平成 21 年度国立天文台天文シミュレーションプロジェクト成果報告書

重力崩壊型超新星爆発における三次元 MHD 効果

三上 隼人 (千葉大学大学院理学研究科)

利用カテゴリ　XT4B

平成 21 年度の共同利用では、重力崩壊型超新星爆発向け適合格子法プログラムの性能評価および計算結果の解析を行い、状態方程式の精密化に取り組んだ。

まず、適合格子法プログラムの性能評価と解析では、状態方程式として縮退圧などをポリとロープ近似した Takara & Sato の状態方程式を用い、即時衝撃波の停滞を再現するために断熱指数を 1.26 とした。初期モデルとして、回転軸に対して 60 度傾いた磁場を持つ大質量星コアを仮定した。適合格子法により原始中性子星の形成領域に多くのメッシュを配置することが可能になり、 過去の多段格子法による計算の 4 倍のメッシュを割り当てた。大質量星コアの半径 3400 km 圏内を計算領域とし原始中性子星を一辺 410 m の メッシュで解像した場合、一辺 8 メッシュを持つ基本ブロックが 12608 個用いられ、メモリ量は 5 GB となった。また、並列化率は 99.58 %となった。この計算で形成される原始中性子星は過去の計算結果よりも 1.0 %だけ密度が高く、5.6×10^{14} g cm^{-3} となった。原始中性子星表面で形成される磁気反転層は、過去の結果では粗いセルによって数値的に散逸していたが、より長く層状構造を維持できるのが分かっている。原始中性子星形成から 100 ミリ秒後まで磁気反転層やジェットの構造を再現した計算結果について、以下にまとめる。原始中性子星によって捻られた磁場は赤道面付近に、10 km おきに向きが反転した層状構造を形成する。この層は原始中性子星形成後 50 ミリ秒後から次第に崩れ、反転した磁場が入り乱れることが分かった。半径 20 km 以上での磁場構造は回転軸付近のタワー状構造と赤道面付近の狭い磁気反転層に分かれる。タワー状磁場は 10^{13} G 以上の強度を持ち、原始中性子星形成から 96 ミリ秒後には半径 120 km まで伸びる。アウトフローについては、原始中性子星形成によって即時衝撃波が発生し、その 39 ミリ秒後には磁場と回転の効果によりジェット状アウトフローが放出される。即時衝撃波面は原始中性子星形成から 2.4 ミリ秒後では高速回転により扁平していたが、19 ミリ秒後には扁長へと変化する。その後遠方へと伝播するにつれて球状へと変化する。また初期には光速の 4.4 % で伝播するが徐々に減速し、原始中性子星形成から 40 ミリ秒後には半径 400 km で停滞する降着衝撃波となる。回転と磁場の効果によるジェット状アウトフローは原始中性子星形成から 24 ミリ秒後に放出され始め、71 ミリ秒後には降着衝撃波に追いつく。その後、衝撃波全体を押し上げるようにして超新星爆発を起こすことが分かった。ジェット状アウトフローの構造は原始中性子星表面から開口角 30 度で広がり、回転軸付近では螺旋状に巻かれることが分かった。また、ジェット状アウトフローの速度は光速の 12 % であり、初期には半径 60 km で加速され回転軸方向へ放出され、後期には半径 600 km でさらに加速される。そのエネルギー源は原始中性子星の回転によって捻られた磁場であると考えられる。磁気エネルギーは初期には半径 18 km で蓄えられ、光速の 1.4 % の速さで遠方へと漏れ出していく。漏れた磁気エネルギーは次第に加速され、伝播速度は光速の 5.0 % まで達する。この漏れ出しにより、ジェット状アウトフローが形成された領域での磁気エネルギーは 2.5×10^{48} erg となる。長時間計算が可能になったことで磁気反転層の崩れやジェット状アウトフローの捻れが発見することができた。

これら後期の爆発過程を現実的なモデルで検証するためには、現在主流となっている Shen の状態方程式を採用し、データテーブルの最適化に取り組んだ。Shen の状態方程式は密度 ρ、陽子数比 Y_p、温度 T のテーブルデータとして提供されているものの、 温度については不等間隔に構築されている。ここで、内部エネルギー $E_{int}(\rho, Y_p, T)$ について絶対零度からの増分を $\Delta E_{int} = E_{int}(\rho, Y_p, T) - E_{int}(\rho, Y_p, 0)$ と定義し、ΔE_{int} についてスプライン補間を適用した。また、Shen の状態方程式を組み込むために、電子数の保存則を解くことにした。この状態方程式を用いて衝撃波管問題を正しく計算できることを確認し、計算時間の増加が以前の簡略化された状態方程式での計算に比べて三割程度に抑えられていることが分かった。次に、重力崩壊型超新星爆発へと適用するために低密度領域での電子捕獲とニュートリノ散逸を組み込み、重力崩壊から原始中性子星の形成までを安定して計算できることが確認できた。また、並列化率は 99.27 % となった。