

## 3次元一般相対論輻射磁気流体計算による超新星爆発計算

黒田仰生 (TU Darmstadt)

利用カテゴリ XC-A

本年度は主に (1) 磁気駆動型超新星爆発計算、(2) 外磁場のニュートリノ輸送への影響、の2種類の計算をしたので、それぞれについて報告する。

### 1 ニュートリノ輻射計算による磁気駆動型超新星爆発

超新星の爆発機構における磁場の役割を調べるために世界に先駆けて開発した、数値相対論と一般相対論的ニュートリノ輻射磁気流体を組み合わせた我々独自の数値コード (以下では3DGRMHDコード) を用いた研究を行なった。計算の概要は以下の通りである。親星モデルは広く使われている20太陽質量星 (Woosley & Heger 2007) を用い、そこに回転と磁場を与えたモデル (R1B12)、回転のみを与えたモデル (R1B00)、そして無回転無磁場モデル (R0B00)、の計3モデルを計算した。ニュートリノと物質の相互作用に関しては超新星物理に必要な基本的な相互作用 (Bruenn 1985) に nucleon-nucleon Bremsstrahlung を加えた Opacity を用い、また強重力場における赤方偏移、Doppler 効果も全て取り扱っている。磁場の進化は constrained-transport 法を採用する事で  $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$  を保っている。基本的なコードは Kuroda et al. 2016 と同じだが、今回新たに磁場を取り入れ、それを使った実際の計算が新しい点である。ちなみに数値相対論、multi energy ニュートリノ輻射輸送、そして一般相対論的磁気流体コードを結合させた数値コードは現在世界でも我々だけである。

次に結果の説明に移る。計算開始後親星は重力崩壊を起こし、最大密度が核密度を超えたあたりで強い相互作用のバウンスが起こり原始中性子星が出現する。R1B12モデルはバウンス後双極子型のショック波面が特に停滞する事なく外層へと伝わって行く爆発期への移行が見られた。図1はバウンス後約100msにおけるエントロピー分布 (左パネル) とプラズマベータ ( $\beta \equiv P_{\text{gas}}/P_{\text{mag}}$ ) の逆数の分布を対数で表した図 (右パネル) である。図1の右パネルから、ショックの内側は磁気圧優勢な領域 (黄色い領域,  $\log(\beta^{-1}) \geq 0.5$ ) で構成されており、磁気駆動型爆発と言える。今回の我々の最先端の計算で再確認されたこととしては、以下の爆発の形状、規模に関連することが挙げられる。過去の同規模な回転や磁場を考慮した2次元軸対称超新星爆発計算において、非常にコリメートされた双極子型爆発は多数報告されている。一方、軸対称を仮定しない数少ない3次元計算 (過去2例ほど) によると、爆発の形状がより拡がり、爆発の規模も弱まる可能性が示唆されている。その大きな理由としては kink 不安定性が生じる事でジェット先端の収斂が弱まり、その結果より拡がった弱いショックが形成されるからと考えられている。今回の我々の解析でも kink 不安定が十分成長する環境が整っており、その為ジェット先端が常に回転軸上に存在せず、拡がったショック波面につながっている可能性がある。

一方二つの無磁場モデル (R1B00 と R0B00) はバウンス後500msほどまで計算したが明らかな爆発は見られなかった。しかし、回転がある方がショック波面はより外側に位置し (図2の上パネルにおける青太線と黒太線の比較より)、回転の効果は遠心力でショッ

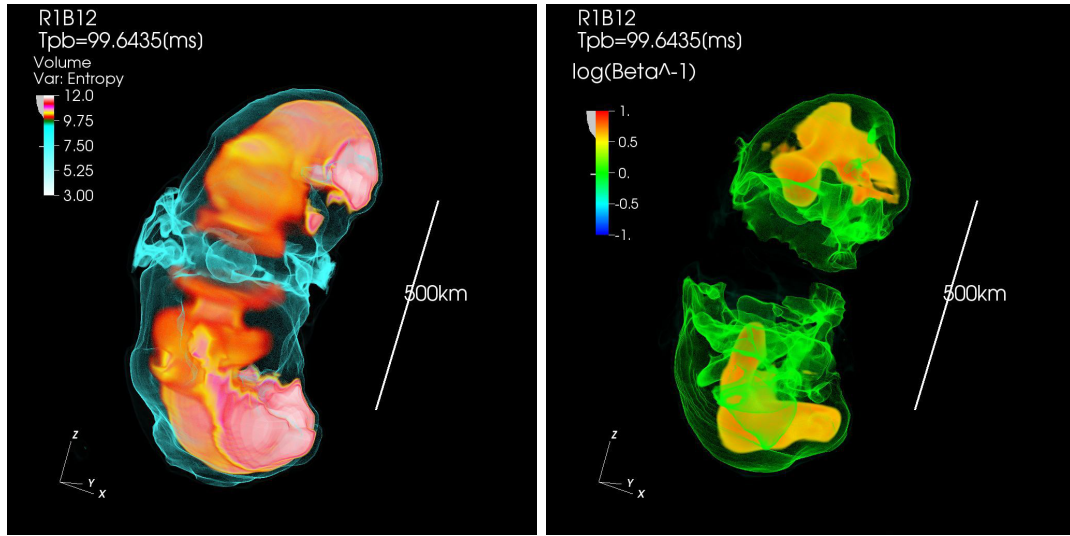


図 1: バウンス後約 100ms におけるモデル R1B12 でのエントロピー分布（左パネル）とプラズマベータの逆数の分布（右パネル）を対数で表した図。プラズマベータはガス圧と磁気圧の比で定義しており、赤い領域は磁気圧がガス圧の 10 倍以上あることを示す。回転軸は  $z$  軸と平行である。

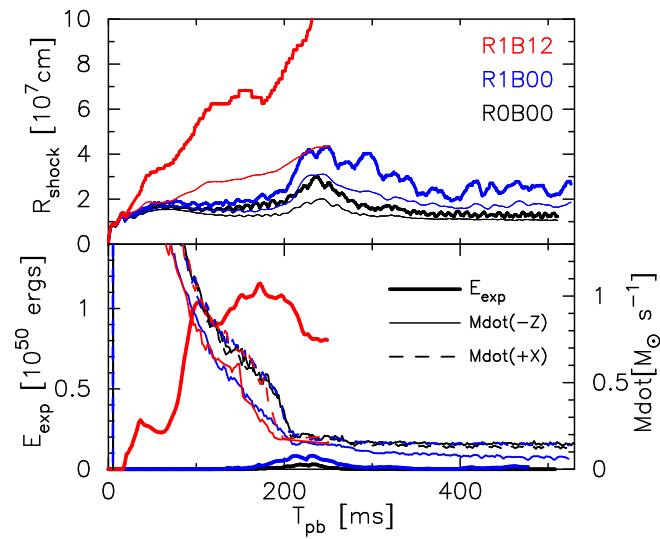


図 2: 上パネル：最大ショック半径（太線）と平均ショック半径（細線）の時間進化を各モデルに対して表示。下パネル：各モデルにおける計算領域中の重力に束縛されていない全エネルギー  $E_{\text{exp}}$ （太線）と極方向（ $-z$  軸：細実線）と赤道面方向（ $+x$  軸：細破線）からの質量降着率の時間進化。

ク波面をより外側に形成する働きがある事が今回の詳細な計算でも確認された。モデル R1B00(青線) と R0B00(黒線) のショック波面の差はニュートリノ加熱の効率にも顕著な差を生じさせる。重力崩壊型超新星爆発は解放された重力エネルギーを爆発エネルギーへと転嫁するので、回転効果で潰れにくく解放される重力エネルギーもより少ない回転している親星が、より爆発しやすいかどうかは自明ではない。しかし、我々の解析からはショックがより外側に形成された R1B00 において、加熱の効率が約 2-5 倍ほど高く、この程度の回転の場合には爆発に有利である事が確認された。これは、ショックがより外側に形成された事でニュートリノ加熱領域が広がり、そこに含まれる質量の増加や滞在時間の延長が効いてくるからである。

我々のニュートリノ輻射計算からは、ニュートリノと流体力学の詳細な関連性を読み解く事ができる。大まかに述べると、バウンス後すぐ爆発を引き起こした R1B12 は一番低いニュートリノ光度を示し、一方常にショックが一番内側に形成されていた R0B00 では一番明るい光度が見られた。これらは原始中性子性への質量降着率の大小を反映しており (図 2 の下パネル参照)、基本的に質量降着率の大きい R0B00 ではその分より高エネルギーのニュートリノが放射される。また我々の 3 次元計算からは、ニュートリノ放射の観測者角度依存も無矛盾に見積もることができる。例えば R1B00 においては、赤道面から見た場合、ニュートリノの光度、平均エネルギーに周期的な振動が見られた。これは回転効果によりニュートリノ球を含む原始中性子性自体が非軸対称の回転不安定 (low- $T/W$  不安定, Watts et al. 2005) にさらされ、 $m = 1$  のモードにニュートリノ球が歪むからである。実際我々の解析でも回転しているニュートリノ球の  $m = 1$  の歪みとニュートリノ信号の振動数スペクトルが一致したことから、このことは正当化される。

爆発を起こした R1B12 モデルに関しては爆発的元素合成に関しての解析も行った。3 次元の磁気駆動型爆発モデルに関しての元素合成計算は過去 1 例しかなく (Mösta et al. 2018)、かつ我々の計算はその先行研究に対してニュートリノ輸送を正確に解いているので、より元素合成の信頼度はある。図 3 は放出されうる重元素の太陽組成比との比較図である。詳細は省くが、今回我々が確認したことは、2nd peak ( $A \sim 130$ ) までは作られるが、それ以降、特に 3rd peak ( $A \sim 195$ ) は生成されなかったこと、また若干のランタノイド属 ( $A \sim 150$ ) は作られたこと、である。過去の一例 (Mösta et al. 2018) で可能性を示唆され

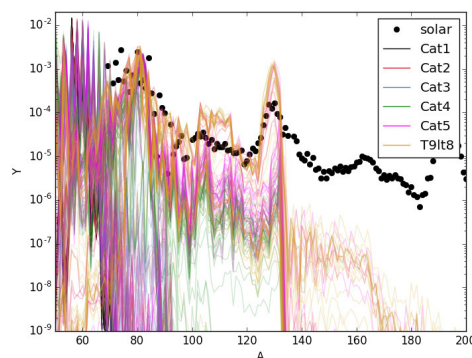


図 3: シミュレーションの最終段階における放出されうる重元素の太陽組成比との比較。

たことではあるが、上述の3次元効果による弱い爆発により、3rd peak までは元素合成が進まず、若干のランタノイドまでに留まる、という結果が我々の無矛盾な計算でも確認されたことは大きなステップと考えている。

以上、世界でもまだ我々しか開発していない、3DGR $\nu$ MHD コードを用いて、より無矛盾な超新星爆発計算、またそこから発せられるニュートリノ信号の見積もりを行なった。その結果磁気駆動型超新星爆発における kink 不安定はニュートリノ輸送を真面目に解いても十分出現する可能性があり、その結果2次元軸対称の計算とは定量的に大いに異なる爆発形状、及び規模に行き着くことが我々の詳細な計算でも初めてわかった。また、ニュートリノ信号は原始中性子性の力学を色濃く反映しており、将来の観測に重要な示唆を示した。上記は現在 ApJ に投稿中である。

## 2 外磁場を考慮したニュートリノと物質の相互作用の超新星爆発計算への適用

上記の計算では強磁場モデル ( $B \sim 10^{15}$  G) ながら、強磁場下におけるニュートリノと物質の相互作用は考慮しなかった。しかしながら本来、外磁場はニュートリノと核子の散乱、また（逆）電子捕獲反応に影響を及ぼす。我々の上記の計算だけでなく、過去の超新星計算では全てこれらの影響は無視されたか、もしくは準定常状態におけるそれらの影響の見積もり程度のみが議論されてきた。そこで今回、私は世界で初めてこれらの影響を考慮した Opacity を作成し、実際の計算を行なう事でそれらの影響がどの程度なのかについて解析を行った。外磁場下におけるニュートリノの核子散乱、および電子捕獲率は Arras & Lai 2009 を参考に M1 moment formalism に適用し、上述のモデルと同様の計算を行なった。その結果、今までは無視されていた、外磁場のニュートリノの核子散乱は原始中性子性中心付近で数%から 10%ほどと、十分考慮するような値であり、また逆電子捕獲率への寄与も数%ほどとこれも無視できない値となっている。現在の超新星爆発計算はより緻密になってきており、爆発の可否を決める一要因としてニュートリノと物質のより詳細な相互作用が大きなカギとなってきている (Kotake et al. 2018 など)。先行研究からは例えば数%の過熱効率の違いなども爆発の成功に繋がってくる可能性があることから、今回私が世界で初めて取り入れた外磁場の影響は今後より詳細に検証されるべき対象であると考えている。この結果は現在投稿に向けて執筆中である。