

博士論文審査報告書

論文題目

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

Kenichi SUGIURA
杉浦 健一

Department of Pure and Applied Physics

Research on Theoretical Astrophysics

2022年10月

重力崩壊型超新星は、金属含有率が太陽と同程度の環境下で、太陽質量のおよそ8倍以上の質量を持った大質量星がその準静的進化の最後に起こすコアの重力崩壊とそれに伴う外層の爆発的放出現象である。爆発後には通常中性子星が残ると考えられているが、爆発に失敗した場合や、成功したとしてもその後大量の質量降着がある場合などには、ブラックホールが形成されると思われている。後者がどの親星に対して起こるのか、そしてそれはどのように観測され得るのかについては現在も盛んに研究されている重要課題の一つである。

いずれの場合でも、それが我々の天の川銀河内で起こった場合は、いわゆるマルチメッセンジャー観測の重要な対象となる。実際、 γ 線から電波にいたるあらゆる波長の電磁波による観測に加え、現在ではニュートリノと重力波による詳細な観測が可能である。重力波については、LIGO、Virgo、KAGRAによる同時観測から重力波の波形のみならずその偏向に関する情報も得られる可能性があり、例えば原始中性子星形成直後の自転周期が明らかになるかもしれない。一方、ニュートリノについても、SuperNova Early Warning System(SNEWS)に代表されるような、複数のニュートリノ検出器がネットワークを組んで互いに情報を共有、発信する仕組みが出来上がっており、千載一遇のイベントに対する万全の備えが構築されつつある。

重力崩壊型超新星は宇宙全体で見れば決して稀な現象ではないが、ニュートリノや重力波で観測が可能なものとなると実質的に天の川銀河内のものに限られる。このため、通常天文現象のように理論モデルを観測によって較正することが難しく、特に high-fidelity simulation といわれる、できるだけ精密に物理過程を取り込んだ大規模な数値計算が理論的な研究を牽引してきた。最近では、特別な対称性を課すことなく三次元のシミュレーションが行われるようになり、これまでの電磁波観測から推定されている放出ガスの質量や運動エネルギーとの系統的な比較が可能になりつつある。

一方で、現在の最先端モデルで考慮されている物理過程は、相対論的ニュートリノ輸送のような巨視的なものから、高密度高温での核物質の状態方程式やニュートリノと物質との弱い相互作用といった微視的なものまで極めて多岐にわたっている。そのような数値計算は、high-fidelity simulation と謳ってはいるものの、一概にその信頼性は十分とは言えず、中には精度が疑わしいものあり、その精査が始まっている。

本学位論文は、こうしたことを背景に、超新星爆発とそれに続く原始中性子星の冷却段階において重要な役割を果たしていると思われる物理過程をそれぞれ一つずつ抽出し、個々に詳しく調べている。具体的には、超新星爆発段階では原始中性子星の固有振動が生み出す音波に着目し、それが停滞衝撃波の安定性に与える影響を線形解析の手法で調べている。一方、原始中性子星の冷却段階では、近年になってようやく注目され始めた μ 粒

子とニュートリノの間の弱い相互作用による反応率を数値的に評価し、様々な反応チャンネルの相対的な重要度を定量的に明らかにしている。いずれも大規模なシミュレーションの結果を理解する上で重要かつ有用な基礎的研究である。本学位論文は4つの章と2つの補遺から構成されている。以下、各章の概要とその評価を述べる。

第1章はイントロダクションで、大質量星コアの重力崩壊から反跳、衝撃波の停滞と復活、そして原始中性子星の形成と冷却にいたる一連の進化と、そこで重要になる物理過程について簡潔にまとめている。また、衝撃波の復活を引き起こす上で重要となる非球対称な流体運動とニュートリノ放出および、原始中性子星の冷却を考える上で基礎となる素過程についても、それぞれ一つのセクションを割いて説明しており、いずれも便利なレビューとなっている。

第2章以降が申請者の行った研究である。まず第2章では、超新星爆発において一度停滞した衝撃波が復活する上で重要と考えられている停滞衝撃波下流における非球対称な流体力学不安定の成長に対する、原始中性子星の固有振動に起因する音波の影響について調べている。乱れた降着流は原始中性子星に衝突して止まるが、その際に原始中性子星の固有振動を誘起する。その振動は降着流中に音波を射出し、元の非球対称な運動に無視できない影響を及ぼすと考えられている。これらは大規模シミュレーションの結果から推測されたことだが、その機構を線形解析で詳細に明らかにしようというのが申請者の行ったことである。

そのために、申請者はまず停滞衝撃波を通過する球対称定常降着流を数値的に構築し、それを無摂動状態にした線形摂動方程式をラプラス変換により解いている。原始中性子星が作る音波は、内部境界条件として与えられている。この系には内在的な不安定モードがあり、それはラプラス変換後、虚軸の右に極として現れ、その位置がモードの成長率と角振動数を与える。音波は初期揺らぎを生成するとともに、その成長率などの値に変更を加える。申請者の研究結果によると、音波の存在は個々の不安定モードの成長率を高めるとともに、不安定モードが出現するニュートリノ臨界光度も引き下げるため、衝撃波の復活を助ける。また、初期揺らぎは特定のモードに対して選択的に大きくなることを明らかにした一方、ニュートリノ光度の揺らぎの影響は小さいことも示した。さらに、ニュートリノのグローバルな非対称性が定常的に生じる **LESA(Lepton-number Emission Self-sustained Asymmetry)**現象が線形レベルでも生じることを明らかにした。これらはいずれも大規模シミュレーションの結果と一致しており、それを物理学的に基礎付ける重要な結果として高く評価できる。

続く第3章で申請者は、原始中性子星の冷却における μ 粒子の影響を調べている。 μ 粒子は質量が100MeVを超えるため親星には存在せず、超新星コアにおいても、コア反跳後に生成されるようになり、原始中性子星が

冷えるに従って増えていくが、その存在量は電子を超えることがない。このため当初は無視されていたが、近年超新星爆発や原始中性子星冷却の計算に取り入れられるようになり、一躍注目を浴びるようになった。申請者は今後の観測の可能性を考慮し、原始中性子星冷却のはじめの約1分間に注目し、ニュートリノ球および μ 粒子が最も多く存在すると考えられる最高温度地点での熱力学状態をいくつか取り出し、 μ 粒子に関わる全ての反応と、参照用に核子に関わる重要反応に対する反応率を数値的に評価し、 μ 粒子の重要性を調べている。その際、後者における核子の微小な反跳、形状因子、平均場レベルでの分散関係の補正を考慮している。

その結果、ニュートリノ球付近では、電子型反ニュートリノと μ 型ニュートリノに対しては μ 粒子崩壊の逆反応が、また電子型ニュートリノと μ 型反ニュートリノに対してはフレーバー交換反応がそれぞれ最も重要となることを明らかにした。一方、より深部の最高温度地点では、同様の傾向が見られるものの、全般に μ 粒子が関与する反応は核子のそれに比べ抑制されることも明らかにした。さらに、核子の関連する反応では、平均場レベルでの分散関係の変更が最も重要な影響を与えるという先行研究と一致した結果を得ている。これらの結果は、シミュレーションのみが先行している現状で、その結果を正しく理解する上で重要な基礎情報を与えるものとして高く評価されるべきものである。

第4章は結論で、本学位論文で得られた知見がまとめられている。

以上述べてきたことをまとめると、本学位論文で申請者は、超新星爆発段階とそれに続く原始中性子星冷却段階において、重要であるにもかかわらずそれ自体の研究が十分でなかった、停滞衝撃波と降着流の安定性への音波の影響と μ 粒子の関与するニュートリノ反応に注目し、その振る舞いを詳細かつ定量的に調べている。その結果は、大規模シミュレーションの結果を理解する上で欠かせない基礎的な知見を与えるとともに、今後のこの分野の研究を促進するものともなっており重要である。よって、本論文は博士（理学）の学位にふさわしいものと認める。

2022年9月

審査員

主査	早稲田大学教授	博士（理学）東京大学	山田 章一
	早稲田大学教授	博士（理学）早稲田大学	辻川 信二
	早稲田大学名誉教授	理学博士（京都大学）	前田 恵一
	東京理科大学教授	理学博士（東京大学）	鈴木 英之