

## 論文内容の要旨

論文題目：

# Study of core-collapse supernovae in special relativistic magnetohydrodynamics

(特殊相対論的磁気流体計算に基づく重力崩壊型超新星の研究)

氏名 滝脇 知也

超新星爆発は非常に重い星が自らの重力を核融合にて支えることができなくなり、爆縮することによりトリガーされる爆発であり、中心での高温高密度な環境は、地上では実験できない高エネルギー物理学の実験場として優れている。天文学者のみならず、物理学者も魅了する天体現象である。

この超新星の残骸が非球対称に発達していることから、もともとの爆発も非球対称に起こると考えられ、それらを生み出す星の自転および磁場の効果の重要性が指摘されてきた。しかし近年新たな文脈からこの自転磁場の研究の重要性は高まっている。

ガンマ線バーストと呼ばれる 100 秒程度の継続時間を持ち 10ms 程度で激しく時間変化する突発的なガンマ線放射現象は長年謎にまつまれているが、このガンマ線バーストの数日後、同じ位置から超新星爆発が観測されたことなどにより、これらの天体現象は同一の起源を持つと考えられ始めている。現在有力だと考えられている理論モデルによると、この放射は重力崩壊によりできた中心天体周りの降着円盤の回転エネルギーをニュートリノ加熱及び磁気流体過程により爆発エネルギーに変換し、極付近の物質を吹き飛ばすことによって生じると予想されている。このシステムは幾何学的に非常に複雑な形状をしており、1 次元的な計算に簡略化することができない。モデルの正しさを検証するためには、多次元磁気流体計算が不可欠になる。

この計算を行うにあたり、強磁場で低密度の領域ではニュートン力学的な取

り扱いでは磁気音速が光速を超えてしまい、計算が不安定になるという問題があった。そこで安定かつ正確な計算を行うため、今回新しく特殊相対論的な枠組みに基づく計算コードを開発した。通常相対論的な計算では省略されることの多い素粒子過程に関しても、今回の計算では重要になると考えたため、ニュートリノの全フレーバーを考慮した冷却過程を組み込んである。

本論文の主要な結果はこの新たに開発した2次元磁気流体コードにより強磁場を持ち高速自転する星の重力崩壊過程をシミュレートしたものである。計算の初期で回転エネルギーが重力束縛エネルギーの1%、磁気エネルギーが10<sup>-4</sup>%ほどのモデルを中心に、幅広いパラメーターレンジをとり、系統的に自転と回転の効果調べた。本計算では、全てのモデルで磁気駆動のジェット状の爆発を確認したが、その特性は大まかに二つに分かれた。一つ目のグループでは、爆発がコアバウンスの直後にすぐ生じたのに対し、別のグループではバウンス後100ms程度遅れて爆発が起こった。この爆発の時間差は磁場の巻き込みによりトロイダル磁場が、コアの外側に落ちてくる物の力学的エネルギーにより生じるラム圧力を超えるほどに成長するためのタイムスケールに拠っている。このとき物の降着率は、どのモデルでも概ね似たようなものとなり、ラム圧力も同程度の値を示すことから、必要な磁場も各モデルで共通の10<sup>15</sup>G程度となる。必要とされる磁場の強さが同じことから、このジェット状の爆発の1次元的な構造は各モデルでよく似ている。その一方、爆発エネルギー自体は生成されるジェットの太さに依存し、この量は、爆発が起きるまでの時間と強い相関があった。

本計算の結果から、このような強磁場・強回転に伴う重力崩壊の結果、中心に超強磁場の中性子星、マグネターが残されることが予想される。そのため、この計算結果はこのマグネター生成の際に生じるジェットに応用できると考えられる。2006年に見つかったGRBの亜種であるX線フラッシュは中心天体がマグネターだと予想されており、我々のシミュレーションと状況がよく似ている。観測結果から、通常のガンマ線バーストと違い比較的低いローレンツファクターで運動していることが報告されているが、本計算でもこのようなジェットは密度が高く、ローレンツファクターの大きくない低速のものであることが示されている。

今回の計算では自転磁場の初期条件について幅広い可能性を考え、パラメーターレンジを広くとったことにより、磁気超新星の爆発機構を一般的に議論することができた。このことは、新しい計算コードにより今までは計算が破綻し

てしまっていたような長時間計算が可能になったことにも強く拠っている。ただし、今回の計算の磁場の成長と現実に行っている磁場の成長とはまだ隔たりのあることを指摘しておかねばならない。まず、本計算では星の自転軸に対して、軸対称が仮定されているため、非軸対称的な磁場の成長を人為的に抑制してしまっている。また、計算グリッドの不足から、MRI と呼ばれる磁場の不安定成長モードを完全に追えていない。磁場の増幅に関して、さらなる計算手法の精密化が求められる。

今後、天体物理学におけるシミュレーションの価値はより高くなっていることが予想される。高精度の観測結果と直接比較できる量をシミュレーションにより得ることができるからである。超新星爆発のシミュレーション究極的な目標は輻射輸送を含めた3次元一般相対論的磁気流体計算を、適切な解像度にて行うことにある。今回の我々の計算はその究極の目標に向けた着実な1歩を報告するものである。