



2022年5月6日

## Ia型超新星の起源解明の道標：超新星残骸に刻まれた超高速度白色矮星の痕跡

### 1. 発表者：

谷川 衝（東京大学 大学院総合文化研究科 広域科学専攻 助教）

### 2. 発表のポイント：

- ◆ Ia型超新星（注1）の残骸（注2）に暗い穴とそれを取り囲む明るい輪という構造があることを理論的に予言した。
- ◆ これまでIa型超新星の残骸はそのような構造を持たないと考えられてきた。
- ◆ Ia型超新星の残骸の構造を詳細に観測することによって、Ia型超新星の起源が明らかになることを提言した。今後の観測によってIa型超新星の起源に迫ることができると考えている。

### 3. 発表概要：

Ia型超新星は宇宙で最も明るく頻繁に起こる爆発現象の1つであり、宇宙の距離を測る「標準光源」として利用されています。重要な天体であるにもかかわらず、その起源はわかっていません。理化学研究所のジル・フェラン研究員と長瀧重博主任研究員、東京大学大学院総合文化研究科の谷川衝助教を中心とする東京大学・理化学研究所・University of Manitoba・Paris-Saclay Universityの日加仏の国際共同研究グループは、超高速度白色矮星（注3）を生み出すIa型超新星の数百年から数千年後の姿である超新星残骸をコンピュータシミュレーションによって再現しました。そのような超新星残骸は暗い穴とそれを取り囲む明るい輪という構造を持つことが明らかになりました。今後、詳細な観測によって超新星残骸にそのような構造が発見されれば、Ia型超新星の起源を特定することができます。本研究は、超新星残骸の観測を通じたIa型超新星の起源の解明への道標を提示したことになります。

本研究は、科研費「3次元流体シミュレーションで解き明かす超高速度白色矮星とIa型超新星の起源（課題番号：JP19K03907）」、科研費「ガンマ線バースト爆発放射機構の統一的理解（課題番号：19H00693）」、理化学研究所新領域開拓研究課題「Evolution of matter in the Universe」の支援により実施されました。

### 4. 発表内容：

超新星は、恒星が自分自身を吹き飛ばす大爆発で、最も明るいときには1000億個もの恒星からなる銀河に匹敵するほど明るくなります（図1左）。超新星には主に2つのタイプがあります。1つは太陽より8倍以上重い大質量星が最後に起こす大爆発です。この爆発の後には中性子星やブラックホールが残ります。もう1つは白色矮星と呼ばれる天体の大爆発です。この爆発の後には何も残りません。この2つ目の大爆発はIa型超新星と呼ばれています。Ia型超新星は「宇宙の物差し」と言って、遠くの天体までの距離を測る「距離指標」となっています。Ia型超新星を距離指標として用いることで、宇宙の膨張が加速しているという重要な発見がなされました。この発見者は2011年にノーベル物理学賞を受賞しています。

このように重要なIa型超新星ですが、白色矮星がどのような爆発機構に基づいてIa型超新星となるのかという問題は、2つの有力説が拮抗して決着していません（図1右）。1つの説は太陽の様な「生きた恒星」と「燃え尽きた恒星」とも言える白色矮星からなる連星（注4）の中で、生きた恒星から白色矮星へ物質が降り積もることで白色矮星が爆発する、

というものです。もう1つの説は2つの白色矮星からなる連星の中で、片方の白色矮星からもう片方の白色矮星へ物質が降り積もることによって、物質が降り積もった方の白色矮星が爆発する、というものです。

近年、後者の説を支持する発見がなされました。それは秒速 1,000km を超える超高速白色矮星の発見です。この発見が後者の説を支持することになる理由を説明します（図2）。2つの白色矮星が連星としてお互いの周りを公転しているとします。もし片方の白色矮星が爆発した場合、もう片方の爆発しなかった白色矮星は、爆発した方の白色矮星の重力から突然解放されることとなります。すると爆発しなかった方の白色矮星は超高速で飛び去っていくことになり、超高速白色矮星となります。この説は **Dynamically Driven Double-Degenerate Double-Detonation (D<sup>6</sup>)** モデルと呼ばれています。超高速白色矮星の存在は、宇宙のどこかで D<sup>6</sup> モデルに基づいた Ia 型超新星が起こったことの間接的な証拠となります。

そこで本研究チームは、もしすべての Ia 型超新星が D<sup>6</sup> モデルに基づいて起こるのならば Ia 型超新星の爆発後数百年から数千年の姿である超新星残骸に D<sup>6</sup> モデルの痕跡が残っているのではないかと予想しました。そして残っているならばその痕跡がどのようなものを明らかにするための理論研究を開始しました。D<sup>6</sup> モデルに基づいた Ia 型超新星の残骸の姿を理論的に明らかにするには、2つのステップが必要です。1つ目のステップは白色矮星の爆発前後数十秒程度を追跡すること、2つ目のステップは爆発によって吹き飛んだ物質を数千年にわたって追跡することです。1つ目のステップは、スーパーコンピュータを使った爆発シミュレーションによって、すでに行われていました (Tanikawa et al. 2018, ApJ, 868, 90)。本研究チームは、上述の爆発シミュレーションの結果を初期条件として、爆発によって吹き飛んだ物質の数千年に渡る進化を超新星残骸シミュレーションで追跡することにしました。

まず本研究チームが採用した初期条件について紹介します（図3）。この初期条件は D<sup>6</sup> モデルに基づいた爆発の 50 秒後の物質分布です。白色矮星が単独であるなら、爆発によって吹き飛んだ物質は球対称に膨張していきます。しかし、もう1つの白色矮星が存在することによって、飛び散った物質に「影」ができます。この「影」はまさに D<sup>6</sup> モデルの痕跡です。問題はこの「影」が超新星残骸になったときにどのように見えるのか、そしてそれがどのくらい長続きするのかです。本研究チームの超新星残骸シミュレーションはそれを図4のように明らかにしました。爆発 50 秒後に存在した「影」は、ほぼ球対称な超新星残骸の中にぽっかりと空いた「暗い穴」とその周りを囲む「明るい輪」という構造へと進化しました。さらにこの構造は、千年以上の長い年月にわたって存在し続けることも明らかになりました。

本研究は、超新星残骸の特徴から Ia 型超新星の爆発機構に迫ることができることを示しています。お隣の銀河である大マゼラン雲にある超新星残骸 SNR 0519-69.0 や SNR N103B (注5) の年齢は千年程度です。もし D<sup>6</sup> モデルに基づいてこれらの Ia 型超新星が起こったのだとすれば、これらの超新星残骸には「暗い穴」と「明るい輪」があるはずです。本研究成果は、今後の超新星残骸の観測指針となると期待されます。

本研究は、科研費「3次元流体シミュレーションで解き明かす超高速白色矮星と Ia 型超新星の起源 (課題番号: JP19K03907)」、科研費「ガンマ線バースト爆発放射機構の統一的理解 (課題番号: 19H00693)」、理化学研究所新領域開拓研究課題「Evolution of matter in the Universe」の支援によって実施されました。

## 5. 発表雑誌：

雑誌名：「The Astrophysical Journal」（オンライン版：5月6日）

論文タイトル：The double detonation of a double degenerate system, from Type Ia supernova explosion to its supernova remnant

著者：\*Gilles Ferrand, Ataru Tanikawa, Donald C. Warren, Shigehiro Nagataki, Samar Safi-Harb, Anne Decourchelle

DOI 番号：[10.3847/1538-4357/ac5c58](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ac5c58)

## 6. 問い合わせ先：

東京大学 大学院総合文化研究科 広域科学専攻

助教 谷川 衝 (たにかわ あたる)

E-mail: [tanikawa](mailto:tanikawa@ea.c.u-tokyo.ac.jp) (末尾に"@ea.c.u-tokyo.ac.jp"をつけてください)

電話番号: 03-5454-6611

## 7. 用語解説：

### (注1) Ia型超新星

超新星は突然明るく輝く天体で、1つの銀河の明るさに匹敵します。「Ia型」というのは光学スペクトルに基づく分類で、水素の吸収線がなく(I型)、ケイ素の吸収線が強い(a型)超新星がIa型超新星です。Ia型超新星は白色矮星が爆発したときに輝く天体と考えられています。

### (注2) 超新星残骸

超新星の後に残される星雲状の天体です。超新星によって吹き飛ばされた物質と星間物質がぶつかることで、それぞれの物質が高温になり、特にX線で明るく輝きます。

### (注3) 白色矮星

太陽のような恒星が燃え尽きた恒星です。大きさは地球程度(1万km)ですが、質量は太陽くらい(地球質量の30万倍)ある非常に密度の高い恒星です。

### (注4) 連星

2つの恒星が、互いの重力で引き合うことによって、周りを公転している天体です。

### (注5) SNR 0519-69.0, SNR N103B

どちらもお隣の銀河である大マゼラン雲にある超新星残骸の1つです。今から千年程度前に起こった超新星の残骸だと考えられています。

8. 添付資料 :

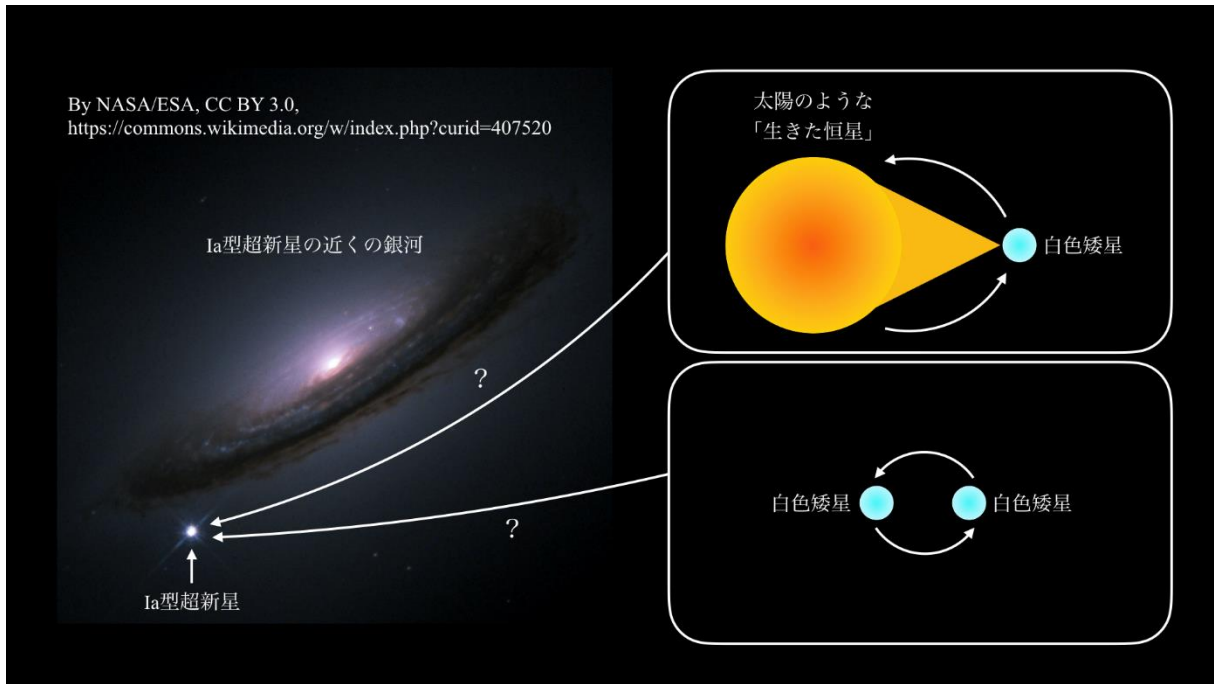


図1 : 左は Ia 型超新星 SN1994D とその超新星を含む銀河である NGC 4526。右は Ia 型超新星を起こすと考えられている連星の候補で上が「生きた恒星」と白色矮星の連星、下が白色矮星同士の連星。

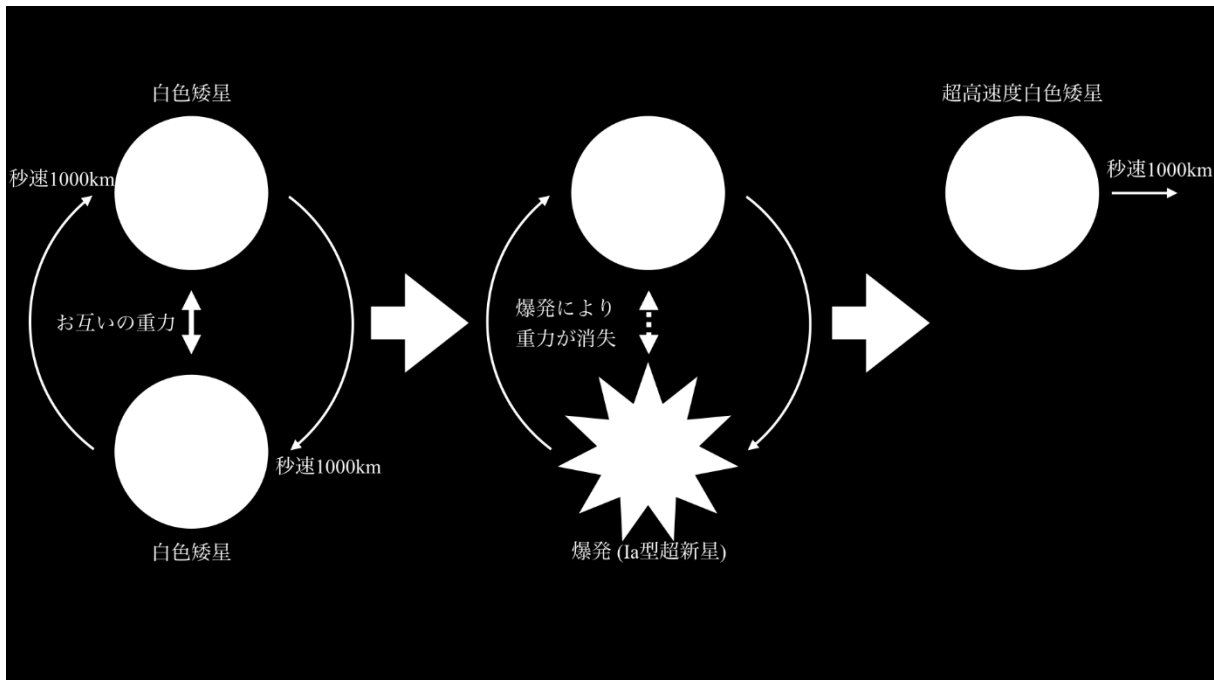


図2 : D<sup>6</sup>モデルの模式図。左 : 白色矮星同士の連星で、白色矮星それぞれが秒速 1,000km でお互いの周りを公転。真ん中 : 片方の白色矮星が爆発。右 : 爆発しなかった方の白色矮星は、爆発した白色矮星の重力から突然解放され、元の速度である秒速 1,000km で星間空間へ飛び去る。

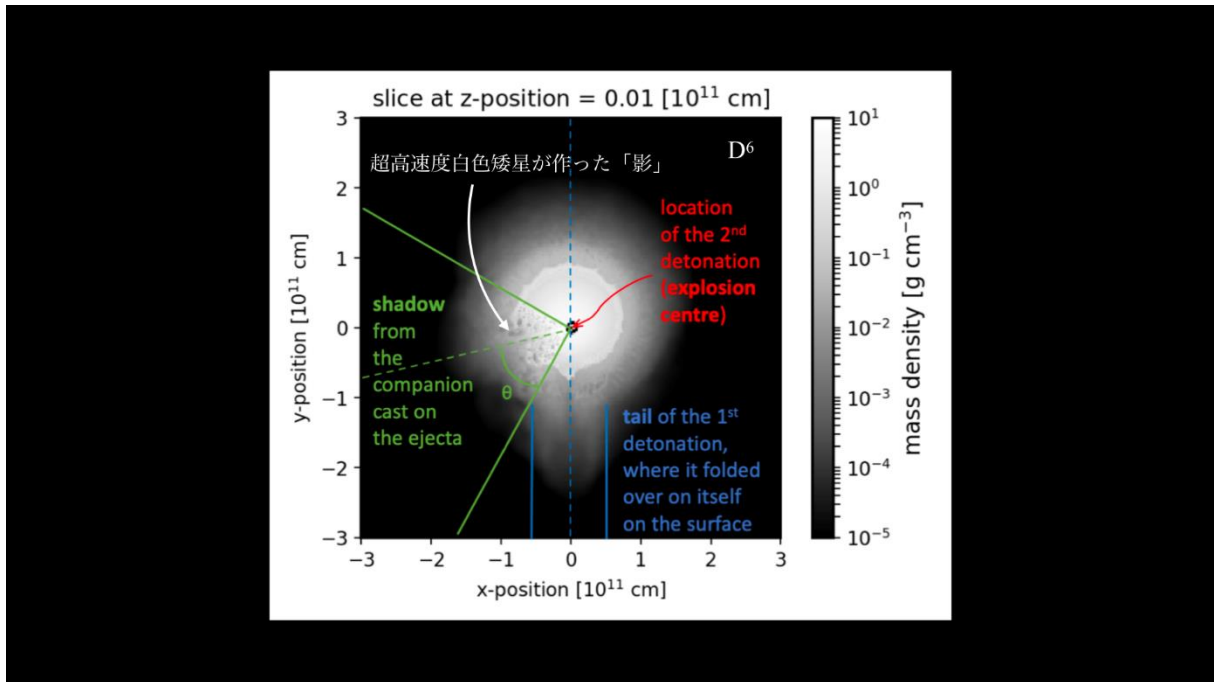


図3：D<sup>6</sup>モデルに基づいた白色矮星の爆発直後の物質分布の理論的予想。超新星残骸シミュレーションの初期条件として使用。緑の線に挟まれた領域は最終的に超高速度白色矮星となる白色矮星が作った「影」。単に白色矮星が爆発しただけだと、物質は球状に分布することになるが、もう1つの白色矮星が存在したことによって、球状の物質分布が崩れる。

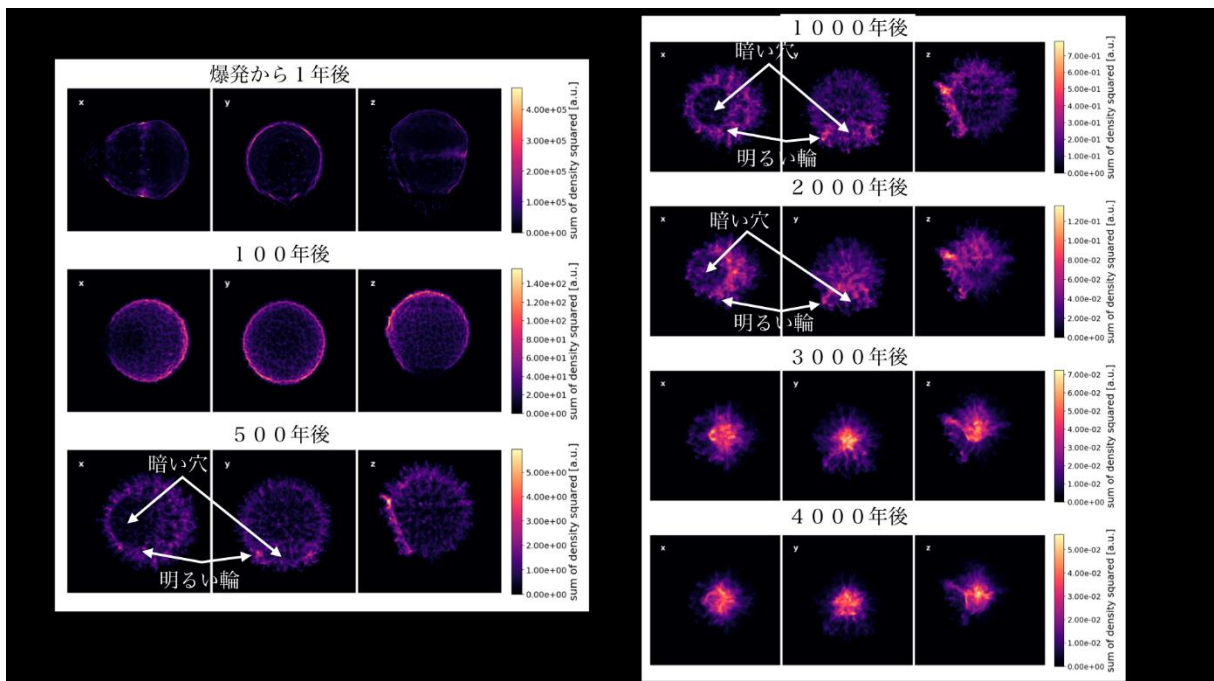


図4：超新星残骸シミュレーションの結果。色の明るさは物質の濃さを表している。特に爆発500年後から2000年後の間に、図3の「影」に由来する「暗い穴」とそれを取り囲む「明るい輪」が現れる。