

# 重力崩壊型超新星爆発における acoustic mechanism の研究

犬塚 慎之介 (早稲田大学大学院 先進理工学研究科)

## Abstract

初期質量が約  $8M_{\odot}$  より大きな星では、進化の最後にはコアで重力崩壊が起こる。中心部の密度が原子核の密度程度になると強い核力の影響によって止められ (バウンスと呼ばれる)、衝撃波が発生する。この衝撃波が外層まで伝わって星全体を吹き飛ばすのが重力崩壊型超新星爆発である。超新星爆発の観測からは外層に  $10^{51}$  erg 程度の運動エネルギーが伝えられていなければならない。しかし多くのシミュレーションでは、衝撃波はコアを伝播する際に熱的なニュートリノの生成や外層原子核の分解のためにエネルギーを消費して減衰してしまい、爆発を再現できない。この停滞した衝撃波にエネルギーを与えて復活させることが理論上の課題である。本研究では音波によりエネルギーを輸送し衝撃波を復活させる機構 (acoustic mechanism) に着目しその有効性を調べるため、コアの内部領域、すなわち原子中性子星表面から衝撃波まで伝播する音波について二つの数値計算を行い、結果を比較して考察する。

## 1 Introduction

### 1.1 本研究の目的

重力崩壊型超新星の爆発機構についてはこれまでに様々な理論的研究がなされ、信頼に足る超新星爆発の進化過程のモデルおよび爆発のシナリオが構築されている。しかしその解明にあたっては未だに多くの困難が残されている。その一つは超新星のコア内部で発生する衝撃波の停滞である。衝撃波を復活させる機構としてニュートリノ加熱メカニズムが現在盛んに研究されているが、今日まで次元の計算では爆発を再現できていない。本研究では重力崩壊型超新星内部において次元球対称な流れを仮定したうえで、音波により爆発を起こす機構 (Acoustic mechanism) に着目し、爆発にどれほど寄与しているのか調べることを目的とする。

### 1.2 研究背景

#### 1.2.1 重力崩壊型超新星

太陽質量の約 10 倍以上の質量をもった大質量星では重力収縮により中心部の圧力が急激に低下し、物質が中心に向かって落下する。Fe コアは収縮を続け中心部の密度は上昇を続ける。やがて中心部の密度が原子核の密度程度になるとバウンスが起こり原始

中性子星 (PNS) が形成され、球状衝撃波が発生し外層に向かって伝播を始める。この衝撃波が十分なエネルギーを輸送できれば外層を吹き飛ばし爆発が起こると考えられている。しかし実際には次元球対称計算では爆発を再現できていない。Fe 分解反応や電子捕獲反応で発生するニュートリノにより衝撃波はエネルギーを失い、伝播の途中で停滞してしまうからである。この停滞した衝撃波にエネルギーを与えて再び外層へ伝播させる機構が研究されてきた。

ニュートリノ加熱メカニズムは、重力崩壊で蓄えられた内部エネルギーの一部を衝撃波下流の物質に吸収させ衝撃波を再び外層へ伝播させる機構である。ただし衝撃波が停滞している領域ではニュートリノの吸収の効率が悪く、その効果は詳細な数値計算で検証しなければならない。また、爆発に影響を与える非球対称な現象 (回転、磁場、流体不安定性) の効果を調べるために多くの次元、次元の数値計算が行われている。

#### 1.2.2 Acoustic mechanism

衝撃波が失速、停滞した後、内部コアで強い音波が発生する。この音波がコア内部を伝播して衝撃波にエネルギーを輸送し、バウンス後遅い段階での爆発を引き起こす可能性がある (図 1)。これが音波による超新星の爆発機構 (Acoustic mechanism) である

(Burrows et al. (2006))。音波が超新星爆発にもたらず寄与について調べることはその爆発メカニズムを解明する一翼を担う可能性がある。

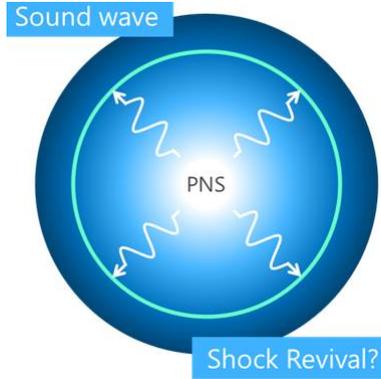


図 1: Acoustic mechanism

## 2 Calculation

本研究では、重力崩壊型超新星のコアの内部において衝撃波が停滞した後に、原子中性子星表面で与えた物理量の揺らぎが外向きの音波の伝播に伴って停滞衝撃波まで伝えられた場合の揺らぎの成長を調べるため、以下の二種類の数値計算を行う。

1. コアの内部領域を伝播する音波の波長が流れのスケール長より十分小さい場合を仮定し、音速に対する流れの速度の揺らぎを近似的に計算する。
2. 1. の仮定が成り立たない長波長の場合に、流れの状態を記述する方程式を線形化し、数値計算を行って衝撃波における速度の揺らぎの時間変化を調べる。

### 2.1 速度揺らぎの進化の数値計算

#### 2.1.1 計算方法

星内部の定常的な流れの中で音波の伝播に伴う流れの揺らぎの成長を評価する。

非一様な媒質流の速度  $u$ 、音速  $c$  のスケール長に比べ十分短い波長をもつ波を仮定すると、断熱不変量の保存を表す以下の式が成り立つ (Bretherton and

Garrett. (1968), Dewar. (1970))。ここで  $E$  は波のエネルギー密度、 $\omega' = \omega - \mathbf{k} \cdot \mathbf{u}$  は波の固有振動数、 $v_g$  は波の群速度である。

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{E}{\omega'} \right) + \nabla \cdot \left( \mathbf{v}_g \frac{E}{\omega'} \right) = 0 \quad (1)$$

球対称な媒質流 ( $\mathbf{u} = v_r$ ) を伝播する波が短波長であると仮定すると、速度の揺らぎは次のように近似的に求められる (Jacques. (1977))。

$$(\delta v_r)^2 \propto \frac{v_r c}{(v_r + c)^2} \quad (2)$$

これより音速に対する流体粒子の速度の揺らぎを計算領域内の各点で評価し、原始中性子星表面から衝撃波までの成長率  $R$  を求める。

$$\left( \frac{\delta v_r}{c} \right)_r = C \left( \frac{v_r}{c} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{1}{v_r + c} \quad (3)$$

$$R = \frac{(\delta v_r/c)_r}{(\delta v_r/c)_{\text{PNS}}} \quad (4)$$

超新星のコア内部の流体粒子の速度  $v_r$ 、音速  $c$  を図 2 に示す。計算を行う衝撃波下流領域では  $c \gg v_r$  となり、短波長の近似が成り立つのは音波の波長  $\ll 10\text{km}$ 、すなわち音波の周期が  $1\text{ms}$  より十分小さい場合である。

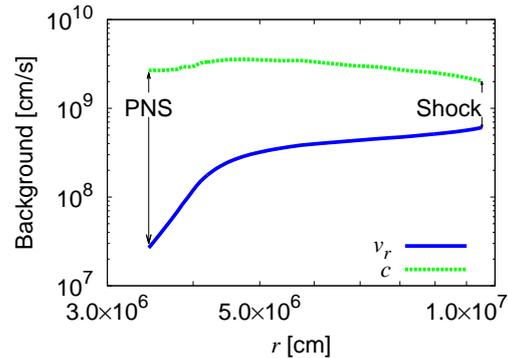


図 2: 星のコア内部の定常流

#### 2.1.2 結果

音波とともに伝播する揺らぎの成長を定常的に求めた結果を図 3 に示す。音速に対する流体粒子の速

度の揺らぎは原始中性子星表面から衝撃波までで約 10 倍に成長している。

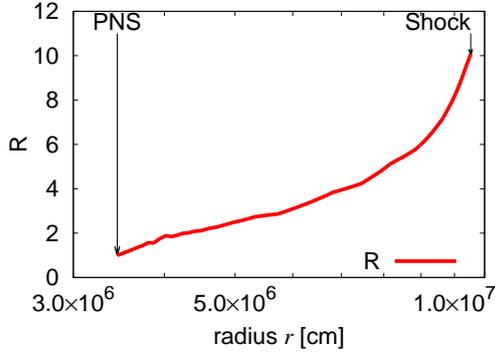


図 3: 音速に対する速度揺らぎの進化

## 2.2 揺らぎの時間発展の数値計算

### 2.2.1 計算方法

原始中性子星表面で与えた流れの揺らぎが音波の伝播に伴って停滞衝撃波まで伝わる場合の、コア内部の流体の方程式を数値的に解き、衝撃波における流れの揺らぎの時間変化を調べる。

流れの物理量の揺らぎ  $\delta\rho$ ,  $\delta v_r$ ,  $\delta p$  について以下の式が成り立つ。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla_j(\rho v_j) = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho v_i) + \nabla_j(\rho v_i v_j + p \delta_{ij}) = -\rho g_i \quad (6)$$

$$p = K \rho^\gamma \quad (7)$$

ここで  $\rho$  は密度、 $v_r$  は動径方向の速度成分、 $p$  は圧力である。線形化されたこれらの方程式を計算する際には Laplace 変換を利用した数値計算コードを使用した。

速度・密度揺らぎの境界条件として次のような正弦波を与える。

$$\frac{\delta v_r}{v_r} \propto \sin \frac{2\pi}{T} t \quad (8)$$

$$\frac{\delta v_r}{v_r} = \frac{c_s}{v_r} \frac{\delta \rho}{\rho} \quad (9)$$

本計算では波の周期  $T$  を 1ms とする。これは図 2 に示す定常流のスケール長と同程度の波長に対応するため、前節と異なり長波長で計算を行う。

線形解析で音速に対する流体粒子の速度の揺らぎを評価し、原始中性子星から衝撃波までの成長率  $R$  の時間変化を求める。

$$R = \frac{(\delta v_{\text{Shock}}/c)_r}{(\delta v_r/c)_{\text{PNS}}} \quad (10)$$

### 2.2.2 結果

原始中性子星表面で与えた正弦波形をもつ揺らぎの衝撃波における時間変化の計算結果を図 4 に示す。揺らぎは音速で伝播し、衝撃波に到達する時刻には音速に対する流体粒子の速度の揺らぎの振幅は約 40 倍に成長している。

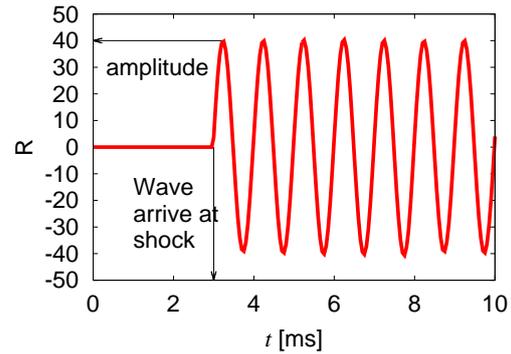


図 4: 速度揺らぎの時間変化

## 2.3 Discussion

原始中性子星表面で与えた音速に対する流体粒子の速度揺らぎ  $\delta v_r/c$  は音波の伝播に伴い、衝撃波半径において Calculation 1 では 10 倍、Calculation 2 では 40 倍に成長した (図 5)。衝撃波半径における  $\delta v_r/c$  が定常流に対し 100%程度に成長していれば、衝撃波の dynamics に影響を与える可能性がある。そのためには原始中性子星表面において短波長の場合...10%、長波長の場合...2.5%の揺らぎが発生している必要がある。

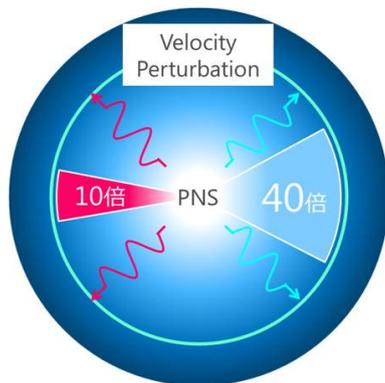


図 5: 速度揺らぎの成長率の比較

### 3 Conclusion

本研究では超新星内部の停滞衝撃波に音波が与える影響を調べるため、音波の伝播に伴う速度揺らぎの成長を二つの方法で数値計算し解析した。結果として、原始中性子星表面での揺らぎがどの程度あれば衝撃波に影響を与えるか見積もることができた。

今後の課題として、原始中性子星の振動や内部の構造を調べて実際に生成される揺らぎを計算することや、衝撃波上流で自由落下を続ける物質の流れの影響と合わせて解析を行い、衝撃波の dynamics に与える影響をより詳細に検討することが考えられる。

### Reference

- A. Burrows et al. 2006. ApJ, 640, 878.
- F. P. Bretherton and C. J. P. Garrett. 1968. Proc. Roy. Soc (London) A302, 529.
- R. L. Dewar. 1970. Phys. Fluids, 13, 2710.
- S. A. Jacques. 1977. ApJ, 215, 402.
- D. Lai and P. Goldreich. 2000. ApJ, 535, 402.
- T. K. Suzuki, K. Sumiyoshi and S. Yamada. 2008. ApJ, 678, 1200.
- Ya. B. Zel'dovich and Yu. P. Raiser. 2002. Dover.