縮するという面でも、時間的変化を考慮しなければならないことになった。名実ともに、星の

* 東大教養 Daiichiro Sugimoto: Professor Hayashi and Stellar Evolution

内部構造論から星の進化論になったのである。話の文脈からは余分のことであるが、この第2論文の共著者はサンデージ (A. R. Sandage) である。いまでは、彼は観測的宇宙論の大御所であるが、かつては、そのような計算もしたのである。その後、彼の興味は、球状星団の観測、青い星の観測、そのような天体としてキューサーが見つかったこと等を通して観測的宇宙論に繋っていったのであろう。

2. 天体核グループの形成

1955年になって、湯川秀樹先生の勧めもあって、京都大学基礎物理学研究所で天文学と原子核物理学の、今日の言葉でいうと、インター・ディシプリナリーな研究が発足した。核物理の方では武谷三男先生や早川幸男先生、天文学の方では亡くなられた畑中武夫先生らが、林先生をその分野に呼び戻して始められたものである。当時は、一方では、原子核構造論や反応論が軌道に乗ってきたころであり、他方では、ホイール (F. Hoyle) とシュバルツシルドが球状星団の星の進化を、赤色巨星の問題も含めて解釈し、*アストロフィジカル・ジャーナル* のサプリメントに大論文を発表した年であった。

そのような背景のもとで、原子核物理の人たちは天文学者の講義を聞き、恒星内部での核反応を計算した。そこに集まった人たちの半数は、その後は核物理や素粒子論に戻ったが、残りは天体核物理学のグループとして定着した。

林先生も核反応の研究をやられたが、同時に恒星内部構造と進化の研究の中心であった。東京の畑中先生の方では、小尾信弥氏が若い人と一緒に内部構造の研究を始められた。両氏は、1957年に物理学会から「天体の核現象」と題する論文選集をだされた。当時は今と違って、コピーの機械はないに等しかったから、重要な論文をリプリントにして出版した論文選集は学問を進めるのにおおいに貢献したものである。同時に、そのような題目で論文選集がだされたことは、天体核物理学が市民権を獲得しつつあったことを意味する。

恒星の進化はまた、宇宙で元素を合成していく過程でもある。銀河系のなかで、どのようにして重い元素が合成され、星の種族と銀河系の中での分布が決まっていたかについて、武谷・畑中・小尾の3氏がその頭文字をとって THO と呼ばれるシナリオを提出されたのも、1956年のことであった。そして、元素合成の具体的な過程については、1957年にバービッジ夫妻、ファウラー、ホイールの4人が104ページ2列組みの大論文「恒星における元素合成 (Synthesis of the Elements in Stars)」をだしたが、それはその後、 B^2FH と称され、その分野でのバイブルになった。

ところで、原子核反応自身は、恒星の内部における、ある場所、というよりは、ある与えられた温度と密度のところはどういう反応が起こるという問題である。恒星との関係は、その温度や密度が恒星の内部で実際に存在するような値で考えなければならないという点にある。

これに対し、恒星進化論は、恒星のある1点だけでなく、内部全体にわたって構造を解かなければならないという意味で、原子核反応の問題とはかなり異なる様相もっている。しかも、恒星の内部構造を記述する微分方程式は、たちの悪い非線形のものだから、論理構造としても、ひとつの新しいジャンルになっているわけである。当時林先生が取り組まれたのは、中心部で水素が消費されてしまった重い星はどう進化するか、という問題であった。北海道大学の坂下志郎氏は林先生の研究室に寝泊まりして、先生と一緒に計算を進めていた。

この時期に、林先生はそれまでの湯川研究室から独立して、新設の核エネルギー学講座を担当されるようになったが、その創設予算で、当時50万円もする歯車式の電動計算機を2台も導入された。これは、いまでは1000円の電卓程度の機能をもつものであるが、その後、おおいに活躍した。そのやや後に、私は大学院生になって、先生の計算のお手伝いをし、この計算機をおおいに使ったものである。そのほかに、対数の逆をひくテーブルをつくったこと、数値計算をする女性を2人雇ったこと、私が小学校で毎朝やらせられた、そろばんの腕が役にたったこと等があって、計算の能率が非常にあがったものと思っている。これは、いまからいうと笑話のようなものであるが、やはり研究には、その時々最新の手段に惜しみなく予算を使うことが大切なことを意味している。

その後、電子計算機の時代になっても、林先生はいち早く、それを使うことを考えられた。1959年にはアメリカの NASA に行かれて、当時最新の IBM 7090 を使い、重い星が主系列星からヘリウム燃焼段階を終るまでの計算をして帰ってこられた。当時、世界的にみても、自然科学分野では電子計算機の大口利用者はまだ少なかったが、そのうちの一人になられたわけである。日本へ帰られてからは、いろいろと努力をされて、計算機を使えるようにして下さったが、まだしばらくは、機械式の計算が主なものにならざるをえなかった。

3. 林フェイズの発見

林先生がアメリカでされた計算で分かったことの一つに、ヘリウム燃焼段階に星は黄色い超巨星になるということがあった。その後、星の中心核でヘリウムが消費されてしまうと、星の半径はふたたび増大する。そして、次の段階である炭素の原子核反応が始まる直前には、ふ

つうの計算では半径がべらぼうに大きくなってしまいうことまで計算された。こうして、次の問題は、半径を赤色巨星の程度におさめるには、どのようにすればよいかということであった。

赤色巨星の半径をだしてくる問題は、1955年にホイールとシュバルツシルドによって球状星団と関連して議論されていたが、彼らの議論は、星の表面での条件だけを考えたものであった。そこで、林先生は星の表面で対流が起こっている場合について、表面近くの構造も詳しく解いて、表面条件を定めようとした。

そのころ、林先生の重い星に続く問題として、私は中質量の星の進化を計算させられていたが、私が数値積分をしている間に、林先生が表面条件の取扱いを決めようということであった。今でもかなり鮮明に覚えているが、ある日、研究室のセミナーがあって先生の部屋へ行ったら、先生が「杉本君、副産物がでたよ」とおっしゃった。そして、見せられたのが、後にいう、林フェイズの理論であった。

主産物の表面条件の方は、HR図に引かれた赤色巨星のブランチ、すなわち林ラインであった。その右側にあたる、星の表面温度の低いところには、星が重力平衡に

ある解は存在しえないというのが結論である。そのような領域を林先生は「禁止領域」と名づけられた。進化して半径が大きくなった星は、禁止領域ぎりぎりのところまで膨れるが、その以上には大きくなれないので、林ライン上にはほぼ留まり、徐々に明るくなっていくことになる。そして、進化した結果としての内部構造の変化には、星は半径を大きくすることによって適応するのではなく、表面から内部に広がっている対流領域を深くして適応することになる。

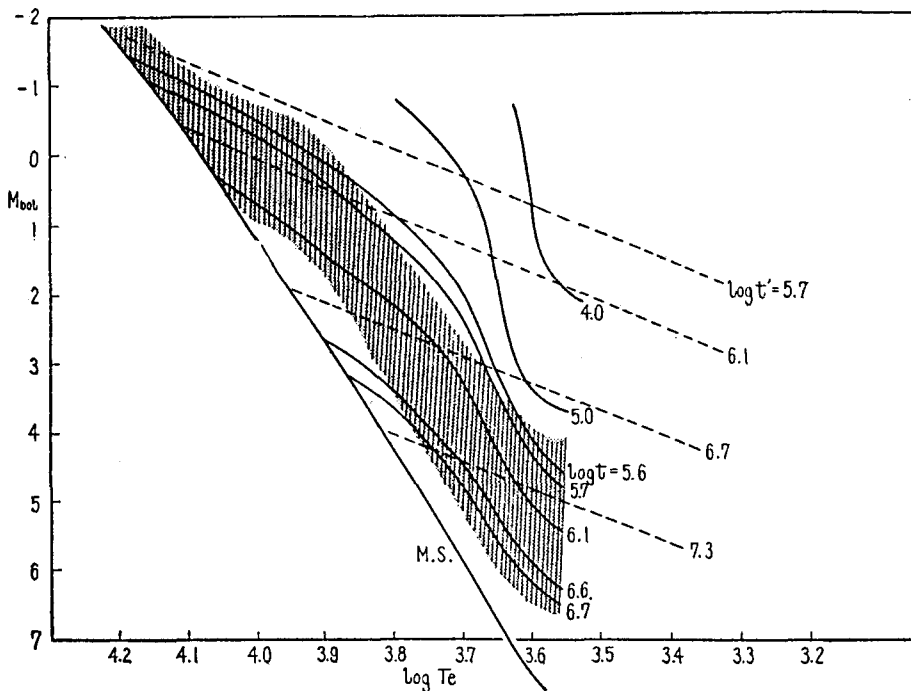
そこで林先生のアイデアは、そのような状況は進化した赤色巨星だけに関わるものではなく、生まれた星が主系列星に収縮してくる時にも起こるはずのものだということであった。そうだとすると、生まれた星が収縮する過程は、それまで言われていたヘニエイ収縮、すなわち、「ほぼ一定の光度を保ちながら半径が小さくなっていき、星の内部に対流は存在せず、ふく射平衡の状態にある」というものとは、かなり違うものだということになる。

それに対し、林先生の考えられた描像は次のようなものであった。まず、星は林ライン上、かなり光度の高いところに現れる。そして表面温度をほぼ一定に保ちなが

452

C. HAYASHI

[Vol. 13,



星団が生まれてからそれぞれの時刻において理論的に期待されるHR図。点線はヘニエイ収縮の場合で、実線は林フェイズを経過する場合。それぞれの線につけた数値は時刻(年)の対数($\log t$)。実際に観測された星団、NGC 2264の主系列はハッチングで示されている。とくにその下部のあたりを見ると、林フェイズがある場合の時刻一定の線に乗っていることが分かる。林先生の1961年の論文(Publ. Astron. Soc. Japan)より再掲。

ら収縮し、同時に星は次第に暗くなっていく。林ラインに乗っているために、対流が星の表面から内部へ深く広がっている。星の内部が収縮してくるにつれて、その対流は次第に浅くなる。そして、ついに対流がなくなってしまうと、その後、わずかの間はヘニエイ収縮をして主系列星に至るというのである。林先生の描像とそれまでのものとの違いは、観測的には、若い星団の主系列の下部に現われる。林先生は若い銀河星団 NGC 2264 と比較して(図参照)、新しい描像の方が正しいことを示された。

その論文が出版されたのは1961年のことであったが、同じ年にアメリカのパークレーで開かれたIAU(国際天文学連合)の総会で、林先生はその論文を発表された。座長をしていたのはシュバルツシルドで、彼はその論文の重要性にすぐ気づいたが、多くの人にはよく分からなかったらしいというのが、林先生の後日談である。研究において、新しい概念(コンセプト)を提出するときには、おうおうにして、そのようなものである。しかし、1960年代後半になって、主系列星への収縮が電子計算機で詳しく計算されるようになり、誰が計算しても、林ラインに沿った収縮という、林先生の予言どおりの結果が得られたのである。このようにして、林フェイズは次第に浸透していった。そして、林先生は、1970年に天文学分野で国際的な賞として特段のものである、エディントン・メダルを授与されたのであった。

4. 生まれたばかりの星と進化した星

話は少し戻るが、1962年に林先生はそれまでの研究に一段落をつけるものとして、基礎物理学研究所が出版している「理論物理学の進歩(Progress of Theoretical Physics)」のサプリメントに183ページからなる論文を書かれた。大学院生であった蓬茨霊運氏と私の2人が手伝ったので、著者の頭文字をとってHHSと呼ばれることになった論文である。

それは星の内部構造論を再構成するほかに、新しいこととして、主に次の二つの主題を含んでいた。第一は、林フェイズと直接に関係するもので、巨星の表面条件から始まって、主系列への収縮という林フェイズを議論したものである。その前の段階として、星間ガスから生まれた星がダイナミカルに進化し、林フェイズに至る描像についても論じてあった。第二は、ヘリウム燃焼段階の詳しい研究から始まって、その後の進化についての描像まで議論したものであった。

こうして、林先生とその門下生の研究は、星が生まれる段階と進化の進んだ段階の2つに分かれていったのだが、後者の研究も林フェイズの発見と無関係ではない、というのは、ヘリウム燃焼段階を終わった星は、いずれ

にしても、赤色巨星になる。その表面温度は林ラインによって決まっている。だから、逆に、星の表面のことは詳しく議論する必要がない。星の中心核で原子核反応が次第に進み、その内部構造が変わっていくところだけを、いわば切り離して研究することができるのである。そして、中心核の進化が星の外層に及ぼす影響は、星の外層での対流の深さというパラメーターに吸収されてしまう。その影響が出るのは、星の光度、すなわち明るさだけである。そして、その光度は、中心核だけを取り出したモデルに、外層の代わりをする適切な境界条件をつけることによって計算できる。こうして、中心核の進化と外層の進化は分離して扱えるようになり、当時の電子計算機でも処理できる程度のもになった。

林先生は中心核の進化の研究も指導されていたが、こちらの研究は次第に私が引き継ぐようになり、先生自身は林フェイズの前の段階である星の誕生を主に研究されるようになった。そして、その延長上に林先生の太陽系起源論がある。そのあたりのことと、林フェイズの発見がさらに与えた大きい影響のことについては、この特集のなかで中野武宣氏や中沢清氏によって書かれるだろうから、ここでは省略させていただこう。

1962年のHHSの論文は電子計算機万能時代以前の恒星進化論に1つの時期を画するもので、その後もバイブルと呼ぶ人があるほど、いろいろなところで引用された。しかし、1970年代になって電子計算機が大々的に使われるようになって、研究の方法もかなり変わってきた。そして、具体的な内容は、HHSに画かれた予想よりも、はるかに豊富なものとなり、当時私たちが夢に見た、超新星爆発の段階までモデルを計算することも実際に行なわれている。しかも恒星内部のそれぞれの層でどのような原子核反応が起こり、どのような元素がどのような割合で形成されるかということまで詳しく計算され、観測と比較されている。こうして、内容はきわめて豊富になったが、基本的な理解が新しく進んだかということ、その答えは必ずしも明らかではない。本当はその点をつめて議論し、今後の恒星進化論の進むべき方向を見定めるのが大切であろう。しかし、紙数も尽きたし、この特集の主旨に一致すると思わないので、そのような議論は別の機会にゆずることにしてしよう。

☆ ☆

☆ ☆ ☆