

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 12 日現在

機関番号：17102

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26870615

研究課題名(和文)多角的なアプローチによる超新星ニュートリノの観測的特徴に関する理論研究

研究課題名(英文)Diverse Theoretical Studies toward Observations of the Supernova Neutrinos

研究代表者

中里 健一郎(Nakazato, Ken'ichiro)

九州大学・基幹教育院・助教

研究者番号：80609347

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,800,000円

研究成果の概要(和文)：太陽の約10倍以上の質量を持つ大質量星が進化の最後で起こす、重力崩壊による超新星爆発やブラックホール形成の過程で放出されるニュートリノの観測的特徴を理論的に研究した。まず銀河系内で超新星爆発が起こった際のニュートリノバーストについて、検出数だけでなくイベントのエネルギー・角度分布や中性子タグされる割合について、統計的な誤差まで考慮してその時間変化を詳細に調べた。次に、過去の超新星爆発を起源とする背景ニュートリノについてさまざまな不定性を系統的に評価した結果、星形成史の違いによる影響は主に低エネルギー成分に現れることから、今後のスーパーカミオカンデにガドリニウムを添加する実験の重要性を指摘した。

研究成果の概要(英文)：Stars with masses more than 10 solar masses undergo the gravitational collapse and the subsequent supernova explosions and/or black-hole formations. Observational properties of the neutrinos emitted from these processes are investigated in this project. Firstly, for a neutrino burst from Galactic supernovae, time variations are evaluated for the event number, energy and angular distributions, and fraction of events with neutron tag. Secondly, for the supernova relic neutrinos, which are the integration of neutrino flux emitted by past supernovae, the flux and spectrum are evaluated taking into account various uncertainties. As a result, it is found that the low-energy spectrum of supernova relic neutrinos is mainly determined by the cosmic star formation rate density and a future experiment in Super-Kamiokande with gadolinium-loaded water is important for the detection of these low-energy neutrinos.

研究分野：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 超新星背景ニュートリノ ブラックホール 重力波

### 1. 研究開始当初の背景

重力崩壊型超新星爆発は重たい星の死であるだけでなく、元素の起源や銀河進化の動力源として重要な意味を持ち、宇宙物理学における中心課題の一つである。将来、近傍の超新星爆発から放出されたニュートリノが観測されれば、謎とされてきた爆発メカニズムの理解が大きく進むと期待されている。一方、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を宇宙背景放射として検出する試みもあり、この超新星背景ニュートリノの検出により超新星爆発の発生頻度や宇宙の星形成史に示唆を与えうると考えられている。

世界最大の水チェレンコフ型ニュートリノ検出器であるスーパーカミオカンデでは、Gdを添加する計画が進んでいる。これにより、反電子型ニュートリノが逆ベータ崩壊反応を起こすときに生成される中性子をタグし、特に低エネルギー領域においてノイズ事象を軽減できると期待されている。この新たなフェーズにおいて、超新星爆発から放出されたニュートリノが実際に検出された場合、超新星やニュートリノの物理において、何がどこまで明らかになるのかを理論的に検討することが不可欠であった。

### 2. 研究の目的

(1) 数値シミュレーションに基づく超新星ニュートリノのデータセットを用い、銀河系内の超新星によるニュートリノバーストのイベント数を評価する。その際、イベント数の時間変化だけでなく、反跳電子(陽電子)のエネルギー・角度分布や中性子タグの有無まで考慮して理論予測を行い、スペクトルの時間変化や粒子識別性についても議論する。

(2) 超新星背景ニュートリノは、過去に起こったすべての超新星爆発から放出されたニュートリノが重なり合って地球に届くため、そのフラックスは、個々の超新星から放出されたニュートリノのスペクトルだけでなく、過去の超新星発生率ひいては星形成の歴史にも依存する。また低金属量な環境で形成された星は、進化の過程であまり質量放出をせずに、重力崩壊の結果ブラックホールを形成するとする示唆もあり、この場合に放出されるニュートリノのスペクトルは通常の超新星ニュートリノのそれとは大きく異なる。さらに検出器でのイベント数を考える際には、ニュートリノ振動パラメータの依存性も考慮しなければならない。こうした様々な不定性を考慮して、超新星背景ニュートリノのフラックスを系統的に予測する。

(3) 本研究課題の期間中、アメリカの重力波検出器 advanced LIGO により、30 太陽質量程度のブラックホール 2 つが合体する現象を、重力波によって捉えたとする発表があった。このブラックホールの起源は、すでに述べた

とおり、低金属量な環境で形成された星である可能性が高く、とすれば、これまでに進めていた背景ニュートリノの研究とも密接にかかわるテーマとなりうる。そこで、advanced LIGO で発見されたようなブラックホールが、低金属量星を起源とする場合に、期待される背景重力波のエネルギー密度を予測する。

### 3. 研究の方法

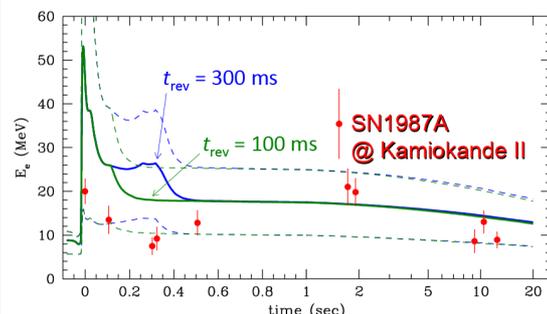
(1) 超新星爆発によるニュートリノバーストの検出イベント数評価のため、各反応の微分断面積を用いて、超新星ニュートリノのスペクトルを反跳電子(陽電子)のエネルギー・角度分布に焼き直す。さらに、統計的有意性を議論するため、モンテカルロ計算を行う。

(2) 超新星背景ニュートリノのフラックスに影響を与える様々な不定性、具体的には星形成率や金属量の進化、超新星爆発のメカニズムに対応する衝撃波復活時間、ブラックホールが形成される場合の状態方程式、ニュートリノ振動パラメータなどによる依存性を系統的に調べる。さらに、今後の Gd を添加したスーパーカミオカンデを用いて、どのくらいの期間で背景ニュートリノが検出できるか、統計的に評価する。特に、金属量の進化に関しては銀河の観測データを用いることで、ブラックホール形成率の進化を見積もった。

(3) 連星ブラックホール合体を起源とする背景重力波のエネルギー密度と近傍宇宙でのブラックホール合体率や合体までの遅延時間分布、ブラックホールを形成する金属量閾値との関係を調べた。ブラックホール形成率の進化については、(2)でも採用した銀河の観測に基づく金属量進化モデルを用いた。

### 4. 研究成果

(1) 銀河系内の超新星からのニュートリノバーストのイベント数の予測を行った結果、平均エネルギーの時間変化は 100 ミリ秒程度の精度で捉えることが出来るが、統計的な誤差まで考慮すると、超新星までの距離によっては角度分布やフレーバー比については時間変化まで捉えることは難しいことが

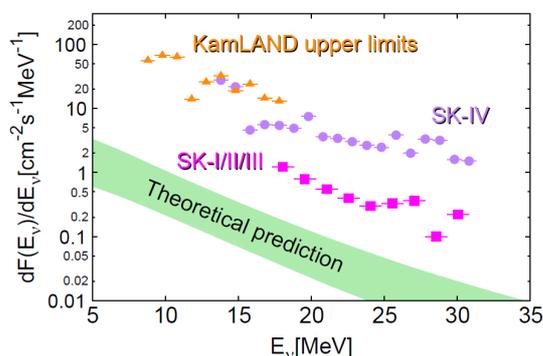


超新星ニュートリノによる反跳電子エネルギーの時間変化の理論予測と SN1987A の観測 (1)

わかった。

(2) 超新星背景ニュートリノのスペクトルを見積もった結果、星形成史の違いによる影響は主に低エネルギー成分に現れることが分かり、今後のスーパーカミオカンデに Gd を添加する実験計画の重要性を改めて確認することができた。一方、ブラックホール形成率や超新星の衝撃波復活時間の不定性は、背景ニュートリノの高エネルギー成分に現れることもわかった。このことから、スペクトルに注目することで、背景ニュートリノのフラックスにおける不定性の起源を、ある程度切り分けられる可能性があることを示唆した。

さらに、実際の検出の際には無視できない大気ニュートリノなどのバックグラウンドの影響も考慮した結果、スーパーカミオカンデにおいて有意な検出のために必要な期間は、これまでにリストアップしてきたさまざまな不定性に強く依存することが指摘できた。



背景ニュートリノの理論予測と観測の上限値

(3) 背景重力波のエネルギー密度を見積もった結果、近傍宇宙での連星ブラックホール合体率で規格化した背景重力波のエネルギー密度は、ブラックホールを形成する金属量閾値に依存しないことがわかった。これは、金属量がある程度豊富となった銀河では星形成が抑制され、結果として各 redshift で形成される星の金属量の分布は redshift にあまり依存しないからである。このことから、近傍宇宙での連星ブラックホール合体率と背景重力波のエネルギー密度が得られれば、合体までの遅延時間分布を推定することが可能であることを指摘した。

(4) 以上の他に、強磁場中性子星（マグネター）の再帰的な軟ガンマ線のバースト放射に関する研究や、非一様核物質相を含む有限温度状態方程式に関する研究も行った。特に、核物質の状態方程式は超新星爆発後の原始中性子星冷却によるニュートリノ放射に大きな影響を与えると考えられており、今後、研究を進めていく予定である。

## 5. 主な発表論文等

(雑誌論文)(計10件)

H. Togashi, K. Nakazato, Y. Takehara, S. Yamamuro, H. Suzuki and M. Takano, "Nuclear equation of state for core-collapse supernova simulations with realistic nuclear forces", Nuclear Physics A, 査読有, 961 巻, 2017 年, pp. 78 - 105

DOI: 10.1016/j.nuclphysa.2017.02.010

K. Nakazato, E. Mochida, Y. Niino and H. Suzuki, "Detectability and Uncertainties of the Supernova Relic Neutrino Background", JPS Conference Proceedings, 査読有, 14 巻, 2017 年, pp. 010705-1 - 010705-4

DOI: 10.7566/JPSCP.14.010705

K. Nakazato, Y. Niino and N. Sago, "Gravitational-Wave Background from Binary Mergers and Metallicity Evolution of Galaxies", The Astrophysical Journal, 査読有, 832 巻, 2016 年, pp. 146-1 - 146-10

DOI: 10.3847/0004-637X/832/2/146

K. Nakazato, "Supernova Explosion and Black Hole Formation with QCD Phase Transition", Acta Astronomica Sinica, 査読有, 56 巻 Supplement, 2015 年, pp. 49 - 51

<http://adsabs.harvard.edu/abs/2015AcASn..56S..49N>

K. Nakazato, E. Mochida, Y. Niino and H. Suzuki, "Spectrum of the Supernova Relic Neutrino Background and Metallicity Evolution of Galaxies", The Astrophysical Journal, 査読有, 804 巻, 2015 年, pp. 75-1 - 75-15

DOI: 10.1088/0004-637X/804/1/75

H. Togashi, Y. Takehara, S. Yamamuro, K. Nakazato, H. Suzuki, K. Sumiyoshi and M. Takano, "Equation of state for nuclear matter in core-collapse supernovae by the variational method", Journal of Physics: Conference Series, 査読有, 569 巻, 2014 年, pp. 012058-1 - 012058-5

DOI: 10.1088/1742-6596/569/1/012058

H. Togashi, Y. Takehara, S. Yamamuro, K. Nakazato, H. Suzuki, K. Sumiyoshi and M. Takano, "Equation of state for nuclear matter in core-collapse supernovae by the variational method", Proceedings of 13th Symposium on Nuclei in the Cosmos, 査読有, 2014 年, 169-1

- 169-6

<http://adsabs.harvard.edu/abs/2014nic.confE.169T>

K. Nakazato, "Self-organized criticality in a spherically closed cellular automaton: Modeling soft gamma repeater bursts driven by magnetic reconnection", *Physical Review D*, 査読有, 90 巻, 2014 年, pp. 043010-1 - 043010-6  
DOI: 10.1103/PhysRevD.90.043010

T. Miyatsu, S. Yamamuro, K. Nakazato and M.-K. Cheoun, "Complete equation of state for neutron stars using the relativistic Hartree-Fock approximation", *AIP Conference Proceedings*, 査読有, 1594 巻, 2014 年, pp. 420 - 425  
DOI: 10.1063/1.4874104

K. Nakazato, "Supernova Explosion and Black Hole Formation with Hadron-Quark Phase Transition", *AIP Conference Proceedings*, 査読有, 1594 巻, 2014 年, pp. 278 - 283  
DOI: 10.1063/1.4874082

[学会発表](計 28 件)

中里健一郎, "大質量星の重力崩壊によるブラックホールの形成とニュートリノ放出", 新学術「地下素核研究」第 3 回超新星ニュートリノ研究会, 2017 年 3 月 4 日 ~ 5 日, 東北大学(宮城県仙台市)

K. Nakazato, "Neutrino Observation of Core Collapse Supernovae", *Quarks and Compact Stars 2017*, 2017 年 2 月 20 日 ~ 22 日, 京都大学基礎物理学研究所(京都府京都市)

中里健一郎, "非一様相を考慮した有限温度核物質状態方程式", 第 5 回中性子星核物質ウィンタースクール・研究会, 2017 年 2 月 16 日 ~ 18 日, 福すむ宿 福住旅館(福島県福島市)

中里健一郎, "銀河の金属量進化を考慮した連星ブラックホール合体からの背景重力波", 第 29 回理論懇シンポジウム「重力が織りなす宇宙の諸階層」, 2016 年 12 月 20 日 ~ 22 日, 東北大学(宮城県仙台市)

K. Nakazato, "Inhomogeneous nuclear matter in compact stars", *International Symposium on Neutron Star Matter (NSMAT2016) -Recent Progress in Observations, Experiments and Theories*, 2016 年 11 月 21 日 ~ 23 日, 東北大学(宮城県仙台市)

中里健一郎, 新納悠, 佐合紀親, "銀河の金属量進化を考慮した連星ブラックホール合体からの背景重力波", 日本物理学会, 2016 年 9 月 21 日 ~ 24 日, 宮崎大学(宮崎県宮崎市)

中里健一郎, 新納悠, 佐合紀親, "銀河の金属量進化を考慮した連星ブラックホール合体からの背景重力波", 日本天文学会, 2016 年 9 月 14 日 ~ 16 日, 愛媛大学(愛媛県松山市)

K. Nakazato, E. Mochida, Y. Niino and H. Suzuki, "Detectability and Uncertainties of the Supernova Relic Neutrino Background", 14th Symposium on Nuclei in the Cosmos, 2016 年 6 月 19 日 ~ 24 日, 朱鷺メッセ(新潟県新潟市)

K. Nakazato, "Theoretical study of supernova relic neutrinos", *Revealing the history of the universe with underground particle and nuclear research 2016*, 2016 年 5 月 11 日 ~ 13 日, 東京大学(東京都文京区)

持田恵里, 中里健一郎, 新納悠, 鈴木英之, "SK-Gd による超新星背景ニュートリノの検出可能性とその不定性", 新学術「地下素核研究」第 2 回超新星ニュートリノ研究会, 2016 年 1 月 6 日 ~ 7 日, 富山商工会議所(富山県富山市)

中里健一郎, "原始中性子星における有限温度非一様状態の核物質", 第 28 回理論懇シンポジウム「宇宙における天体形成から生命まで」, 2015 年 12 月 23 日 ~ 25 日, 大阪大学(大阪府豊中市)

中里健一郎, "中性子星の状態方程式", KEK 理論センター研究会「原子核・ハドロン物理の課題と将来」, 2015 年 11 月 24 日 ~ 26 日, 高エネルギー加速器研究機構(茨城県つくば市)

中里健一郎, 富樫甫, 竹原裕太, 山室早智子, 鈴木英之, 鷹野正利, "原始中性子星における有限温度非一様状態の核物質", 日本天文学会, 2015 年 9 月 9 日 ~ 11 日, 甲南大学(兵庫県神戸市)

K. Nakazato, "Spectrum of the Supernova Relic Neutrino Background", *Numazu Workshop 2015: Challenges of modeling supernovae with nuclear data*, 2015 年 9 月 1 日 ~ 4 日, 三島商工会議所(静岡県三島市)

K. Nakazato, "Astrophysical Implications of the Symmetry Energy", Workshop

on Science with SpiRIT TPC, 2015 年 6 月 6 日～7 日, 理化学研究所(埼玉県和光市)

中里健一郎, "超新星ニュートリノの理論予測", 日本物理学会, 2015 年 3 月 21 日～24 日, 早稲田大学(東京都新宿区)

石塚知香子, 中里健一郎, 大西明, "クラスト状態方程式が中性子星半径に与える影響", 日本物理学会, 2015 年 3 月 21 日～24 日, 早稲田大学(東京都新宿区)

林田真悟, 池田一得, 石徹白晃治, 茅野翼, 小汐由介, 中里健一郎, 高橋亘, 梅田秀之, 徐宸原, 吉田敬, "Super-Kamiokande 及び KamLAND による超新星ニュートリノ観測の相補的解析による可能性", 日本物理学会, 2015 年 3 月 21 日～24 日, 早稲田大学(東京都新宿区)

中里健一郎, "原始中性子星における有限温度非一様状態の核物質", 新学術領域研究会「中性子星核物質」, 2015 年 3 月 12 日～14 日, 京都大学基礎物理学研究所(京都府京都市)

中里健一郎, "軟ガンマ線リピーターの再帰的バーストに対する自己組織化臨界モデル", 第 27 回理論懇シンポジウム「理論天文学・宇宙物理学と境界領域」, 2014 年 12 月 24 日～26 日, 国立天文台(東京都三鷹市)

- ⑳ K. Nakazato, "Supernova Explosion and Black Hole Formation with QCD phase transition", Quarks and Compact Stars, 2014 年 10 月 20 日～22 日, Peking University (Beijing, China)
- ㉑ H. Togashi, Y. Takehara, S. Yamamuro, K. Nakazato, H. Suzuki, K. Sumiyoshi and M. Takano, "Variational study of the supernova equation of state with realistic nuclear forces", Fourth Joint Meeting of the Nuclear Physics Divisions of the American Physical Society and The Physical Society of Japan, 2014 年 10 月 7 日～11 日, Hilton Waikoloa Village (Hawaii, USA)
- ㉒ K. Nakazato, "Stellar core collapse with QCD phase transition", Compact Stars in the QCD Phase diagram IV, 2014 年 9 月 26 日～29 日, Kino Prerow (Prerow, Germany)
- ㉓ 中里健一郎, "軟ガンマ線リピーターの再帰的バーストに対する自己組織化臨界モ

デル", 日本天文学会, 2014 年 9 月 11 日～13 日, 山形大学(山形県山形市)

- ㉔ 持田恵里, 中里健一郎, 新納悠, 鈴木英之, "銀河の金属量進化を考慮した超新星背景ニュートリノのスペクトル予測", 日本天文学会, 2014 年 9 月 11 日～13 日, 山形大学(山形県山形市)
- ㉕ 中里健一郎, "星形成史と超新星背景ニュートリノ", 宇宙の歴史をひもとく地下素粒子原子核研究 第一回研究会, 2014 年 8 月 23 日～24 日, 大阪大学(大阪府豊中市)
- ㉖ H. Togashi, Y. Takehara, S. Yamamuro, K. Nakazato, H. Suzuki, K. Sumiyoshi and M. Takano, "Nuclear equation of state for core-collapse supernovae with realistic nuclear forces", 13th Symposium on Nuclei in the Cosmos, 2014 年 7 月 7 日～11 日, Kölcsey Convention Center (Debrecen, Hungary)
- ㉗ H. Togashi, Y. Takehara, S. Yamamuro, K. Nakazato, H. Suzuki, K. Sumiyoshi and M. Takano, "Equation of state for nuclear matter in core-collapse supernovae by the variational method", 3rd International Workshop on "State of the Art in Nuclear Cluster Physics" (SOTANCP3), 2014 年 5 月 26～28 日, 横浜メディア・ビジネスセンター(神奈川県横浜市)

〔その他〕

ホームページ等

<http://asphwww.ph.noda.tus.ac.jp/srn/>

<http://www.np.phys.waseda.ac.jp/EOS/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

中里 健一郎 (NAKAZATO KEN'ICHIRO)

九州大学・基幹教育院・助教

研究者番号: 80609347

### (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

( )