

林 忠四郎先生と星の誕生の研究

中 野 武 宣*

京都大学名誉教授の林忠四郎先生は、1986年11月に文化勲章を受章された。林先生は宇宙物理学の多くの分野で優れた研究業績を残されたが、その中でも後にハヤシ・フェイズと呼ばれるようになった主系列に至る星の進化の研究は、星の誕生と太陽系の起源の研究に強い衝撃を与えた点で特筆すべきものである。その後この分野の研究は大発展を遂げ、今日では理論面に留まらず、観測的にも宇宙物理学の重要な分野に成長している。林先生はこの2つの分野でも輝かしい足跡を残されている。私はハヤシ・フェイズの理論が日本天文学会欧文研究報告(PASJ)に発表された1961年に大学院に入学し、主として星の形成の研究を行ってきた。林先生のそばで研究に従事してきた者から見たこの分野の学問的状況、研究の経過等について、この機会に記してみたい。

ハヤシ・フェイズへの道

1950年代には星の進化と元素の起源が宇宙物理学における第一の関心事であった。私が大学院に入った頃、林先生達はProg. Theor. Phys. (PTP) Suppl. No. 22として1962年に発表された、星の進化に関する長くて難解な半review的論文(いわゆるHHS)を執筆中であった。修士1年の時には、その原稿による講義を富田憲二君と一緒に聞かせていただいた。それより数年前における星の進化に関する1つの謎は、赤色巨星の有効温度 T_e がどうして約3000Kよりも低くならないのかということであった。水素が部分的に電離している領域での気体の状態方程式は、完全電離気体のそれとは全く異なる。しかし、部分電離領域は、在ったとしても星の表面近くの極く狭い領域に限られるので、それを無視して表面まで完全電離気体の状態方程式を使い、また、表面近くは輻射平衡にあるとして、表面で温度と圧力を0とする境界条件のもとで星の構造を解くのが一般的であった。この解がいわゆるradiative zero solutionである。比較的早期型の星では、現実的な表面境界条件から出発しても、すぐにこの解に近づくことは、M. Schwarzschildの教科書にも書かれている。このモデルでの星の半径と光度から求めた T_e は、あまり晩期型でない星の場合、観測とよく一致する。しかし、主系列を離れ、巨星になっていく星をこのように扱うと、 T_e は進化とともに低下していくが、3000Kになっても低下は止まらない。

表面境界条件に部分電離領域を含む星の大気の構造を反映させねばならなかったのである。

しばらく堅苦しくなることをお許し願いたい。水素の部分電離領域では、温度(T)—圧力(P)図上でのadiabatの勾配($d \log T / d \log P$)_{ad}は1に比べて非常に小さい。これはガスを断熱圧縮しても、水素の電離にエネルギーが食われるため、温度の上昇が非常に小さいからである。一方、エネルギーを輻射で運ぶためには、その強度に比例した温度勾配 $d \log T / d \log P$ が必要である。この勾配が($d \log T / d \log P$)_{ad}よりも大きいと、星の外部へ行くほど単位質量当りのエントロピーが小さくなり、対流が起る。部分電離領域では($d \log T / d \log P$)_{ad}が非常に小さいため、必ず対流が起ると考えてよい。この領域では温度がほんのわずかに低下する間に圧力と密度は大幅に低下する。そのため約8000Kまで低下し電離領域から抜け出した所は、非常に低密度で、光球のすぐ近くになっている。そのため T_e はせいぜい3000Kまでしか下れない。HR図上の T_e が約3000Kよりも低い領域には、力学平衡状態の星は存在できない。このようなことを示した林先生と蓬茨靈運氏の論文が1961年PASJに発表された。

ハヤシ・フェイズとは

星は非常に低温の星間雲が重力収縮して生れるので、生れた星は徐々に温度を上昇させて主系列に到達すると考えるのが自然である。このような進化を最近に調べたのはLevé (1953)やHeney等(1955)であった。彼等は初期の赤色巨星の構造の研究と同じように、星は輻射平衡にあるとした。結果は図1の水平に近い線に沿って、 T_e が徐々に上昇していくというものであった。この進化の道筋は俗にHeney trackと呼ばれている。

しかし、このような星も言うまでもなく準静的力学平衡状態にある。 T_e が非常に低いと、主系列を去った赤色巨星と同じように、水素の部分電離領域が星の中に入るため、対流が起る。そのため T_e は3000Kよりも低くなることはできない。そうすると進化の道筋は図1の実線のようにならざるを得ない。このようなことを林先生はわずか3ページの論文で非常に明解に示されたのである。この道筋の垂直に近い部分がHayashi trackと呼ばれ、星がここにある時期がHayashi phaseと呼ばれることは周知のことであろう。

ハヤシ・フェイズの宇宙物理学的意味は2つあるであ

* 京大理 Takenori Nakano: Professor C. Hayashi and the Research on Star Formation

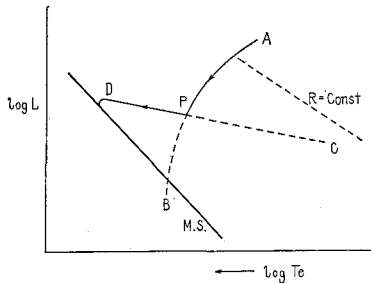


図1 主系列 (M.S.) に向けての星の進化の道筋 (Hayashi 1961, P.A.S.J. 13, 450 より).

ろう。1つは太陽系の起源との関連においてである。この時期の星の光度が大ききことは、同じ半径をもった Henyey track 上の星と比較してみれば明白である。そのため惑星の材料物質は強い光に照らされて、かなりの高温になったかもしれない。これは惑星の組成や形成過程に大きな影響を及ぼしたかもしれない。

もう1つの意味は星の誕生との関連においてである。Hayashi track の右側の領域は、星が力学平衡状態にあり得ないので、ハヤシの禁止領域と呼ばれる。星は低温の星間雲から生れるので、この禁止領域を横切らねばならない。従って、少なくとも星の形成の最終段階は、Henyey track に沿った静かな収縮ではなく、動的な収縮である。

水素の部分電離領域では定圧比熱と定積比熱の比は $4/3$ よりも小さいので、この領域が星 (あるいは雲) の内部の相当部分を占めていると、星は重力的に不安定である。そのため、Henyey track 上のある部分では、収縮は準静的ではあり得ないだろうという推定を A.G.W. Cameron がしていた。しかし、このようなことが起るのは Hayashi track と Henyey track の交差する点 (図1の点 P) よりも半径が50倍以上も大きい時である。ハヤシの禁止領域はそれよりもはるかに広いのである。

しかし、ハヤシ・フェイズの理論も直ちに世界中に受け入れられたわけではなかったようである。星の大気での放射吸収係数が必ずしもよく知られていなかったこと、星の表面近くでは対流によるエネルギー輸送の効率が悪いこと、対流の構造を正確に決めるのが難しいこと等が原因だったと思われる。F. Hoyle 等 (1963, M.N.R.A.S. 126, 1) は、星の大気に固体微粒子が存在するという仮想的な場合を考えても、ハヤシの禁止領域を消すことができないことを確認している。しかし、大気に強い磁場があれば、対流が抑えられるので、星が Henyey track をたどる可能性は残っていると主張している。当時既に水を含む炭素質隕石の存在が知られていたため、原始太陽の光度を小さく抑えたいという強い願望があったようである。

ここで私事を述べさせていただくならば、私の修士論文は太陽よりも質量の小さい星の主系列に向う進化に関するものであった。小質量星は密度が高いため、大気に水素分子が存在する。そのため分子の部分電離領域が存在し、部分電離領域と同じような効果をもたらす。また、密度が高くと、内部で電子が縮退しやすく、構造に影響を及ぼす。このような星の構造と進化を調べることによって、主系列の晩期型の部分の星の性質、特に定常的な水素燃焼を行う星の質量の下限が $0.08 M_{\odot}$ であることを明らかにすることができた。ハヤシ・フェイズの理論が発表された直後にこのようなテーマをいただき、私は研究者として非常に幸運なスタートを切らせていただいた。

星間雲の熱的、力学的性質

星の形成の最終段階が動的収縮であることが明らかになると、星間雲の収縮に関心が集まるのは当然の成行きである。しばらくして Gaustad の論文 (1963, Ap. J. 138, 1050) が星の形成に関心を持つ人々の目を引いた。彼は数 10 K から数 1000 K のガスの放射吸収係数を調べ、それを使って自己重力とガス圧がほぼ釣り合った雲の放射によるエネルギー放出率を計算した。雲の質量が $0.1 M_{\odot}$ よりも小さくない限り、これは雲が自由落下と同じ速さで収縮しているとしたときの圧力による仕事率よりも大きいことを彼は示した。これは言いかえると、雲のエネルギー放出の時間尺度が力学平衡への緩和時間よりも短いことであり、従って、準静的に収縮することが許されないことを意味する。

Gaustad の論文が出てすぐに、林先生は星間雲の収縮過程をもっと掘り下げてみる必要があると言われ、私が協力することになった。Gaustad の取扱いには不十分な点があつた。宇宙線や星の光によるガスの加熱が無視されている、塵による 100 K での放射吸収係数をもっと低温でも使っている、吸収係数が十分大きければかまわないのだが、エネルギー放出率を放射の拡散方程式によって推定している、等であった。星間雲の温度での熱放射の波長は塵の大きさよりもはるかに長いので、吸収係数は相当強く温度に依存するはずである。そのため低温での吸収係数の計算から始めねばならなかった。

雲の進化にとりかかってからしばらくは手さぐりの状態であった。まず雲を平均密度と平均温度の2つの量 (いわゆる一層モデル) で記述し、勝手な初期条件を与えたとき熱的、力学的にどんな進化をするかを調べてみた。少し高温から出発すると、まず温度が急速に低下し、その後収縮または膨張が見えてくる。このような結果を眺めているうちに、種々の時間尺度を比較してみれ

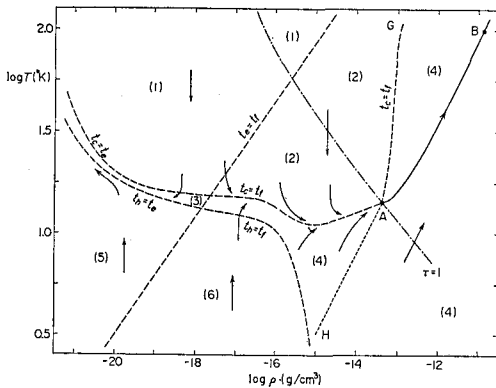


図2 太陽質量の星間雲の温度—密度図上での進化 (Hayashi and Nakano 1965, P.T.P. 34, 754 より).

ば、このような進化の様子はすぐにわかることに気付いた。雲の温度を変化させる過程は4つある。加熱、冷却、膨張、収縮がそれである。雲の温度と密度を定めると、それぞれの過程による温度変化の時間尺度を決めることができ、雲の進化の様子を知ることができる。図2は太陽質量の雲についての結果(1965)である。雲の質量で決まる臨界密度よりも高密度ならば、初期の温度にほぼ無関係に雲は最終的には動的に収縮していくことが明らかになった。

次に、質量の異なる雲についての同様の研究を、服部嗣雄君を加えて行った(1969)。0.01 M_{\odot} よりも重い雲の性質は、図2と本質的に同じである。しかし、0.01 M_{\odot} の雲の様子は全く違う。このような小質量の雲の自己重力がガス圧よりも強く、膨張しないような状態では、雲は熱輻射に対してほぼ不透明になっており、エネルギー放出率が小さい。そのためこのような雲は準静的に収縮することになる。このことは自己重力による収縮によって生れる天体の最小質量が約 0.01 M_{\odot} であることを意味する。1976年 M. Rees はいわゆる“opacity-limited fragmentation”説を唱えた。雲は熱輻射に対して不透明になるまで分裂を続けるという主張であり、彼が得た最小質量は、当然のことながら我々が7年早く得た値と同じであった。

私は 1965 年の論文によって就職することができ、アメリカでの研究生生活の機会をつかむことが出来た。半分はお世辞だろうが、ある人からこのような仕事がアメリカでできなかったのは残念だと言われた。当時日本では、高柳和夫、西村史朗両氏が星間ガスの加熱と冷却から平衡温度を求める仕事(1960, PASJ 12, 77)をしておられた。また、早川幸男氏は、当時観測から推定されていた星間ガスの温度は、宇宙線と星の光による加熱だけでは説明できないほど高かったので、10 MeV 程度の“subcosmic ray”が銀河の中に相当量あり、主要な熱源

になっているのではないかと考えておられた(1960, PASJ 12, 110)。星間ガスの物理状態の研究において日本が第一線にあったことが、我々の研究の着想や比較的短期間での仕事の完成の素地になっていたように思う。

星間雲の動的収縮

星間雲はその質量で決まる臨界密度よりも高密度ならば動的に収縮することが明らかになると、この収縮の様子をもっとくわしく調べてみたくなるのは当然である。当時外国では電子計算機による天体現象のシミュレーションが始まっていた。林先生は星の進化の計算にNASAの計算機が使われた経験から、計算機が研究に大きな変革をもたらすことを早くから察知しておられたようである。その頃 Colgate と White の論文(1966)のプレプリントが林先生に届いた。星の重力崩壊と超新星爆発のシミュレーションに関するものであった。状態方程式を変えれば、彼等の方法はほとんどそのまま星間雲の重力収縮に使える。日本でも東京大学に大型計算機センターが発足したので、出来ないことはない。そこで超新星爆発の研究をしていた大山 襄氏(当時広島大学)の協力を得て、このプロジェクトを始めることにした。

星が Hayashi track の上に現われるまでを追いかけた。臨界密度近くから出発すると、透明な状態から不透明な状態までを追わねばならず、取扱いは極めて複雑である。そこで、十分不透明な状態を初期状態とし、差し当りエネルギー輻送を無視して行うことにした。収縮が進むと、まず中心部分にほぼ力学平衡状態の芯が出現し、外の物質がそれに降り積って、芯が次第に太っていくという重力収縮の基本的な振舞を確認することができた(1968)。この仕事は星間雲の収縮のシミュレーションとしては最初のものと言ってよい。更に成田真二君が中心になって、雲の中でのエネルギー輸送の効果を取り入れたシミュレーションを行い、Hayashi track 上の光度が相当大きいところに星が現れるまでを追跡することができた(1970)。

この研究によって、星間雲の重力収縮は極めて非相似的であることがわかった。このことは、初期密度を変えると、収縮の最終段階はかなり違った様相を呈する可能性を示唆している。我々の仕事の少し後に、Larson はエネルギー放出の取り扱いの難しさを意に介さず、臨界密度に近い状態を出発点とするシミュレーションを行った。その結果は Hayashi track 上の光度のあまり大きくないところに星が出現するというものであった(1969)。計算機事情の格差もあっただろうが、彼の大胆さには敬意を表すべきであろう。

おわりに

星の形成に関して私が林先生と研究を一緒にさせていただいたのはここまでであった。その後先生は中沢清、高原まり子氏と軸対称雲の重力収縮のシミュレーションを行われ、また最近では、成田真二、木口勝義、観山正見氏と非軸対称雲の収縮と分裂、回転雲の平衡形状とその安定性等の研究を続けておられ、その活動は当分止まりそうにない。

私の拙い文章ではうまく表現できなかったと思うが、林先生は技業の問題には見向きもせず、いつも基本的な問題を手がけてこられたと思う。しかも非常にタイミング良くである。何が基本的問題かは、漠然とならば誰にでも解るだろう。しかし、機が熟さなければ研究は中々進展するものではない。林先生は周辺分野の発展、研究環境の整備等によって機が熟したことを逸速く見抜く眼力を持っておられるように思う。そのためには、どこに困難があり、それを克服するためには何が必要かを知っていなければならない。林先生は断えず広い分野に目を配り、時々いくつかの重要問題について考察し、アイデアを温めておられるように思う。このことが多くの分野で優れた業績を挙げることに繋がったのではないだろうか。

林先生は、「研究者は critical thinker でなければならぬ」、「研究の上で black box を作るな」等とよく仰しゃっていた。著名な人の言がすべて正しいとは限らない、と言うのはやさしいが、権威に対して批判精神を維持するのは必ずしも容易ではない。研究室のコロキウムや日頃の研究活動を通じて、何事にも批判精神を忘れないこと、研究を進める上で安易な妥協をしないことを、知らず知らずのうちに教え込まれていたように思う。最近の研究の事で林先生に話を聞いていただく機会が少なくなったが、こんな事をやっていたら先生は何と仰しゃるだろうかと考え、時々自分の研究の進め方を反省している。林先生は私にとっては今も怖い先生である。

☆ ☆

☆ ☆ ☆

天体観測専門誌

天文ガイド

7月号 定価450円+税 6月5日発売!

ニューフェイス・テストレポート
高橋製作所のP-2型赤道儀

宇宙の新しい謎
入り乱れる星間ガス

カスタムクラフト
ガリレオの望遠鏡の複製に挑戦

超新星の残骸
レムナントの写真集

奇妙な星の話
パルサー

- 7月のスター・ウォッチング ● 7月の観測資料
- 観測ガイド ● 情報ボックス...など情報満載!!

新刊・近刊案内

天文年鑑活用ハンドブック

毎年度版で定評のある「天文年鑑」を100%活用するための補足解説書。今後何年も便利に利用出来る。

- 天文年鑑編集委員会編 ● 定価980円

藤井旭の天文年鑑 1987年度版

今年4月から来年3月までの天文現象のうち、小・中学生が観測出来るものを図解でわかり易く解説。

- 藤井 旭著 ● 定価520円

天体写真テクニック

天体写真撮影のためのテクニックを初級から上級まで、この道のベテランが懇切丁寧に詳しく解説。

- 天文ガイド編 ● 予定価1950円 ● 6月中旬発行

誠文堂新光社

東京都千代田区神田錦町1-5
電03(292)1221 振替東京7-128