

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 31 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26800100

研究課題名(和文) 超新星の多波長理論・観測で迫る恒星物理の未解決問題と宇宙論的研究への応用

研究課題名(英文) Theoretical and observational multi-frequency study of supernovae: Solving open questions in stellar physics and developing applications to cosmology

研究代表者

前田 啓一 (Maeda, Keiichi)

京都大学・理学研究科・准教授

研究者番号：00503880

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：超新星やその周辺環境の理論・観測研究を通し、超新星の爆発前の親星の性質や星周物質の性質に様々な知見が得られた。これにより、理論的に未解明の恒星終末期の進化についての理解が大きく進展した。「恒星・連星進化の観点からのアプローチ」、「超新星爆発・突発現象の観点からのアプローチ」、「周辺環境からのアプローチ」として、様々な理論計算、地上・宇宙からの他波長観測を通し、多くの成果が得られた(三年間の研究機関にわたり合計約50編の国際査読論文誌に発表)。これらの異なるアプローチを融合した分野でも多くの成果があった。

研究成果の概要(英文)：We have obtained a broad spectrum of new insights on the natures of supernova progenitor stars and circumstellar environment, through studying supernovae both through theoretical and observational methods. The work has led to a large step forward to understand unresolved problems in stellar evolution, especially in the final centuries of their lives. The work has utilized various different approaches, highlighted by "stellar and binary evolution", "supernovae and transient phenomena", "their environments". The issues have been tackled through theoretical simulations, multi-frequency observations from the ground and space, leading to many outstanding results (resulting in about 50 papers in refereed international journals). The synergy between different approaches is especially a highlight in this work.

研究分野：理論・観測天文学

キーワード：光赤外天文学 理論天文学 輻射輸送 超新星 恒星進化論 多波長天文学

1. 研究開始当初の背景

太陽質量の 10 倍を超えるような大質量星はその進化の最期に重力崩壊型超新星を起こし、チャンドラセカール限界質量程度に到達した白色矮星は核反応暴走爆発である Ia 型超新星を起こす。しかし、爆発に至る進化経路や爆発機構は現在でも未解明であり、天体物理学上の大問題の一つとされている。

Ia 型超新星に至る進化経路の解明は超新星を標準光源として用いる精密宇宙論の発展に不可欠であり、また大質量星の重力崩壊に伴う超新星の親星を明らかにすることは超新星を用いた遠方宇宙探査の基礎を与える。また、近年の突発天体探査・追観測の進展により次々と発見されている正体不明の爆発現象の進化経路と爆発機構を明らかにすることは、未解明の恒星進化仮定を明らかにするとともに、これらが銀河の化学進化などに及ぼす影響を検討するうえで重要である。

2. 研究の目的

本研究では、恒星進化・爆発機構・超新星周辺環境の研究を有機的に結び付け、恒星物理と超新星機構の未解明問題の解決を目指した。

3. 研究の方法

本研究課題では、理論・観測両面から、以下のアプローチを通じ恒星進化・超新星の研究を推進した。

(1) 「恒星・連星進化の観点からのアプローチ」

(2) 「超新星爆発・突発現象の観点からのアプローチ」

(3) 「周辺環境からのアプローチ」

(4) 「(1 - 3) の複合的アプローチおよび銀河化学進化や宇宙論的研究への応用」

4. 研究成果

(1) 「恒星・連星進化の観点からのアプローチ」

重力崩壊型である IIb 型超新星 SN2011dh について (その親星は黄色巨星であることが確認されている) ハッブル宇宙望遠鏡を用いた紫外線観測により理論から予想される伴星候補を発見した (Folatelli et al. 2014)。別の IIb 型超新星 SN2008ax について、爆発前と超新星消滅後のハッブル宇宙望遠鏡の画像を新たに解析し、親星が予想外の青色巨星であることを突き止めた (Folatelli et al. 2015)。Ib 型超新星 iPTF13bvn に対して、ハッブル望遠鏡を用いた観測により、爆発前の親星の性質を確定した (Folatelli et al. 2016)。これは、Ib 型超新星の親星の性質が

直接観測から確定した世界初の例である。超新星爆発前の大質量星進化に関しても新たな知見が得られた。数年のタイムスケールで大規模な爆発を繰り返し、最終的に IIc 型超新星となった現象を発見した (Thoene et al. 2017)。

Ia 型超新星に至る進化の白色矮星 + 恒星モデルにおいて、伴星が超新星放出物質に巻き込まれることによる観測的帰結を流体・放射計算により明らかにした (Maeda, et al. 2014)。通常の Ia 型超新星から初めて、連星相手との衝突の兆候を検出した (Marion et al. 2016)。また、Ia 型超新星の白色矮星

白色矮星親星系に関して、binary population synthesis の手法により、観測されている超新星の頻度を説明できるか議論した (Ablimit et al. 2016)。

(2) 「超新星爆発・突発現象の観点からのアプローチ」

重力崩壊型超新星の爆発機構においては多次元的效果が重要である。新たに偏光放射モデルを行うことで、その三次元構造を明らかにした (Tanaka et al. 2017)。また、非対称な衝撃波が星を突き抜けた際の最初の放射 (ショックブレイクアウト) がこれまで調べられていた球対称の場合とどのように変わるか、二次元輻射流体により研究した。球対称モデルと異なり、放射の継続時間が必ずしも親星の半径のみで決まらないこと、逆にこの結果を用いて衝撃波の非対称性 (従って爆発の非対称性) を観測的に導出できる可能性を指摘した (Suzuki et al. 2016)。

近年注目を集めている超高輝度超新星のモデルとして、超強地場中性子星などを想定した中心天体からのエネルギー注入により超新星が輝くモデルの二次元長時間流体シミュレーションを世界で初めて行った (Suzuki & Maeda 2017)。また、このようなシナリオにおける超高輝度超新星とガンマ線バーストとの関係を議論した (Cano et al. 2016)。

Chandra 望遠鏡により、新種の X 線突発現象を発見した (Bauer et al. 2017)。その正体は謎であるが、低高度のガンマ線バーストに伴う現象であるとする説を提唱している。このような現象のモデルとして、エネルギーの大きな超新星が高密度星周物質と衝突しガンマ線バーストとして輝く機構の数値計算を行った (Suzuki et al. 2017)。また、エネルギーの大きな極超新星については、これまでヘリウム外層がはげた酸素星が親星だと思われていたが、極超新星一例についてヘリウム外層の存在を示唆する観測結果を提出した (Yamanaka et al. 2017)。

近年観測の進む潮汐破壊現象に関して、白色矮星がブラックホールにより破壊される現象の高解像度流体シミュレーションを行

った。先行研究では潮汐破壊中に核反応暴走が起こると提唱されていたが、これが数値計算上の数値的な効果であり、実際には核反応暴走が起こる可能性が低いことを指摘した (Tanikawa et al. 2017)。

太陽質量の 100 倍を超えるような超大質量星の進化計算も行った。このような大質量星は、爆発直前に間欠的に質量放出をする機構が知られている。進化計算から得られた非定常質量放出のデータを用い、これが超新星発生後に超新星放出物質と衝突することで明るく輝く機構のシミュレーションを行った。その結果、このような機構により明るい IIIn 型超新星や超高輝度超新星の一部が説明しえることが分かった (Yoshida et al. 2016)。

理論研究と並行し、ケーススタディとして個々の超新星の観測を行い、理論モデルとの比較から爆発や親星の性質を見積もった (folatelli et al. 2014; Milisavljevic et al. 2015; Yamanaka et al. 2015; Kuncarayakti et al. 2015, 2016)。

Ia 型超新星のモデルとして、連星白色矮星の衝突合体の流体シミュレーションを行った。数値計算解像度の重要性を指摘したほか (Tanikawa et al. 2015)、白色矮星の個々の質量によりどのように帰結が変わるかを調べ、連星の合計質量がチャンドラセカール質量を大きく上回る場合のみ合体の際に炭素核反応暴走が引き起こされることを明らかにした (Sato et al. 2015)。また、近年発見された白色矮星連星が将来 Ia 型超新星となる可能性を議論した (Sato et al. 2016)。

Ia 型超新星で爆発的に生成される不安定同位体からの高エネルギー放射の研究を推進し、近傍で発生した SN2014J から Ia 型超新星として初めてガンマ線放射の検出に成功し (Diehl et al. 2014, 2015; Terada et al. 2016)、その運動学的特徴を説明するために白色矮星表面のヘリウム層での核反応が重要である可能性を指摘した。また、異なる爆発機構における異なる核種の生成量に注目し、55Fe 起源の 5.9keV 放射を用いて爆発機構を切り分ける可能性を提唱した (Seitenzahl et al. 2015)。

(3)「周辺環境からのアプローチ」

IIIn 型超新星の観測データから、ほとんどの場合に爆発直前に 0.01 太陽質量/年を超えるような激しい質量放出をしていることを突き止めた (Moriya & Maeda 2014)。同様な手法を IIn 型超新星に適用し、これが IIIn 型と同程度かさらに激しいヘリウムの質量放出を伴う系であることを明らかにし、さらに爆発の質量・エネルギーが IIIn 型の場合とは明らかに異なることを示した (Moriya & Maeda 2016)。さらに、IIIn 型超新星の X 線データの系統的な解析を行い、吸収を受けていない成分と激しい吸収を受けている成分に

分解できることを発見した。これは、星周物質の形状が disk あるいは bipolar であることを示唆する (Katsuda et al. 2016)。

水素がほとんど検出されずかつ親星の多様性が知られている IIb 型超新星は超新星に至る連星進化を理解するカギとなる。IIb 型超新星 SN2013df に対してすばる望遠鏡による観測を行い、二年経過したのちに水素輝線が強く放射されていることを発見した (Maeda et al. 2015)。このような特徴がみられない例も集め、親星半径と星周物質密度 (爆発直前の質量放出率) に関係があることを世界で初めて明らかにした。

Ia 型超新星親星システムからの質量放出に伴い星周物質を観測的に制限するための理論研究を推進した。星周物質はダストを伴うと考えられ、超新星からの光を受けこの星周ダストが近赤外域で光するという現象 (星周エコ) により星周物質に制限をつける手法を提案した (Maeda et al. 2015)。通常の Ia 型超新星の近赤外線データを精査し、このよう放射が見えないことから星周物質及び爆発前の質量放出に上限を与えた。この理論モデルの提出後、特異な超新星 SN2012dn から、予想された近赤外線エコを発見した (Yamanaka et al. 2016)。さらにエコの理論計算を推し進め、この超新星の星周物質が円盤状に分布していること、この星周物質形成に必要な質量放出率が白色矮星 + 恒星モデルの予測とよく一致することを示した (Nagao et al. 2017)。以上は、Ia 型超新星の少なくとも一部が恒星との連星系における爆発であることを示唆する。

Ia 型超新星のなかでも高密度星周物質に囲まれた系の存在が知られている (SN Ia-CSM)。この Ia-CSM を引き起こす超新星は通常の Ia 型超新星と異なる特徴を持った 91T-like 超新星に分類されることを明らかにした (Leloudas et al. 2015)。

一方、通常の超新星 SN2014J について、すばる望遠鏡をはじめとする複数の大型望遠鏡により高分散分光観測を行った。超新星爆発後半年以降経過した段階での高分散分光観測は世界でも初めてであり、これを用いた新しいアイデアに基づく星周物質の解析手法を開発した。この結果、この超新星の周囲には高密度の星周物質が存在しないことを明らかにした (Maeda et al. 2016)。また、偏光観測からも同様の示唆が得られた (Kawabata et al. 2014)。

また、超新星の発生した場所の電波・可視の系統的解析を初めて行い、周辺環境の診断を行った (Galbany et al. 2017)。周辺環境のスケールでは吸収の兆候がない一方で、超新星の観測からは激しい吸収を受けている例が見つかり、これは周辺環境探査で分解できないスケールである星周物質が存在することを示唆する。

(4)「(1-3)の複合的アプローチおよび銀河化学進化や宇宙論的研究への応用」

Maeda et al. (2015)で明らかにされた Ib 型超新星の親星半径と星周物質密度(爆発直前の質量放出率)の関係は親星と周辺環境をつなぐ新しいアイデアであり、天体物理学の大問題である質量放出の起源に迫るものである。この新たな知見をもとに、連星進化計算を行った結果、大質量星連星進化モデルにより、Ib 型親星の多様性と質量放出率との関係が連星進化モデルの一般的な帰結であることを明らかにした(Ouchi & Maeda 2017)。これは、超新星に至る大質量星進化における連星進化の重要性を明らかにしたものである。

ガンマ線バースト(GRB)に伴う超新星の性質を用いた宇宙論への応用手法を開発した(Dainotti et al. 2017)。

超新星と超新星残骸研究の学際融合を進めた。超新星の理論・観測研究から提唱された、安定鉄族元素の生成量により爆発機構を制限するというアイデアを超新星残骸に適用した。超新星残骸 3C397 においては大量の鉄族元素からの X 線輝線が観測されており、これは高密度の白色矮星を起源とする Ia 型超新星爆発の残骸であることを支持する。このような状況は、白色矮星と恒星の連星進化モデルから予想される。また、有名な超新星残骸であるケプラー超新星残骸について、X 線観測から星周物質の量、分布および爆発時に生成された鉄の質量を求めた(Katsuda et al. 2015)。この結果、この超新星残骸のもととなったケプラーの超新星は、91T-like 超新星であるとともに、Ia-CSM で観測されるのと同程度の星周物質を持った親星の爆発であることを明らかにした。この結果から、91T-like 超新星と Ia-CSM の統一的解釈を提唱した。超新星残骸における粒子観測の観測研究も進めた(Katsuda et al. 2016)。

距離指標としての精度向上も視野に入れ、Ia 型超新星分光データの統計解析を進めた。統計学の専門家とともに、最新の統計手法(スパースモデリング)を Ia 型超新の光度・距離推定に適用し、その有用性を示した(Uemura et al. 2015)。爆発後一週間程度の初期分光データの統計解析を世界で初めて行い、それまで知られていたカルシウム吸収線における高速成分だけでなく、最初期においてはシリコンや酸素も高速成分を示すことを発見した(Zhao et al. 2015)。特に、酸素の高速吸収成分とシリコン・カルシウムの高速吸収成分の間には観測量に反相関がみられることを発見した(Zhao et al. 2016)。以上は未解明の高速吸収成分の起源に迫る鍵になると考えられ、また今後宇宙論のための標準光源としての精度向上への応用が期待される。

また、Ia 型超新星は特異な減光則を示すこ

とが知られている。減光量は距離指標としての光度・距離推定に大きな影響を与えるため、その起源の解明は重要である。近赤外線エコーで得られた知見も考慮し、星周物質中での輻射輸送の効果により特異な減光則が作られるか、理論研究を行った。星周ダストが一定の条件を満たした場合のみ、このような現象が起こることが明らかになった(Nagao et al. 2016)。

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 50 件)

Ouchi, R., Maeda, K., “Radii and Mass-loss Rates of Type Ib Supernova Progenitors”, 2017, ApJ, 840 (13 pages) DOI: 10.3847/1538-4357/aa6ea9, 査読有

Suzuki, A., Maeda, K., “Supernova ejecta with a relativistic wind from a central compact object: a unified picture for extraordinary supernovae”, 2017, MNRAS, 466, 2633-2657 DOI: 10.1093/mnras/stw3259, 査読有

Dainotti, M. G., Nagataki, S., Maeda, K., Postnikov, S., Pian, E., “A study of gamma ray bursts with afterglow plateau phases associated with supernovae”, 2017, A&A, 600, 98 (11 pages) DOI: 10.1051/0004-6361/201628384, 査読有

Tanaka, M., Maeda, K., Mazzali, P. A., Kawabata, K. S., Nomoto, K., “Three-dimensional Explosion Geometry of Stripped-envelope Core-collapse Supernovae. II. Modeling of Polarization”, 2017, ApJ, 837, 105 (11 pages) DOI: 10.3847/1538-4357/aa6035, 査読有

Nagao, T., Maeda, K., Yamanaka, M., “The Origin of the Near-infrared Excess in SN Ia 2012dn: Circumstellar Dust around the Super-Chandrasekhar Supernova Candidate”, 2017, ApJ, 835, 143 (9 pages) DOI: 10.3847/1538-4357/835/2/143, 査読有

Suzuki, A., Maeda, K., Shigeyama, T., “Hydrodynamical Interaction of Mildly Relativistic Ejecta with an Ambient Medium”, 2017, ApJ, 834, 32 (21 pages) DOI: 10.3847/1538-4357/834/1/32, 査読有

Katsuda, S., Maeda, K., et al. (2/10 authors), “Two Distinct-absorption X-Ray Components from Type IIn Supernovae: Evidence for Asphericity in the

Circumstellar Medium”, 2016, ApJ, 832, 194 (12 pages)

DOI: 10.3847/0004-637X/832/2/194, 査読有

Yamanaka, M., Maeda, K., et al. (2/37 authors), “OISTER optical and near-infrared observations of the super-Chandrasekhar supernova candidate SN 2012dn: Dust emission from the circumstellar shell”, 2016, PASJ, 68, 68 (24 pages)

DOI: 10.1093/pasj/psw047, 査読有

Zhao, X., Maeda, K., et al. (2/10 authors), “The Oxygen Features in Type Ia Supernovae and Implications for the Nature of Thermonuclear Explosions”, 2016, ApJ, 826, 211 (20 pages)

DOI: 10.3847/0004-637X/826/2/211, 査読有

Maeda, K., Terada, Y., “Progenitors of type Ia supernovae”, 2016, IJMPD, 1630024 (22 pages)

DOI: 10.1142/S021827181630024X, 査読有

Ablimit, I., Maeda, K., Li, X.-D., “Monte Carlo Population Synthesis of Post-common-envelope White Dwarf Binaries and Type Ia supernova Rate”, 2016, ApJ, 826, 53 (14 pages)

DOI: 10.3847/0004-637X/826/1/53, 査読有

Suzuki, A., Maeda, K., Shigeyama, T. “2D Radiation-hydrodynamic Simulations of Supernova Shock Breakout in Bipolar Explosions of a Blue Supergiant Progenitor”, 2016, ApJ, 825, 92 (17 pages)

DOI: 10.3847/0004-637X/825/2/92, 査読有

Moriya, T.J., Maeda, K., “Circumstellar and Explosion Properties of Type Ibn Supernovae”, 2016, ApJ, 824, 100 (7 pages)

DOI: 10.3847/0004-637X/824/2/100, 査読有

Nagao, T., Maeda, K., Nozawa, T., “Extinction Laws toward Stellar Sources within a Dusty Circumstellar Medium and Implications for Type Ia Supernovae”, 2016, ApJ, 823, 104 (10 pages)

DOI: 10.3847/0004-637X/823/2/104, 査読有

Kuncarayakti, H., Maeda, K., Anderson, J. P., Hamuy, M., Nomoto, K., Galbany, L., Doi, M., “Evolving into a remnant: optical observations of SN 1978K at three decades”, 2016, MNRAS, 458, 2063-2073

DOI: 10.1093/mnras/stw430, 査読有

Terada, Y., Maeda, K., et al. (2/12 authors), “Measurements of the Soft Gamma-Ray Emission from SN2014J with Suzaku”, 2016, ApJ, 823, 43 (10 pages)

DOI: 10.3847/0004-637X/823/1/43, 査読有

Cano, Z., Johansson Andreas K. G., Maeda, K., “A self-consistent analytical magnetar model: the luminosity of γ -ray burst supernovae is powered by radioactivity”, 2016, MNRAS, 457, 2761-2772

DOI: 10.1093/mnras/stw122, 査読有

Yoshida, T., Umeda, H., Maeda, K., Ishii, T., “Mass ejection by pulsational pair instability in very massive stars and implications for luminous supernovae”, 2016, MNRAS, 457, 351-361

DOI: 10.1093/mnras/stv3002, 査読有

Katsuda, S., Maeda, K., et al. (2/12 authors), “Spatially Resolved Spectroscopy of a Balmer-dominated Shock in the Cygnus Loop: An Extremely Thin Cosmic-Ray Precursor?”, 2016, ApJ, 819, 32 (6 pages)

DOI: 10.3847/2041-8205/819/2/L32, 査読有

Maeda, K., et al. (1/24 authors), “Sodium Absorption Systems toward SN Ia 2014J Originate on Interstellar Scales”, 2016, ApJ, 816, 57 (17 pages)

DOI: 10.3847/0004-637X/816/2/57, 査読有

② Maeda, K., Nozawa, T., Nagao, T., Motohara, K., “Constraining the amount of circumstellar matter and dust around Type Ia supernovae through near-infrared echoes”, 2015, MNRAS, 452, 3281-3292

DOI: 10.1093/mnras/stv1498, 査読有

② Zhao, X., Wang, X., Maeda, K., et al. (3/10 authors), “The Silicon and Calcium High-velocity Features in Type Ia Supernovae from Early to Maximum Phases”, 2015, ApJS, 220, 20 (21 pages)

DOI: 10.1088/0067-0049/220/1/20, 査読有

③ Katsuda, S., Mori, K., Maeda, K., et al. (3/10 authors), “Kepler’s Supernova: An Overluminous Type Ia Event Interacting with a Massive Circumstellar Medium at a Very Late Phase”, 2016, ApJ, 808, 49 (14 pages)

DOI:

10.1088/0004-637X/808/1/49, 査読有

④ Maeda, K., et al. (1/26 authors), “Type IIb Supernova 2013df Entering into

an Interaction Phase: A Link between the Progenitor and the Mass Loss”, 2015, ApJ, 807, 35 (10 pages)
DOI: 10.1088/0004-637X/807/1/35, 査読有

⑳ Kuncarayakti, H., Maeda, K., et al. (2/12 authors), “Nebular phase observations of the Type-Ib supernova iPTF13bvn favour a binary progenitor”, 2015, A&A, 579, 95 (9 pages)
DOI: 10.1051/0004-6361/201425604, 査読有

㉑ Yamanaka, M., Maeda, K., et al. (2/33 authors), 2015, ApJ, 806, 191 (14 pages)
DOI: 10.1088/0004-637X/806/2/191, 査読有

㉒ Maeda, K., Kutsuna, M., Shigeyama, T., “Signatures of a Companion Star in Type Ia Supernovae”, 2014, ApJ, 794, 37 (29 pages)
DOI: 10.1088/0004-637X/794/1/37, 査読有

㉓ Diehl, R., et al. (8/10 authors), “Early ^{56}Ni decay gamma rays from SN2014J suggest an unusual explosion”, 2014, Science, 6201, 1162-1165
DOI: 10.1126/science.1254738, 査読有

㉔ Moriya, T., Maeda, K., “Constraining Physical Properties of Type IIIn Supernovae through Rise Times and Peak Luminosities”, ApJ, 790, 16 (5 pages)
DOI: 10.1088/2041-8205/790/2/L16, 査読有

〔学会発表〕(計 32 件)

Maeda, K., “Circumstellar environment and progenitors of type Ia supernovae”, 2016 MIAPP programme: The physics of supernovae, 2016/08/22-09/16, Garching (Germany)

Maeda, K., “Type Ia supernovae: Progenitor scenarios and observational constraints”, Supernovae through the ages: Understanding the past to prepare for the future, 2016/08/09-13, Easter Island (Chile)

Maeda, K., “A take away list for the Chile-Japan SN collaboration in 2016”, Workshop SN MAS 2016, 2016/01/20, Santiago (Chile)

Maeda, K., “Links between SN Ia observations and progenitor evolutions”, The 14th Marcel Grossmann Meeting, 2015/07/12-18, Roma (Italy)

Maeda, K., “Energetic Death of Massive

Stars”, European Week of Astronomy and Space Science, 2015/06/22-26, Tenerife (Spain)

Maeda, K., “The environment surrounding SNe Ia: Shaped by CSM or ISM?”, South American Supernovae 2015, 2015/04/28-30, Santiago (Chile)

Maeda, K., “A link between progenitors and stripped-envelope SNe, and their CSM environment”, South American Supernovae 2015, 2015/04/28-30, Santiago (Chile)

Maeda, K., “Insight and constraints on SN Ia progenitor and explosion”, The Ia supernovae: Progenitors, Explosions, and Cosmology, 2014/09/15-19, Chicago (US)

〔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〕

プレスリリース「目に見えない光で Ia 型超新星の爆発機構を探る」

http://www.kyoto-u.ac.jp/ja/research/research_results/2014/140801_1.html

プレスリリース「本当にあった！消えた黄色超巨星跡に青い星」

<http://www.ipmu.jp/ja/node/1985>

プレスリリース「限界を超えた Ia 型超新星の起源を解明」

http://www.kyoto-u.ac.jp/ja/research/research_results/2016/160607_1.html

6. 研究組織

(1) 研究代表者

前田 啓一 (MAEDA, Keiichi)

京都大学・大学院理学研究科・准教授

研究者番号：00503880

(2) 研究分担者

該当なし。

(3) 連携研究者

該当なし。

(4) 研究協力者

該当なし。