

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月31日現在

機関番号：14301
 研究種目：研究活動スタート支援
 研究期間：2011～2012
 課題番号：23840023
 研究課題名（和文）多次元ニュートリノ輻射輸送計算と超新星の爆発メカニズム
 研究課題名（英文）Multi-dimensional Neutrino Radiation Transfer Calculation and Supernova Explosion Mechanism

研究代表者
 諏訪 雄大（SUWA YUDAI）
 京都大学・基礎物理学研究所・特定准教授
 研究者番号：40610811

研究成果の概要（和文）：多次元ニュートリノ輻射流体計算を用いて、超新星爆発シミュレーションを行った。特に、1) 核物質の状態方程式の依存性、2) 空間2次元と3次元でのニュートリノ加熱効率の違い、について調べた。

研究成果の概要（英文）：I performed core-collapse supernova simulations using multi-dimensional neutrino-radiation-hydrodynamic code. I investigated the following two topics; i) the impact of nuclear equation of state, and ii) the dependence of neutrino heating efficiency on special dimension (2D and 3D).

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2011年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2012年度	1,200,000	360,000	1,560,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,500,000	750,000	3,250,000

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

キーワード：超新星、ニュートリノ、流体力学

1. 研究開始当初の背景

重力崩壊型超新星爆発は宇宙で最も激しい爆発の一つである。その明るさは星の集合である銀河にも匹敵する。そのため、古来より膨大な観測がなされている。それにも関わらず、その爆発メカニズムはいまだ完全には明らかになっていない。

最も有力なメカニズムの候補として、ニュートリノ加熱機構がある。この機構では、中性子星表面から放射されたニュートリノの一部が外層で吸収されるプロセスが重要である。加熱効率を定量的に求めるには、ニュートリノ輻射輸送方程式を数値的に精度よ

く解くことが肝要である。このプロセスで実際に爆発を起こすことができるのかどうか、これまで数多くの研究がなされてきた。しかし、球対称シミュレーション（流体もニュートリノ輻射輸送の両者に球対称の仮定が用いられている）では、爆発を起こすことができていなかった。

近年、多次元のシミュレーションが可能になり、本研究代表者らのグループを含む、2つのグループが爆発を起こすことに成功した。これは、対流などの本質的に多次元の効果がニュートリノ加熱の効率を大きく上げることで、衝撃波の得るエネルギーが著しく上昇したことによるものである。しかし、い

まだシミュレーションで得られた爆発エネルギーは観測で得られているものより 1-2 桁小さい、という問題が残っている。

2. 研究の目的

本研究では、ニュートリノ加熱によって駆動される超新星爆発にまつわる物理について、シミュレーションを用いて調べることを目的とした。

3. 研究の方法

本研究では、流体計算とニュートリノ輻射輸送計算を同時に行うニュートリノ輻射流体計算を軸に据えている。特に、ニュートリノ輻射輸送部分に、*Isotropic Diffusion Source Approximation* という新しいスキームを用いていることが特徴である。このスキームは、他のものと比べてはるかにコストが小さいが、(球対称の) より精度の高い計算の結果を非常によく再現できることが示されている。したがって、このスキームを用いることで、沢山のモデルをシミュレートすることが可能になる。超新星のような非線形の計算では、いくつもの初期条件からシミュレーションを行うことで系統的な振る舞いを調べる必要があり、数多くの計算が不可欠である。そのため、計算コストの小さいスキームを用いることは大きなアドバンテージになる。

4. 研究成果

助成いただいていた期間の主な成果は以下の通りである。

(1) 核物質の状態方程式が超新星爆発に与える影響

超新星は、大質量星の外層が爆発によって吹き飛ばされるものであるが、同時に大質量星の核から中性子星を形成するプロセスであるとも言えられる。そのため、最終的な生成物である中性子星の構造は爆発のダイナミクスを変える可能性がある。中性子星の構造は核物質の状態方程式によって記述されるため、これらの状態方程式の与える影響を明らかにすることが現象の理解に不可欠であった。これまでに爆発を報告していた計算は全て単一の状態方程式を用いていたため、他の状態方程式で爆発がどのように変化するのかが調べられていなかった。

そこで、私は現在超新星コミュニティでよく使われている4つの状態方程式を全て用いて衝撃波のダイナミクスを系統的に調べた。その結果、中性子星がニュートリノ放出

によって冷えて行く過程で、より早く収縮するような状態方程式の方が爆発を起こしやすいことを明らかにした [論文7]。

(2) 世界初の空間 3 次元ニュートリノ輻射流体シミュレーション

これまで、爆発を起こすことのできていたシミュレーションは軸対称性を課した空間 2 次元のものであった。その理由は、空間 3 次元シミュレーションは計算コストが膨大なため、現実的な時間で興味のある時間スケールを追うことができなかつたためである。しかし、昨今のコンピューターリソースや数値計算スキームの発展のおかげで、3 次元シミュレーションも現実的になった。このような背景のもと、私は国立天文台の滝脇氏、固武氏とともに世界初の空間 3 次元ニュートリノ輻射流体計算を行った。その結果、3 次元計算は 2 次元のそれに比べてニュートリノ加熱効率が上がりうることを示した [論文1]。しかし、この計算は分解能がまだ低いため、現在さらに高分解能の計算を行って、より詳細な検討を行っている。

(3) 大質量星内部での超相対論的ジェット伝搬とガンマ線バースト

上記の超新星シミュレーション以外にも、ガンマ線バーストという星が起こすもうひとつの爆発現象についての研究も進めた。ガンマ線バーストを起こすには大質量星の中心部で作られた超相対論的なジェットが星を貫くことが必要であると考えられている。私は、早稲田大学の長倉氏、KEK の井岡氏とともに特殊相対論的流体シミュレーションを用いて、大質量星の内部でのジェット伝搬のシミュレーションを行った。その結果と解析的モデルを詳細に比較し、数値計算をよく再現するモデルの構築に成功した [論文2]。また、京都大学の仲内氏らとともに、解析的モデルを用いて様々な星におけるジェット伝搬計算を行い、ガンマ線バースト形成可能性を調べ、さらに観測的な特徴の予言を行った [論文4]。

(4) 超臨界降着流とニュートリノ加速

超新星やガンマ線バーストの中心部で実現されていると考えられている、非常に降着率の高い流れ(超臨界降着流)の中でのニュートリノ輻射輸送方程式を解くことで、熱的成分の一部から非熱的成分が作られることを示した。この成分によって、ガンマ線バースト駆動に重要だとされているニュートリノ対消滅の効率が 10 倍以上にもなりえることを示した [論文6]。

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7件)

[1] 諏訪雄大、Neutrino acceleration by bulk matter motion and explosion mechanism of gamma-ray bursts, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society、査読あり、428、2013、2443~2449
DOI: 10.1093/mnras/sts218

[2] 諏訪雄大、滝脇知也、固武慶、Tobias Fischer、Matthias Liebendoerfer、佐藤勝彦、On the Importance of the Equation of State for the Neutrino-driven Supernova Explosion Mechanism、The Astrophysical Journal、査読あり、764、2013、99-1~19
DOI: 10.1088/0004-637X/764/1/99

[3] 滝脇知也、固武慶、諏訪雄大、Three-dimensional Hydrodynamic Core-Collapse Supernova Simulations for an $11.2 M_{\odot}$ Star with Spectral Neutrino Transport、The Astrophysical Journal、査読あり、749、2012、98-1~17
DOI: 10.1088/0004-637X/749/2/98

[4] 長倉洋樹、諏訪雄大、井岡邦仁、Population III Gamma-Ray Bursts and Breakout Criteria for Accretion-Powered Jets、The Astrophysical Journal、査読あり、754、2012、85-1~21
DOI: 10.1088/0004-637X/754/2/85

[5] 固武慶、住吉光介、山田章一、滝脇知也、黒田仰生、諏訪雄大、長倉洋樹、Core-Collapse Supernovae as Supercomputing Science: a status report toward 6D simulations with exact Boltzmann neutrino transport in full general relativity、Progress of Theoretical and Experimental Physics、査読あり、2012、2012、01A301-1~34
DOI: 10.1093/ptep/pts009

[6] 仲内大翼、諏訪雄大、坂本貴紀、樫山和己、中村卓史、Long Duration X-Ray Flash and X-Ray Rich Gamma Ray Burst from Low Mass Population III Star、The Astrophysical Journal、査読あり、759、2012、128-1~9
DOI: 10.1088/0004-637X/759/2/128

[7] 固武慶、滝脇知也、諏訪雄大、岩上わか、川越至桜、政田洋平、藤本信一郎、

Multimessengers from core-collapse supernovae: multidimensionality as a key to bridge theory and observation、Advances in Astronomy、査読あり、2012、2012、428757-1~46
DOI: 10.1155/2012/428757

[学会発表] (計20件)

[1] 諏訪雄大、"Multidimensional simulation of core-collapse supernovae", Symposium on 'Gravitational Wave Astronomy', 大阪市立大学、大阪、2013年3月2日

[2] 諏訪雄大、"Physical Ingredients in Core-Collapse Supernova Explosion Mechanism", Quarks to Universe in Computational Science, 奈良県新公会堂、奈良、2012年12月15日

[3] 諏訪雄大、"Numerical Simulation of Core-Collapse Supernovae", East Asia Numerical Astrophysics Meeting, 基礎物理学研究所、京都、2012年10月30日

[4] 諏訪雄大、"Axisymmetric simulation of core-collapse supernovae with spectral neutrino transfer", Core-Collapse Supernovae: Models and Observable Signals, University of Washington, Seattle, USA, 2012年7月1日

[5] 諏訪雄大、"First Gamma-Ray Bursts Imprinting Population III Progenitor Structure", First Stars IV, ハートピア京都、京都、2012年5月21日-25日 (ポスター発表)

[6] 諏訪雄大、"Axisymmetric simulation of core-collapse supernovae with spectral neutrino transfer", 16th Workshop on "Nuclear Astrophysics", Ringberg Castle, Munich, Germany, 2012年3月26日

[7] 諏訪雄大、"On the importance of the equation of state for the neutrino-driven supernova explosion mechanism", Death of Massive Stars: Supernovae & Gamma-Ray Bursts, 日光千姫物語、

日光, 2012年3月12日-16日 (ポスター発表)

[8] 諏訪雄大, "Multi-dimensional core-collapse supernova simulations and the equation of state influence", Formations of Compact Objects: from the cradle to the grave, 早稲田大学, 東京, 2012年3月8日

[9] 諏訪雄大, 滝脇知也, 固武慶, Tobias Fischer, Matthias Liebendoerfer, 佐藤勝彦, "ニュートリノ駆動型超新星爆発と核物質状態方程式", 日本天文学会春季年会, 埼玉大学, 埼玉, 2013年3月20日

[10] 諏訪雄大, "超新星爆発にまつわる物理: 状態方程式依存性と重力波放出", 新学術領域研究「中性子星核物質」キックオフシンポジウム, 理化学研究所, 埼玉, 2012年10月27日

[11] 諏訪雄大, "重力崩壊型超新星爆発シミュレーションと親星依存性", 超新星と超新星残骸の融合研究会, 国立天文台, 東京, 2012年10月16日

[12] 諏訪雄大, "重力崩壊型超新星爆発シミュレーションの現状と展望", 高エネルギー天体研究会, 首都大学東京, 東京, 2012年10月6日

[13] 諏訪雄大, 滝脇知也, 固武慶, M. Liebendoerfer, T. Fischer, 佐藤勝彦, "超新星爆発における核物質状態方程式の影響", 日本物理学会 2012年秋季大会, 京都産業大学, 京都, 2012年9月13日

[14] 諏訪雄大, "超新星爆発シミュレーションと核物質状態方程式", ハドロン物理の諸相と状態方程式, 基礎物理学研究所, 京都, 2012年8月31日

[15] 諏訪雄大, "ニュートリノ輻射流体シミュレーションで探る重力崩壊型超新星爆発メカニズム", 京コンピュータ・シンポジウム2012, 神戸大学, 兵庫, 2012年6月14日-15日 (ポスター発表)

[16] 諏訪雄大, "状態方程式の違いは爆発にどのくらい影響を及ぼすのか?", 超新星爆発と数値シミュレー

ション, 基礎物理学研究所, 京都, 2011年12月27日

[17] 諏訪雄大, "コラプサーモデルにおける非熱的ニュートリノ生成と対消滅効率", 高エネルギー宇宙物理学研究会, 大阪大学, 大阪, 2011年12月17日

[18] 諏訪雄大, "初代星が起こすガンマ線バーストの特徴", ガンマ線バースト将来衛星検討会議東京大学, 東京, 2011年12月6日

[19] 諏訪雄大, "状態方程式がニュートリノ駆動型超新星爆発に及ぼす影響", 素核宇融合による計算基礎物理学の進展, 合歓の郷, 三重, 2011年12月4日

[20] 諏訪雄大, "超新星を起こす親星の限界質量はどこにあるのか?", 第24回理論懇シンポジウム, 国立天文台, 東京, 2011年11月5日-7日 (ポスター発表)

[その他]
ホームページ等
<http://www2.yukawa.kyoto-u.ac.jp/~suwa/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

諏訪 雄大 (SUWA YUDAI)
京都大学・基礎物理学研究所・特定准教授
研究者番号: 40610811

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者

()

研究者番号: