

重力崩壊型超新星の爆発メカニズム

荒木 惟 (福岡大学大学院 理学研究科)

Abstract

超新星は大質量星の進化の最終段階に起きる激しい爆発現象である。その爆発エネルギーは 10^{51} erg とその親の銀河に相当するほどで宇宙で最も激しい爆発現象のひとつであると言える。重力崩壊型超新星は文字通り重力崩壊が爆発の引き金となるものであり、この超新星が重力崩壊から爆発に至るまでのような物理が関わっているのか長きに渡って研究は進められてきた。しかしまだ完全には解明されていない点が残っている。この研究では現在有力視されている超新星が爆発に至るまでの標準シナリオを解説し最後に現在の最新のシミュレーションについても議論する。

1 Introduction

超新星爆発は大質量星の進化の最終段階で起こす爆発現象であり、高エネルギー天体物理学としても重要な天体現象の一つである。またニュートリノ天文学や重力波天文学での候補天体としても重要性を持っている。超新星のなかでも重力崩壊型超新星は親星の質量が $8M_{\odot}$ 以上の恒星が進化の最終段階で起こす爆発現象である。恒星は核融合反応により元素合成を行いながら進化していき、質量が $8M_{\odot}$ 以上である恒星はその最終段階で中心部に鉄のコアを作る。この鉄コアが不安定になり重力崩壊を起こし爆発が生じる。この超新星の研究は約 50 年間にわたって行われてきたが未だその爆発のメカニズムに関して完全解明されておらず、現在も盛んに研究がおこなわれている。この重力崩壊型超新星のメカニズムを解明するには、素粒子、原子核物理、流体力学、電磁プラズマ物理そして一般相対性理論を含めた非常に複雑な物理が関連してくる。この現象を考慮した研究を行うには数値シミュレーションは欠かすことができない。将来的にこの現象を、7 変数（時間 1，空間 3 次元，位相空間 3 次元）を持つボルツマン輻射輸送方程式を一般相対論的な流体・時空の進化と合わせてセルフコンシステントに解くことが必要である。当発表では重力崩壊型超新星が重力崩壊を起こし爆発に至るまでの標準的なシナリオを解説し、さらに現在の数値シミュレーションの結果についても紹介する。

2 重力崩壊から爆発にいたるまで

ここでは重力崩壊型超新星の重力崩壊の始まりから爆発にいたるまでの標準シナリオを解説する。恒星は核融合をしながら進化しているがその質量が $8M_{\odot}$ 以上の恒星は進化の最終段階で重力崩壊を起こす。これにより爆発することがわかっていて、爆発後は中性子星もしくはブラックホールになると言われている。この研究で注目する恒星は爆発後中性子星となる恒星であり、その恒星は質量が $9 - 25M_{\odot}$ であることがわかっている。また星の運命はその恒星に含まれる金属量に依存するので、その中でも私たちの太陽系と同程度の金属量を持つ恒星に注目する。

2.1 重力崩壊の開始

爆発直前の恒星は元素合成が進みその中心部に鉄のコアを作る。その鉄コアの内部の圧力勾配と自己重力が釣り合うことによって、恒星は安定している。その鉄コアの内部の圧力が減少し釣り合いが崩れるとき重力崩壊を起こす。内部圧力は主に電子による縮退圧と熱による圧力によって支えられている。よってこの 2 つの圧力の減少が引き金となり重力収縮し始める。

まず電子の縮退圧について考えてみる。重力崩壊が開始するとき鉄コアの密度が $10^9 [\text{g}/\text{cm}^3]$ になっている。このとき原子核の周りをまわっている電子が原子核に取り込まれてしまう現象が起きる、これを電子捕獲反応 (${}^{56}\text{Fe} + e^- \rightarrow {}^{56}\text{Mn} + \nu_e$) と言う。この

反応は左辺と右辺の化学ポテンシャルの和を比較すると左辺の方が化学ポテンシャルが大きいので平衡にする方向に反応が進むためである。よってこの反応によって電子は原子核に取り込まれるため圧力の担い手を失い縮退圧は減少してしまう。

次に熱による圧力を考えてみる。鉄コアが重力収縮を始めるときの温度は 10^9 [K] 以上であるこのとき鉄コアの鉄が光を出しながらヘリウムに分解される ($^{56}\text{Fe} + \gamma \rightarrow 13^4\text{He} + 4n - 124.4\text{MeV}$)。これを鉄の光分解という。この反応は吸熱反応であるので熱的なエネルギーが奪われ、熱によって支えられていた圧力は減少する。以上の 2 つの減少によって鉄コアの内部の圧力は減少し鉄コアは重力崩壊を起こす。

2.2 ニュートリノトラッピング

重力崩壊開始時、電子捕獲反応では電子が捕えられる代わりに、電子ニュートリノが飛び出している。重力崩壊の初期では電子ニュートリノは物質と相互作用することなくコアの外に抜け出るが、重力崩壊が進み中心密度が 10^{12} [g/cm³] になると、電子捕獲反応によって飛び出していた電子ニュートリノが鉄コアに閉じ込められ始める。これをニュートリノトラッピングと言う。それは電子ニュートリノが鉄の原子核との散乱が効き始めるからである。またニュートリノが鉄コアからギリギリ抜け出すことのできる面をニュートリノ球という。

2.3 コアバウンス

鉄コアはその後も重力収縮をし続け、中心密度が 10^{14} [g/cm³] 以上になったときその値は核密度を超えるので、核力による斥力が働き力がバウンスする。この跳ね返った力が衝撃波となって外側へと広がる。これをコアバウンスという。そしてこの衝撃波は原子核を核子に分解しながら外側へと伝わっていく。しかし現段階のシミュレーションでは衝撃波は星の外までいかず、鉄の光分解や電子捕獲反応によりエネルギーを損失してしまい、半径が 100-200km の時点で失速してしまう。よってこの失速してしまった衝撃波をどうにかして復活させ爆発をさせなければならない。

2.4 ニュートリノ加熱

一度止まってしまった衝撃波を復活するために考えられているのはニュートリノによる再加熱である。

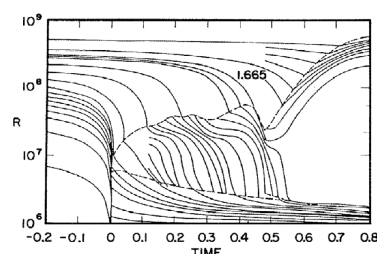


図 1: Wilson らによる $25M_{\odot}$ モデル

1985 年に Wilson らがニュートリノ加熱によって衝撃波の復活に成功したことによりその重要性は確かめられた。

衝撃波の通ったあとの物質は分解された陽子と中性子で満ちている。その核子とニュートリノ球から飛び出た電子ニュートリノが次のように荷電反応をする。

$$n + \nu_e \rightarrow p + e^- \quad (1)$$

$$p + \bar{\nu}_e \rightarrow n + e^+ \quad (2)$$

よってニュートリノがエネルギーを運び再加熱することができる。しかし加熱と同時に脱ニュートリノによる冷却も起きているので、加熱と冷却を考慮したトータルの加熱率を考える。そのときある半径を境に加熱が優勢の領域と冷却が優勢の領域に分かれる。これをゲイン半径といい。加熱率と冷却率の等しい半径である。ゲイン半径は 80-100km の領域にあると考えられている。ゲイン半径以下の領域は冷却が優勢であり、ゲイン半径以上の領域は加熱が優勢である。よってこのことをまとめると半径が 100-200km で失速した衝撃波はゲイン半径と衝撃波面の間の加熱優勢の領域で暖められ、再び息を吹き返す。これがニュートリノによる加熱のメカニズムである。

3 数値計算モデル

爆発のメカニズムを解明する上で数値計算は欠かすことができない。よってこれから重力崩壊型超新星の爆発のシミュレーション結果を次元ごとにみていくことにする。

3.1 1次元モデル

まず最初に球対称の1次元モデルをみってみる。1次元モデルでは一般相対性理論とニュートリノ輻射輸送に基づく計算が行われておりその結果によると爆発しないという結論にいたる。これは1次元シミュレーションは球対称モデルであるために方向が一方向であり、失速した衝撃波が再び加熱する間もなく物質が降り積もるからである。

3.2 2次元モデル

次に2次元の軸対称モデルについてみってみる。2次元モデルは軸対称であるので流体の不安定が作られやすく1次元モデルより再加熱しやすい。よって1次元モデルより爆発しやすいことがわかっている。また90°で対称のモデルと180°で対称のモデルでは180°対称のモデルは衝撃波が復活し見事爆発していることがわかっている。

3.3 3次元モデル

最後に3次元モデルをみってみる。3次元モデルの数値計算は現在2次元モデルとの爆発しやすさを議論する研究が行われている。現在では3Dモデルは2Dモデルより爆発しにくいと考えられてる。ここで唯一爆発が成功した例を紹介する。このシミュレーション

ンでは親星が $11M_{\odot}$ としたときのシミュレーション結果である。(a)はバウンス後50msの時点では衝撃波の背面で凸凹した小さな揺らぎがでてきはじめる。(b)はバウンス後110msではその揺らぎのスケールが発達する。(c)はバウンス後130msで衝撃波面そのものが大域的に揺らぎ始める。(d)はバウンス後170msで外側では大域的な揺らぎをしつつ内側では小さなスケールでの揺らぎを持つ構造を持っている。

4 Discussion

このように重力崩壊型超新星の爆発のシナリオは大きな流れとしては解明されてきているがさらにニュートリノ輸送や一般相対性理論に基づいた計算、また流体の乱流理論などさまざまな問題が残っている。またシミュレーションに関しても比較的軽い星では3Dモデルで爆発をしたがより重い $27M_{\odot}$ では爆発を再現できないなどの問題がある。しかし「京」をはじめとするスーパーコンピュータの発達により計算技術は向上し、さらなる爆発メカニズムの解明が進んでいくと考えられる。

Reference

- Kotake, K., Sato, K., & Takahashi, K. 2006, Reports on Progress in Physics, 69, 971
- Bethe, H. A., & Wilson, J. R. 1985, The Astrophysical Journal, 295, 14
- Suwa, Y., Takiwaki, T., Kotake, K., et al. 2013, The Astrophysical Journal, 764, 99

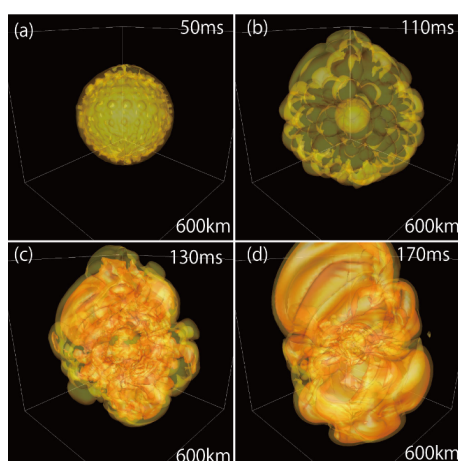


図 2: 「京」による3次元シミュレーション