

Graduate School of Advanced Science and Engineering
Waseda University

博士論文概要
Doctoral Dissertation Synopsis

論文題目
Dissertation Title

Explosion mechanism and neutrino reactions in the neutrino driven core-collapse supernovae

ニュートリノ駆動超新星爆発における爆発メカニズムとニュートリノ反応

申請者
(Applicant Name)
Kenichi SUGIURA
杉浦 健一

Department of Pure and Applied Physics, Research on Theoretical Astrophysics

November, 2021

Introduction

宇宙に数多存在する恒星の進化は、その初期質量によって異なる。太陽の約8倍以上の大質量星は、最期に重力崩壊型超新星爆発と呼ばれる巨大な爆発を起こし、その後中心部に原始中性子星やブラックホールなどの高密度天体が形成されることが知られている。しかしながら、超新星の内部構造や爆発メカニズムは天体物理学に残された未解明領域の一つである。超新星爆発は、星の重力崩壊後に星中心部に衝撃波が形成され、その衝撃波が星外層まで到達することにより起こると考えられている。超新星の爆発エネルギーは、主に重力崩壊中に放出されたニュートリノによる超新星物質の加熱によって担われていると考えられており、これをニュートリノ駆動超新星爆発と呼ぶ。超新星からのニュートリノは電磁波で透過できない超新星の中心部の情報を我々に伝えるメッセンジャーとしても期待されている。1987年に大マゼラン雲で起こった超新星1987Aから飛来した約10個のニュートリノをカミオカンデ実験において観測して以降、ニュートリノ天文学が大きく開花しつつある。Hyper-Kamiokande, JUNO, DUNE等の次世代ニュートリノ検出器の建設も進み、次なる近傍ニュートリノ駆動超新星からのニュートリノシグナルを捕らえる準備が整ってきている。

一方でニュートリノ駆動超新星の理論的研究は、未だ発展途上にある。古くから球対称性を仮定したニュートリノ駆動超新星数値計算は爆発に成功しないことが知られており、近年は大規模数値シミュレーションを用いた多次元数値計算が精力的に行われ、音波、対流、乱流、回転等の多次元的効果がニュートリノ加熱に加わることにより、超新星がうまく爆発することが明らかになってきた。しかしながら、多次元的効果のうち、何が爆発の引き金であるかの理解が未だ不十分である上に、そもそも超新星数値計算に取り込まれているニュートリノ物理が単純化されすぎているという問題点も抱えている。

本論文では、ニュートリノ駆動超新星の理論的解明を目指して行った(1)多次元的効果が超新星爆発における停滞衝撃波の不安定性へ与える影響の線形解析を用いた研究、(2)ニュートリノ駆動超新星において中心的な役割を果たすニュートリノ-物質間の反応の精密化とそれがニュートリノシグナルへ与える影響の解明、の二つの研究成果についてまとめる。

超新星における停滞衝撃波不安定性の線形解析

超新星内部における衝撃波の挙動が、超新星爆発の理解の鍵を握っている。重力崩壊後に星中心部に形成された衝撃波は、外向きに伝播を始めるが、物質の降着や鉄の光分解によるエネルギー損失によって勢いを失い、一度星内部で停滞することが知られている。これを停滞衝撃波と呼ぶ。停滞衝撃波は流体力学的に不安定で、衝撃波面の変形を起こし非球対称な爆発を促進されることが数値計算により明らかになっている。本研究では、衝撃波面の不安定性に寄与する多次元的効果を、停滞衝撃波面の線形安定性解析を行うことで、定性的、系統的な評価を行った。特に通常行われるような局所的な線形解析ではなく、基礎方程式をラプラス変換することで、停滞衝撃波から原始中性子星表面までわたる大局的な領域についての線形解析を行っている点が

本研究の特色である。

まず着目したのは、音響メカニズムと呼ばれる現象である。これは重力崩壊中に形成される原始中性子星が、浮力を復原力とするg-モード振動を起こし、降着流の中に音波を放出する。この音波のお運動エネルギーが散逸し熱に換わることにより、停滞衝撃波下流域を加熱し衝撃波の復活を助けるという現象である。本研究では原始中性子星表面から音波を注入することにより、衝撃波面の不安定性が励起されるかを調べた。そして、ニュートリノ光度が小さくニュートリノ加熱が十分ではないような条件下でも、音波注入による追加の加熱により、衝撃波面の不安定性が励起されることが明らかになった。また、この衝撃波面の変形のうち、双極的、四重極的な大きなスケールの変形がより不安定になりやすいことも明らかになった。さらに、停滞衝撃波の固有振動数とPNSから放射される音波の振動数が近い時、両者が共鳴を起こし不安定性が特に増大することも明らかになった。

次に着目したのは、Lepton-number Emission Self-sustained Asymmetry (LESA)と呼ばれる現象である。これは電子型ニュートリノと電子型反ニュートリノが非対称に放出され、降着流もこの非対称性を反映して変形を起こし、ニュートリノ放射の非対称性が長い時間維持されるという、数値計算により見つかった現象である。この現象は、ニュートリノと流体が非線型に相互作用した現象であるが、線形解析の段階でこの不安定性が説明可能であることを示した。具体的には、ニュートリノの非対称な放出が衝撃波の変形を引き起こし、降着流の温度や電子数比が非対称的になり、原始中性子星に降着した際に非対称なニュートリノ放出を励起する、という自律的な機構があることが判明した。

ニュートリノ反応の抜本的な改善

ニュートリノ輸送の正確な取り扱いも、ニュートリノ駆動超新星の理解には必要不可欠である。特にニュートリノの吸収、放出、散乱反応の正確な取り扱いは、ニュートリノの総数やスペクトル、平均エネルギーを決め、ニュートリノ加熱がどれほど起こるかを左右すると共に、ニュートリノ駆動超新星からのニュートリノシグナルを決めるという意味でも重要である。

まず本研究では、核子（中性子または陽子）とニュートリノの反応率の抜本的な改善を行った。核子は高温高密度環境下では互いに強い相互作用をしており、核子の分散関係は変更を受ける。これは反応率に大きく影響を及ぼすことが知られているが、現在我々の研究グループが用いている数値計算コードには取り入れられていない。本研究では平均場近似を用いることによって核子の分散関係の影響を取り入れた。超新星中心部で実現される熱力学状態をいくつか選んで反応率を計算した結果として、

(1) 中性子と陽子の平均ポテンシャルに差が生じることで、電子型、ミュー型ニュートリノの中性子への吸収が大きく促進されること、(2)原始中性子星中心部において生じる平均ポテンシャルの差が、中性子崩壊の逆反応を起こしやすくすること、(3) 高温高密度領域では有効質量が小さくなる影響で、核子散乱反応が大きく促進されること、が明らかになった。また、核子の反跳、weak-magnetism、擬スカラー項の補

正、核子の形状因子の運動量移行量依存性を新たな補正として加えた。Weak-magnetismとは核子をもつ異常磁気モーメントに起因する補正で、ニュートリノの反応率を大きくし、反ニュートリノの反応率を小さくすることが明らかになった。核子の形状因子の運動量移行量依存性は、どの反応についても反応率を小さくする効果があることも判明した。そして、擬スカラー項の補正は反応率に影響を与えないことがわかった。

古くから冷えた中性子星内部においてミューオンが存在することが知られているが、近年、超新星爆発初期においてもミューオンが生成される可能性が注目を集めている。ミューオン生成は超新星爆発を助けることが指摘されているが、爆発以降の原始中性子星からのニュートリノ放射に与えるミューオンの影響についてはまだ調べられていない。ニュートリノ駆動超新星からのニュートリノの半分は爆発後の数分にわたる原始中性子星からの冷却段階で放出されると見積もられており、近傍超新星のニュートリノ観測を見越すと、この冷却段階でのミューオンの役割の理解も重要である。そこで原始中性子星冷却段階の熱力学状態を取り出して、ミューオンの関わるニュートリノ反応の反応率について詳細に調べた。各フレーバーのニュートリノに関して以下の結果を得た。電子型ニュートリノに関して、 $\nu_e + \mu^- \rightarrow \nu_\mu + e^-$ が重要で特に入射ニュートリノエネルギーが低い時に、ニュートリノの中性子捕獲よりも重要な反応である。電子型反ニュートリノと μ 型ニュートリノについては、 $\bar{\nu}_e + e^- + \nu_\mu \rightarrow \mu^-$ が低エネルギーで重要である。そして μ 型反ニュートリノについては $\nu_\mu + e^- \rightarrow \nu_e + \mu^-$ が低エネルギーで重要である。 τ 型(反)ニュートリノに関しては、ミューオン散乱がミューオンの関わる反応の中では最も大きい反応率を持つが、中性子散乱と比較して無視できる程度である。本研究では、これらの反応率を踏まえて、ニュートリノの拡散係数も評価した。原始中性子星の冷却段階ではニュートリノは極めて頻繁に反応を起こし、拡散的なニュートリノ輸送が実現されており、冷却タイムスケールが拡散係数から評価できるからである。そして、ミューオンが存在することにより、電子型(反)ニュートリノと μ 型(反)ニュートリノの拡散係数が小さくなり、ニュートリノエネルギー流速が抑えられることがわかった。特に μ 型反ニュートリノが大きく影響を受けることも明らかになり、ミューオンが一時的にニュートリノエネルギーを溜め込む役割を果たし、原始中性子星冷却を遅らせる可能性があることが判明した。

List of research achievements for application of Doctor of Science, Waseda University

Full Name : 杉浦 健一

seal or signature

Date Submitted(yyyy/mm/dd): 2022/9/12

種別 (By Type)	題名、発表・発行掲載誌名、発表・発行年月、連名者（申請者含む） (theme, journal name, date & year of publication, name of authors inc. yourself)
Academic papers	<p>○Title: Muon-related neutrino interactions and their relevance for proto-neutron star cooling Journal: Progress of Theoretical and Experimental Physics Publication date: September 2022 Authors: <u>Ken'ichi Sugiura</u>, Shun Furusawa, Kohsuke Sumiyoshi, Shoichi Yamada</p> <p>○ Title: Linear Analysis of the Shock Instability in Core-collapse Supernovae: Influences of Acoustic Power and Fluctuations of Neutrino Luminosity Journal: The Astrophysical Journal, Volume 874, Number 1, Page 28 Publication date: March 2019 Authors: <u>Ken'ichi Sugiura</u>, Kazuya Takahashi, Shoichi Yamada</p>
Lectures	<p>Title: 原始中性子星におけるミューオンとそのニュートリノシグナルへの影響 Conference: 日本天文学会 2021年春季年会 Place: オンライン, Date: 2021年3月 Authors: <u>杉浦健一</u>, 山田章一, 古澤峻, 中里健一郎, 鈴木英之, 住吉光介</p> <p>Title: 超新星爆発におけるミューオン生成とニュートリノシグナルへの影響 Conference: 第7回超新星ニュートリノ研究会 Place: オンライン, Date: 2021年1月 Authors: <u>杉浦健一</u>, 山田章一, 古澤峻, 中里健一郎, 鈴木英之</p> <p>Title: Muon creation in proto-neutron stars and its implication for neutrino signal in cooling phase Conference: The Evolution of Massive Stars and Formation of Compact Stars: from the Cradle to the Grave Place: Tokyo Japan, Date: February 2020 Authors: <u>Ken'ichi Sugiura</u>, Hideyuki Suzuki, Ken'ichiro Nakazato, Shoichi Yamada</p> <p>Title: Corrections of charged current neutrino reaction rates and its effects on PNS cooling Conference: Multi-dimensional Modeling and Multi-Messenger observation from Core-Collapse Supernovae Place: Fukuoka, Japan, Date: October 2020 Authors: <u>Ken'ichi Sugiura</u>, Ken'ichiro Nakazato, Shoichi Yamada</p>

List of research achievements for application of Doctor of Science, Waseda University

Full Name : 杉浦 健一

seal or signature

Date Submitted(yyyy/mm/dd): 2022/9/12

種類別 (By Type)	題名、発表・発行掲載誌名、発表・発行年月、連名者（申請者含む） (theme, journal name, date & year of publication, name of authors inc. yourself)
	<p>Title: 原始中性子星冷却におけるニュートリノシグナルへのweak-magnetismの影響 Conference: 日本天文学会 2019年秋季年会 Place: 熊本, Date: 2019年9月 Authors: <u>杉浦健一</u>, 中里健一郎, 山田章一</p> <p>Title: Linear Analysis of Shock Instability in CCSNe ~ Effects of Acoustic Injection and LESA~ Conference: FOE19 Fifty-one Erg Place: Raleigh, North Carolina, USA, Date: May 2019 Authors: <u>Ken'ichi Sugiura</u>, Kazuya Takahashi, Shoichi Yamada</p> <p>Title: Linear Analysis of Shock Instability in Core-collapse Supernovae: Effects of fluctuations from inside Conference: RIKEN - RESCEU Joint Seminar 2019 Place: Tokyo Japan, Date: March 2019 Authors: <u>Ken'ichi Sugiura</u>, Kazuya Takahashi, Shoichi Yamada</p> <p>Title: Linear Analysis of Shock Dynamics in CCSNe ~Effects of Acoustic Injection and LESA~ Conference: 第31回理論懇シンポジウム Place: 京都, Date: 2018年12月 Authors: <u>Ken'ichi Sugiura</u>, Kazuya Takahashi, Shoichi Yamada</p> <p>Title: Linear Analysis of Shock Dynamics in CCSNe ~Effects of Acoustic Injection and LESA~ Conference: Deciphering multi-Dimensional nature of core-collapse Supernovae via Gravitational-Wave and neutrino signatures (SNeGWv2018) Place: 富山, Date: 2018年12月 Authors: <u>Ken'ichi Sugiura</u>, Kazuya Takahashi, Shoichi Yamada</p> <p>Title: 原始中性子星におけるニュートリノシグナル Conference: 第48回天文・天体物理若手夏の学校 Place: 愛知, Date: 2018年7月 Authors: <u>杉浦健一</u>, 高橋和也, 山田章一</p>

List of research achievements for application of Doctor of Science, Waseda University

Full Name : 杉浦 健一

seal or signature

Date Submitted(yyyy/mm/dd): 2022/9/12

種類別 (By Type)	題名、発表・発行掲載誌名、発表・発行年月、連名者（申請者含む） (theme, journal name, date & year of publication, name of authors inc. yourself)
	<p>Title: Linear Analysis of Shock Dynamics in CCSNe ~Effects of Acoustic Injection and LESA~ Conference: Physics of Core-Collapse Supernovae and Compact Star Formations Place: Tokyo, Japan, Date: March 2018 Authors: <u>Ken'ichi Sugiura</u>, Kazuya Takahashi, Shoichi Yamada</p> <p>Title: 超新星コアにおける流体力学的不安定星の線形解析 Conference: 第47回天文・天体物理若手夏の学校 Place: 長野, Date: 2017年7月 Authors: <u>杉浦健一</u>, 高橋和也, 山田章一</p>