

星の進化論と私

杉本 大一郎

〈東京大学教養学部宇宙地球科学 〒153 東京都目黒区駒場3-8-1〉

天文学者とは少し変わった一研究者の、恒星進化論への取組み。自己重力系から星団へ、「そろばん」の時代からテラ・フロップス専用計算機へ。

1. 30 余年前

私が星の進化論の研究を始めたのは、京都大学の大学院に入り、後(1986年)に文化勲章を受章された林忠四郎先生に師事した1959年にさかのぼります。当時は、光電子増倍管を使った三色測光によって、星団のHR図が盛んに作られた時期でした。理論の方は、F. ホイルとM. シュバルツシルドが、1955年にアストロフィジカル・ジャーナルのサプリメント第13号で球状星団の星の進化を論じ、HR図に見られる巨星分枝がM型星の位置に来るのは星に深い表面対流層があるからだとか、水平分枝はヘリウム燃焼の段階にある星だということなどが、明らかになり始めた頃でした。彼らはそれを含めた「恒星進化論への先駆的貢献」に対し、1994年になって、バルザン賞[1957年に設立された国際バルザン財団が各年に3つのおおまかな分野を決めて出す賞]を受けました。いっぽう、元素の起源については、1957年に、レビュー・オブ・モダン・フィジックス誌に、 B^2FH と称されるようになった、E.M.およびG.R. パービジ夫妻、W.A. ファウラー(1983年にノーベル賞を受賞したが、昨年亡くなった)、F. ホイルが、恒星内部における原子核反応をいろいろな過程に分類し、元素の起源に関するストーリーを作り上げたところでした。これら2つの論文が、いわば、当時のバイブルでした。

当時はまだ電子計算機を使う機会も殆どなく、私は、歯車式の電動計算機や算盤などを使って研究を始めました。1959年、林先生はアメリカの科

学アカデミー(NAS)と航空宇宙局(NASA)が共同で運用する研究員の第1期の頃に採用され、NASAに1年間滞在されました。そして、「星の進化の研究に電子計算機を使う」という世界でも2つしかなかった例のうちのひとつを、実際に示されました。それは太陽15.6倍の質量をもつ星の進化でした。どうして15.6という半端な値の質量なのかは、よく尋ねられるところでしたが、その答えは、60,000の1/4乗だということです。NASA以前に手計算で研究されていたとき、よく出て来る質量の4乗がキリのいい数値になることは便利なことでした。計算機世代の人には想像も出来ない理由だったわけです。もっとも、電子計算機と言っても、星の内部構造を記述する微分方程式を、いろいろな初期値を与えて、星の中心から外側へ向かって積分したり、星の表面から内側へ向かって積分したりするのに使われるだけでした。

NASAから帰国された林先生は、1962年に理論物理学刊行会のプロGRESS・オブ・セオレティカル・フィジックスのサプリメントとして、183ページの論文を出版されました。その著者は林忠四郎・蓬茨霊運・杉本大一郎となっていますが、先生以外はまだ大学院生だったので、自分たちが直接に研究していた部分を取り入れてもらった以外は、手伝っただけでした。この論文では、赤色巨星の半径を決める原理としての林の限界線、星の誕生とハヤシ・フェイズ(後に米・英でそう命名された)、超新星までの進化の概要に至るまで論じられ、新しいバイブルと言われるものになりました。

2. 星の内部構造をどう計算するか

こういふことで、私はごく初期の時代から電子計算機を使って星の進化の研究を始めるという好運にめぐまれましたが、そうは言っても、日本で計算機を利用するのはかなり難しいことでした。日本学術振興会が UNICOM という計算機利用システムを実施していましたが、京都からパンチカードを送ると、2週間ほどたつてデバッグの結果が帰って来るといふ次第でした。そこで、私は計算機によって星の進化を追及することそのものよりも、星の内部構造と進化を決めている物理は何かということ、計算機の助けを借りながら追求するというスタイルをとることになりました。これは、天文学科でなく、物理学科の出身である私の趣味にも合っていました。当時、両学科の協調関係は現在に比べると薄く、星の進化論や宇宙線物理学をとおして、協調が始められるようになったばかりでした。こういう訳で、論文は物理学会の宇宙線のセッションで発表していました。今からみると、隔世の感どころか、隔世そのものです。

大学院を終えてから、故早川幸男先生に、名古屋大学へ助手として呼んでいただきました。先生は天体核物理から宇宙線、素粒子、プラズマ物理、さらに X 線天文学と広い分野の基礎を作ってくれた方です。私は先生から、どのようにして広い視点から研究を進めるかを学びました。名古屋大学助手の期間中に、NASA のゴダード宇宙航空センターに2年間滞在させて頂きましたが、それはちょうど人類が初めて月に降り立つ (1969 年) 直前で、活気に満ちた時代でした。私は NASA で、名機であったと称される IBM 7094 から始まって、最初のバイト・マシンの系列で IBM 360/75 という、当時としては最も大型の電子計算機を使わせてもらうことになりました。

当時、星の内部構造と進化をニュートン・ラフソン法を使った繰り返し計算によって解くことが、L.G. ヘニエーによって始められたところでした。

星の進化論を研究しているグループはありましたが、それらは主系列に近い進化段階を詳しく調べるといふ方向でした。それに対し、私は京都時代からの継続もあって、進化の進んだ段階に興味を持っていたこと、星の内部構造をきめる物理という原理的な事柄に興味を寄せていたこともあって、他の研究者とは異なる路線をとりました。しかし、赤色巨星の構造をヘニエー法を使って解くといふのは、至難の技でした。といふより、ヘリウム燃焼段階を過ぎてからの星の構造では、繰り返し計算が集束しなかったのです。

その根本的な理由は、後から考えると、次のようなことでした。ある時間ステップを与えて、それだけ後の星の構造を計算します。そのとき、星の中心部と外層 (星の本当の表面でなくても、水素のなくなった星の中心核の外縁、すなわち水素の多い外層の底でも同様) では、物理的描像がまったく異なります。すなわち、与えられた時間ステップの間に、外層では熱が十分に伝播しているのに対し、中心部では殆ど伝播していません。そして、その物理的描像に合うのは、前者では4本の連立微分方程式、後者では2本の連立微分方程式です。両者で、物理的描像における原因と結果が入れ替わっているからで、前者に含まれていた2本の微分方程式は、後者では、代数方程式の描像の方が良いといふわけです。例えて言うと、 $x-y$ 平面で急に立ち上がって y の値が大きくなっている関数を見るときに似ています。このとき、 x を与えて y を読むと、その値は決め難く見えます。しかし、 y を与えて x を読むと、その値は非常に正確に決まっているといえます。この、中心部と外層における原因と結果の矛盾が、指数関数的発散をまねき、数値的不安定を引き起こすことが分かりました。

この問題は次のようにして解決することができました。最初に4本の連立微分方程式を考えて、差分方程式に書き表す。空間メッシュの刻みステップと時間ステップの比を一定に保って時間ステ

ップを無限小にしたとき、もとの4本の微分方程式に戻るようにするのは当然です。しかし、そのような差分方程式系はいくつもある。そこで、そのうちから、空間ステップを止めておいて時間ステップを無限小にするという、数学的には非常識だが熱の伝播していない状態に対応する極限をとると、差分方程式系が2本の微分方程式と、2本の代数方程式という、中心部の描像に合うようになるものを選ぶ。結果として、このような処方比較的に実現出来ることが分かりました。

こうした結果、計算の精度はやや落ちましたが、数値不安定はピタリと止まり、核反応やニュートリノの発生による熱の出入りと熱の伝播によって支配される恒星の熱的進化が計算出来るようになりました。具体的には、何億年もかかる主系列星の段階から、超新星爆発直前の速い進化までが、一つのコードで計算出来るようになったわけです。こうして、数値的構造を正しい物理的描像に合わせることがいかに重要かを体得しました。こうしてできた計算コードは、その後、杉本プログラムと自称して、かなり最近まで威力を発揮し続けることになりました。

3. 核反応の暴走する超新星

私は1969年秋にアメリカから帰国しましたが、その次の年の春には、現在放送大学の学長をしておられる小尾信弥先生に呼んで頂いて、東京大学教養学部へ移りました。同時に理学系研究科の天文学専攻も担当し、そこの大学院生との共同の研究の輪が広がりました。このたび「星の進化と超新星の理論」ということで、日本学士院賞を野本憲一さんと連名で受賞することになりましたが、彼は、私の東大での最初の大学院生でした。彼と一緒に、杉本プログラムをさらに拡張しました。星が超新星爆発をするときのようなダイナミカルな状況では、問題にしている時間ステップの間に、星の中心部では音波は十分に伝播しているのに、外層では音波が伝わっていないという状況が生じ

ます。その様子は、さきに述べた熱の伝播を音波の伝播に、そして星の中心部を外層に入れ換えた場合に相当します。そして、私たちは、前と同様な数学的方法でこの問題を解決することが出来ました。こうして、超新星への進化を研究する、強力な数値的手法を手に入れました。

星の内部で起こる物理としては、超高密度で電子が縮退したと呼ばれる量子力学的状態にある星の内部で原子核反応が起こるとき、それが暴走する現象に特に興味をもっていました。そこで、その興味と新しく展開した計算法を組合わせて、超新星爆発に至る進化の研究を、野本さんと一緒に展開することになりました。そのとき、私たちは、外国でやられていた、鉄の原子核が光分解して始まるII型超新星ではなく、核反応の暴走によるI型超新星を研究の中心に置くことにしました。

その問題は、私がもう一つ興味を持っていた、星の内部の薄い層で起こる原子核反応の暴走の研究と共通の面を持っていました。それは、白色わい星の表面近くで起こる新星爆発や中性子星のX線バースター現象の解明に進みました。そして、幾何学的には（球形の星の内部の層の曲率半径に比べて）薄い層が、その中で圧力が何桁も変わるとい、いわゆる薄い層を正確に扱うために、座標系の原点を時間的に移動させながら計算する方法を編み出しました。こうして、進化の計算に必要な時間ステップの数は、数100分の1で済むようになりました。この方法は、2つの星が互いに接近して公転しあい、お互いの間でガスが流れ合うという近接連星系の進化の研究でも、ガスの堆積効果を正しく計算するのに威力を発揮することになりました。そして、そのような近接連星は、当時盛んになったX線観測衛星が見つけたX線星やブラックホールなど、とくに中性子星の表面で核爆発がおこるX線バーストと関連して、いろいろと話題になりました。1981年に私が頂いた仁科記念賞は、「近接連星系の星の進化」についてのものでした。

こうして、I型超新星の研究は、連星系の中で起こるヘリウム爆轟型の超新星にも進みましたが、その問題の延長として、酸素・ネオン・マグネシウム中心核を持つ星も考えました。その中心核の質量が、電子の縮退圧が重力に抗して支え得る質量の最大値であるチャンドラセカール限界に達したとき、何が起こるかという問題です。ここでは、原子核の電子捕獲によって超新星の引金がかかれ、I型超新星のような核反応の暴走とII型超新星のような重力崩壊が共存して起こります。そのような超新星に至るのは、主系列時代の質量が太陽の8-12倍の星です。そのような星の研究は私たちの独壇場だったので、その質量範囲は、Japanese Massと呼ばれるようになりました。

4. マゼラン星雲で起こった超新星

こうして、物理的描像に基づいた計算機的方法とそれによる進化の研究の基礎が完成しましたが、それを現実の星の進化の研究に広く適用し、観測される天体現象を詳しく解析していったのは、主に野本さんの功績です。そして、運の良いことに、1987年、われわれの隣の銀河であるマゼラン星雲の中で超新星爆発が起こりました。肉眼で観測できる超新星としては、ケプラー以来、400年ぶりの出来事だったのです。しかも幸いなことに、X線天文学を初め、赤外線やニュートリノの観測など、人工衛星を駆使したもの、ハイテクによる地上からの観測、神岡鉱山などの地下からの観測に至るまで、あらゆるチャンネルと方法を使った観測が展開されてきたところでした。こうして、1987年の超新星は、星の進化論と比較されるべき豊富なデータを提供することになりました。もし、この超新星がそれより10年前に発生していたら、そんなに多くの事柄を捉え、理解させることはできなかったでしょう。

この超新星の好運に恵まれたとき、野本さんとその周囲の大学院生の活躍は目ざましいものでした(彼はその研究に対して、1989年の仁科記念賞

を授与されました)。私の方は、この超新星の観測と直接に結びつけるような研究はそんなにやったわけではありません。野本さんの活躍を見物していたという方が正しいでしょう。

こうして、最終的な成果を刈り取ったのは野本さんです。だから、彼だけが学士院賞を頂いたので良かったのかもしれませんが。実際、原理的な事を解明し新しい道をつけたが、見栄えはまだ良くない仕事よりも、最終的に多くの収穫を刈り取ったの方が目立つし、その方が高く評価される傾向が、とくに最近は強いようです。しかし、科学の進歩にとって、手探りで路を付け、原理的なことを解明しながら新しいパラダイムを開いていくことも重要です。そして、それらが補いあって、科学が進歩するのだと思います。実際問題としては、そのどちらの面により強く興味を持ち、情熱を燃やすかは、人によってさまざまです。人によって、それぞれの性格に分かれていることも間々あるでしょう。私は、野本さんという相互補完的な良い研究仲間を持って、研究に花開かせることが出来たのだと思っています。そして、不十分ですが、花を開かせるために新しい土壌を開拓しようとしてきた私の努力に対しても、その功績を学士院が認めて下さったことを有難く思っています。

5. 星の重力熱力学から 恒星系の力学へ

私自身は、むしろ超新星の個々の現象よりも、星はなぜ進化するのか、なぜ進化しなければならないのかということのほうに、より深く興味をもつようになっていました。そして、自分自身の重力(万有引力)で束縛されたシステムを解明する方に興味が向かい、重力を繰り込んだ熱力学という形で展開しました。そして、その問題を、お互いに作用し合っている開いたシステムに構造ができる問題の一環として考えるように努めました。そのように考えていくと、宇宙そのものから生命

まで、構造の形成されてくる世界がひとつの自然哲学のなかで共通に見えてくるように思います。

そのもっとも簡単な応用として、そして、私にとって最も取り組みやすい問題として、星の内部構造と進化の理論から得た物理を、星の集団である星団や銀河に関する恒星系力学に持ち込むことを考えました。そのような発想は、恒星系力学の研究者のなかでは、初期のほんの一部の研究において意識されただけだったからです。そして、自分自身の重力で結合したシステムにエントロピー最大の状態が存在せず、そのために恒星系が進化していくという、星の進化論で作り上げた観点を、恒星系においても明確にすることができました。

しかし、他方では、恒星系は1個の星の内部構造とは違う側面も持っています。それは、1個の星はガスからなっているのに対し、恒星系はお互い同士は直接にはめったに衝突しない、粒々の星が集まってできているからです。こうして、私の研究は、そのような多数の粒からなっていて、それらが遠くにある粒々と重力で互いに作用しあっているシステムの研究に進んでいきました。ここでは、何万個という粒子からなるシステムのそれぞれの粒子について、他のすべての粒子から作用する力を考慮しながらその運動をコンピュータで解いていくという方法で研究を進めます。そのような事をしていて突き当たった問題は、現在のスーパーコンピュータの能力不足でした。

そこで考えたのが、そのような問題も取り扱える超高速のコンピュータを作ればいいではないか、ということでした。もちろん何らかの点を犠牲にしないと、現存するコンピュータより遙かに速い計算機など作れません。そして見つけたのは、多くの粒子からなる多体系と呼ばれるシステムに問題を限ってコンピュータを専用化するなら、比較的簡単に現存のものの数百倍の性能の計算機も作れるということでした。私があることを言ったとき、適用できる問題を絞ったのでは面白くない、と忠告を与えてくれた人がありました。しかし、多体問題は天体や

宇宙だけでなく、多くの原子からなる物質の性質、さらにタンパク質といった高分子の立体構造の研究から、タンパク質の機能の解明という生命科学にまで発展しうる可能性をもっています。そう言っただけで、勇気づけてくれる人もありました。コンピュータの適用範囲が、絞られたものの中だけでも十分に広い適用対象を持っていれば、それはそれで開拓する価値があるというわけです。そして、そのようなコンピュータを超並列のパイプライン方式で実現するという方向を見定めるのに、いろいろと知恵を貸してくださった方もありました。

こうして出来た専用コンピュータの初期のモデルは、用途はやや限られていましたが、スーパーコンピュータ並の性能を発揮しました。しかも非常に安価に出来るので、現在、日本国内の他に、イギリス、ドイツ、フランス、アメリカの天文学者に使われています。インドに持ち帰ってもらったものも動くことを、日本からネットワークを通して、最近、確認しました。

そのようなコンピュータを更に大型化して、星団、銀河、宇宙などの研究に適用するという研究プロジェクトを立てましたが、それは文部省科学研究費の特別推進研究として1992年度から採用されています。そして、今年の夏には、1テラ・フロップスのスピード、すなわち、1秒間に1兆回の演算を実行する超並列計算機として、発表しました。この速度は、現在、世界に存在する最も速いコンピュータの10倍程度のものです。そしてそれにかかる費用も、その消費電力も、同じ計算速度で比べると、汎用のスーパーコンピュータの数100分の1と小さいのです。これによって、恒星系の天文学を一段と進めたいと思っています。また、この研究のために開発したLSIチップに似たものとして、タンパク質などの分子動力学を計算するLSIチップも、泰地真弘人さんが開発しました。この分子動力学用のものは、重力用のものと違って、まだ大規模並列化はしておりませんが、同様に発展させることが出来る基盤はすでに達成されていま

す。

こうして、私は、野本さんを初め、多くの若い天文学者から、また計算機学者やタンパク質科学者まで、多くの人に助けられて、はじめて研究を進めることが出来ました。私は、これまで、多くの方々の指導や協力、あるいは勇気づけを頂くことが出来て幸せだったと思い、また、それらの方々に感謝しています。そして、それと同時に、いろいろと異なる分野、発想法、人柄の違いがうまく助け合って成果を出していくことが、科学研究を進める上で大切であることを、あらためて感じています。多様性があり、それを受け入れるとともに融合していくことは、科学にとっても、社会にとっても大切なことなのでしょう。

私がこれまでの研究で、物事の初めだけをやって、その後の収穫は誰かにしてもらってきたのは、若い仲間の協力が得られた他に、私が無能だったからでもあります。例えば、現実の星の進化の研究で野本さんと競争したら、負けるに決まっているわけです。だから、さっさと退却して、別の仕事を始めるしかなかったわけです。ある程度年をとって、職に関する心配をしなくても良くなると、結果がどうなるか分からないことにも手を出すことができます。40歳を超すとますますオリジナリティーが要求される由縁です。昔は、物理学の成果は若いうちに出すものだと思われていました。現在でももちろんそうでしょうが、それ以外の面も起こっていることに、注目する必要があります。

My Retrospect to Stellar Evolution

Daiichiro SUGIMOTO

Coll. Arts & Sciences, Univ. Tokyo

Abstract: Computational code for stellar evolution got remarkable stability by relaxing contradictions in physical pictures between stellar core and envelope. It made possible to calculate evolution from quasi-static phase through dynamical stages of supernova explosion. It bloomed at the time of SN1987A. I brought my understanding of stellar evolution as gravothermal processes into stellar dynamics. Now operational is our tera-flops computer dedicated to stellar dynamics.



星のクリスマスツリー 大森幸子（東京都）