

論文内容の要旨

Magnetorotational Collapse of Massive Stars in Full General Relativity: The Growth of Initial Magnetic Field and The Emitted Gravitational Waves

一般相対論下での大質量星の磁気回転型重力崩壊： 初期磁場の成長及び重力波

氏名 黒田 仰生

本論文では、重力崩壊型超新星爆発の爆発機構解明を目的とした独自の3次元磁気流体コードを2つ開発し、それらを使った大質量星の重力崩壊計算、及びそれに伴う重力波の放出について詳細に調べたので報告する。

観測からは多くの重力崩壊型超新星が非球対称性を示し、その非球対称性を作る原因として我々は磁気回転効果が重要だと考えている。その為その効果を探る上で磁気流体計算が不可欠であり、我々が開発したコードで今後多くの事が解明できると期待している。2つのコードのうち1つはニュートニアン近似で記述されており、もう1つは一般相対論を取り入れている。更に重力崩壊型超新星の数値計算を行う上で生じる問題を避ける技術がいくつか含まれている。その一つとして、非常に広範囲を数値計算で取り扱わなければいけないという問題点である。例えば、重力崩壊後に形成された中心天体は約10km程であるのに対して、その源となる鉄核は約5000kmであり、また親星の表面は更に遠い $\sim 10^5\text{--}10^6\text{km}$ にある。なるべく広範囲を数値計算で取り扱う際に、一様な数値メッシュ幅で取り扱う事は限られた計算機資源を鑑みても非現実的である。そこで Adaptive-Mesh-Refinement という手法を用いている点が我々のコードの特徴である。それ以外の点では、一般相対論下でのメトリックの時間発展を追う際、“Baumgarte-Shapiro-Shibata-Nakamura”方式と呼ばれる現在最も安定な手法を用いてある。両方のコードに対して各種のテスト計算を行い信頼性を確認した上で、15太陽質量星の重力崩壊計算を行った。その結果得られた事として以下が挙げられる。(1) 初期に強磁場が存在する場合回転軸方向への高速のアウトフローが形成された。(2) low- $|T/W|$ 不安定性に由来する一本腕のスパイラル構造が確認された。(3) 一般相対論とニュートニアン計算を比較すると、例えば中心密度が約30%上昇する等より強い重力の影響が見られた。これらの結果は先行研究でも報告されている事から、我々のコードの信頼性を示す事となる。

更に我々は重力崩壊に伴い放出される重力波を見積もった。重力崩壊中心部を「直接見る」手段は非常に数限られているが、その中で重力波は非常に有用な観測手段である。また重力波で中心部を「見る」事で、重力崩壊型超新星の物理

をよりよく理解できる。現在次世代の重力波検出器が開発中であり、それらを使う事で今よりも約 100 倍遠くまで見る事が出来ると考えられるので、今後重力波天文学は活発化していくと考えられる。その様な現状の中で理論の側から様々な重力波波形の予測をする事は非常に大切であり、本論文では一般相対論計算により弱/強磁場モデルにおいて放出される重力波の違いを調べた。その結果得られた事として、(1) 今回用いた初期回転に対して、コアバウンス時の重力波は Type I の波形を示した。これは先行研究と矛盾が無い結果である。(2) コアバウンス後 30ms 以内において、ニュートニアン計算では見られたアウトフロー形成が一般相対論計算では見られなかった。この理由として、より強い重力の影響で中心天体がより圧縮され、非軸対称のスパイラル波が出現しやすくなり (Fig.1 参照)、その結果アウトフロー形成が妨げられたと考えている。似たような結果は先行研究で報告されているが、それは一般相対論起源ではなくニュートリノ冷却に由来するものである。強磁場モデルにおいて双極子構造が出現しなかった事で、結果

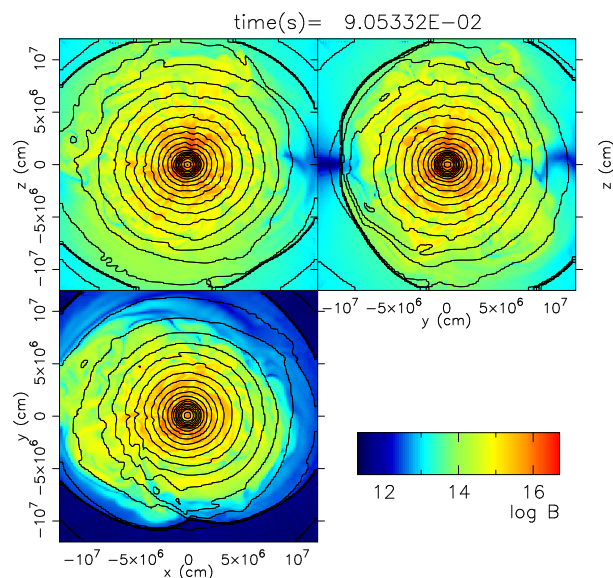


Figure 1: 計算開始から約 90ms 後 (コアバウンスから約 30ms) の中心天体の様子。色は磁場の強さをガウスで表したものであり、黒線は等密度線を表す。 $m = 1$ のスパイラル構造が xy 平面にはっきりと見て取れる。

的に強磁場、弱磁場モデル間での重力波の波形に定性的な相違は見られなかった。(3) また spiral standing accretion shock instability (Spiral SASI) の重力波波形のスペクトルが低振動数帯に出現する事が解った。この Spiral SASI は過去の数値計算から起こる事が示唆されており、中心の中性子星の回転を高速化する事等から爆発力学の過程で大きな役割を果たすと考えられている。我々の計算では中心天体がコアバウンス後約 15ms でこの Spiral SASI へと移行し、ショック面が激しく変化する Spiral SASI に特有な現象が見られた。Spiral SASI へと移行したとほぼ同時に、約 100-300Hz 帯にピークを持つ重力波が放出される結果も得られた (Fig. 2 参照)。この振動数帯 (100-300Hz 帯) に出現する事は Spiral SASI の形態の時間変化と矛盾ない事から、我々はこのエネルギー放出は Spiral SASI に起因する物だと結論づけた。

今回我々が用いた初期の角速度分布の場合、重力崩壊後に形成される原始中性

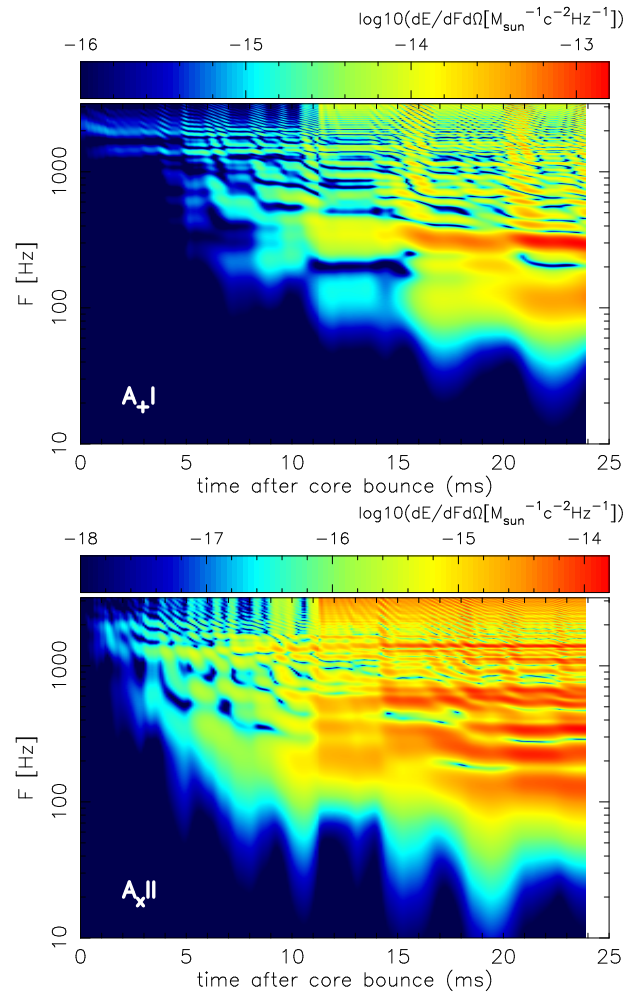


Figure 2: エネルギースペクトルの時間変化。上図では観測者は北極方向にいるとし、下図では赤道面から観測した場合である。また超新星が観測者から 10kpc 離れた所で起きたと仮定する。特に上の図から解るように 300Hz 帯での重力波放出 (Spiral SASI に起因) がコアバウンス後約 15ms で強くなってくる。赤道面から見た場合も 100-300Hz 帯の低振動数領域への重力波放出が見られる。

子星は数ミリ秒で回転する高速の中性子星であり、そこから放出される重力波もその回転に依存する $\sim 1000\text{Hz}$ 帯に強く現れる (Fig. 2 の下図参照)。このような結果は過去の先行研究でもいくつか報告されているが、我々の計算では更に Spiral SASI が成長した事が原因で数百 Hz 帯の低振動数への放出も起こる可能性を示した。この事は今回我々が今回新たに発見した内容である。またこの Spiral SASI により放出される重力波成分は次世代の検出器 (e.g., *LCGT* or *Advanced LIGO*) で十分観測できると考えられ、今後理論と観測の更なる融合が期待できる。