

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 15 日現在

機関番号：32689

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26800149

研究課題名(和文)重力崩壊型超新星における磁場のふるまいと役割

研究課題名(英文)Evolution and roles of the magnetic fields in core-collapse supernovae

研究代表者

澤井 秀朋 (Sawai, Hidetomo)

早稲田大学・理工学術院・その他(招聘研究員)

研究者番号：70514199

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,900,000円

研究成果の概要(和文)：重力崩壊型超新星爆発における磁場の役割とふるまいを探るため、数値シミュレーションによる研究を行った。その結果、磁気回転不安定と呼ばれる磁場増幅メカニズムが爆発のダイナミクスと重元素の生成に大きな役割を果たす可能性が示唆された。重力崩壊型超新星爆発は星中心付近で発生したニュートリノがそのすぐ外側を温めることで引き起こされると考えられているが、磁気回転不安定が間接的にその温めを促進することが明らかになった。また、磁気回転不安定が起こるとより多くの中性子が爆発で飛ばされ、その結果、鉄より重い元素が生成されることが分かった。

研究成果の概要(英文)：We numerically studied the evolution and roles of the magnetic fields in core-collapse supernovae. As a result, we found that the so-called magnetorotational instability (MRI), a mechanism amplifying magnetic field, plays important roles in the explosion dynamics and in production of heavy elements. Core-collapse supernovae are considered to be driven by neutrino heating: neutrinos produced around the center of the star heat the matter right outside. We found that the MRI indirectly enhances the heating. It is also found that more neutrons are expelled due to the MRI, and heavy elements (heavier than iron) are produced as a consequence.

研究分野：宇宙物理学

キーワード：重力崩壊型超新星 磁気流体シミュレーション 磁気流体不安定 rプロセス元素合成

1. 研究開始当初の背景

重力崩壊型超新星は質量が太陽の8倍以上の重い星が進化の最後に引き起こす爆発的現象のことである。重力崩壊型超新星の数値シミュレーションは約半世紀にわたって数多く行われてきたが、そのいずれも観測される典型的な爆発エネルギーを再現するに至っていない。

爆発を促進する候補のひとつとして考えられるのが磁場である。重力崩壊型超新星における磁場の効果は強磁場を持つ親星の枠組みで近年盛んに研究されてきた。一方で、弱磁場をもつ親星については、数値シミュレーション上の取り扱いの難しさからあまり調べられて来なかった。しかし、多くの親星は弱い磁場を伴うと考えられているため、後者についても詳しい研究が必要であった。

2. 研究の目的

弱磁場を持つ親星を起源とした重力崩壊型超新星において、磁場の役割と振る舞いを明らかにする。特に以下の2つのことを中心に取り組む。

(1) 弱磁場を持つ親星において磁気流体不安定による磁場の増幅が爆発を促進するか否かを明らかにする。

(2) 磁気流体不安定のうち特に磁気回転不安定について、飽和磁場が初期磁場の強さに依存するか否かを明らかにする。

降着円盤のローカル・シミュレーションでは磁気回転不安定の飽和磁場が初期磁場の強さに依存することが確かめられている(例: Hawley et al. 1995, ApJ, 440, 742)。磁気回転不安定成長の時間スケールにおいて定常として扱える降着円盤に対し、超新星のコアは非定常であるため、これら二者では磁気回転不安定飽和メカニズムが異なる可能性がある。

3. 研究の方法

(1) 上記「2. 研究の目的(1) \ (2)」を達成するため、2次元軸対称磁気流体シミュレーションを行った。数値コードは研究代表者自身が開発したものをを用いた。弱磁場をもつ親星において磁場の増幅を捉えるには空間高解像度が必要であり、そのため計算コストがかさむ。本研究では、境界条件の与え方を工夫し、計算領域を小さく限定することで計算コストを減らした。また、数値コードをMPIとOpenMPでハイブリッド並列し、並列化効率の高い計算を行った。

数値シミュレーションは複数モデル実行した。初期磁場や空間解像度について広いパラメタを調べ、それらが結果にどのような影響を与えるか調べた。

(2) 弱磁場を持つ親星を起源とした重力崩壊型超新星による宇宙の化学進化への貢献を調べるため、上記(1)と同様の2次元軸

対称磁気流体シミュレーションをより広い計算領域で行い、その結果に対して元素合成計算を行った。元素合成計算は英国キール大学(当時)の西村信哉氏が行った。

4. 研究成果

(1) 磁気回転不安定は爆発を促進することが明らかになった。磁気回転不安定がよりよく捉えられる高解像度モデルほど早く爆発し、爆発のエネルギーも大きかった(図1参照)。また、初期磁場が強いほど早く爆発し、爆発のエネルギーも大きくなることが分かった。初期磁場が強いモデルでは回転軸に沿ったジェット形成も見られた。

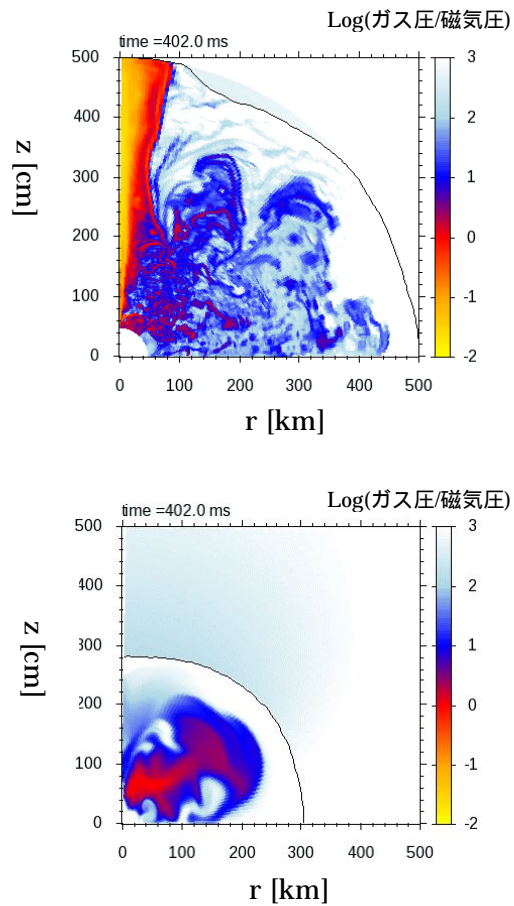


図1: あるモデルにおける爆発の様子をガス圧と磁気圧の比(対数表示)で描いたもの。上下のパネルでは解像度のみが異なる。解像度の低い下のモデルでは衝撃波が半径300km程度に位置しているのに対し、解像度が高く磁気回転不安定が捉えられている上のモデルでは、衝撃波がより早く膨張し、軸に沿ったジェット上の爆発も見られる。

(2) Sawai & Yamada (2014, ApJ, 784, L10)は、磁気回転不安定に伴って起こる角運動量輸送によりニュートリノ加熱領域が膨張し、ニュートリノ加熱率を上昇させることを示した。今回の研究ではこれに加えて磁気回転不安定による新たな力学的効果を見出した。そ

れは、歪められた磁力線に乗ってコア最深部の低陽子数流体がニュートリノ加熱領域に運ばれ、それによりニュートリノ加熱率が上昇するというものである。磁気回転不安定に起因するこれら2つの効果により、爆発が促進されることが明らかになった。

(3) 超新星のグローバルシミュレーションにおいても降着円盤のローカル・シミュレーションと同様に初期磁場の強いモデルほど磁場の飽和値が高くなる傾向が確かめられた。

(4) 磁気駆動のジェットと磁気回転不安定に起因する流体の移動によってコア最深部から放出される低電子比流体においてrプロセス元素合成が起こることが明らかになった。特にニュートリノ加熱に比べ磁場の影響が強い場合にrプロセス元素が合成されやすく、磁場の影響が一番強いモデルでは太陽組成が再現された。また、中には低金属星で観測される弱いrプロセス組成とよく合うモデルもあった。

(5) rプロセス元素以外の元素合成計算では、磁場の影響が強い場合とニュートリノ加熱が強い場合の双方において、極超新星に匹敵する量の亜鉛が生成されることが分かった。一方、ニッケルの生成量は多くても通常の重力崩壊型超新星程度であった。このような元素組成は過去の研究では見られなかった新しいパターンであり、磁場を伴う重力崩壊型超新星と極超新星との関係において興味深い。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 4件)

Nobuya Nishimura, Hidetomo Sawai, Tomoya Takiwaki, Shoichi Yamada, & Friedrich-Karl Thielemann, 2015, The Astrophysical Journal Letters, 836, L21, 査読あり, 10.3847/2041-8213/aa5dee

Hidetomo Sawai, Nobuya Nishimura, Tomoya Takiwaki, & Shoichi Yamada, 2016, "R-Process Nucleosynthesis in Core-Collapse Supernovae Aided by Magnetorotational Instability", JPS Conf. Proc. 14, 020618, 査読あり, 10.7566/JSPC.14.020618

Hidetomo Sawai & Shoichi Yamada, 2016, "The Evolution and Impacts of Magnetorotational Instability in Magnetized Core - Collapse Supernovae", The Astrophysical

Journal, 817, 153, 査読あり, 10.3847/0004-637X/817/2/153

Nobuya Nishimura, Hidetomo Sawai, Tomoya Takiwaki, & Shoichi Yamada, 2015, "The r-process nucleosynthesis in core-collapse supernovae with the magneto-rotational instability", Proceedings of Science, PoS(NIC XIII)128, 1, 査読あり, <http://studylib.net/doc/18739671/po-s-nic-xiii-128>

[学会発表](計 11件)

Hidetomo Sawai, "Magnetohydrodynamic Simulations to Reveal Supernova Explosion Mechanism", SCF2017, 2017年3月14日, ビオポリス(シンガポール)

Hidetomo Sawai, "Magnetically assisted explosions of weakly magnetized stars", IAU Symposium 331, 2017年2月20日, サン・ジル・レ・バン(フランス領レユニオン島)

澤井秀朋、「重力崩壊型超新星の高解像度時期流体シミュレーション」、日本天文学会秋季年回、2016年9月16日、愛媛大学(愛媛県・松山市)

Hidetomo Sawai, "Core-Collapse Supernovae assisted by Magnetorotational Instability", 2nd NAOJ-ECT* Workshop MRACCS2016, 2016年6月29日, 国立天文台(東京都・三鷹市)

Hidetomo Sawai, "Impacts of magnetorotational instability on core-collapse supernovae", F.O.E. Fifty-One Erg an international workshop on the physics and observations of supernovae and supernova remnants, 2015年6月1日, ローリー(アメリカ)

澤井秀朋、「弱磁場高速回転星の重力崩壊：磁気回転不安定に助けられるニュートリノ加熱爆発」、「大質量星の進化・活動現象と星の回転」研究会、2015年2月18日、北海道大学(北海道・札幌市)

澤井秀朋、「超新星における磁気回転不安定のシミュレーション」、国立天文台天文シミュレーションプロジェクト平成26年度ユーザーズミーティング、2015年1月20日、国立天文台(東京都・三鷹市)

澤井秀朋、「弱磁場星の超新星爆発シミュレーション」、第27回理論懇シンポジウム、2014年12月24日、国立天文台（東京都・三鷹市）

澤井秀朋、「弱磁場星の重力崩壊 ～マグネター磁場の由来と超新星のダイナミクス～」第2回DTAシンポジウム「コンパクト天体の活動性と磁氣的性質」、2014年10月28日、国立天文台（東京都・三鷹市）

澤井秀朋、「磁気回転不安定増幅磁場に助けられるニュートリノ加熱爆発」、日本天文学会2014年秋季年会、2014年9月13日、山形大学（山形県・山形市）

澤井秀朋、「磁気回転不安定に助けられるニュートリノ加熱爆発」、超新星・ガンマ線バースト研究会、2014年8月25日、理化学研究所（埼玉県・和光市）

6. 研究組織

(1) 研究代表者

澤井秀朋 (SAWAI, Hidetomo)
早稲田大学・理工学術院・招聘研究員
研究者番号：70514199

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：

(4) 研究協力者

()