

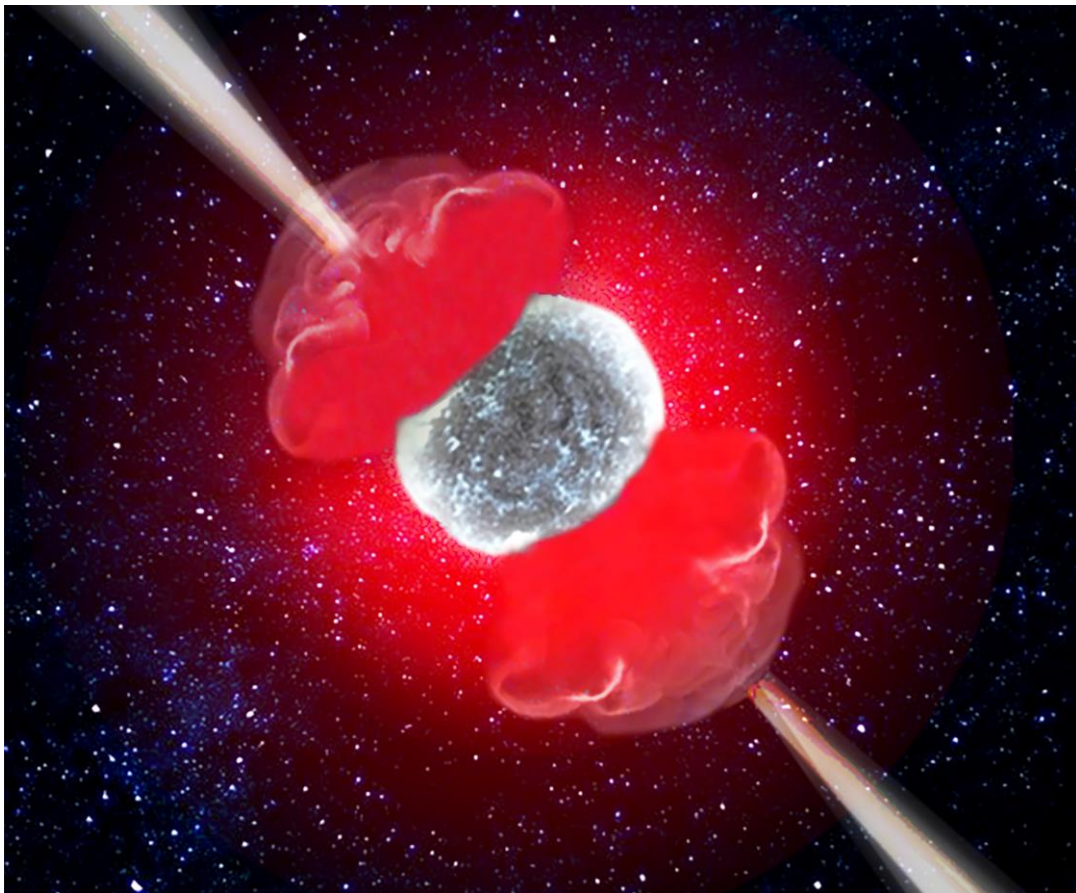
極超新星に付随する超高速成分を発見

—極超新星が光速ジェットにより引き起こされることを実証—

概要

京都大学大学院理学研究科 前田啓一准教授、アンダルシア天体物理学研究所 Luca Izzo 博士および Antonio de Ugarte Postigo 博士（スペイン）を中心とする研究グループは、ガンマ線バースト GRB 171205A を引き起こした極超新星 SN 2017iuk に光の速度の 30%にも達する超高速成分が付随したことを発見しました。研究グループはスペインの 10 メートル・カナリア大望遠鏡（GTC）、南ヨーロッパ天文台がチリに所有する 8 メートル・超大型望遠鏡（VLT）を用いて GRB 171205A の発見直後からの追観測を行い、爆発当初から極超新星由来の可視放射が発生していること、最初の数日間に確認されたスペクトルがこれまで知られていた極超新星とは大きく異なることを発見しました。このスペクトルの理論解析の結果、極超新星には光速の 30%以上に達する高速成分が付随すること、同時にこれが爆発の際に作られた鉄などの重い元素に満たされていることがわかりました。これは、極超新星が光速に近いジェットにより引き起こされる重い星の爆発であり、このジェットが十分に減速されずに星を突き抜けた場合にガンマ線バーストが発生するという理論を支持します。本研究により、ガンマ線バーストと極超新星の爆発機構の理解が大きく進展するとともに、爆発天体現象を理解する上での爆発直後からの観測の重要性が示されました。

本研究成果は、2019 年 1 月 17 日に国際学術誌「Nature」にオンライン公開されました。



研究成果のポイント

- 世界最大級の望遠鏡群を用いたガンマ線バーストの発見直後からの追観測により、爆発直後からエネルギーの大きな極超新星に由来する成分が付随することを発見した。
- 爆発後数日以内に極超新星放出物質により作られた吸収線を確認。これまで知られていた例を大きく上回る光速の 30%にも達する成分が存在し、それが鉄などの重い元素で満たされていることを発見した。
- この特徴は爆発後一週間程度で消失し、その後はこれまで知られていた極超新星と同様のスペクトルを示した。今後、爆発直後からの詳細な追観測を推進することで、今回発見されたような超高速成分が一般的に確認されることが期待され、これはガンマ線バーストと極超新星の爆発機構の理解を大きく前進させる。

1. 背景

太陽の 10 倍以上の質量をもつ重い星はその生涯の最後に超新星爆発を起こします。超新星爆発のエネルギーは 10^{51} エルグ（1 エルグは 10^{-7} ジュール）にも上り、これは太陽が 100 億年の一生をかけて放出するエネルギーと同程度になります。超新星爆発のエネルギーのうち電磁波（主に可視光）として放出されるエネルギーは全体のわずか 0.1%程度（ 10^{48} エルグ程度）ですが、それでも恒星の集団である銀河の明るさと同程度に達するという、宇宙の中でも最も明るく激しい現象の一つです。しかし、宇宙にはさらに極限的な爆発現象が存在します。その代表的なものが（ロング）ガンマ線バースト（注1）です。その名の通り、数秒～数十秒程度の短い期間に、可視光よりもエネルギーの大きな（波長の短い）電磁波であるガンマ線を大量に放出する現象です。ガンマ線で放出するエネルギーだけでも超新星の全エネルギーに匹敵するような非常にエネルギーの大きい現象です。また、少なくとも一部のガンマ線バーストは超新星を伴って現れることが知られています。その超新星は通常の超新星よりも短波長側に青方偏移した、幅の広い吸収線を持つスペクトルを示すことがわかっています。これは高速膨張する超新星放出物質により作られる性質であり、通常の超新星の 10 倍以上の爆発エネルギーを持つと解釈されています。そのように巨大なエネルギーの超新星爆発は「極超新星」と呼ばれます（注2）。

極超新星を伴って現れることなどから、（ロング）ガンマ線バーストは大質量星の爆発である超新星のさらに激しいものと考えられています。しかし、超新星爆発の標準モデルでは、ここまで激しい爆発を説明することはできません（注3）。非常に高速で回転するなどの特殊な条件をみたした星がその一生の最期に中心部でブラックホールあるいは非常に磁場の強い中性子星を形成し、それに伴って光速に近い速度をもったジェットが形成されるモデルが提唱されています。ジェットのエネルギーの大部分は星全体を吹き飛ばすことに使われ（極超新星の発生）、一部はほぼ光速に近い速度を保ったまま星を突き抜けてガンマ線を放出する（ガンマ線バーストの発生）というモデルです。この仮説が正しければ、光速に近い速度のガンマ線バースト・ジェット成分と光速の 10%程度の速度を示す極超新星成分のほかに、光速の数十%程度の速度の「コクーン」（cocoon：繭の意）が存在することが予測されます（図1）。しかし、これまでの極超新星の観測からはそのようなコクーン成分の存在は確認されていませんでした。

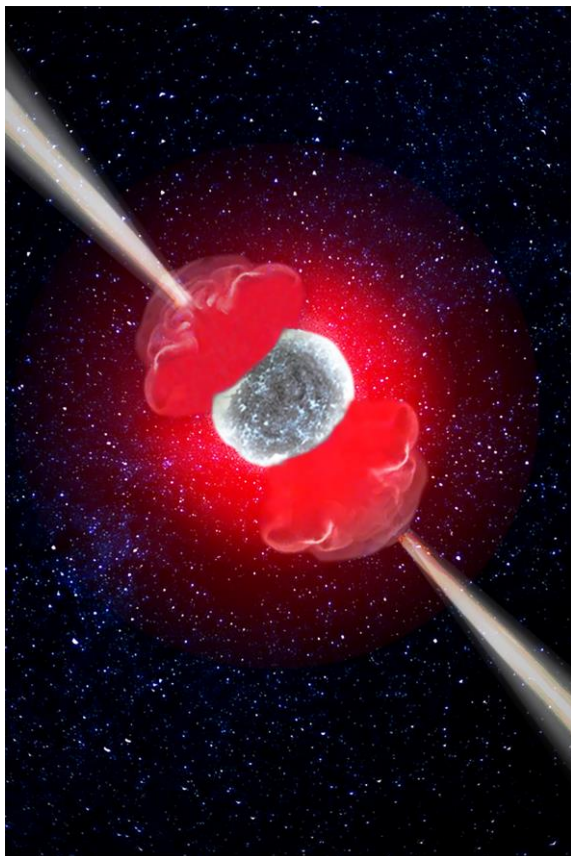


図 1

ガンマ線バーストと極超新星の想像図（Anna Serena Esposito 氏提供）。大質量星の一生の最期に中心部が一気に収縮し、ブラックホールあるいは非常に磁場の強い中性子星を作る。この際に光速に近い速度のジェットが発生した場合、あまり減速されずにほぼ光速で放出される成分（白：ガンマ線バーストの発生源）、もとの星全体が光速の 10%程度で吹き飛ばされる成分（中心付近の灰色：極超新星として見える成分）に加え、星の外層付近の少量の物質がジェットにより押し出され光速の 30%程度に達する速度を持つ成分（赤：コクーン）の存在が予測される。ジェット自体はすべて減速されてしまい極超新星とコクーン成分のみの可能性も考えられ、この場合は比較的弱いガンマ線バーストが発生することが期待される。

2. 研究手法・成果

2017 年 12 月 5 日に、ガンマ線バースト GRB171205A が発見されました（図 2）。地球からの距離は約 5 億光年と、ガンマ線バーストとしては史上 3 番目の近さであり、このような近傍ガンマ線バーストは 10 年に一回程度しか発生しません。京都大学理学研究科 前田啓一准教授、アンダルシア天体物理学研究所 Luca Izzo 博士および Antonio de Ugarte Postigo 博士（スペイン）を中心とする研究グループは、GRB171205A 発見当日からスペインの 10 メートル・カナリア大望遠鏡（GTC）、南ヨーロッパ天文台がチリに所有する 8 メートル・超大型望遠鏡（VLT）を用いた、可視域における詳細な追観測を開始しました。GRB171205A の距離であれば、これら世界最大級の大型望遠鏡により、爆発直後のまだ暗い段階から極超新星を確認するだけの観測データが得られることが期待されました（注 4）。

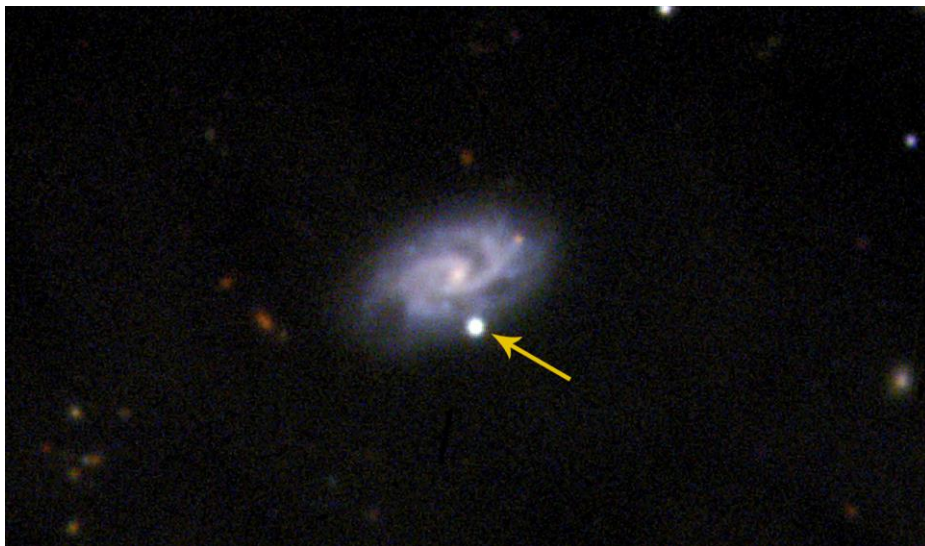


図 2

コップ座にある渦巻銀河に発生した GRB171205A と SN2017iuk の画像（カナリア大望遠鏡提供）。

この観測の結果、ジェットとは異なる、主に可視域で光る成分が爆発直後から存在することが確認されました。爆発の1日後には、極超新星でみられるような、幅の広い吸収線が現れだし、超新星 SN 2017iuk と名づけられました。これまでガンマ線バーストに付随する超新星由来の成分が発見されたのは、もっともはやい例でも爆発後5日後、ほとんどの場合は一週間以上経過した後です。超新星の放射は2, 3週間かけて増光していきますから、今回非常に近傍のガンマ線バーストに対して大型望遠鏡を用いたことで初めて発見できたものです。このようにして初めて取得された極超新星の非常に初期のスペクトルは、新たな驚きをもたらしました。吸収線の位置（波長）が、これまで知られていた極超新星のスペクトルと全く合わないのです（図3）。さらに観測を継続するにつれ、一週間程度でこれまでに知られていた極超新星と変わらないスペクトルへと変化する様子も確認されました。このことから、GRB171205A・SN 2017iuk はガンマ線バースト・極超新星としては特別ではなく、観測された特異な性質は爆発直後に観測できたという事実起因すると考えられます。

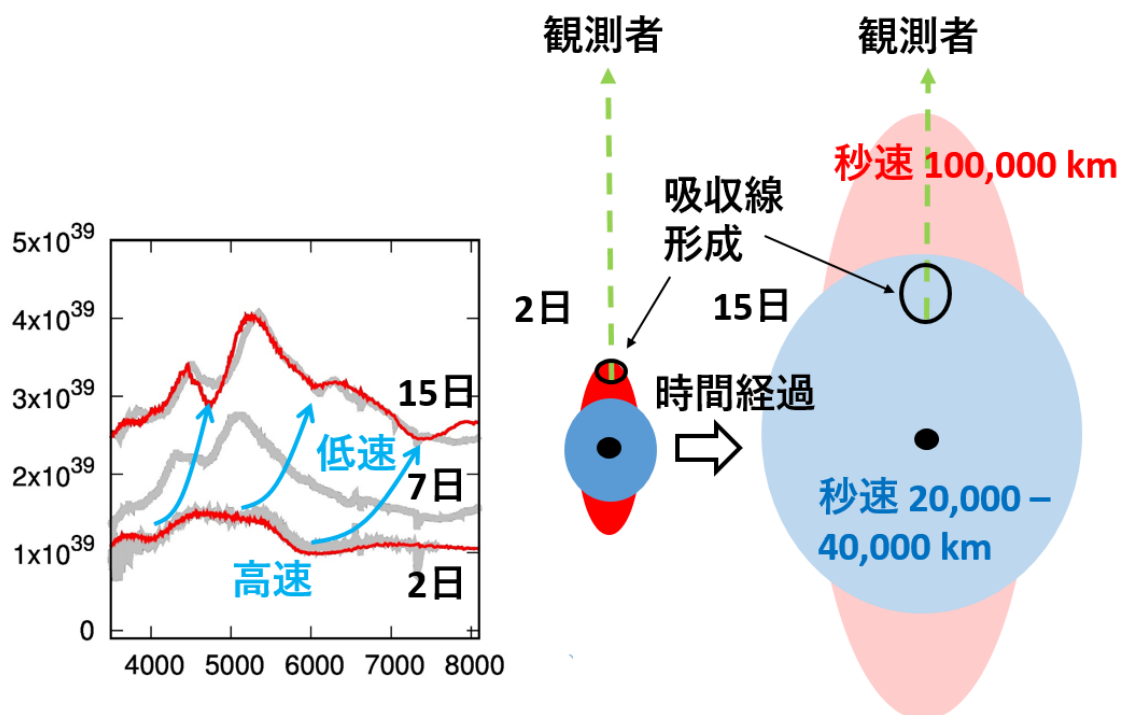


図3

左のパネル： 極超新星 SN 2017iuk のスペクトル進化（爆発後2, 7, 15日）。上に行くほど時間が経過したのちのスペクトル。理論計算により得られた2, 15日時点のスペクトルを赤で示してある。15日時点におけるスペクトルは典型的な極超新星と類似している。2日時点においてみられる吸収線は、15日の際に見られた吸収線がより短い波長に青方偏移して現れたものとして解釈できる（青の矢印）。15日における青方偏移に対応する速度は秒速20,000km程度であるが、2日における速度は秒速100,000km程度に達する。また、爆発直後の強い吸収線を説明するためには、この超高速成分の組成は鉄などの重い元素を大量に含むことが示された。Izzo et al. (2019) Nature…から改変して掲載。

右のパネル： 上記スペクトル進化の解釈。高密度の「極超新星成分」（青：秒速20,000 – 40,000 km）の外側に、少量・低密度の超高速成分（赤：秒速100,000km程度）が存在する。2日の時点では十分に密度が高く、外側の超高速成分が吸収を起こす。その後膨張運動により密度は減少し、超高速成分はすかすかとなり吸収線を形成しなくなり、内側の極超新星成分のみ見えるようになる。

爆発直後のスペクトルの謎を解明するため、京都大学の前田啓一准教授はスペクトルの理論的考察とスペクトル計算を行い、観測データを再現するような状況の解明を目指しました。スペクトルの時間進化を見ると、爆発直後に見えだした吸収線は時間とともに波長の長い側に移動していく様子が見られます。これは通常の超新星でも見られる特徴であり、初期にはより外側に存在する密度の低い高速の成分が吸収線を作り、時間の経過に伴う膨張運動により密度が低くなることで、吸収線を作る成分はより中心に近い低速成分へと移り変わっていく場合に見られる振る舞いです。理論計算の結果、爆発放出物の最外層には光速の 30%以上（秒速約 100,000km）まで到達した少量（太陽質量の千分の一程度）の噴出物が存在し、その内側にこれまで極超新星で知られていたような秒速 20,000 - 40,000 km 程度の噴出物が大量（太陽質量の数倍程度）に存在していたことがわかりました。さらに、この高速成分は大量の鉄などの重い元素を含むこともわかりました。超新星爆発において、鉄などの元素は爆発により生じた高温の火の玉により生成されます。このような重元素の塊が星を突き抜けて高速で飛び出すということは、爆発がジェットにより引き起こされて、そのジェットが激しい核反応により鉄などを生成しながら星の外層部まで到達して超高速のコクーンを形成したというシナリオを支持します。このようなコクーンから予想される爆発直後の光度曲線が SN 2017iuk の初期の紫外線・可視光での振る舞いを良く説明できることも、国立天文台 鈴木昭宏特任助教により示されました（注5）。

3. 波及効果、今後の予定

今回の観測は、（ロング）ガンマ線バーストおよび極超新星の爆発が光速ジェットにより引き起こされることを直接的に支持する初めての成果につながりました。近年、超新星や突発的な爆発天体の爆発直後からの観測を行うための整備が世界中で進んでいます（注6）、今回の成果はそのような新しい観測手法により爆発天体の起源についての知見が大きく進展することを示す良い例となりました。秒速 100,000km をも超えるような超高速噴出物の直接的な確認は、恒星の爆発現象としてはこれまで例がなく、ガンマ線バーストと極超新星がいかに関係的な天体現象であるかを物語ります。将来同様の観測が増えるにつれて、そもそも高速ジェットを形成したのはどのような天体か、ガンマ線バーストにまつわる最大の謎に迫っていけると期待されます。

4. 研究プロジェクトについて

本研究は、下記の研究費の支援を受けて行われました。

- 18H05223 基盤研究 S「爆発直後からの観測による Ia 型超新星の起源解明」（代表：土居守、東大 / 分担：前田啓一、京大）
- 18H04585 新学術領域研究・公募研究「多次元・多波長輻射輸送手法の開発で切り開く爆発天体現象研究のフロンティア」（代表：前田）
- 17H02864 基盤研究 B「超新星から迫る大質量星の終末進化：最期の 100 年から最終末期 1 年へ」（代表：前田）

<用語解説>

（注1） ガンマ線バースト

短時間の間に大量のガンマ線を放出する天体現象。大きく二種類に分類されることが知られ、持続時間が数秒以上のロング・ガンマ線バーストとそれ以下のショート・ガンマ線バーストに分けられる。本研究で対象としたのはロング・ガンマ線バーストであり、大質量星が生涯最期に起こす爆発現象であるが通常の超新星よりも激しい現象であると考えられている。ショート・ガンマ線バーストは起源が全く異なり、中性子星同士の連星

の合体に起因すると考えられている（2017 年 8 月 17 日に重力波天体 GW170817 の発見を通し、その正しさが検証された）。

（注 2） 極超新星

超新星のスペクトルにおいて、吸収線は青方偏移して実験室で計測した波長よりも短い波長に現れる。これは、高速膨張する膨張物質を観測した際の特徴であり、物質が観測者に向かう視線速度に対応し波長が短くなるドップラー効果のためである。ガンマ線バーストに付随する超新星はこの波長のずれが大きい傾向を示し、これは膨張速度が速いためと解釈される。膨張物質の運動エネルギーは速度の二乗に比例するので、エネルギーが大きい。このようなエネルギーの大きい超新星を極超新星と呼ぶ。

（注 3） 超新星爆発の標準モデル。

大質量星の中心部が一気に収縮し中性子星を形成すると、 10^{53} エルグ程度のエネルギーが解放される。このエネルギーの大部分はニュートリノとして放出される。このうち 1%程度のエネルギーがニュートリノから星の外層に輸送されることで、超新星爆発が起こると考えられている。この機構では、ガンマ線バーストや極超新星のエネルギーを説明することはできない。

（注 4） 極超新星の明るさの変化

極超新星の光度は、超新星分類学的には Ic（イチ・シー、あるいはワン・シー）型に分類される。このタイプの超新星は、爆発直後は非常に暗く徐々に増光し、2, 3 週間かけて最大光度に達したのちに減光に転じる。このため、時間の経過に伴い極超新星成分はより明確にガンマ線バースト成分から区別できることになる。まだ暗い爆発直後から極超新星成分をとらえるためには、非常に質の良い観測データが必要である。

（注 5） 爆発直後の紫外線・可視放射の光度曲線モデル

詳細な研究成果は、本論文に先駆けて以下で発表されている。

Suzuki, A., Maeda, K., Shigeyama, T. 2019, The Astrophysical journal, 870, 38.

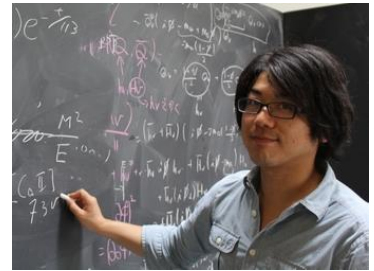
この論文では、ジェットは十分に減速されてコクーンのみで比較的エネルギーの低いガンマ線バーストを引き起こす可能性も指摘されている。実際、GRB171205A は通常のガンマ線バーストよりもガンマ線放射が弱いことがわかっている。

（注 6） 爆発直後の超新星・突発天体観測

2019 年初頭から本格的な稼働を開始する、京都大学（3.8 メートル）せいめい望遠鏡においても、爆発直後の超新星・突発天体観測は重要なターゲットである。

<研究者のコメント>

光速の 30%にも達する速度の放出物質が吸収線として直接観測されたような天体現象は他にほとんど例がありません。星の爆発である超新星で通常観測されるような速度の 5 倍から 10 倍程度にもなりますし、特に激しい極超新星爆発としてこれまでに知られていた例と比べても 3 倍近く of 速度です。爆発直後から質の良い分光観測データが取得できたことで、このような超高速成分が発見されました。これは、ガンマ線バーストと極超新星の爆発機構を調べるうえで重要なヒントになると思われます。



前田准教授

超新星などの爆発的な天体現象の研究において、爆発直後からの観測の重要性が増しています。いよいよ稼働を始める京都大学 3.8 メートル「せいめい」望遠鏡でも格好のターゲットであり、今後さらなる研究の進展が期待されます。

<論文タイトルと著者>

タイトル：Signatures of a jet cocoon in early spectra of a supernova associated with a gamma-ray burst

著者：L. Izzo¹, A. de Ugarte Postigo^{1,2}, K. Maeda³ et al. (including A. Suzuki⁴)

著者所属：¹Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC), Granada, Spain.

²DARK, Niels Bohr Institute, Copenhagen, Denmark.

³Department of Astronomy, Kyoto University, Kyoto, Japan.

⁴Division of Theoretical Astronomy, National Astronomical Observatory of Japan, National Institutes of Natural Sciences, Tokyo, Japan.

掲載誌：Nature DOI：10.1038/s41586-018-0826-3