

# 理論天文学，特に重力崩壊型超新星研究における シミュレーションの役割と今後

佐藤 勝彦

〈東京大学大学院理学系研究科 〒113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1〉

e-mail: sato@phys.s.u-tokyo.ac.jp

理論天文学ではシミュレーションは不可欠である。天体また宇宙全体の構造・進化は地球上で実験して調べることはできないし、また天文学が対象とする物理系・天体は一般に物質の諸階層が組み合わさった複雑なシステムである。星の構造・進化はニュートリノなどの素粒子反応、エネルギー源としての核反応、熱伝導、輻射の輸送にかかわる原子分子プロセスなどから、対流等の流体现象までがからみ合った系である。全体的な構造・進化を解明するにはシミュレーションによらざるをえない。ここでは、筆者自身がこれまで多くの共同研究者と進めてきた星の重力崩壊・超新星研究の歴史を振り返りながら今後のシミュレーションによる研究の方向・期待について考えたい。

筆者の恩師である林 忠四郎先生は、星の進化研究のパイオニアであるが電子計算機が使えない初期の段階では、手回し、また電動式の機械的な計算機によって星の内部解と外層解を計算し、それを接続しながら星の進化のシミュレーションを進めた。日本におけるシミュレーション的研究のはしりといえる。計算機室には若い女性の計算手が何人かいて計算を実行してくれたそうである。

研究室の研究の自然な流れから私は星の進化の最後の爆発、重力崩壊型超新星のシミュレーションを始めることになった。重力崩壊型超新星の爆発のシナリオは、1) 鉄の熱分解、また鉄の縮体電子の捕獲によって鉄のコアが不安定となり重力崩壊を始める、2) 中心に中性子星が形成されその重力エネルギー ( $\sim 10^{53}$  erg) が解放され、生じた

衝撃波が外層に伝わり、星を爆発させる。3) そのとき解放された重力エネルギーの 99% はニュートリノとして放出されるが、1% 程度が物質に渡され爆発のエネルギーとなる、というものであった。しかし、1970 年当時行われていたシミュレーションでは、このシナリオどおりに爆発は起こらなかった。発生する衝撃波は弱く、衝撃波は途中でへたり、外層の落下は続き星は結局ブラックホールになってしまう。当時のシミュレーションには、以下のような限界があった。

まず第 1 は、ニュートリノの相互作用である。当時ニュートリノの相互作用は Fermi による V-A 理論が正しいとされ星の進化もこの理論に従ってニュートリノによるエネルギー損失が計算されていた。しかし今日標準理論となっている Weinberg-Salam 理論はすでに提唱されていたにもかかわらず、ほとんど無視されていた。筆者はこの理論に基づいて超新星の研究を始めたが、幸いなことに、この理論が予言する中性流相互作用が加速器実験で発見された。この中性流相互作用のもとに、星のコア全体を一つのゾーンとする簡単なモデルでシミュレーションを行うと、電子型ニュートリノは星が重力崩壊を始めてまもなく、コアに閉じ込められてしまう（拡散時間が動力学的時間より長くなる）ことがわかった。ニュートリノはフェルミ粒子であるのでフェルミ縮体を起こしそのフェルミエネルギーは 100 MeV を超える。縮体したニュートリノの圧力も加わりコアは強く跳ね返った。このニュートリノがコアの中に

閉じ込められるというトラッピング理論は、今は常識的であるが、しかしこれによって爆発が起こることが確かめられたわけではない。星のコアを細かくタマネギの皮のように分割したシミュレーションで爆発を示さなければならない。

第2の問題はニュートリノの輸送を極めて不透明な中心領域からほとんど透明な鉄コアの表面近くまで、流体計算と連立して計算して解く難しさである。この問題、輻射流体力学は、超新星コアだけでなく星形成、クエーサージェット形成をはじめ天文学の広い分野で重要だが困難な課題である。特に超新星コアにおけるニュートリノ輸送は、相互作用がエネルギーの2乗で変化すること、フェルミ粒子であるためパウリ原理を満たさなければならないことなどさらに困難が大きい。

重力崩壊型超新星のシミュレーションで、長くトップを走っていたのは、ローレンスリバモア研究所の、J. Wilson のグループであった。流量制限法 (Flux Limited Method) など原爆、水爆の輻射流体シミュレーションで開発した技術を応用し、単純な衝撃波による爆発は起こらないものの、中心に形成された超新星コアからの長時間にわたるニュートリノ放射が衝撃波の後面を押し続けることで爆発が起こるという遅延爆発モデル (Delayed Explosion Model) が提唱され、長らく超新星爆発の標準モデルと考えられてきた。しかしこの10年足らずの間に球対称1次元系では、流量制限法を超えて、直接ボルツマン方程式を解くことが可能になるなど、重力崩壊のシミュレーションは大きく進んだ。その結果、再度重力崩壊は爆発に転ずることは困難で、コアはブラックホールになってしまうことになってしまった。ニュートリノの流量を人為的に増加させるだけで爆発が起こるというシミュレーション結果もあり、この結論は確定的になったとは言えないが、しかし自転の効果や磁場の効果を取り込んだシミュレーションの必要な時代になってきたことは明らかである。自転の効果もまた磁場の効果も含めた Le-

Blanc, Wilson (1972) による極めて先駆的な研究もあったが、シミュレーションの困難からこの30年、遅々として進まなかったと言って良い。

我々のグループはSN1987Aの観測から明らかに爆発が球対称ではないこと、またこの超新星からの可視光が分極していることから、自転の効果を含めたシミュレーションを山田章一氏(現在、早稲田)を中心として、直ちに始めた。ニュートリノ輸送などが含まれていないシミュレーションではあるが、その結果、自転の効果は自転軸方向にジェットの爆発は起こさせるものの、爆発のエネルギーそのものは角運動量の増加とともにむしろ減少することなどを明らかにした。これは遠心力の効果により、重力収縮が減速され解放される重力エネルギーが減少することによる。また清水鉄也氏ら(現在、理研)により、自転によって扁平になった超新星コアからのニュートリノ放射によって、自転軸方向への放射が強まる効果によりジェットの爆発が起こるモデルが提唱された。

最近の固武 慶氏を中心とする自転重力崩壊のシミュレーションはこのモデルを裏づけている(p. 608 カラー図1)。しかし、2次元シミュレーションの最も困難な問題はニュートリノ輸送である。2次元、3次元での輻射輸送は理論天文学共通の課題であり、分野を越えた連携交流が必要である。最近の多くのシミュレーションから、超新星爆発は、最初に生じた衝撃波によって一挙に爆発が起こることはなく、内部で対流が起こったりしながら衝撃波がニュートリノで押され爆発が起こると言うことがわかってきた。対流はニュートリノの流量を大きくし爆発を起こしやすくする。しかし2次元計算での対流は、流体要素はリングで、あまりにも人為的である。10年ほど前に行われた清水鉄也氏らによる先駆的3次元的シミュレーションにおいても、最近ロスアラモスグループによって進められているSPHによるシミュレーションにおいても、一般的に軸対称な対流が起こるわけではない。ニュートリノ輸送も含む3

次元重力崩壊型超新星のシミュレーションは、確かに困難であるが、しかし現在の計算機能力の向上から見るなら今チャレンジすることのできる現実的課題となってきた。

重力崩壊において磁場の効果は一般に小さいと考えられてきた。特に中心領域では常識はずれの強い磁場を仮定しても、高密度物質の圧力に比べると磁気圧は小さいからである。しかしコアの外層などでは磁場の効果は現れる。磁場入りのシミュレーションも山田章一氏ら早稲田大学のグループによって始められている。

これまで進められてきた2次元、3次元の重力崩壊型超新星のシミュレーションでは一般相対論的效果は無視されているか、せいぜいポストニュートニアン近似程度で考慮されているのみである。2次元、3次元の一般相対論的重力崩壊の研究は京都大学の中村卓史氏を中心として、世界に先駆けて始められ、研究者の層は厚い。より現実的な状態方程式、ニュートリノの効果を取り入れる方向の研究に向かっており、今後さらに相互の連携協力が今後の研究の進展のために必要となるだろう。

ガンマ線バースト、また極超新星も基本的には大質量星の自転重力崩壊に起因するものと考えられるようになってきた。中心に作られるブラックホールと周りに形成される降着円盤から、従来の超新星モデルとは異なったメカニズムで爆発が起こるのだと考えられるが、中心のエンジン部分は隠されたままである。ガンマ線バーストや極超新星を含めた重力崩壊型超新星研究の夢は、ニュートリノ輸送を含む3次元一般相対論的磁気流体シミュレーションであろう。

米国ではそれを最終目標としたオークリジ国立研究所を中心とした「Tela Scale Supernova Initiative」プログラムやアリゾナ大学を中心とした「Supernova Science Center」などによるプログラムが進んでいる。現在の計算機能力やプログラム開発の現状からそのような夢が数年のプログラム

中に実現できるとは思えないが、このような大型プログラムが認められていることはこの分野の重要性が高く認知されていることを示している。現在、世界的にも、それぞれのグループがそれぞれの得意なアプローチでこの研究を進め競いあっている。それぞれのグループがそれぞれの持ち味を活かして、何でも採り入れた大規模数値計算を目指すのではなく、磁場や自転、相対論効果、状態方程式、ニュートリノプロセスなど多様な物理パラメータに対する依存性などを、数値実験的に、重力崩壊の物理を調べ尽くすことが、今重要であると思われる。

日本においても新たに、これまで他分野で活躍していた多くの研究者がそれぞれの得意な道具をもって重力崩壊型超新星にチャレンジし始めた。相互の連携を深め研究を進めることで、さらに世界をリードする研究が数多く生まれてくると確信している。その上で国立天文台のスーパーコンピュータの共同利用の果たす役割は大きい。

現在日本でのシミュレーション的研究は多くの分野で世界のトップを走っている。星形成、星の進化、超新星爆発、相対論的多次元重力崩壊、宇宙の大規模構造の形成、銀河形成、銀河構造、球状星団、太陽物理、惑星系形成、月形成など枚挙にいとまがない。これらの成果は、活発な若手の研究者のチャレンジ精神と日夜を忘れた努力によって成し遂げられたものであろう。しかし何となく、シミュレーション的研究を進めている研究者の平均年齢がいくらか上昇しているように思うのは筆者の誤解だろうか？ シミュレーションによる研究は論文の数を誇ろうなどと思うと、極めてコストパフォーマンスが悪い。評価、評価という世の流れや就職難から避けられているとすれば残念である。本質をとらえたシミュレーション結果は観測結果と同じように重みがある。多くの若者がシミュレーション的研究にもチャレンジしてほしいものである。