

研究種目：基盤研究(C)
 研究期間：2006年度～2009年度
 課題番号：18540295
 研究課題名（和文）大質量星重力崩壊による天体現象の極限物質科学に基づいた
 系統的解明
 研究課題名（英文）Systematic study on the astrophysical phenomena of gravitational
 collapse of massive stars based on the science of dense matter
 研究代表者 住吉 光介 (SUMIYOSHI KOHSUKE)
 沼津工業高等専門学校・教養科・准教授
 研究者番号：30280720

研究成果の概要（和文）：太陽の10倍以上の質量を持つ星の進化の最期には、重力崩壊が
 起こり超新星爆発のような華々しい天文現象へと繋がる。本研究では、大質量星の違いが
 天文現象へもたらす影響を数値シミュレーションにより明らかにした。崩壊後にブラック
 ホールが誕生する条件を系統的な研究から発見した。超新星と異なり、ブラックホール形
 成過程で短いニュートリノ放出を伴うことを予測した。ニュートリノ観測によりブラック
 ホールを同定し、中心部の高温高密度物質の性質を探ることが可能であることを示した。

研究成果の概要（英文）：We studied the fate of the gravitational collapse of massive stars by
 the numerical simulations. We utilized the nuclear data for the extreme conditions of
 density and temperature to find out the influence of the microphysics. We revealed that
 the black hole formation occurs for massive stars of 40-50 M_{sun} by the systematic study.
 We found that the evolution toward the black hole formation is associated with a short
 burst of neutrinos, which is different from the case of supernova neutrinos. We proposed
 that the detection of such neutrinos is a probe to the extremely dense and hot matter inside
 the central core.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	1,000,000	0	1,000,000
2007年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2008年度	700,000	210,000	910,000
2009年度	700,000	210,000	910,000
年度			
総計	3,400,000	720,000	4,120,000

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、中性子星、ブラックホール、ニュートリノ、状態方程式

1. 研究開始当初の背景

太陽質量の10倍以上の質量を持つ大質量星は、進化の最期に重力崩壊を起こす。重

力崩壊の結果、中心部圧縮の反発により爆発へ転ずる場合が超新星爆発である。1987年に超新星爆発が観測された際には、日本の観測施設で超新星からのニュートリノが世

界で初めて検出された。この発見は2002年の小柴昌俊博士のノーベル物理学賞受賞に繋がった。

こうした超新星爆発は、観測的にはよく知られているが、その爆発メカニズムは、まだ十分に解明されていない。1987年の観測により、ニュートリノが重要な役割を担っていることが確実となったが、現在に至っても数値シミュレーションによる研究では、爆発が起きる主因を明確に示すことができていない。

爆発メカニズム解明の鍵の一つは、極限物質の科学にある。大質量星が重力崩壊に至る際、中心部は非常に高温高密度となる。この状態は実験室では再現できないので、理論的な計算で予測することが必要である。こうした理論計算による原子核データが超新星でどのような役割を果たしているのかを解明するのは、爆発メカニズムを理解する上で欠かせない。

超新星爆発の後には、中心部に高密度天体（中性子星やブラックホール）が残される。中性子星になるのかブラックホールになるのかは、大質量星の性質（質量や構造）によって異なる。質量が大きい場合はブラックホール形成に繋がることが予想されるが、その形成条件はよく判っていない。また、ブラックホールが誕生する場合の天文現象の様相も予測されていない。

上述のような状況において、極限物質の性質と重力崩壊現象の関連、大質量星の性質と中性子星・ブラックホール形成の関連、超新星爆発の例と比してブラックホール形成の際の観測シグナル、を系統的に明らかにすることが課題であった。これらを背景として研究を開始した。

2. 研究の目的

大質量星（太陽質量の10～100倍程度）の進化の最期に起こる重力崩壊は、超新星爆発を起こし中性子星を残すか、ブラックホール形成に至ると考えられているが、何がその運命を分けるのかは、未だに定かではない。鍵となるのは、超新星爆発メカニズムと高密度天体の性質であり、極限状態における物質科学の影響を大きく受ける。

本研究の目的は、厳密なニュートリノ輸送流体計算により、星の重力崩壊から高密度天体形成までのダイナミクスを長時間シミュレーションすることにより、大質量星の最期の運命を系統的に明らかにすることである。

特に、星の質量による違いに着目して中性子星とブラックホールの形成分岐点を定めること、極限物質の性質が爆発や高密度天体に与える影響を検証することにより、超新星ニュートリノによる高密度天体誕生の観測

を目指すと共に極限物質の問題の解明に迫る。

具体的な課題は以下の3つである。

(a)残される高密度天体の性質を系統的に明らかにする。（超新星が起源とされる原始中性子星・ブラックホールの性質を大質量星の重力崩壊から直接に決定して、高密度天体形成のシナリオを星の質量の関数として解明する。）

(b)ニュートリノ観測シグナルを系統的に明らかにする。（重力崩壊及び崩壊後に放出されるニュートリノのエネルギースペクトルや時間変化を決定して、大質量星起源の中性子星・ブラックホール誕生の観測シグナルを予測する。）

(c)高温高密度における物質科学の影響を明らかにする。（ハドロン物質の状態方程式やニュートリノ相互作用が超新星爆発や高密度天体形成に及ぼす影響と不定性を明らかにし、天体観測から極限状況下の物質をプローブする。）

総じて、大質量星の質量に応じた重力崩壊後のシナリオを決定し、残された高密度天体およびニュートリノ放出の性質を予測して、宇宙における大質量星進化過程の全貌を明らかにする。

3. 研究の方法

本研究では、重力崩壊の数値シミュレーションを段階的に行い、大質量星の重力崩壊現象を系統的に解明する。極限物質科学による不定性を定量的に決定した上で、一般相対論のもとでの第一原理計算による最終的な答えを求める。主な研究の項目として

(1) 大質量星の質量の関数として、シナリオを決定して、高密度天体形成・超新星ニュートリノの予測データを提供する。

(2) 極限状況下での物質・ニュートリノ反応の研究を行い、爆発現象や超新星ニュートリノへの影響を探る。

(3) ニュートリノ観測シグナルの予測イベント数を提供して、地上における観測可能性を明らかにする。

ことを手順として研究計画を進めた。

研究代表者は、独自に開発した一般相対論的ニュートリノ輸送流体計算コードを用いて、これまでに例のない長い時間スケールで現象を追う事ができるため、重力崩壊から始めてコアバウンスの後、高密度天体が形成して熱的進化するまでを一貫した数値計算で研究することができた。これは従来の方法では極めて困難であり、それぞれ独立の計算で行われていた。本研究により初めて高密度天体形成の様子を明らかにする事ができ、大質量星の性質と結びつける事ができた。

また、研究代表者は、核データを自ら構築

し世界に公開してきており、ニュートリノ・原子核物理における不定性とその影響を世界に先駆けて逐一調べることが可能であった。さらに原子核・ハドロン物理の理論実験研究者と密接な連携をとることができ、超新星物理において必要な核データの構築を行い、天体現象への関係を明らかにした。

4. 研究成果

本研究により、当初の目的としていた課題を達成することができた。世界に先駆けて、大質量星の最期を系統的に解明して、ブラックホール形成のニュートリノ検出による観測予測を行った。さらに、中心部の高温高密度物質を探る手法を創案して、極限物質と天文現象の相関を明確にした。

これらの成果は、全て海外の査読付き研究雑誌の論文として公表を行なった。また、国際会議の招待講演を行なったほか、国内外の学会・研究会において口頭発表を行い、研究成果を公表した。

スーパーコンピュータを駆使して、研究代表者が行ったニュートリノ輻射流体計算の数値シミュレーションにより、大質量星の重力崩壊から始まるダイナミクスとニュートリノ放出を系統的に解明したことは、天文学・宇宙物理学上の重要な成果である。

特に、ブラックホールが形成される事例が注目すべき天体現象であることを明らかにして、ニュートリノ検出がブラックホール検出および高温高密度物質を探る手がかりであることを提案したことは、ニュートリノ・原子核物理などの他分野において、非常に大きな波及効果を持っており、新たな研究の発展を生む原動力となった。

当初の課題についての研究成果は以下の通りである。

(a)残される高密度天体の性質を系統的に明らかにする。

→大質量星モデルの構造の違いに着目して、系統的な研究を行い、ブラックホール形成に至る場合の条件を明らかにした。様々な質量・金属量・進化モデルを初期モデルとして、重力崩壊の数値シミュレーションを行なった結果、太陽質量の40倍を越える大質量星では、ブラックホール形成がコアバウンスから約1秒で起きることを明確に示した。この際、大質量星の外層の密度分布勾配の違いが重要であることを明らかにした。

(b)ニュートリノ観測シグナルを系統的に明らかにする。

→ブラックホール形成の場合にはニュートリノ放出時間が短く、継続時間は状態方程式に敏感であることを明らかにした。スーパーカミオカンデ・ニュートリノ観測施設における観測シグナルのイベント数予測を行い、観

測が現実的に可能な天体現象であることを示した。ニュートリノ放出の時間は約1秒であり、超新星爆発による超新星ニュートリノ（継続時間は約20秒）と大きく異なる性質を持っており、超新星と区別してブラックホール形成を探ることが可能であることを明確にした。さらに、大質量星のモデルによる相違点を示して、ニュートリノシグナルの普遍的な性質を明らかにした。

(c)高温高密度における物質科学の影響を明らかにする。

→超新星爆発の場合について、中心コアにおける高温高密度物質における原子核の組成について調べた結果、これまで考えられてきたヘリウム原子核の他に、重陽子などの軽元素が大量に存在することを発見した。さらにニュートリノが重陽子と反応した際に、ニュートリノ加熱に寄与するかどうかの計算を行なった結果、衝撃波復活に影響力を持ちうる寄与があることを示した。ブラックホール形成の場合については、状態方程式の柔らかさにより、ニュートリノ放出時間が異なることを発見して、観測により状態方程式を探る新しい方法を提案した。この時、高温高密度状態で発生するストレンジネス・クォーク自由度を考慮した場合について、状態方程式を新たに構築して数値シミュレーションを行なった。これにより、新粒子が出現することがブラックホール形成の引き金になることを発見した。この時のニュートリノ放出の性質の違いを核子の自由度による状態方程式の場合と比較することにより、ハイペロン粒子が出現するかどうかをニュートリノ観測により同定することができることを明らかにした。

これらの研究成果により、宇宙物理学・天文学の基礎となる大質量星の進化過程の詳細が明らかになった。ブラックホール形成の様子をニュートリノ観測という新たな手法で探ることができるようになったのは、大きな進歩である。また、超新星ニュートリノと並び、ブラックホール形成時のニュートリノ観測により高温高密度物質の性質を探る、という新たな手法を提案したことにより、原子核物理と天文学の2つの分野を結ぶ新たな研究発展を生んだ。ストレンジネス物理学やクォーク物理学などの新しい学問分野における実験や理論への波及効果に繋がった。

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22件)

(うち、原著論文16件、国際会議プロシーディングス3件(第一著者)3件(共著者)、すべて査読のある論文雑誌に掲載)

[1] Exploring hadron physics in black hole formations: A new promising target of neutrino astronomy, K. Nakazato, K. Sumiyoshi, H. Suzuki and S. Yamada, Physical Review D81 (2010) 083009 (6 pages).

[2] Emergence of hyperons in failed supernovae: trigger of the black hole formation, K. Sumiyoshi, C. Ishizuka, A. Ohnishi, S. Yamada and H. Suzuki, Astrophysical Journal 690 (2009) L43-L46.

[3] Neutrino deuteron reaction in the heating mechanism of core-collapse supernovae, S. Nakamura, K. Sumiyoshi and T. Sato, Physical Review C80 (2009) 035802 (6 pages).

[4] Dynamics and neutrino signal of black hole formation in non-rotating failed supernovae. II. progenitor dependence, K. Sumiyoshi, S. Yamada and H. Suzuki, Astrophysical Journal 688 (2008) 1176-1185.

[5] Oscillation and future detection of failed supernova neutrinos from black hole forming collapse, K. Nakazato, K. Sumiyoshi, H. Suzuki and S. Yamada, Physical Review D78 (2008) 083014 (14 pages).

[6] Astrophysical implications of equation of state for hadron-quark mixed phase: compact stars and stellar collapses, K. Nakazato, K. Sumiyoshi and S. Yamada, Physical Review D77 (2008) 103006 (12 pages).

[7] Appearance of light clusters in post-bounce evolution of core-collapse supernovae, K. Sumiyoshi and G. Roepke, Physical Review C77 (2008) 055804 (5 pages)

[8] Tables of hyperonic matter equation of state for core-collapse supernovae, C. Ishizuka, A. Ohnishi, K. Tsubakihara, K. Sumiyoshi and S. Yamada, Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics 35 (2008) 085201 (19 pages).

[9] Dynamics and neutrino signal of black hole formation in non-rotating failed supernovae. I. EOS dependence, K. Sumiyoshi, S. Yamada and H. Suzuki, Astrophysical Journal 667 (2007) 382-394.

[10] Neutrino signals from the formation of a black hole: A probe of the equation of state of dense matter, K. Sumiyoshi, S. Yamada, H. Suzuki and S. Chiba, Physical Review Letters 97 (2006) 091101 (4 pages)

(その他、国際会議の研究報告雑誌での論文 17件、共著を含む。)

[学会発表] (計25件)
(口頭発表のうち、国際会議8件、国内会議・学会17件)

[1] 超新星における高温高密度物質とニュートリノ

住吉光介

日本物理学会、岡山大学、2010.3.22

「高密度星の中のストレンジネス」

(シンポジウム依頼講演)

[2] Emergence of hyperons in failed supernovae with short neutrino bursts,

K. Sumiyoshi, K. Nakazato, C. Ishizuka, A.

Ohnishi, S. Yamada and H. Suzuki,

The 10th International Conference on Hypernuclear and Strange Particle Physics (Hyp X), "RICOTTI" in Tokai, Ibaraki, Japan,

2009.9.18

(Invited talk)

[3] 重力崩壊型超新星・ニュートリノ放出と状態方程式

住吉光介

研究会「R プロセス元素組成の統合的理解—宇宙の中の不安定核物理—」

筑波大学、2009.3.10

(招待講演)

[4] 球対称シミュレーションの現状

住吉光介

重力崩壊型超新星と高エネルギー天文学研究会、東京大学、2009.2.2

(招待講演)

[5] 超新星爆発の数値シミュレーションの現状と将来の課題

住吉光介

次世代スーパーコンピューティング・シンポジウム2008

分科会「次世代スパコンで物質と宇宙の進化を探る」

東京都千代田区丸の内 MY PLAZA、2008.9.17

(依頼講演)

[6] ニュートリノ輻射流体計算による重力崩壊型超新星の研究

住吉光介

先駆的科学計算に関するフォーラム 2008～天文科学～

九州大学、2008.7.22

(招待講演)

[7] 超新星爆発の大規模数値シミュレーション

住吉光介

日本物理学会、近畿大学、2008.3.23

(シンポジウム依頼講演)

[8] Equation of state of dense matter for core-collapse supernovae, compact object and neutrino bursts,

K. Sumiyoshi,

The 10th International Symposium on Origin of Matter and Evolution of Galaxies (OMEG07),

Hokkaido University, Japan, 2007.12.5

(Invited talk)

[9] Core-collapse supernovae and nuclear physics,

K. Sumiyoshi,

The 3rd Japanese-German EFES (JSPS)-DFG/GSI workshop on Nuclear Structure and Astrophysics,

Frauenwoerth im Chiemsee, Germany, 2007.9.30

(Invited talk)

[10] Influence of equation of state in supernova simulations: neutrinos from proto-neutron star and black hole formation,

K. Sumiyoshi,

Yukawa International Seminar (YKIS06) 2006,

New Frontiers in QCD - Exotic Hadrons and Hadronic Matter -

YITP, Kyoto, Japan, 2006.12.5

(Invited talk)

[11] Influence of nuclear equation of state in core-collapse supernovae,

K. Sumiyoshi,

In Heaven and on Earth 2006, The Nuclear Equation of State in Astrophysics, McGill University, Montreal, Canada, 2006.7.7

(Invited Talk)

[12] Core-collapse supernovae, neutron stars and black holes in the light of physics of unstable nuclei,

K. Sumiyoshi,

The 6th China-Japan Joint Nuclear Physics Symposium,

Shanghai, China, 2006.5.16

(Invited Talk)

[図書] (計 0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0件)

○取得状況 (計 0件)

[その他]

研究会開催・代表者

[1] Numazu Workshop on Supernova EOS、沼津高専、2007.3

[2] 第2回 Numazu Workshop on Supernova EOS、沼津高専、2008.3

[3] 研究会「クォーク力学・原子核構造に基づく爆発的天体現象と元素合成」

沼津高専、2009.3

研究会・世話人/組織委員会

[1] The 10th. International Symposium on Origin of Matter and Evolution of the Galaxies (OMEG10)

RCNP, Osaka University, 2010.3

Program Advisory Committee

[2] New Frontiers in QCD 2010

Exotic Hadron Systems and Dense Matter Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto, Japan, 2010.1-3

Organizing Committee

[3] Chiral Symmetry in Hadron and Nuclear Physics (Chiral07)

Osaka University, Suita, Osaka, Japan, 2007.11

Organizer

[4] RCNP 研究会「超新星爆発とニュートリノ・原子核反応」

大阪大学核物理研究センター(RCNP), 2007.3
世話人

6. 研究組織

(1) 研究代表者

住吉 光介 (SUMIYOSHI KOHSUKE)

沼津工業高等専門学校・教養科・准教授

研究者番号: 3028720

(2) 研究分担者

無し

(3) 連携研究者

無し