

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：32660

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2011～2012

課題番号：23840038

研究課題名（和文） 超新星ニュートリノの長時間変動に関する系統的研究

研究課題名（英文） Systematic study on the long term variation of supernova neutrino spectra

研究代表者

中里 健一郎 (NAKAZATO KEN' ICHIRO)

東京理科大学・理工学部・助教

研究者番号：80609347

研究成果の概要（和文）：本研究課題では、超新星ニュートリノの光度曲線やスペクトルの長時間変動を理論的に予測するため、ニュートリノ輻射流体計算による星の重力崩壊と、超新星爆発によって中心部に形成される高密度領域（原始中性子星）のニュートリノ放出による冷却を計算し、それらを組み合わせることで、さまざまな場合についての、系統的で包括的な超新星ニュートリノのモデルを得た。さらに、今回の研究で得られたデータは「Supernova Neutrino Database」として、ウェブ上で提供している。

研究成果の概要（英文）：In this study, to follow the long term evolution of supernova neutrino spectra for various progenitor stars, we combine the results of neutrino-radiation hydrodynamic simulations for the early phase and quasi-static evolutionary calculations of neutrino diffusion for the late phase. The supernova neutrino data computed in this study are publicly available on the internet.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2011年度	800,000	240,000	1,040,000
2012年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
年度			
総計	1,400,000	420,000	1,820,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：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・超新星爆発・原始中性子星・重力崩壊・ブラックホール

1. 研究開始当初の背景

重力崩壊型超新星爆発に伴って放出されるニュートリノは、将来的にその観測からいまだ解明されていない超新星の爆発メカニズムだけでなく、ニュートリノの質量などニュートリノ振動にかかわる素粒子的性質にも重要な手がかりが得られると期待されてい

る。しかしこれまで、さまざまな質量や化学組成をもつ超新星に対して、20秒といった長いタイムスケールをカバーしたニュートリノ放出量の数値計算は存在せず、ニュートリノ観測から超新星爆発の何がどこまでわかるのか、といった系統的研究は、あまりなされていなかった。

2. 研究の目的

本研究課題では、数値シミュレーションによって超新星ニュートリノの長時間変動に関する系統的な解析を行い、その結果を包括的なデータベースとしてまとめあげることがを目的とした。これによって、ニュートリノ観測から超新星の物理に迫る上での基盤整備を行うとともに、理論家から観測家まで幅広い分野の研究者に有用なデータを提供し、今後の研究に役立てることを目指した。

3. 研究の方法

(1) 重力崩壊開始からバウンスののち、数百ミリ秒までのニュートリノ放出量は、一般相対論的流体とニュートリノ輸送をカップルさせた計算（ニュートリノ輻射流体計算）を行って求めた。その際、離散化されたニュートリノの分布関数を考えて直接ボルツマン方程式を解きその時間発展を求める。ここで、離散化されたニュートリノの分布関数とは、各ニュートリノフレーバーのエネルギー・角度分布を離散化したものである。これにより、ニュートリノの総放出エネルギーやスペクトルの時間変動について精度のよい議論が可能となる。

(2) 超新星爆発の後半のフェーズにおけるニュートリノ放出量は、ニュートリノ拡散近似による原始中性子星の冷却の計算を行う。これについても計算上の基礎は(1)に共通する部分が多いが、流体のダイナミクスを解く代わりに力学的に平衡な原始中性子星を仮定し、ニュートリノ輸送はボルツマン方程式を多群流束拡散近似とよばれる手法によって解く。しかし、こういった仮定や近似をとることで計算コストを軽減させ、より多くのモデルにたいして爆発から20秒といった長い時間にわたる放出ニュートリノのデータを得ることを可能とした。

(3) 最後に、(1)、(2)の計算を、物理的描写に基づく現象論的なモデルで繋ぎ、さまざまな場合の超新星ニュートリノの系統的なデータを求めた。

4. 研究成果

(1) ニュートリノ輻射流体計算は質量や元素組成の異なる8つのモデルに対して行った。結果として、重力崩壊の跳ね返り（バウンス）から100ミリ秒以後のフェーズにおけるニュートリノ光度とエネルギーは、崩壊

前の星の鉄コアの質量が大きいほど、高くなることを確認できた。これはバウンス後の質量降着率に違いがあるためと考えられる。特に、中質量（太陽の30倍程度）で低金属量の星では、鉄コアが大きすぎてバウンスから約800ミリ秒で再崩壊が起こり、ブラックホールが形成されることがわかった。

(2) 原始中性子星冷却の計算は、(1)に挙げた8モデルのうち、ブラックホールにならなかった7モデルについて、衝撃波復活時間（バウンスによって生成された衝撃波が一旦、停滞した後で復活し、コアを通過するまでに要する時間）を3通りに変えて行った。その結果、崩壊前の星の鉄コアの質量が大きいほど、また衝撃波復活時間が長いほど、あとに残される中性子星の質量は大きくなり、ニュートリノの総放出量や平均エネルギーも上がることが分かった。

(3) 前述の(1)、(2)の計算を総合して、図1のような長時間にわたる超新星ニュートリノの光度曲線と平均エネルギーや図2のようなスペクトルの時間変化を見積もることができた。さらに前述の通り、ここでも衝撃波復活時間が重要であり、特に重力崩壊前の鉄コアの質量が大きい場合では、原始中性子星に降着する物質の解放する重力エネルギーが大きく、それが放出ニュートリノのエネルギー源となるため、より衝撃波復活までの時間の依存性が顕著となることがわかった。

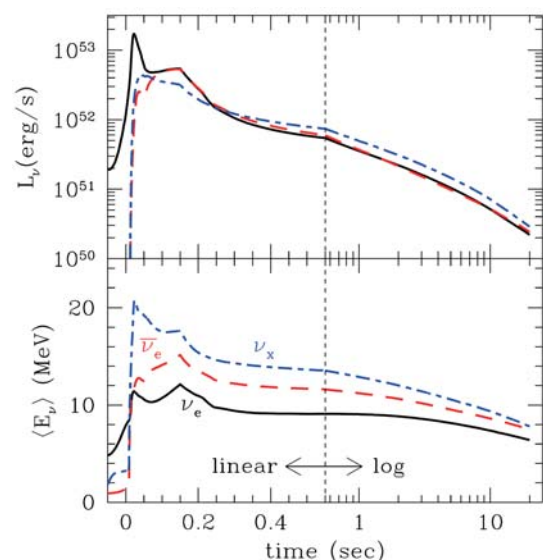


図1 超新星ニュートリノの光度曲線と平均エネルギーの時間発展の計算例

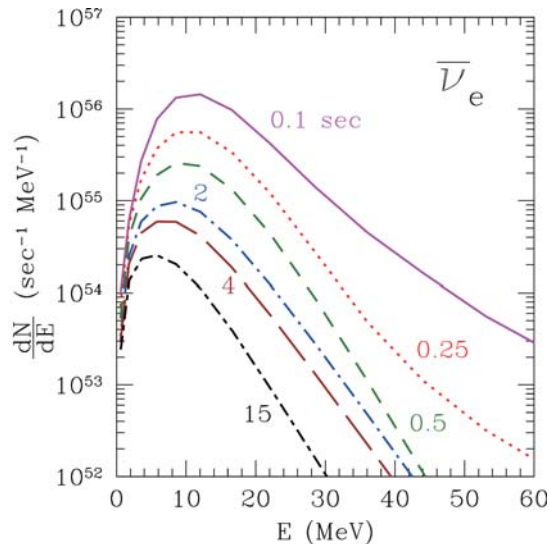


図2 超新星ニュートリノのスペクトルの時間変化の計算例

(4) 今回の研究で得られたデータは「Supernova Neutrino Database」として、ウェブ上で提供されており、誰でも簡単にダウンロードして使えるようになっている。このデータは、将来、銀河系内超新星が起こった際にすぐ比較できるテンプレートとして、また過去に起こった超新星爆発から放出されたニュートリノによる宇宙背景放射の見積もりなどにおいても有用なものとなると期待している。

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11件)

- ① K. Nakazato, K. Sumiyoshi, H. Suzuki, T. Totani, H. Umeda and S. Yamada, "Supernova Neutrino Light Curves and Spectra for Various Progenitor Stars: From Core Collapse to Proto-neutron Star Cooling", The Astrophysical Journal Supplement, 査読有、205巻、2013年、pp. 2-1-2-17
DOI: 10.1088/0067-0049/205/1/2
- ② H. Sotani, K. Nakazato, K. Iida and K. Oyamatsu, "Effect of superfluidity on neutron star crustal oscillations", Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters, 査読有、428巻、2013年、pp. L21-L25
DOI: 10.1093/mnrasl/sls006

- ③ M. Takano, H. Togashi, S. Yamamuro, K. Nakazato and H. Suzuki, "Variational Method for Nuclear Matter with an Explicit Energy Functional", Proceedings of Science (NIC XII), 査読有、2012年、pp. 236-1-236-6
http://pos.sissa.it/archive/conferences/146/236/NIC%20XII_236.pdf

- ④ H. Kikuchi, H. Suzuki, K. Nakazato, S. Yamada and K. Sumiyoshi, "Systematic long term simulations of spherical supernova explosions and their applications", AIP Conference Proceedings, 査読有、1484巻、2012年、pp. 397-399
DOI: 10.1063/1.4763432

- ⑤ M. Takano, H. Togashi, S. Yamamuro, K. Nakazato and H. Suzuki, "Cluster Variational Method for Nuclear Matter with the Three-Body Force", AIP Conference Proceedings, 査読有、1484巻、2012年、pp. 378-380
DOI: 10.1063/1.4763426

- ⑥ K. Nakazato and K. Sumiyoshi, "The influence of hyperon potential on the black-hole-forming failed supernovae", AIP Conference Proceedings, 査読有、1484巻、2012年、pp. 375-377
DOI: 10.1063/1.4763425

- ⑦ K. Nakazato and K. Sumiyoshi, "Stellar Core Collapse and Exotic Matter", IAU Symposium, 査読有、279巻、2012年、pp. 367-368
DOI: 10.1017/S1743921312013385

- ⑧ H. Sotani, K. Nakazato, K. Iida and K. Oyamatsu, "Probing the Equation of State of Nuclear Matter via Neutron Star Asteroseismology", Physical Review Letters, 査読有、108巻、2012年、pp. 201101-1-201101-4
DOI: 10.1103/PhysRevLett.108.201101

- ⑨ K. Nakazato, S. Furusawa, K. Sumiyoshi, A. Ohnishi, S. Yamada and H. Suzuki, "Hyperon Matter and Black Hole Formation in Failed Supernovae", The Astrophysical Journal, 査読有、745巻、2012年、pp. 197-1-197-10
DOI: 10.1088/0004-637X/745/2/197

- ⑩ 中里健一郎、「ニュートリノ天文学で探るバリオン物質」、素粒子論研究、査読なし、119巻、2011年、pp. B73-B75
- ⑪ K. Nakazato, K. Iida and K. Oyamatsu, "Curvature effect on nuclear 'pasta': Is it helpful for gyroid appearance?", Physical Review C, 査読有、83巻、2011年、pp. 065811-1-065811-10
DOI:10.1103/PhysRevC.83.065811

[学会発表] (計12件)

- ① 中里健一郎、「超新星ニュートリノの包括的な理論モデルデータベース」、第25回理論懇シンポジウム「計算宇宙物理学の新展開」、2012年12月22日～24日、つくば国際会議場
- ② K. Nakazato, "Stellar Core Collapse and Exotic Matter", Symposium: 'Quarks to Universe in Computational Science (QUCS 2012)', 2012年12月13日～16日、奈良県新公会堂
- ③ 中里健一郎、「超新星ニュートリノの包括的な理論モデルデータベースの構築」、日本天文学会、2012年9月19日～21日、大分大学
- ④ 中里健一郎、「超新星ニュートリノの包括的な理論モデルデータベースの構築」、日本物理学会、2012年9月11日～14日、京都産業大学
- ⑤ H. Suzuki, "Systematic study of supernova neutrino oscillation using outputs of supernova simulations", The XXV International Conference on Neutrino Physics and Astrophysics (NEUTRINO 2012), 2012年6月3日～9日、京都テルサ
- ⑥ K. Nakazato, "The long term variation of supernova neutrino spectra", The XXV International Conference on Neutrino Physics and Astrophysics (NEUTRINO 2012), 2012年6月3日～9日、京都テルサ
- ⑦ 中里健一郎、「核密度以下における原子核物質の非一様構造の多次元計算」、日本天文学会、2012年3月19日～22日、龍谷大学
- ⑧ K. Nakazato, "Stellar Core Collapse and

Exotic Matter", IAU Symposium 279 'Death of Massive Stars: Supernovae and Gamma-Ray Bursts', 2012年3月12日～16日、日光千姫物語

- ⑨ K. Nakazato, "Black Hole Formation and Equation of State at Supranuclear Densities", Formations of Compact Objects: from the cradle to the grave, 2012年3月7日～9日、早稲田大学
- ⑩ K. Nakazato, "The influence of hyperon potential on the black-hole-forming failed supernovae", Origin of Matter and Evolution of Galaxies (OMEG11), 2011年11月14日～17日、理化学研究所
- ⑪ 中里健一郎、「QCD相転移と超新星爆発・ブラックホール形成」、第24回理論懇シンポジウム「理論天文学・宇宙物理学の革新」、2011年11月5日～7日、国立天文台
- ⑫ 中里健一郎、「QCD相転移が星の重力崩壊に与える影響」、日本天文学会、2011年9月19日～22日、鹿児島大学

[その他]
ホームページ等
<http://asphwww.ph.noda.tus.ac.jp/snn/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中里 健一郎 (NAKAZATO KEN' IHIRO)
東京理科大学・理工学部・助教
研究者番号：80609367

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：