

XC30 システム利用申請書

1 研究の意義・目的

過去40年以上にわたり詳細な数値シミュレーションが行われてきたが、重力崩壊型超新星の爆発メカニズムは完全には明らかにされていない。我々の近傍で起こったため、最も良く観測が行われた超新星 1987A から我々が得た爆発メカニズムに関するヒント、それは爆発が明らかに非対称に起こっていることである。一方、超新星の爆発メカニズムとして最も有力視されているのは、ニュートリノ加熱メカニズムである。星の重力崩壊の際、その開放される重力エネルギーの99%は原始中性子星から放射されるニュートリノが星から持ち去ってしまう。その内のたった1%だけ原始中性子星の外に与え、つまり温め、爆発させるというのが上記のメカニズムである。ただニュートリノ輻射輸送を多次元で解くのは困難を極める。したがって、この分野の研究者は、(多次元シミュレーションの重要性を心に留めつつも) それには目をつむって、球対称を仮定しつつ研究を行ってきた。2003年に日、独、米のグループで独立の計算で、良く一致して球対称では爆発しないことが分かった。これを契機に、多次元計算に火が点いて、近年では(観測される超新星の爆発エネルギーよりずっと弱い)爆発を起こすモデルも報告され、多次元性がニュートリノ加熱メカニズムを助け、爆発によりセンスに働くことがほぼ定説となっている [4]。

ただここで注意しなくてはならないのは、これらは星の軸対称を仮定したシミュレーション(二次元)で得られた結果であることである。三次元方向を加えれば、当然、星の対流のスケールも影響を受けるはずで、これはニュートリノの加熱率にも影響を与える。ある種の流体不安定性が衝撃波の背後で発達し(SASIと呼ばれる)爆発を助けるという指摘がある [5]。これも二次元では、対称軸付近にその運動が支配されていた(課題1)。大質量星は一般に高速自転している。自転を軸対称で扱おうと、当然リング状の回転を仮定していることになり、自転の効果を過大評価していることにならないか? 磁場の超新星のダイナミクスに及ぼす効果も、マグネター(強磁場中性子星)の生成メカニズムと関連して、大変に興味のあるテーマである。二次元計算では、磁気回転不安定性(MRI)のモードを見落としている。3次元シミュレーションを行うことで初めて、マグネターと普通の中性子星のブランチを作っている親星の段階での臨界磁場に制限を付けられるかもしれない(課題2)。軸対称を仮定した計算では、重力波はプラスモードの偏光成分しか持たなかった(e.g., [7])。3次元では両モードが放出される上、超新星を観測する方向も重要になってくるに違いない(課題3)。超新星におけるニュートリノ振動は、球対称で爆発した1980年初頭の今となっては間違っていることが明白になっているモデルをバックグラウンドにして計算を行っている(それしか爆発するモデルがなかったからである)。3次元で爆発するモデルでは、ニュートリノ振動の方向依存性が重要になると予想される(e.g., [8])。turbulentな運動をしている星の外層部分を通ってきたニュートリノ振動から、はたしてニュートリノパラメータに制限を付けられるであろうか? おそらく重力波の観測、元素合成の観測などと相関をとることで初めて可能になるであろう。これら大変面白く、そして沢山のテーマの礎、バックグラウンドモデルとなる3次元の超新星の爆発ダイナミクスを数値シミュレーションで明らかにすること、これが本申請課題のハイライトである。

(記載はこのページの範囲を超えないようにしてください)

2 研究計画・方法

2.1 計画

今期は、上で述べた研究内容の課題 1、2、3 を行う計画である。

(1) 衝撃波の停滞不安定 (SASI) が 3 次元で如何に成長するか、これまでよりも高い解像度で長時間衝撃波の時間発展を追いたいと考えている。流体ソルバーとしてはこれまで開発してきたコードを継続して使うことにし、ニュートリノ輸送はいわゆる light-bulb 近似でニュートリノ加熱、冷却を扱うことにする [5]。この近似は本計算で興味のある原始中性子星のずっと外では正当化される。

(2) 重力崩壊 自転、磁場の重力崩壊の数値計算を行い、軸対称計算とのダイナミクスとの違いを明らかにする。その際、ニュートリノ輸送は、スペクトル依存性を持った IDSA 法 [6] で行う。

(3) 課題 1、2 に基づいて重力波、ニュートリノ放射の定量的予測を行う。特に、最近、long characteristics 法を用いたニュートリノ輻射計算法を開発した [2]。まずは、hydro 計算のポストプロセスでニュートリノ輸送を計算し、ニュートリノ放射の非対称度を正確に評価する。これまでのこの分野で主に行われた ray-by-ray ニュートリノ輸送計算との比較を行い、これまでに比べ重力波、ニュートリノ放射がどの程度変わってくるのかを明らかにする。

2.2 期待される成果

輻射輸送を含む三次元シミュレーションで超新星の爆発メカニズムに迫る。さらに爆発時に放射される重力波形の計算、ニュートリノ光度曲線、スペクトルなどの定量的予測を行い、物質に対して透過性の高いニュートリノや重力波の特徴を用いた近次世代の観測から、如何に爆発メカニズムに迫れるかを明らかにする。

(記載はこのページの範囲を超えないようにしてください)

3 計算コードの開発・最適化・準備状況

(§ 3.1、3.2 合わせて1ページ以内)

3.1 計算コードの開発・最適化状況 (XC-T に申請する場合は不要)

テスト計算の際、一モデルの計算時間は、球座標 $300(r) \times 30(\mu) \times 30(A) \times 12(2: \text{エネルギー位相空間})$ の格子点数でバウンス後から典型的な爆発時間である 400ms まで計算する場合、256 並列で 8 日、512 並列でおよそ 4 日強で、512 コアまではおよそスケールしている。これは (爆発メカニズムにもっとも効く) charged-current 反応のみを取り込んだ本計算では、輻射輸送の際のエネルギー位相空間方向に関して、フルに scalable であることに起因している。また、本計算で必要になる $300 \times 60 \times 120 \times 12$ の格子点数の場合、連続的にジョブを投入できた場合で、512 並列でおよそ一ヶ月弱の計算時間を必要とする。

3.2 必要な計算資源の見込み

上述のように本計算で 1 モデルに要する計算時間 (1 month@512 並列) を勘案すると、年内に計算を終え解析を済ませ、年度内にはこれらの成果を論文にまとめ投稿するためには、およそ 8 モデルほどジョブを投入することが妥当である。現実的な星の進化モデルに従って、親星の自転、磁場のプロファイルをそれぞれ 2 通り、質量を 2 通りまで変化させ、系統的に、自転・磁場のダイナミクスへ及ぼす効果を調べ上げたい。

(記載はこのページの範囲を超えないようにしてください)

4 関連する過去の研究課題の成果

以下の大部分は、国立天文台 Cray -XT4 を使って得られた成果である。

参考文献

- [1] Iwakami, W., Takeko, K., Ohnishi, N., Yamada, S., & Sawada, K. 2008, ApJ, 678, 1207 (以下、すべて査読論文) 使用したシステム : Cray XT4(国立天文台), SGI Altix (東北大流体研)
- [2] Takeko, K., Iwakami, W., Ohnishi, N., & Yamada, S. 2009, ApJ, 704, 951 使用したシステム : Cray XT4(国立天文台)
- [3] Takeko, K., Iwakami, W., Ohnishi, N., & Yamada, S. 2009, ApJ, 697, L133 使用したシステム : Cray XT4(国立天文台)
- [4] Takeko, K., Sato, K., & Takahashi, K. 2006, Reports on Progress in Physics, 69, 971
- [5] Ohnishi, N., Takeko, K., & Yamada, S. 2006, ApJ, 641, 1018
- [6] Suwa, Y., Takeko, K., Takiwaki, T., Whitehouse, S. C., LiebendAorfer, M., & Sato, K. 2010, PASJ, 62, L49 使用したシステム : Cray XT4(国立天文台)
- [7] Takiwaki, T., & Takeko, K. 2010, arXiv:1004.2896 使用したシステム : Cray XT4(国立天文台)
- [8] Kawagoe, S., Takiwaki, T., & Takeko, K. 2009, JCAP, 9, 33 使用したシステム : 国立天文台汎用 PC

(記載はこのページの範囲を超えないようにしてください)