

連載

星々の終末の姿【5】

科学の進み方を考える

— 星の進化と計算機を例にして —

杉本 大一郎

1. 星の進化論の位置

去る4月のことである。天文教育普及研究会の作花さんから連絡があって、機関誌「天文教育」に、「星の進化について、一般論からウォルフ・ライエ星やりゅうこつ座η星も含めて書いて欲しい」という依頼を受けた。私事になるが去る3月に放送大学を定年退職したので、暇が出来たろうと狙われたらしい。そこで、「個々の現象にも関連してということなら、現在そのことに関連して研究を進めている方に書いていただいたほうが適切で、私は年寄りに過ぎます。」と遠慮した。その後のやり取りの結果、それなら「星の進化と計算機で」ということに落ち着いた。

ここでは、その話を一般論的に書くつもりはない。むしろ私の経験をとおし、意見も交えて、他の人には書けないようなものに見たい。だから研究史に沿って書かれているこのシリーズの他の記事とは並べられないかも知れない。埋め草だと思って読んでいただけると幸いである。ただ、星の進化について書いても良いと思ったのは、「星の進化と元素の起源の理論」は20世紀に解明された自然界のシナリオのうちで、「大陸移動とプレートテクトニクス」に並ぶ二大ストーリーだと、我田引水で思っているからである。それは多様な元素からなる物質世界の歴史を明らかにしただけでなく、いろいろな天文現象を解明し、理解する上での基礎的道具としても使われるようになった。

2. 星の進化論のおこり

私が星の進化に関わるようになったのは、

大学院に入学した1959年のことである。その頃から30年も経たないうちに、星の進化の体系の基本的なところは出来上がった。星が進化するという考えは19世紀半ばからあって、ヘルムホルツ(H.L. von Helmholtz)とケルビン卿(Lord Kelvin)の収縮説と呼ばれていた。しかし定量科学としての星の内部構造論が始まったのは、20世紀に入る頃からである。レーン(H. Lane)やエムデン(R. Emden)は星としての巨大ガス球について、その内部構造を論じていた。その後1916年になってエディントン(Sir A.S. Eddington)は、星の内部を光のエネルギーが伝播する様子も取り入れて、エディントン・モデルを構築した。

これらの研究が現代の星の進化論に至るには、超えなければならない2つの大きな山があった。ひとつは星のエネルギー源の問題であり、もうひとつは星の内部構造(星の場所による温度や密度の分布)を計算することである。前者については1930年代に発展した原子核物理学によって解決されることになるが、ここではそのことには触れない。後者は計算機という、本稿の主題と直接に関係するものである。

3. 星の内部構造論の難しさ

星の内部の各点では、重力(万有引力)によって星を押しつぶそうとする力と、圧力の勾配によって星を広げようとする力が釣り合い、それが星の内部における温度と密度の分布を決めている。そして温度分布によって、エネルギーの流れがきまり、星の表面から出

ていくのが星の光である。それらの様子は力学と熱力学を同時に考慮した微分方程式によって記述される。ところがこの微分方程式が曲者で、すべての変数が掛け算で現れるという非線形の極みである。(重ね合わせの効く)線形の問題では、それを数式の演算によって扱う数学的手法が、基本的には、20世紀の初めに確立している。しかし非線形の問題はどうしようもなく、ケース・バイ・ケースで扱うしかない。そこで星の内部構造の問題は、個々の例について数値的に計算することになる。

1930年代の終わり頃までの星の構造の理論では、ある種の近似をして数値計算の量を減らして解くことが考えられた。密度と圧力の間にある種の間接関係があると仮定して得られるポリトロプ・モデルやエディントン・モデルはそのようなものである。当時は、数値計算は大変だったから、近似の仕方を工夫することになる。一般性をなるべく失わないようにしながら、数値計算が簡単になる近似を見つけ出すのが、理論家の腕の見せ所になる。そのキーポイントは問題に含まれるパラメータの数を減らし、一つの数値計算の結果を適当に変換して数多くの種類や進化段階の星に適用できるようにすることにある。こうすれば、パラメータの数値が異なるいろいろな問題について、少ない数の数値計算をするだけで内部構造が理解出来るようになる。なお、後ほど、最近のシミュレーションとも関連して触れることになるが、このことは単に計算量を減らすということだけではない。それによって、何が何を決めているかという、現象というか物事の本質をえぐり出すことになることに注意しておこう。

4. 赤色巨星は極端に難しい

そうかと言って、そのようなやり方だけでは理解できないところが、非線形システムの

難しさである。このことは、星の内部構造の問題ではとくに著しい。主系列星(や白色矮星、中性子星)のように、星の中心での物質密度と星全体の平均密度が大して変わらない(例えば100倍にしかない)構造の星では、数値計算と言っても、さして難しいものではない。密度の比(密度コントラストともいう)が10桁(100億倍)にもなる赤色巨星では、他の自然現象に類を見ないほど難しいものになる。

巨星の半径が極めて大きくなるのは、図1に示すように、星の中心部に主系列段階での水素燃焼の結果としてヘリウム中心核ができ、その外側は元のままの水素の多い外層という「非一様な化学組成分布をもつ星」になったかららしいということ、1938年になって言い出したのは、エストニアのタルトゥ天文台のエピーク(E. Oepik)であった。

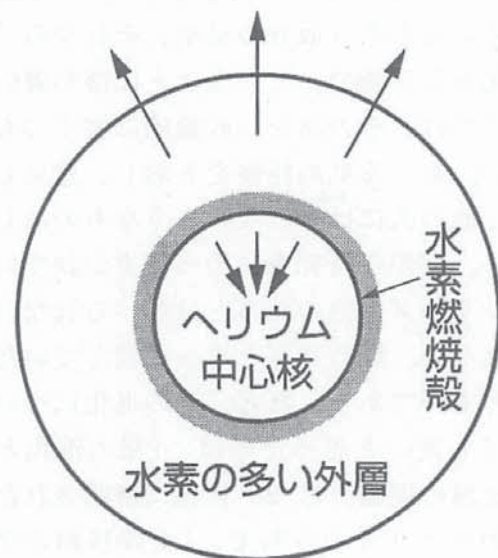


図1 中心部で水素を消費しつつ、ヘリウム中心核ができた星。

中心核が収縮すると外層は何桁も膨張し、星は赤色巨星へ向かって進化する。

このことが定量的にはっきり示されるまでに、その後15年近くもかかっている。そこ

に出てくる名前に、シュワルツシルド (Martin Schwarzschild; ブラックホールの話で出てくる Karl Schwarzschild の息子)、林忠四郎などあるが、1960 年代の後半からは観測的宇宙論学者だと思われるサンデージ(A.R. Sandage)などもある。

5. 星の進化論の隆盛

1950 年代になって、そのような星の内部構造と進化の理論は大きく取り上げられるようになった。それには、ガモフ(G. Gamow)による熱い宇宙の起源と元素の起源論にも刺激されて、天文学で「進化」ということが特に話題として取り上げられるようになったということがある。そのような風潮のほかにも、いくつかの理由があった。その頃になって、光電管を使った光電測光観測によって星団の HR 図が盛んに作られるようになったこと、計算機械が進歩して数値計算がやり易くなったことなどである。

原子核物理学、特に核反応の理論が星の内部のような場に応用されるようになったことももうひとつの理由であった。ただ、それがもっている論理構造という観点からは、星の「内部構造」の話とは性格の異なるものである。というのは、星の内部での原子核融合反応の研究は、ある与えられた温度と密度の(一様な)物質の中で、どんな核反応がどういふ速さで進むかを求めるものであった。そういう意味では、温度や密度が場所によって何桁も変わる星の構造という、たちの悪い非線形問題とは関係がない。「局所的」な問題なのである。だから重要な問題ではあるが、この解説で問題にしている「構造」という文脈とは別なので、これ以上には論じない。

6. 電子計算機以前

さて、星の内部構造を計算する問題に戻ろう。タイガー印の歯車式手廻計算機というの

を博物館(インターネットなど)で見られたことがあるだろうか。それはセットした何桁かの数値を、ハンドルを 1 回まわすごとに足しあげていくものである。その際、ある桁が 10 を超えると、自動的に上の桁に 1 を加える(自動車のスピードメーターについている歯車式積算距離計と同じ)。掛け算をするときは、歯車の噛み合わせを変えながら桁送りを行う。例えばある数に 52 を掛けるときはハンドルを 5 回まわして桁を一つずらし、そしてハンドルを 2 回まわすという具合である。

私が大学院に入学した 1959 年には、計算する原理は同じだが、ハンドルの回転と桁送りを電動、すなわちモーターで実行するものが出来ていた。値段は大学出の初任給の 20 倍くらいだったと覚えている。当時の大学の研究予算では、かなり無理をしないと買えない代物であったが、それに投資したところはタイガーで計算しているよりも遥かに能率が上がった。そういう訳だから数値計算の結果は貴重品で、数表として公表されていた。アメリカ天文学会のアストロフィジカル・ジャーナル(Astrophysical Journal)という論文誌のサプリメント・シリーズの第 1 巻、第 10 号(1955 年)は「星の内部構造の数値積分」という表題であるが、全 112 ページのうち 98 ページが積分結果の数表である。その著者は、すでに紹介した天文学者マーチン・シュワルツシルドと、元は保険業に従事していたが彼と一緒に計算を進めるようになったハーム(R. Haerm)である。私たちはそれを大切に使いながら、そして同時に電動計算機を使って拡張しながら、研究を進めたものである。

7. 電子計算機の使用と解の特異な性格の解明

一方、1959 年には、アメリカで電子計算機が使えるようになっていた。NASA(米国

航空宇宙局)には当時最新鋭で、名機だったと言われる IBM7090 が設置されていた。林忠四郎先生は 1959 年に NASA に滞在して、太陽の 15.6 倍の質量をもつ星の進化を、ヘリウム燃焼段階まで解き明かす有名な論文を發表された。

そのときに使われた数値計算の方法は、基本的には機械式計算機でやっていたのと同じである。すなわち、一方では、星の中心から外へ向かっていろいろな初期値に対応する解を数値積分によって求め、他方では星の表面から内へ向かって表面でのいろいろな初期値に対応する数値解を求める。そして両者がきちんとつながるようになる初期値の組み合わせをグラフの上で見出して、正しい解を知るというものである。この手続きは、基本的に

は、量子力学などで座標原点と無限遠方の両方で境界条件を満たす波動関数を(解析的に)求めるのに使われるのと同じであるが、星の場合には遥かに難しい。

量子力学に出てくるのは、普通の波を少し変形したようなものなのだが、赤色巨星の内部構造で出てくるのは、初期値がほんの僅かだけ異なると、その違いは積分していくにつれて何桁も増幅される。発散すると言ってもよい。その一例を図 2 に示したが、これは星のヘリウム燃焼段階のヘリウム中心核のもので、後の進化段階に対応するものでは、発散の程度はますます激しくなる。その様子は、後に注目されるようになった、カオスが起こるシステム(力学系)でしばしば見られる強い初期値依存性(発散)のはしりでもある。

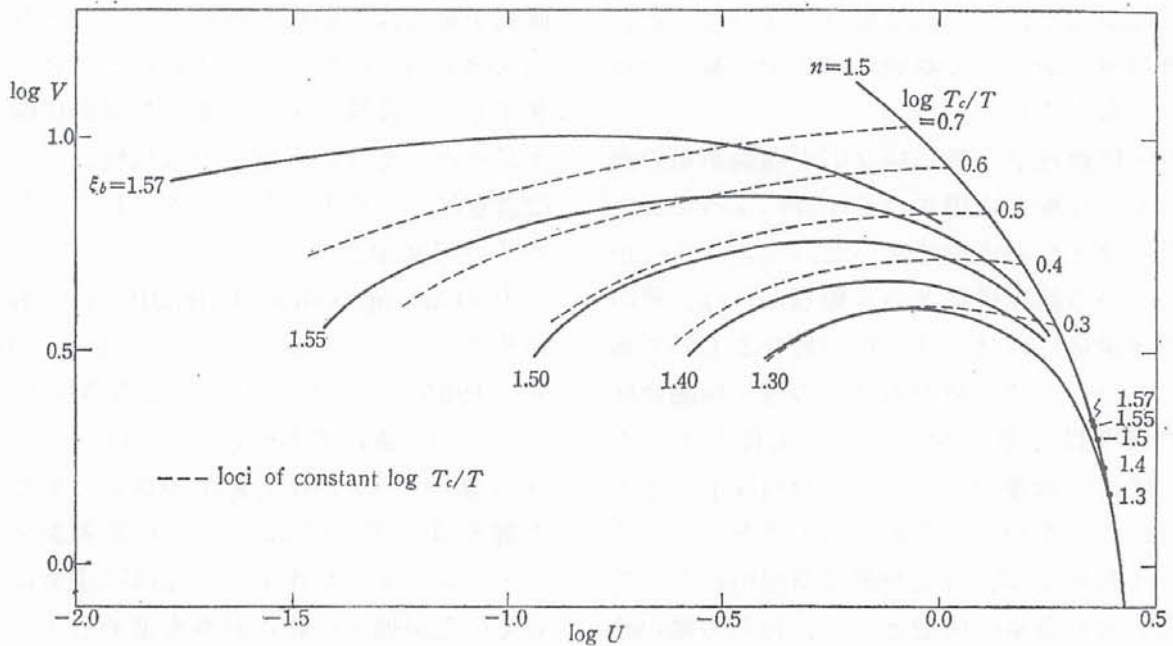


Fig. 4-7. U - V curves of a convective core and its outer radiative region (uniform composition, electron-scattering opacity, and $\beta=1$); ξ_b in terms of Emden's variable.

図 2 星の中心核の数値解の例。右下の部分の分岐点より下では対流が起こっている。分岐点を少し変えると、解(実線)の外側の部分(左側)は大きく変わる。対数目盛りとなっていることに注意。すなわち、縦軸の値は上と下で 30 倍、横軸は左と右で 300 倍異なる広い領域をカバーしている。

(Hayashi, Hoshi, Sugimoto Progr. Theoret. Phys. Suppl. No. 22, 1962)

そういう訳だから、問題を解くためには、微妙な数値計算をたくさん実行しなければならなかった。計算の速さは、今はフロップス (flops) という単位で表現される。小数点の移動する計算を、1秒間に何回実行するかということである。私が最初に始めた電動計算機や (日本人だから) 「そろばん」では、0.1フロップスというところである。IBM7090の時代には、キロ (1000) ・フロップスというところであったろうか。それが最近のコンピュータでは、テラ (1兆) ・フロップスの単位で計られる。現在の超高速計算機の目標は10ペタ (1京=10000兆) ・フロップスである。そして私が以前に関わっていた重力多体問題専用計算機の延長は、今ではペタ・フロップスの程度で、タンパク質の立体構造や天文学の多体問題を計算している (放送大学特別講義「世界最高速の計算機を創って進める科学」、2007~2010年テレビ放映を参照してください)。この数値計算の神代 (神話? の時代) から現代までが、僅か50年足らずの間に経過した。この激動期の最初の時期から今の爛熟期までに立会い、少しは貢献できた私は幸せ者だったと思っている。

8. フィッティングから自動計算へ

計算機で積分して、その解をグラフ用紙の上でつなぐというフィッティング法は1966年頃まで使われたが、計算機の発達に伴って、すべてを自動的に行おうということが始まった。言い出した天文学者の名前をとってヘニエイ (L.G. Henyey) 法と呼ばれた。それは代数方程式の解を求めるニュートン法を拡張したようなものである。すなわち、星の構造の近似解を仮定する。そしてあるべき正しい解からどのくらい「ずれ」ているかを計算し、仮定された解をそれに向かって修正する。

この修正には大きい (何十元、何百元という) 連立方程式を解かなければならないが、

連立1次方程式の場合には、その一般的な手法が線形代数に用意されている。そこで「ずれ」は小さい (仮定された解は真の解に近い) という近似で連立方程式を立て、それを線形代数で解くのである。しかし実際の「ずれ」は必ずしも小さくはないので、このようにして求めた修正は十分ではない。そこで修正された解をもとにして、それを更に修正するということを、何度も繰り返す。こうしてうまくいくときは、修正結果は次第に真の解に近づいていくのだが、最初に仮定された解が適切でない (離れすぎていた) ときには、振動したり、真の解から離れていったりして、求めたい解に至らないという問題がおこる。

そういう問題はあっても、この方法の利点として、進化を計算するとき都合が良いだろうということがある。時刻が進むにつれて星の構造が変わっていくのが進化である。だからある時刻の星の構造は、次のステップ、すなわち時間刻みの分だけ時刻が進んだときの構造を計算するとき、仮定すべき解を考えるのに使える。このことがうまくいくためには、時間刻みを小さくしておかなければならない。そこで問題になるのは、計算すべき進化の時間スパンを時間刻みで割った数、すなわち計算が必要な時間ステップの数がどのくらいになるかということである。

9. 進化計算の手法における根本問題

このステップ数は、先に述べた主系列星のように密度コントラストの小さい星では、たいしたことはない。ところが星がいったん巨星に進化するようになると、べらぼうに大きくなって、手に負えなくなる。そこで天文学者は二手に分かれた。そのひとつは、主系列からせいぜいヘリウム燃焼段階までを問題にし、その代わりに観測と直接に関わる星の外層を精密に計算して、観測されたHR図と詳しく比較しようとするグループである。も

う一つは、外層のことは原理的な事柄を取り入れるだけで、星の中心核の進化に集中するグループである。

後者のグループは少なかった。私は後者の道をとったので、ここでは後者の話をする。そこでは、たちの悪い解をどのようにして求めるかというのが、最大の問題である。進化の一つの段階を例えば 100~1000 ステップで計算するというようにステップ数をとる（ステップの時間間隔をとる）と、ヘニエイ法による解の修正は成功しない。解は次第に大きく振動したりして、めちゃくちゃになってしまう。

もう一つのそしてより根本的な問題は、物理状況が星の中心部と外層部（中心核の比較的外側の領域でも）で、極端に異なるということからくる。進化の進んだ星では、中心部では熱が殆ど伝わらず、熱的に均されて（平均化されて）いないのに、中心核の外側の領域では十分に熱が伝わって均されている。数値は問題によって大きく異なるが、例えば中心部で熱が伝わるのに 100 万年かかるのに対して、星の表面では 1000 秒という感じである。そして、星の進化は例えば 1000 年の時間スケール、すなわち両者の時間の間のスケールで進む。星が超新星になるような速い進化の段階では、中心部では音波が十分に伝わって、進化の時間スケールである 0.1 秒程度の中に、力学的に十分に均されているのに、外側では音波の伝わる時間は 1 ヶ月もかかるので全く均されていない。

だから星の内部の場所によって、注目して解くべき物理状況が異なることになり、物理状況に適切な数式表現にすると、対応する基礎的な微分方程式の連立数まで異なる。それなら異なるものをそれぞれ分けて解けば良いと言われるかもしれない。これはある程度は当たっている。しかし星の中心部から外側まで物理状況は連続的に変わっていくので、両

者を同時に考えなければならないところもある。

10. 星の進化はどんな場合でも計算できるようになった

この問題を私が解決したのは 1969 年、NASA から日本に帰国する直前であった（そして 1 階の私の研究室から地下の計算機室まで、2 年間の滞在期間中に 1000 回以上も大きいカードの箱を持って行き来したので、表彰してやろうかと、からかわれた）。熱の問題については直ぐに論文を書いた。しかし音波の問題に拡張したのは帰国後のことであり、論文で種明かしをしたのは 1981 年になってからである。こうして 1970 年代になって、星の進化は殆どの状況について、計算できるようになった。

それらは、1) 主系列星から鉄の中心核の形成までという進化のメインストリーム、2) 赤色巨星の内部において、ヘリウムの薄いシェルでの核反応が暴走し、外層との間に物質混合がおこったり、鉄より重い元素（s 過程元素）が合成されて星の表面まで汲み出される様子、3) 中間質量の星の炭素・酸素中心核で炭素燃焼が暴走して超新星になる様子、4) 太陽質量の 8-12 倍の星（日本人が解明したので Japanese mass と言われた）が進化して出来た鉄の中心核で原子核の電子捕獲が始まって、超新星に至る様子、5) 近接連星系で 2 つの星の間にガスが流れて質量交換を伴うようになって内部構造も星の半径も大きく変わる進化、6) 白色わい星に連星からガスが降り積もって新星や超新星になる様子、7) 中性子星にガスが降り積もり、そこでヘリウム燃焼が暴走して X 線バースターになる様子、等々である。

それらの計算では星の形は球対称だとしていたが、その範囲内での基本的な進化の様子は、1982 年にはひととおり計算が終わって

いた。これらの計算をするのに使った計算機は MIPS、すなわち 1 秒間当たり 100 万演算程度のものであった。今のパソコンの 1 万分の 1 程度のものである。

11. 計算機の速度と物理的理解の関係

その後、計算機の速度は 100 万倍以上速くなった。その結果として 100 万倍も物事が分かるようになったかという、全くそうではない。この話に関連して私が思い出すのは、人類が月に第 1 歩を印した 1969 年のことである。そのときに使われた計算機は、今のパソコンよりも遅い。つまり計算機の「スピード」は物事を解決するのに役立つが、それと同時に、またそれよりも大事なことは、「使いよう」である。そして計算機のスピードに合った科学的課題が大切なのである。ひとつ弁解させていただくと、私はその後、1990 年から GRAPE 専用計算機を開発するプロジェクトを行った。それで研究対象になったのは、星団や銀河など、星の集団の進化である。そのような問題には、1 秒間あたり 1 兆回程度を超える計算が必要だったからである。

話を戻そう。私は 1984 年頃からは、星の進化の計算そのものには、直接には関わっていない。1970 年代の終わり頃から、私は「星がどう進化かするか」よりも、「星に代表される自己重力系はなぜ進化しなければならないのか」という問題に興味を移していった。それは星の内部構造の問題にも適用したが、その視点を拡張して、「星団や銀河などの恒星系の進化」の分野を考えなおしたいと思った。星の内部構造の研究で得られた知見を、より一般的なものに拡張しようということである。（その挙句の果てが、GRAPE 計算機のプロジェクトになった）。

もう一つの理由として、進化の計算は次第に詳細に入って行き、私の趣味にも手にも負

えなくなってしまうからである。論文を投稿すると、「あの効果やこの効果が計算に入っていない」とか言ってくる（それしか言っていない）。私のやり方は、本質と関係のないことはわざと省いて、物事の本質をえぐり出すという物理学の方法に沿っているつもりである。それに対し若い世代は、「なぜ取り入れないかを説明するよりも、取り入れた計算をしたほうが簡単である。どうせその分はゼロを足したり 1 を掛けたりするだけだから、計算の困難をひき起こすことはない」とか、「少し効くだけで、本質に関係のないことでも、入れておけば、計算されたモデルやシミュレーションの結果は、現実により近くなる。それに計算機は速いのだから、別に大した労力にも費用にもならない」というわけである。

このような考えへの移行は、別に星の進化の計算で起こっただけではない。本質を探るより、より詳しいモデルを計算し、その結果を格好よくきれいな画像で見せるという方向は、あらゆる分野で進んだ。もちろん、それ自身は悪くない。しかしそのような結果を見せられても、何がどうなっているのか、本質的な疑問がどう解決されたのか、そもそも解決されたのかどうかさえ分からないことが多い。

そして、計算機は速いのだから、似たような問題があるときにはもう一度計算すればよいというわけである。私自身は「計算するのは、出来れば、2 度と計算をする必要がないようにするため」と思っている。言い換えると、似たような問題とか変換でつなぐことの出来る問題については、新たに計算を繰り返して行わなくてもよくなるようにするために、そもそも最初の計算をするということを基本的な姿勢にしている。そうしないと、物事の本質は分からないと思うからである。しかしそのようなことを言うのは年寄りの趣味で、若い世代の人は、工学設計のように毎回計算

するのが今風だというわけである。こうして私の趣味に合わなくなったので、私は星の進化の計算から離れていった。

12. その後の進歩は若い世代に語ってもらってください

その後の星の進化の研究では、星の誕生、爆発による死などの動力学的進化、球対称から外れた現象、星の内部の各層での原子核反応の詳細を計算することなどが、盛んに行われるようになった。それらのことについては、実際に計算を遂行している若い世代の人に、その詳細と思想を語ってもらうほうがよい。本質的なことをどう理解するかということとはさて置くとしても、彼らは物事がどうなっているかを示す、きれいな画像を数多く持っている。

このことに関連する一つの典型的な例について、質問を出しておこう。動力学的な計算で成功していると言われるもののひとつに、太陽のフレアや銀河の形成などに関連する「磁力線のつなぎ換え」という現象がある。これがジェットを伴う激しい現象の観測結果とも合うよう、数値計算で再現出来るようになり、観測・理論の両面で成功したと言われている。

この手の磁力線のつなぎ換えのことを私が初めて知ったのは、40年以上前のことで、電磁流体力学の教科書に書いてあった。その当時から続いていた疑問は、気体分子運動論（統計力学）の視点から計算した分子粘性の係数を使ったのでは、太陽フレアの爆発が数分という短い時間スケールで起こることは、到底説明できないということであった。同じことは核融合のプラズマが不安定現象をとおして崩れる場合にも当てはまる。そして考えられていたことは、分子運動レベルではなくて、乱流という集団運動の要素間に働く乱流粘性という、遥かに大きい粘性（運動量の輸

送や散逸）があるのだと考えざるを得ないということであった。

現実をうまく説明したという最近のシミュレーション計算ではどうしたのだろうか。単に大きい値の粘性係数を仮定してシミュレーションをしたからそうなったというだけなのか、それとも上に述べた、粘性が実質上極めて大きいように見える根拠は何かという根本問題も解決されたのであろうか。そのようなシミュレーションをしている人に、一度、解説してほしいものである。そしてこの小論での私の結論は、「計算機とはさみ（鋏）は使いようで切れる（もっとも近頃のはさみは下手な使い方でも切れるのだが）」ということで、計算機の使い方を根本的に考え直すべき時期に（とくに）なっている」ということである。