

超新星の爆発機構とガンマ線バースト源エンジンの統一的説明

Quest for the unified picture of the explosion mechanism of supernovae and the central engine of gamma-ray bursts

佐藤 勝彦 (SATO KATSUHIKO)

明星大学・理工学部・客員教授



研究の概要

超新星もガンマ線バーストも大質量星がその進化の最後に到達する様々な最終形態の一つであるにとらえ、大質量星の準静的進化から、重力崩壊による中性子星やブラックホールの形成とそれに伴うジェットの出射と伝播、さらにはその際に起こる元素の合成や高エネルギー粒子と電磁波の放出までの、一連の過程に対する首尾一貫した系統的研究を行う。

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学／素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理（理論）

キーワード：超新星 ガンマ線バースト 重力崩壊 重力波 ニュートリノ

1. 研究開始当初の背景

大質量星が進化の最後におこす重力崩壊型超新星がどのような仕組みで爆発にいたるのかは、宇宙物理学の長年の謎である。一方、ガンマ線バーストも大質量星の進化の最終形態の一つであることが明らかになり、通常の超新星とガンマ線バーストや極超新星を分ける仕組みがどうなっているのか、またその際に鍵をにぎる物理量は何か、大質量星の終焉に他の形態はないのか、といった間に答えることが重要となってきた。

2. 研究の目的

本研究課題では、単に超新星爆発のメカニズムやガンマ線バーストの中心天体の解明にとどまらず、大質量星がその進化の最後に到達する様々な最終形態の系統的研究を行うことが重要であると考え、大質量星の進化、重力崩壊のダイナミクスとコンパクト天体の形成、ジェットの生成と伝播、元素の合成や高エネルギー粒子の生成などに注目し、その全体像を統一的に明らかにすることを目的としている。

3. 研究の方法

本研究課題のメンバーは、大質量星の重力崩壊現象の異なる時点において重要となる物理過程の専門家の集まりである。分担者はその専門に応じ現象の時系列に沿って配置されている。研究は主に大規模数値シミュレーションを用いて行うが、前後の現象に関する研究成果が互いにフィードバックをかけるようなかたちで進める。

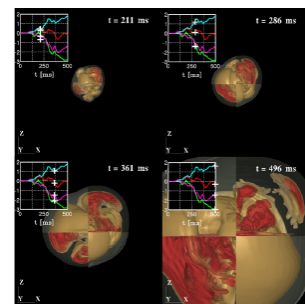
4. これまでの成果

①大質量星コアの重力崩壊に関する成果

強磁場回転星の重力崩壊において、磁場が赤道面対称性を破って存在する場合に、数100~1000km/sの固有速度を出しうるということを示した。また、より弱磁場で高速回転している星の重力崩壊でも磁気圧で爆発が起こることを確認した。さらに、アルフベン波によるエネルギー輸送で超新星爆発を起こすという斬新な機構も発表した。

一方、大質量星の重力崩壊にともない普遍的に形成される定常降着衝撃波の3次元非軸対称モードに対する不安定性の数値的解析を行なった。

また、そこから放出される重力波は時間とともにランダムに変動する特徴を持つことを初めて明らかにした(右図)。

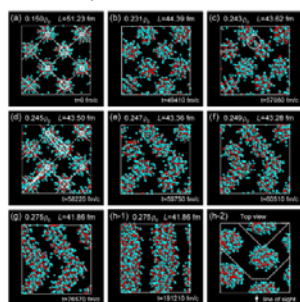


その他、ブラックホール形成をともなう高速自転していない大質量星の重力崩壊は大質量星進化の新たなチャンネルとして重要であり、その際非常にユニークな光度曲線とエネルギースペクトルを示すニュートリノが放出されうることを世界に先駆け提唱した。

②高密度物質における新たな物質相に関する成果

量子分子動力学法 (QMD) を用い、大質量

星の重力崩壊では物質の圧縮により原子核間の引力で体心立方格子構造が不安定になりパスタ相が動的に形成されることを明らかにした(右図)。この結果はPRLに発表され、American Physical Societyの紹介記事に取り上げられるなど大きな反響をよんでいる。また、gyroidとよばれる新たな相も存在する可能性が高いことを液滴模型により示し、PRLに発表した。



3. ニュートリノ振動に関する成果

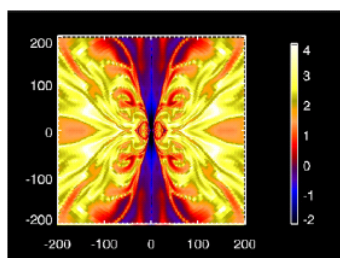
超新星コア近傍でのニュートリノ自己相互作用を含んだニュートリノ振動を数値計算して、エネルギースペクトルの変化を系統的に調べた。また、現行及び次世代検出器で未定パラメータを決定する精度を具体的に評価した。

4. 元素合成に関する成果

強磁場自転超新星におけるジェット状爆発に対し重元素合成計算を行い、第3ピークが顕著に表れるr-元素分布を得た。また、鉄コア領域も含むコラプサージェット内部における重元素合成計算を行い、質量数が60以上の元素はr-元素まで含めて太陽組成に比べ過剰生成になることを示した。

5. ジェット形成と伝播に関する

MPIによる一般相対論的磁気流体コードを開発し、ガンマ線バーストの数値シミュレーションを行った。その結果、磁気卓越ジェットが高速回転する大質量星中心で形成出来ることが明らかとなった(右図)。



一方、ガンマ線バ

ーストを駆動するエネルギー供給源としては、降着円盤からのニュートリノ対消滅反応も依然有力であることもシミュレーションにより示した。

6. 高エネルギー粒子と電磁波放出に関する成果

ガンマ線バーストからの高エネルギーニュートリノ、高エネルギーガンマ線、および最高エネルギー宇宙線生成可能性を解析的なアプローチで検討した。その結果、IceCubeでは3年ほどの継続的観測によってガンマ線バースト高エネルギーニュートリノが観測可能であることやボイド領域などではペアエコー現象がフェルミ衛星などで観測可能であることなどを明らかにした。

5. 今後の計画

これまでに得られた成果を踏まえ、今後は各グループ間の連携をこれまで以上に強めながら、以下の6つの課題に重点的に取り組む。(1)中性子星、ブラックホールと降着円盤の形成及びそこからニュートリノ放出、(2)大質量星コアにおける状態方程式やニュートリノオパシティーなどの微視的物理の精査、(3)自己相互作用によるニュートリノ振動を考慮したニュートリノバースト、(4)r-元素を含む重元素の合成、(5)自転・磁場大質量星の進化計算、(6)相対論的ジェットの形成とその後の伝播における高エネルギー粒子や電磁波の放射。

6. これまでの発表論文等

- (1) Stochastic Nature of Gravitational Waves from Supernova Explosions with Standing Accretion Shock Instability, Kotake, Kei; Iwakami, Wakana; Ohnishi, Naofumi; Yamada, Shoichi, The Astrophysical Journal Letters, Volume 697, Issue 2, pp. L133-L136 (2009)
- (2) Formation of Nuclear "Pasta" in Supernovae, Gentaro Watanabe, Hidetaka Sonoda, Toshiki Maruyama, Katsuhiko Sato Kenji Yasuoka, and Toshikazu Ebisuzaki, Phys. Rev. Lett. 103, 121101 (2009)
- (3) Magnetohydrodynamic Effects in Propagating Relativistic Jets: Reverse Shock and Magnetic Acceleration, Y. Mizuno, B. Zhang, B. Giacomazzo, K. Nishikawa, P.E. Hardee, S. Nagataki, D.H. Hartmann, The Astrophysical Journal Letter, 690 L47-L51 (2009)
- (4) Emergence of Hyperons in Failed Supernovae: Trigger of the Black Hole Formation, K.Sumiyoshi, C.Ishizuka, A.Ohnishi, S.Yamada, H.Suzuki, The Astrophysical Journal Letters, 690(2009) pp. L43-L46
- (5) Gyroid phase in nuclear pasta, Ken'ichiro Nakazato, Kazuhiro Oyamatsu, Shoichi Yamada, Physical Review letters 103(2009) 132501-1 - 132501-4
- (6) Cosmic Rays above the Second Knee from Clusters of Galaxies and Associated High-Energy Neutrino Emission', K. Murase, S. Inoue, S. Nagataki, The Astrophysical Journal Letter, 689, L105-L108 (2008)

ホームページ等

<http://www.utap.phys.s.u-tokyo.ac.jp/~sn09/>

<http://www.cfca.nao.ac.jp/~sn10/>