

令和 5 年 5 月 13 日現在

機関番号：37111

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2021～2022

課題番号：21K20369

研究課題名（和文）重力崩壊型超新星爆発のシミュレーションで探るアクシオンの性質

研究課題名（英文）Exploring Axion-like Particles with Core-collapse Supernova Simulations

研究代表者

森 寛治 (Mori, Kanji)

福岡大学・公私立大学の部局等・ポスト・ドクター

研究者番号：50910816

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）：本研究では、アクシオンと呼ばれる未発見の素粒子を、超新星爆発を用いて探索する手法を開発した。報告者は、アクシオンの生成と消滅によるプラズマの冷却・加熱効果を取り入れた超新星シミュレーションを実施し、観測可能量に対する影響を調べた。その結果、超新星の爆発エネルギーはアクシオン加熱によって従来のモデルより大きくなること、その一方でニュートリノや重力波の信号はより小さくなることを定量的に明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

素粒子物理学の目標は、この世界の最も基本的な構成要素を明らかにすることである。これまで、加速器のような巨大な実験装置を用いた研究が素粒子物理学を牽引し、世界の基本構造に対する人類の理解は飛躍的に進歩してきた。一方、そのような大規模な研究を行うためには多額の費用と時間を要するため、さらなる進展のためには異なるアイデアに基づく代替手法が必要とされている。その一つが、本研究で報告者が開拓している、天体現象を用いた手法である。本研究を通して、超新星の爆発エネルギーのような観測可能量が、地上実験で捉えることのできなかった未発見の粒子を探索する上で有用であることが明らかになった。

研究成果の概要（英文）：In this study, we developed a method to search for undiscovered elementary particles called axion-like particles using supernova explosions. We performed supernova simulations incorporating the cooling and heating effects due to the production and absorption of axion-like particles, and investigated the effects on the observable signatures. The results quantitatively show that the explosion energy is larger than in conventional models due to the additional heating, whereas the neutrino and gravitational wave signals are smaller.

研究分野：理論宇宙物理学

キーワード：アクシオン 超新星爆発

1. 研究開始当初の背景

アクシオンは、量子色力学の強い CP 問題と呼ばれる問題を解決するために 1970 年代に導入された未発見の素粒子である。アクシオンは暗黒物質の有力候補の一つとして挙げられているため、この粒子の探索は素粒子物理と宇宙論の両方にわたる重要性を持つ。

超新星爆発の内部では数千億度に達する極めて高温の環境が実現される。こうした極限環境ではアクシオンのような未発見の素粒子が生成され、近傍超新星イベントからの電磁波・ニュートリノ信号に痕跡が残る可能性がある。超新星は新物理のプロブとして最も有望な天体現象であるため、近傍超新星 SN 1987A が出現した直後に集中的に研究がなされた(e.g. 文献)。21 世紀に入ると、計算機の能力の向上とともに、超新星の理論的理解が飛躍的に進展した。こうした超新星の理論的研究を通して得られた精密な超新星モデルを用いて、アクシオンの性質を探究する研究が進みつつある(e.g. 文献)。このような研究ではニュートリノ輸送の取り扱いなどがアップデートされた最新のモデルが用いられている一方、超新星モデルそのものにアクシオン輸送の効果が取り入れられていないという問題点がある。

2. 研究の目的

本研究の目的は、超新星爆発や大質量星の内部で生成されうるアクシオンの影響を数値シミュレーションを用いて徹底的に調査し、将来の天文観測によってアクシオンの兆候を発見する可能性を探ることである。

3. 研究の方法

報告者は、まず光子と相互作用するアクシオン(またはアクシオン様粒子)の生成率を、天体プラズマの温度・密度、組成の関数として計算するプログラムを作り、以下の 3 つの場合に応用した。

- (1) 超新星シミュレーションコード 3DnSNe(文献)に対してアクシオンによる物質の冷却・加熱効果を組み込み、アクシオンが超新星のダイナミクスに及ぼす影響を調べた(文献)。
- (2) アクシオンと光子の相互作用が十分に強い場合は、アクシオンの生成によって大質量星内部の物質の状態方程式が軟らかくなり、新種の不安定性を引き起こす可能性が指摘されている(文献)。この現象の観測可能性を議論するため、恒星進化シミュレーションコード Modules for Experiments in Stellar Astrophysics (MESA; 文献)に対してアクシオンの効果を組み込み、光度曲線に対する影響を議論した(文献)。
- (3) アクシオン生成率は温度に敏感に依存するため、重力崩壊直前の大質量星からは大量のアクシオンが生成されると期待される。こうしたアクシオンは星間磁場によってガンマ線に変換されうるため、ガンマ線望遠鏡によって検出できる可能性がある。そこで、報告者は MESA を用いて作成した恒星進化モデルに基づきアクシオンの生成量を計算し、地球で観測されうるガンマ線信号を議論した(文献)。

4. 研究成果

- (1) アクシオン輸送を考慮した重力崩壊型超新星モデルの開発(文献)

重力崩壊を起こした大質量星の中心部では、温度が数千億度に達する非常に極端な環境が実現する。このような環境では光子との相互作用により大量のアクシオンが生成される可能性がある。

アクシオンは物質ときわめて弱い相互作用しかしないため、周囲の高密度物質に妨げられずに移動することができると考えられる。この際に物質からエネルギーを持ち出してしまいうため、アクシオンが活発に生成される半径 10 km の周辺では冷却効果として現れる。一方、質量 100 MeV 程度の重いアクシオンは不安定粒子であり、恒星の内部で 2 つの光子に崩壊する。そこで生成された光子は周囲の物質に吸収されるため、アクシオンの崩壊は加熱効果として現れる。

一方、大質量星の重力崩壊に関するこれまでの 1 次元シミュレーションでは、コアの反跳によって生じた衝撃波が失速してしまうことが知られていた。ところが、アクシオンの崩壊による加熱効果が存在すれば、反跳衝撃波が復活に転じて超新星爆発が成功する可能

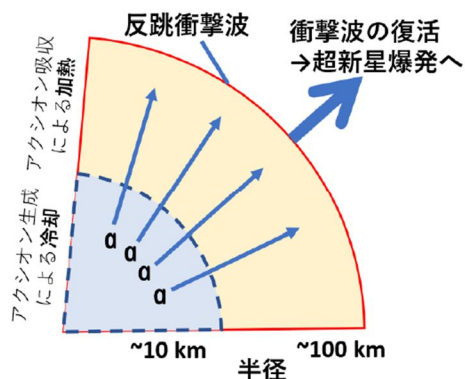


図 1. 恒星中心部のアクシオン輸送の模式図。

性がある(図 1)。このシナリオを検証するために、報告者はアクシオン輸送を組み込んだ 1 次元重力崩壊モデルを開発した。

図 2 は、反跳衝撃波の半径の時間発展を表している。この図を見ると、アクシオンを考慮しない標準的なモデルでは反跳衝撃波が停滞していることが分かる。これは従来の研究と無矛盾である。一方、アクシオンと光子の相互作用を仮定した場合、結合定数が一定の値より大きいときに衝撃波が復活に転じていることが分かる。

さらに、報告者はアクシオン加熱により衝撃波が復活したモデルの爆発エネルギーを見積もった。その結果、結合定数が大きい場合には爆発エネルギーが 10^{51} erg を大きく上回ることが明らかになった。重力崩壊型超新星の爆発エネルギーはおよそ 10^{51} erg 程度であることが天文観測によって知られているため、このような非常に大きい爆発エネルギーをもたらすアクシオンのパラメータは排除されるべきであると考えられる。

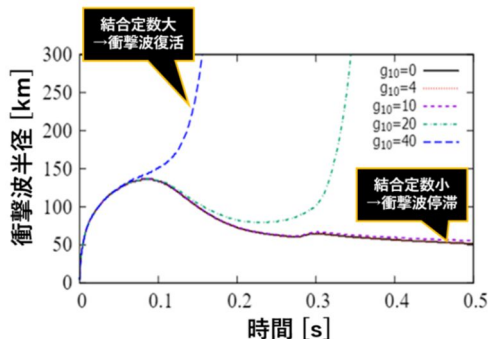


図 2. 反跳衝撃波の半径の時間発展。アクシオン質量として 100 MeV が仮定されている。 g_{10} は 10^{-10} GeV $^{-1}$ を単位としてアクシオン・光子結合定数である。

(2) アクシオンによる状態方程式の修正を考慮した電子対不安定性型超新星モデルの開発(文献)

質量が太陽の 140 倍より重い恒星は、その進化の途上で電子・陽電子対の生成を起し、核反応の暴走によって電子対不安定性型超新星(PISN)と呼ばれる爆発を引き起こすと考えられている。一方で、もしアクシオンの質量が電子・陽電子対の質量より小さい場合、アクシオンが電子・陽電子対よりも低温で生成されるため、電子対不安定性型超新星に類似した新たな突発天体(アクシオン不安定性超新星; AISN)を引き起こす可能性がある。そこで、本研究ではアクシオン不安定性超新星の光度曲線を予言し、今後の天文観測との比較によってアクシオンの性質に制限を付ける可能性を検討した。その結果、AISN は PISN より爆発エネルギーが大きくなる傾向にあり、そのため光度曲線がピークに至るまでの時間が短いことを明らかにした。将来 PISN/AISN の詳細な光度曲線が観測された場合、アクシオン質量に対して制限を課すことが期待される。

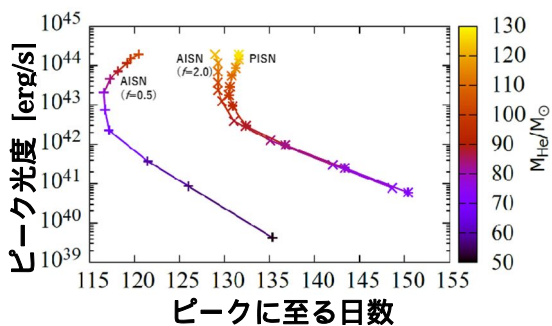


図 3. AISN と PISN の光度曲線の性質。ここで f はアクシオン質量と電子・陽電子対質量の比であり、アクシオンと電子の質量が等しいモデルでは光度曲線のピークまでの時間が 15 日程度短いことが分かる。

(3) 超新星前兆アクシオンの観測可能性の検証(文献)

一般に、大質量星中心部の温度は、重力崩壊に近づくにつれて高くなる傾向にある。そのため、重力崩壊直前の大質量星では大量のアクシオンが生成され、星間磁場との相互作用によってガンマ線として地球に飛来する可能性がある。そこで、本研究ではベテルギウスが重力崩壊を起こす直前に、質量 neV 以下の軽いアクシオンの兆候がガンマ線として観測される可能性を議論した。その結果、前兆ニュートリノを用いた超新星アラートを受けて、次世代 MeV ガンマ線望遠鏡によってベテルギウスを 1 日程度観測することができれば、アクシオンに対して独立な制限を課することができることを明らかにした。

< 引用文献 >

- Raffelt, Physics Report 198 (1990) 1.
- Lucente et al., Journal of Cosmology and Astroparticle Physics 2020 (2020) 008.
- Takiwaki, Kotake & Suwa, MNRAS 461 (2016) L112.
- Mori, Takiwaki, Kotake, & Horiuchi, Physical Review D 105 (2022) 063009.
- Sakstein, Croon & McDermott, Physical Review D, 105 (2022) 095038.
- Paxton et al., The Astrophysical Journal Supplement 192 (2011) 3.
- Mori, Moriya, Takiwaki, Kotake, Horiuchi & Blinnikov, The Astrophysical Journal 943 (2023) 12.
- Mori, Takiwaki & Kotake, Physical Review D 105 (2022) 023020.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 4件/うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Mori Kanji、Takiwaki Tomoya、Kotake Kei	4. 巻 105
2. 論文標題 Presupernova ultralight axionlike particles	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 23020
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevD.105.023020	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Mori Kanji、Takiwaki Tomoya、Kotake Kei、Horiuchi Shunsaku	4. 巻 105
2. 論文標題 Shock revival in core-collapse supernovae assisted by heavy axionlike particles	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 63009
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevD.105.063009	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Mori Kanji	4. 巻 260
2. 論文標題 Axion-like Particles from Nearby Type Ia Supernovae	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 EPJ Web of Conferences	6. 最初と最後の頁 06003 ~ 06003
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1051/epjconf/202226006003	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Mori Kanji、Moriya Takashi J.、Takiwaki Tomoya、Kotake Kei、Horiuchi Shunsaku、Blinnikov Sergei	4. 巻 943
2. 論文標題 Light Curves and Event Rates of Axion Instability Supernovae	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 12 ~ 12
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3847/1538-4357/acaaff	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 Tsuruta Sachiko, Kelly Madeline J., Nomoto Ken'ichi, Mori Kanji, Teter Marcus, Liebmann Andrew C.	4. 巻 945
2. 論文標題 Ambipolar Heating of Magnetars	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 151 ~ 151
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/acbd38	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Famiano Michael A., Mathews Grant, Balantekin A. Baha, Kajino Toshitaka, Kusakabe Motohiko, Mori Kanji	4. 巻 940
2. 論文標題 Evolution of Urca Pairs in the Crusts of Highly Magnetized Neutron Stars	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 108 ~ 108
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac9bf3	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計15件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 8件)

1. 発表者名 Kanji Mori
2. 発表標題 Axion-like Particles from Nearby Type Ia Supernovae
3. 学会等名 16th International Symposium on Nuclei in the Cosmos (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kanji Mori
2. 発表標題 Pre-supernova Axion-like Particles and Their Detectability
3. 学会等名 Workshop on Very Light Dark Matter 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kanji Mori
2. 発表標題 Heavy Axion-like Particles from Nearby Type Ia Supernovae
3. 学会等名 SuperVirtual 2021 -From Common to Exotic Transients- (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kanji Mori
2. 発表標題 Axion-like Particles from Core-collapse Supernovae
3. 学会等名 Probe into core-collapse SuperNovae via Gravitational-Wave and neutrino signals (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 森寛治
2. 発表標題 超新星前兆アクシオンとその検出可能性
3. 学会等名 第34回理論懇シンポジウム「挑戦的アイデアで広げる宇宙物理の可能性」
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 森寛治, 滝脇知也, 固武慶, 堀内俊作
2. 発表標題 超新星爆発に対するアクシオン加熱の影響
3. 学会等名 日本天文学会2022年春季年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kanji Mori
2. 発表標題 Core-collapse Supernova Models with Heavy Axion-like Particles
3. 学会等名 Unraveling the History of the Universe and Matter Evolution with Underground Physics (UGAP2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kanji Mori
2. 発表標題 Shock Revival in Core-collapse Supernovae Assisted by Heavy Axion-like Particles
3. 学会等名 Pre-workshop on "Origin of Elements and Cosmic Evolution: From Big-Bang to Supernovae and Mergers 2022" (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kanji Mori, Tomoya Takiwaki, Kei Kotake, Shunsaku Horiuchi
2. 発表標題 Core-collapse Supernova Models with Heavy Axion-like Particles
3. 学会等名 Brainstorming Workshop 2022 to Revolutionize the Core-Collapse Supernova Theory (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kanji Mori
2. 発表標題 Observational Signatures of Axion Instability Supernovae"
3. 学会等名 SuperVirtual 2022 - From Common to Exotic Transients - (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kanji Mori
2. 発表標題 Core-collapse Supernova Simulations with Heavy Axion-like Particles
3. 学会等名 Exploring the Transient Universe (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 森寛治
2. 発表標題 重力崩壊型超新星爆発に対するアクシオン加熱の影響
3. 学会等名 第35回理論懇シンポジウム「理論天文学・宇宙物理学の広がり：さらなる発展に向けて」
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 森寛治
2. 発表標題 12C+12C Reaction and Type Ia Supernovae
3. 学会等名 星の進化と爆発天体における核反応の物理
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 森寛治
2. 発表標題 超新星爆発に対するアクシオン加熱の影響
3. 学会等名 新学術「地下宇宙」第9回超新星ニュートリノ研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 森寛治, 守屋堯, 滝脇知也, 固武慶, 堀内俊作, Sergei I. Blinnikov
2. 発表標題 アクシオン不安定型超新星の観測の特徴
3. 学会等名 日本天文学会2023年春季年会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
米国	バージニア工科大学	ウエスタンミシガン大学	ノートルダム大学	他2機関
ロシア連邦	クルチャトフ研究所			
中国	北京航空航天大学			