

研究課題名

SN1987A親星モデルを用いた重力崩壊シミュレーションの角度依存性

利用者氏名(所属機関) 中村 拓未 (福岡大学)

利用カテゴリ XC-MD

以下に成果の概要を記入してください。ページ数に上限はありませんが、最終的に提出されるPDF のファイルサイズの上限は 2 MB です。

Summarize your achievement in this document. Though there is no page limitation, eventual size of the file must not exceed 2 MB in the PDF format.

昨年度から現在まで合計32のモデルで計算を行ったのでその内訳を記述していく。重力崩壊型超新星爆発をシミュレーションするにあたり、滝脇知也氏(国立天文台)、指導教官の固武慶氏、中村航氏(福岡大学)らが開発してきた3DnSNeコードを利用した。

二次元無回転のモデルでのシミュレーションを行い、得られた結果と指導教官の中村航氏から頂いた三次元無回転のモデルのシミュレーション結果との比較を行った。その結果をまとめ2020年日本天文学会春季年会でポスター発表したのでその内容を簡潔に示す。

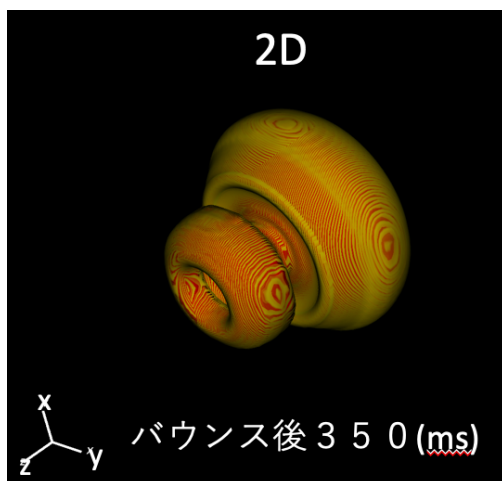


図1 二次元シミュレーション

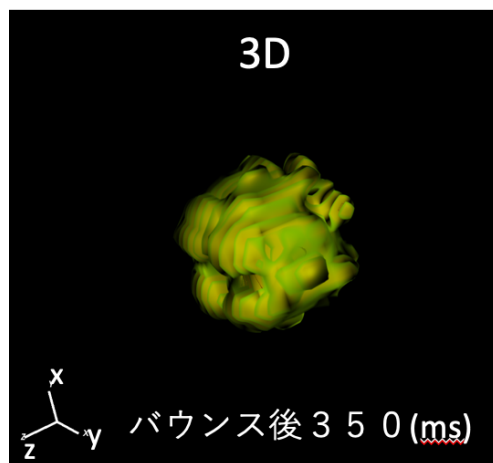


図2 三次元シミュレーション

まず、得られたシミュレーション結果を可視化し、その爆発の様子が二次元シミュレーションの方が三次元シミュレーションに比べて非球対称の度合いが大きいことを確認した。二次元軸対称を仮定すると図のように極軸(z軸)方向に爆発が起こりやすくなってしまったためである。さらに、この非球対称性がニュートリノ起源の重力波に影響を及ぼすことを示した。

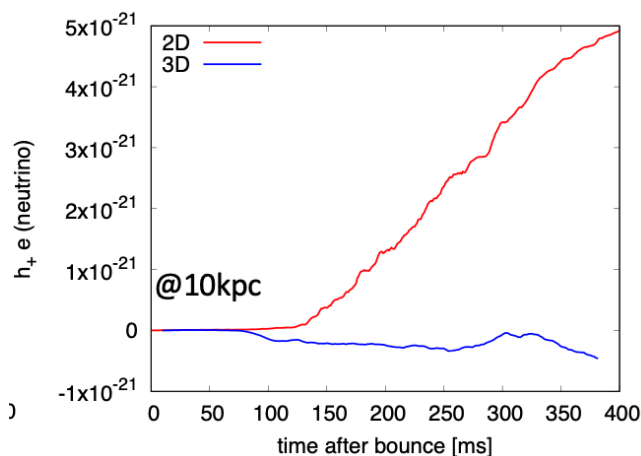


図3 ニュートリノ起源の重力波

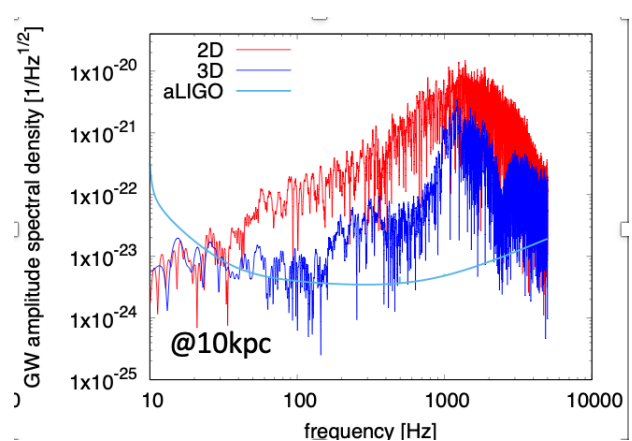


図4 2D,3Dの重力波とa-LIGO
の感度曲線との比較

図3で示すように二次元計算ではニュートリノ起源の重力波をかなり大きく見積もっていることがわかる。また、Advanced LIGOの感度曲線と比較すると、どちらの計算結果も銀河系内で起きた超新星爆発であれば観測のターゲットとなり得ることがわかる(図4)。

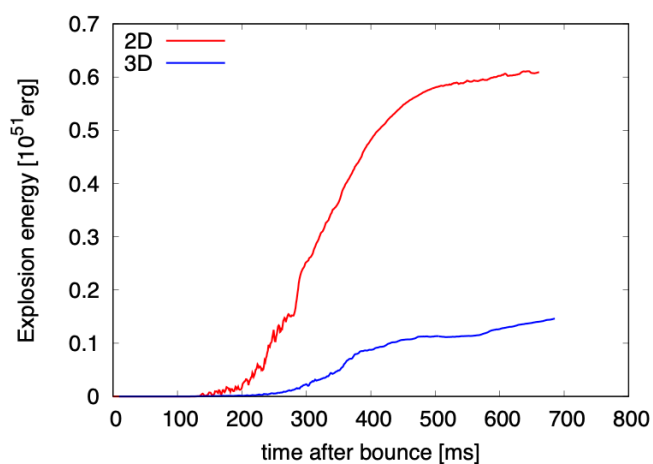


図5 爆発エネルギー

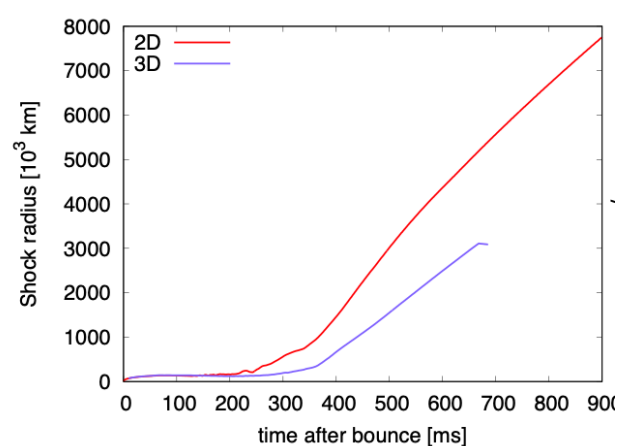


図6 衝撃波半径

次にシミュレーションで得られた爆発エネルギーと衝撃波半径の時間発展の比較を行った。三次元計算の方が自由度が高いため爆発のエネルギーが低くなっており、その影響で衝撃波半径の広がりも小さくなっていることが読み取れる。三次元シミュレーションでは超新星の典型的な爆発エネルギーである 10^{51} エルグの15%ほどまでしか到達していないことがわかる。

最後に重力波のスペクトログラムの比較を行った。

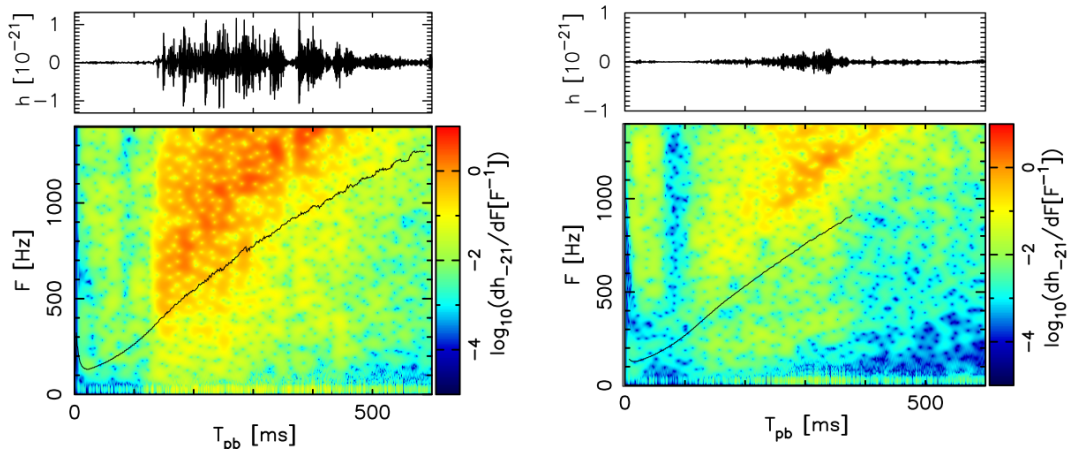


図7 二次元(左) と 三次元(右)モデルのスペクトログラム

図7中の黒線は、得られたスペクトログラム中のピーク周波数の時間発展を、浮力周波数を用いてフィッティングしたものである。

$$f_p = \frac{N}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \frac{GM}{R^2} \sqrt{\frac{(\Gamma-1)m_n}{\Gamma k_b T}} \left(1 - \frac{GM}{Rc^2}\right)^{3/2}$$

式1 浮力周波数

式1のように浮力周波数は原始中性子星質量(M)が増えると増大し、半径(R)が増大すると下がる。今回のシミュレーションでは三次元シミュレーションの方が爆発エネルギーが小さく衝撃波の復活も遅いため、中心に物質がより降着し原始中性子星半径、質量共に大きくなっていた。この二つの浮力周波数を上げる作用と下げる作用が競合し合い、浮力周波数は二次元三次元の両モデルともに同じような値になっていた。以上が学会発表の概要である。

次に、同様の二次元計算モデルに自転の効果を加えて計算を始めたが(5モデル)、得られた結果を確認すると高速回転モデル(角速度 $\Omega=0.5, 1.0, 1.5$)において、コアバウンス後500msあたりから、コアの中心密度が下がる傾向が得られた。この問題を解消すべく、計算で使用していた重力ポテンシャルを最新のものに変更し、改めて計算を行ったところ(7モデル)、爆発後半で起こっていた平均ニュートリノエネルギーなどにみられた不自然な跳ね上がりは解消されたものの、中心密度はやはり下がるという結果となった。中心密度の減少の原因を探るべく、素粒子効果などを一旦外したり(5モデル)、親星を変更して計算(4モデル)してみたが、これらは問題の原因ではないという結果になった。

最後に、音速の見積りにニュートリノの効果を加えて実効的に時間ステップを短くし、同様のセットアップで計算してみたところ(10モデル)現在角速度 $\Omega=0.5$ のモデルまで中心密度が下がらないモデルを作成することに成功した。これらの結果をまとめ次の学会で発表する予定である。