系内で起こる軽い自転超新星爆発のマルチメッセンジャー観測予言

Neutrino and gravitational wave emission from core-collapse supernovae in rapidly rotating lighter progenitors in our Galaxy

滝脇知也
国立天文台

1．研究目的

重力崩壊型超新星爆発は、大質量星の終末を規定する基本的な天体現象であり、元素合成、銀河進化、ならびに中性子星・ブラックホール形成と密接に関係している。近年の三次元数値シミュレーションの進展により、ニュートリノ加熱が爆発を駆動する主要なメカニズムであることが、幅広い親星質量に対して示されつつある。一方で、爆発の非対称性や長時間にわたるダイナミクスについては依然として未解明な点が多く、カシオペア A 超新星残骸の Chandra X 線観測や JWST 赤外線観測、1987A 超新星残骸の ALMA や JWST による観測などが示す著しい非対称構造の起源の理解には、爆発初期から長時間進化を見据えた一貫した理論モデルが求められている。

親星が自転や磁場を有する場合には、ニュートリノ加熱とは異なる爆発メカニズムが働く可能性があり、爆発の非対称性や時間変動を増幅して、重力波やニュートリノ放出に特徴的なシグナルを残すと予想される。従来、高速自転星は低金属量環境に限られると考えられてきたが、近年の連星進化研究により、太陽金属量環境でも質量移動を通じて高速自転状態に至る軽い親星が形成され得ることが示されている（Kinugawa et al. 2024）。軽い星は数が多く、銀河近傍においても一定頻度で高速自転型超新星が発生する可能性があり、観測的意義は大きい。

本研究の目的は、連星進化によって形成される軽い高速自転星を起源とする、磁場を伴った重力崩壊型超新星爆発を三次元数値シミュレーションによって調べ、そこから放出される重力波およびニュートリノ信号を理論的に予言することである。これにより、カシオペア A や 1987A 超新星残骸の最新観測が示す非対称構造の起源を理解し、将来の銀河近傍超新星に対するマルチメッセンジャー観測の解釈に資する理論的基盤を構築することを目指す。

2．研究成果の内容

(1) 高速自転する初期親星の作成

本研究で対象とする軽い高速自転親星の重力崩壊計算には、自己無撞着な軸対称・定常の高速回転星を初期条件として与える必要がある。今年度は、Fujisawa (2015) の手法に基づき、白色矮星型の縮退コアを模した静水圧平衡解を構築した。すなわち、回転軸まわりの軸対称性と定常性を仮定したオイラー方程式を、バロトロピック流体（圧力 $p = p(\rho)$、完全縮退電子ガス EOS）に対して可積分にする条件 $\Omega = \Omega(\varpi)$

のもとで第一積分を解いて密度・圧力分布と重力ポテンシャル Φ を反復的に求めた。可積分条件から角速度は円柱半径 ϖ のみの関数となり、等角速度面は回転軸に平行な円柱面に制限される。

角速度プロファイル $\Omega(\varpi)$ としては、Yoon & Langer (2005) に基づく二領域モデルを採用した。すなわち、内側領域（ϖ < ϖ_n）では Goldreich-Schubert-Fricke 型のシア不安定が許容するシア率を考慮した差動回転、外側領域（ϖ ≥ ϖ_n）では星表面の角速度が局所ケプラー角速度の f_K = 0.95 倍になるという境界条件のもとで滑らかに接続する分布を用いた。これにより、コア中心が比較的低角速度で、表面付近でケプラー回転の 85%程度に達するような、降着・連星進化を経た高速自転白色矮星型コアに相当する初期条件を構築した。総質量は 1.43 太陽質量で、自転による遠心力で赤道方向に強くオブレートに変形している（図 1 左)。

磁場についてはパラメトリックに磁場強度を変えた複数モデルを準備した。

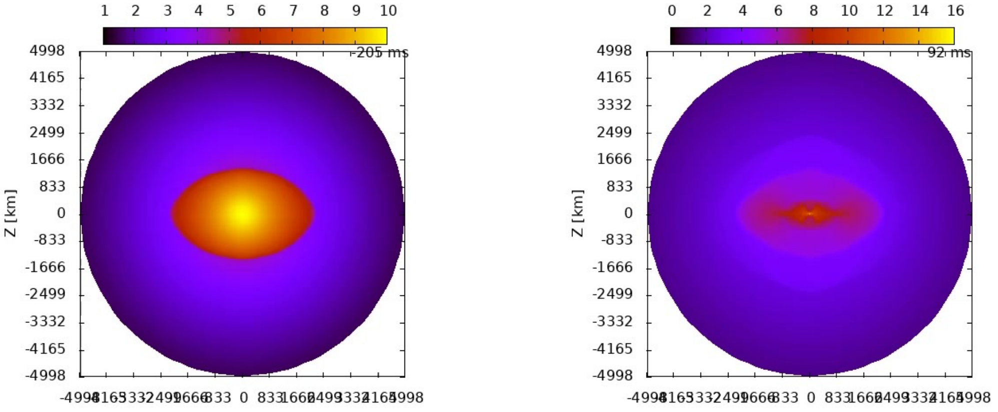

図 1: 質量密度の時間進化（対数表示, $\log_{10}(\rho/[\mathrm{g\ cm^{-3}}])$）。左: バウンス前（t = -205 ms）の高速自転親星。遠心力により赤道方向に強くオブレート。右: バウンス後（t = +92 ms）のコアと衝撃波。範囲 ±5000 km。

(2) 重力崩壊・バウンス・爆発のシミュレーション

上記の初期条件をスタートとして、特殊相対論的近似を含む磁気流体コードでバウンスから爆発開始までの時間進化を追った。図 1 に質量密度の二次元スライスをバウンス前後で示す。バウンス前は遠心力によって明瞭にオブレート化した親星が、コア内部の密度上昇とともに収縮し、バウンス後にはコア中心に高密度の原始中性子星が形成され、その外側に衝撃波と低密度のエンベロープが広がる様子が確認できる。

図 2 に同時刻のエントロピー分布を示す。バウンス前（t = -205 ms）ではコアはまだ低エントロピー（s ≲ 1 k_B/baryon）で、画面はほぼ黒く描画される。一方バウンス後（t = +92 ms）には、自転軸方向に沿って高エントロピー（s ≳ 15 k_B/baryon）の双極的アウトフロー構造が形成され、赤道面側に低エントロピーのトーラスが残る、典型的な磁気回転駆動爆発の構造が現れている。これは自転と磁場が爆発の非対称性を増幅していることを示しており、重力波・ニュートリノ放出にも自転周波数に依存

した時間変動が期待される。

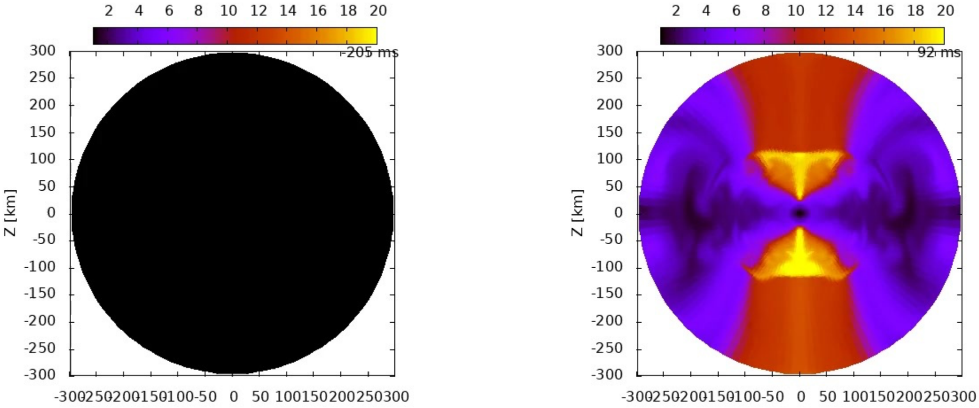

図 2: エントロピーの時間進化（s [k_B/baryon]）。左: バウンス前（t = -205 ms）。右: バウンス後（t = +92 ms）に自転軸方向への双極的高エントロピー流出が形成されている。範囲 ±300 km。

(3) GPU 向けコード開発

また、流体計算の GPU 活用を目指し、以下のコードを開発、公開し、Miyabi-C, G 上でベンチマークをとった。メモリバンド幅から推測される計算時間とおよそコンシステントだった。

https://github.com/cfcanaoj/MHDTurbulence

３．学際共同利用プログラムが果たした役割と意義

本研究で扱う重力崩壊型超新星爆発は、流体力学・磁気流体力学・ニュートリノ輸送・原子核物理・一般相対論など複数の物理分野の知見を統合して初めて記述できる、典型的な学際的計算課題である。今年度の研究を進めるにあたり、本学際共同利用プログラム（MCRP）から配分された Miyabi-C（Xeon CPU Max）の大規模 CPU 計算資源は、自転速度・磁場強度を変えた複数モデルの比較計算を行ううえで決定的な役割を果たした。申請者の主要な計算機環境である国立天文台のシステムだけでは、本研究で要求される三次元の高解像度プロダクトランを必要なモデル数まで展開することは困難であり、MCRP の資源によって初めて系統的なパラメータサーベイが現実的な時間内で可能となった。

また、Miyabi-G の GPU 計算資源を用いて流体コードの GPU 移植・性能評価に着手できたことは、HPC アーキテクチャが GPU 主体へと移行しつつある現状において、超新星シミュレーション分野が将来の本格的な GPU プロダクトラン時代へ橋渡しされていくうえで大きな意義を持つ。これは計算機科学・HPC コミュニティとの接続点でもあり、MCRP が掲げる学際性をまさに体現する成果である。

さらに、本テーマは天文学・天体物理学の側からも、連星相互作用、特異超新星、磁気回転駆動爆発、原始中性子星の磁場起源、超新星残骸の非対称性、重力波・ニュートリノを用いたマルチメッセンジャー天文学など、複数の観測・理論コミュニティが

交差するハブ的な位置を占めている。MCRP のような拠点間連携型の大型計算資源は、こうした分野横断的な研究を継続的に推進していくうえで不可欠な基盤として機能しており、本年度の研究もその恩恵を強く受けている。

４．今後の展望

今後はまず、本年度に構築した自転則と磁場配位の異なる複数の初期親星モデルについて、本格的な三次元 MHD シミュレーションを Miyabi-C 上で完遂する。バウンス前後の力学から、原始中性子星形成、磁気回転駆動による双極的アウトフローの発達、衝撃波の長時間進化までを統一的に追跡し、爆発の非対称性や流体不安定性の発展を定量的に解析することを計画している。各モデルから放出される重力波およびニュートリノ波形を抽出し、自転周波数依存の時間変動など、自転・磁場を伴う爆発に特徴的なシグナルを理論的に予言する。これらの予言は、KAGRA・LIGO・Virgo に代表される重力波観測網、および Super-Kamiokande・IceCube・JUNO などのニュートリノ観測装置による銀河近傍超新星のマルチメッセンジャー観測の解釈に直接資するものとなる。

並行して、コードの GPU 化を引き続き推進する。本年度は単純な流体計算カーネルについて Miyabi-G 上での GPU 化と性能評価を行い、メモリアクセスやスレッド分割に関する知見が得られた。次年度はこの経験を踏まえ、超新星爆発計算で必須となる原子核 EOS テーブル参照と、計算コストの大半を占めるニュートリノ輻射輸送カーネルの GPU 化に着手する。これにより、Miyabi-G を含む将来の GPU 主体スパコンへの本格的な移行を実現し、より長時間・高分解能のプロダクトランを可能にする計算基盤を構築する。

最終的には、得られたシミュレーション結果を、カシオペア A や 1987A 超新星残骸の Chandra・JWST・ALMA 等による最新観測と比較し、爆発初期から残骸期に至る一貫した物理像の構築を目指す。本研究は、軽い高速自転親星という新しい観点から、超新星爆発のマルチメッセンジャー予言に系統的な理論的基盤を与えるものとして、今後さらに発展していくと期待される。

５．成果発表

(1) 学術論文

(2) 学会発表

(3) その他

使用計算機	使用計算機に○	配分リソース※		
		当初配分	移行*	一般利用による追加
Pegasus				

Miyabi-G	〇	567		
Miyabi-C	〇	5760		
	※配分リソースについてはノード時間積をご記入ください。 ＊バジェット移行を行った場合、「+2000」「-1000」のように記入			