

## 重力崩壊型超新星内部の流体力学的不安定性と重力波の解析

犬塚 慎之介 (早稲田大学大学院 先進理工学研究科)

### Abstract

本研究では、重力崩壊型超新星の爆発過程において生じる流体力学的不安定性を三次元の流体シミュレーションを用いて詳細に計算し、原始中性子星付近で発せられる重力波を解析する。重力波の大半が放出されると考えられる原始中性子星近傍の高密度領域を計算領域に含め、この領域におけるニュートリノ加熱・冷却の効果を考慮している点が本研究の特色である。原始中性子星より外側の領域については既に三次元非軸対称で計算が行われていたが、内側の高密度領域はこれまで計算領域から除外されていた。今回は高密度領域において計算される物理量に optical depth に依存する補正を行うことでより現実的な計算を行う。まず、高密度領域を含めた計算において、定常解を数値的に求めた。その定常解を初期条件として、重力崩壊型超新星内部の衝撃波上流で擾乱を与え、対流不安定性や定在降着衝撃波不安定性 (SASI) などの流体力学的不安定性を三次元で計算した。これらの不安定性は衝撃波やその内部の流体の非球対称な運動をもたらす。時間発展に伴う質量降着率とニュートリノ光度の変化に対応させるため、様々な質量降着率とニュートリノ光度の組み合わせでモデルを多数作成した。コアバウンス後の流体力学的不安定性の変化を観察し、不安定性の発現パターンをモード解析により特定した。さらに各モデルについて重力波の計算を行い、超新星内部の流体の不安定性の発現パターンとコア付近で発生する重力波の関係を検討した。

### 1 Introduction

重力崩壊型超新星がどのようにして爆発を起こすのかについてこれまでに様々な理論的研究がなされており、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提案されている。しかし、超新星の爆発機構を解明するにあたり、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。重力崩壊後に発生する衝撃波が星内部を伝播して外層を吹き飛ばすことができれば、爆発が成功したと見なすことができる。しかし、これまでの研究から、鉄の光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のエネルギーは失われてしまい、衝撃波が停滞するという結果が得られている。この衝撃波を復活させることが爆発を引き起こすための重要なポイントである。

現在、重力崩壊型超新星が爆発を起こす機構として最も盛んに研究が行われているものは、ニュートリノ加熱メカニズムである。重力崩壊によって中性子星に蓄えられた内部エネルギーはニュートリノによって持ち出されるが、このニュートリノのエネルギーの一部を衝撃波下流の物質に吸収させることに

より衝撃波を再び伝播させようという機構である。ただし、衝撃波が停滞している領域は、ニュートリノ球の外側なので、ニュートリノの吸収に対し光学的に厚い領域と薄い領域の中間の領域となる。したがってその可否はニュートリノ輻射輸送を厳密に解くことができる詳細な数値計算により検証する必要があるが、比較的小さな質量の星を除いて、ニュートリノ加熱メカニズムは今日まで次元の計算で爆発を再現できていない。それ故に、爆発には非球対称な現象が強く関わっていると考えられている。爆発に影響を与えることが期待される非球対称な効果には流体力学的不安定性、回転、磁場などが挙げられる。現在、多くのグループでそれぞれの効果がどのように爆発に影響するのか詳細な研究が行われているが、未だに超新星爆発の全貌を解明するには至っていない。

また、超新星の爆発過程においてはニュートリノとともに重力波も放出されると考えられている。重力波は一般相対論により存在が予言された時空の歪みの波動であり、天体・天体物理学においては既に欠かせないものとなっている。現在、アメリカの LIGO

を始めとしたいいくつかの観測実験がなされているが、重力波の直接観測は未だ成し遂げられていない。重力波を理論的に予測することは、一般相対論を含む重力理論の検証の進展、および宇宙を見る手段として新たに重力波を用いる「重力波天文学」の誕生に大きく貢献することが期待される。

このような状況において本研究では、重力崩壊型超新星の爆発過程において生じる流体力学的不安定性和原始中性子星付近から発せられる重力波を、三次元の流体シミュレーションを用いて定量的に解析することを目的とする。これまで除外されていた原始中性子星内部の領域を含めたより現実的な計算を行い、異なる初期条件に対応するモデルの重力波形を比較することで、流体の不安定性のダイナミクスと重力波との関係を明らかにする。

## 2 Methods

星内部の流体の基礎方程式は三次元圧縮性オイラー方程式で、自己重力を無視できるとし、ニュートンの万有引力の法則から重力を求める。また、エネルギー方程式のソース項にニュートリノ加熱・冷却項を与える。ニュートリノ加熱・冷却項の計算方法は以下のとおりである。まず、原始中性子星表面から時間に対し一定のフラックスでニュートリノが放出されているとする。この原始中性子星の外側の領域は光学的に薄いと仮定し、輸送方程式を解かず、ニュートリノの分布関数をフェルミ・ディラック関数で近似し、ニュートリノ加熱・冷却量を計算する。さらに今回は原子中性子星内部の高密度領域まで計算を行いその効果を調べたいので、光学的に厚い原子中性子星内部 ( $\rho \gtrsim 10^{11} \text{g/cm}^3$ ) には optical depth に依存する補正 (Murphy 2009) を行い、上記の単純化をこの領域にも適用する。計算領域は原始中性子星の内部、 $\rho \sim 10^{14} \text{g/cm}^3$  となる位置を内部境界とし、中心から半径約 2000km の位置を外部境界とする鉄のコア内部の領域とする。基礎方程式を解く計算コードは、ZEUS-MP/2 コード (Hayes 2006) をもとに作成したものである。離散化方法は有限差分法、計算格子は球座標系のスタガード格子、衝撃波を捕えるために人工粘性を使用する。

### 2.1 衝撃波の不安定性の解析

原始中性子星より外側の領域については既に三次元非軸対称で計算が可能となっているものの、重力波の放出に重要な影響を与えることが予想される原子中性子星近傍の高密度領域はこれまで計算領域から除外されていた。今回は高密度領域におけるニュートリノ加熱・冷却の効果を考慮したより現実的な計算を行う (Iwakami 2014a,b)。まず高密度領域を含めた 1 次元計算によって、定常解を数値的に求める (Yamasaki 2006)。その定常解を初期条件として、重力崩壊型超新星内部の衝撃波上流で擾乱を与え、対流不安定性や定在降着衝撃波不安定性 (SASI) などの流体力学的不安定性を三次元で計算する。これらの不安定性は衝撃波やその内部の流体の非球対称な運動をもたらす。時間発展に伴う質量降着率とニュートリノ光度の変化に対応させるため、様々な質量降着率とニュートリノ光度の組み合わせでモデルを多数作成し、不安定性の発現パターンの違いを調べる。

### 2.2 超新星内部で放射される重力波の評価

超新星のコア付近では重力波が発生すると考えられており、星内部の流体の不安定性が重力波の放射に影響を与える (Kotake 2007)。様々な初期条件のモデルについて超新星内部における物質起源の重力波の計算を行い、地上で観測される重力波形を求める。得られた重力波形の偏光状態から、流体の不安定性の発現パターンと重力波の波形との関係を調べる。

## 3 Results

シミュレーションを行ったモデルの初期条件を表 1 に示す。 $\dot{M}$  は質量降着率 ( $M_{\odot}$ )、 $L_{\nu}$  はニュートリノ光度 ( $10^{52} \text{erg}$ ) を表す。各モデルに対して衝撃波面の運動の球面調和関数展開によるモード解析を行い、対流不安定性 (Convection) と定在降着衝撃波不安定性 (Standing Accretion Shock Instability: SASI) という二つの不安定性が現れていることを確認した。図 1、図 2 は星内部の流体のエントロピー分布の断面図である。図 1 は高エントロピー領域が出現と消失を繰り返す、対流不安定性を示した例である。図 2 は衝

撃波内部の流体がある回転軸のまわりに回転する定在降着衝撃波不安定性のスパイラルモードが現れた例である。このようにして衝撃波内部の流体の運動にみられる不安定性を各モデルに対して調べた結果を表 1 に示す。高密度領域を含めた計算でも二種類の不安定性が現れることを確認できた。このシミュレーション結果を用いて物質起源の重力波の波形 (+モード、×モード) を計算した。

表 1: 計算モデル及び不安定性の発現パターン

$\dot{M}$	$L_\nu$	不安定性
0.3	2.95	SASI
0.3	3.0	SASI
0.3	3.5	Convection
0.4	3.0	SASI
0.4	3.5	SASI
0.4	4.0	Convection
0.6	4.0	SASI
0.6	4.5	SASI
0.6	5.0	Convection
0.8	4.0	SASI
0.8	4.5	SASI
0.8	5.0	SASI
0.8	5.5	Convection

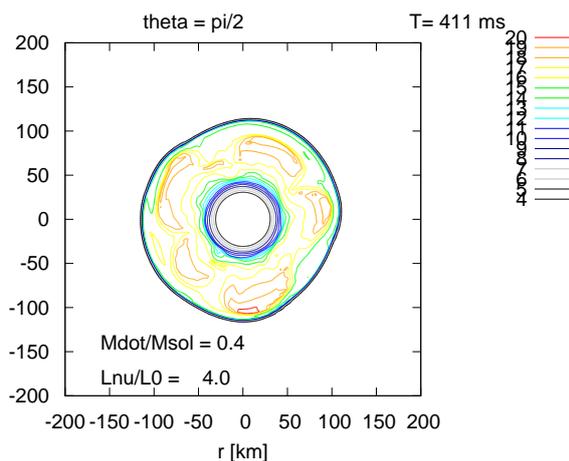


図 1: 対流不安定性

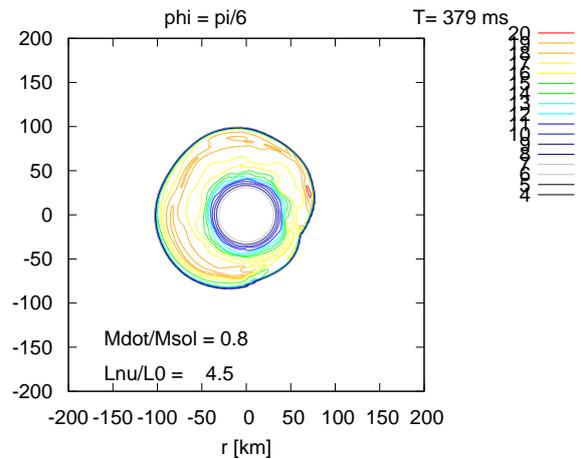


図 2: 定在降着衝撃波不安定性

## 4 Discussion

星内部で発生する不安定性と重力波の関係を調べるため、定在降着衝撃波不安定性 (SASI) のスパイラルモードが確認できたモデルについて、得られた衝撃波面のモード振幅の波形及び物質起源の重力波形 (201ms-456ms) をフーリエ変換し、それぞれの周波数スペクトルを得た。モード振幅の周波数スペクトル (図 3) において、 $l = 1, 2$  モードの周波数 160, 191Hz 成分が卓越しており、衝撃波内部の流体の回転運動に対応していると考えられる。一方、重力波形のフーリエ変換による振幅の周波数スペクトル (図 4) において、160Hz および 191Hz において特徴的なピークが存在し、回転運動の周期が重力波にも対応していることを示唆している。また、重力波の+モードと×モードの位相差の周波数スペクトル (図 5) において 191Hz 成分は  $0.496\pi$  となり、円偏光状態 ( $\pi/2$ ) にあることを示す。以上のことから、SASI のスパイラルモードと重力波の円偏光に対応関係があることがわかる。

## 5 Conclusion

本研究では重力崩壊型超新星内部における衝撃波停滞後の不安定性 (対流・SASI) の成長を調べるため、三次元シミュレーションを行い、不安定性のパターンを確認した上で重力波形の計算を行った。計算領域にはこれまで除外されていた高密度領域を加えた

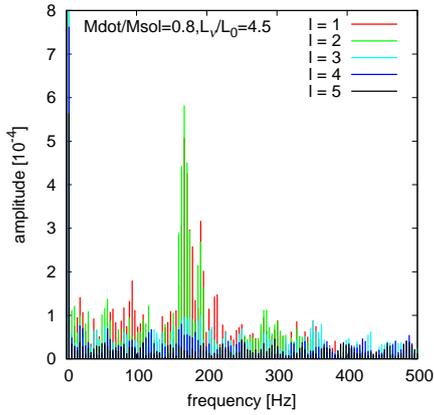


図 3: モード振幅の周波数スペクトル

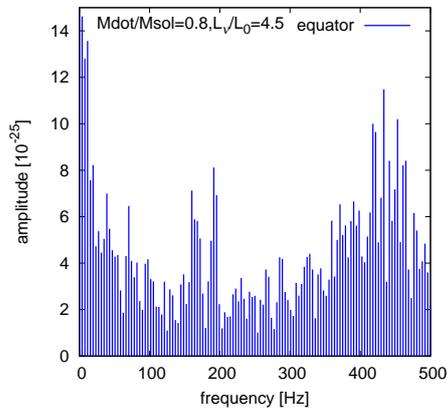


図 4: 重力波の振幅の周波数スペクトル

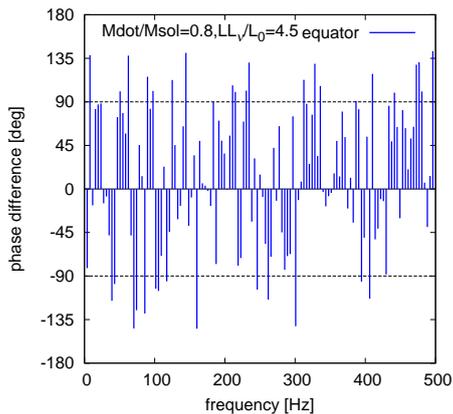


図 5: 重力波の位相差の周波数スペクトル

ことが本研究の特色である。さらに得られた重力波形を解析し、回転運動と重力波の円偏光の関係を調

べた。

今後の課題として、対流不安定が現れたモデルを含む多数のモデルの重力波の偏光状態について、ストークスパラメータを用いてより系統的に調べあげること、超新星の回転の効果の寄与を加えること、次世代検出器による超新星重力波の検出可能性の推定に向けたスペクトル解析などが挙げられる。

## Acknowledgement

基礎物理学研究所 (研究会番号: YITP-W-15-04) 及び国立天文台からのご支援に感謝いたします。

## Reference

- Iwakami, W. et al. 2014a, ApJ, 786, 118
- Iwakami, W. et al. 2014b, ApJ, 793, 5
- Hayes, F. et al. 2006, ApJS, 165, 188
- Kotake, K. et al. 2007, ApJ, 655, 406
- Murphy, J. W. et al. 2009, ApJ, 707, 1173
- Yamasaki, T. et al. 2006, ApJ, 650, 291