

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 5 月 14 日現在

機関番号：34304

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2017

課題番号：15K13466

研究課題名(和文) 新星の窒素同位体比で探る太陽系起源・銀河系化学進化

研究課題名(英文) Chemical Evolution of Milky-way Galaxy and Origin of Solar System from Nitrogen Isotopic Ratios in Classical Novae

研究代表者

河北 秀世 (KAWAKITA, Hideyo)

京都産業大学・理学部・教授

研究者番号：70356129

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：非常に遅い進化をする新星(「遅い新星」)においては、可視光極大期に光球面温度が十分に下がり、分子が形成されることがある。我々は、2012年の「へびつかい座新星」V2676 Oph においてC2およびCN分子を同時に初めて新星において検出し、そのバンド吸収プロファイルから、新星における炭素および窒素の同位体存在比を初めて明らかにした。理論的先行研究から、観測された同位体比を説明するには比較的大きな(-1.1太陽質量以上の)白色矮星が必要であるが、可視光光度の変化が非常に遅いという特徴からは白色矮星質量が比較的軽い(-0.6太陽質量)ことが示唆され、矛盾が生じている。

研究成果の概要(英文)：For a "very slow nova", a photospheric temperature of the nova decreased toward the visual brightness maximum after its outburst, then reached low temperatures suitable for molecular formation like C2 and CN. We have detected C2 and CN molecules simultaneously for the first time in V2676 Oph and derive the isotopic ratios of carbon and nitrogen. These ratios are consistent with the theoretical predictions for the thermo-nuclear runaway reactions on a relatively massive white dwarf. However, the very slowly evolution of its light curve indicates that the mass of white dwarf is smaller based on the nova-wind theory for the optical light curve. There is a discrepancy between those nova models.

研究分野：天文学

キーワード：古典新星 分子生成 同位体比 熱核暴走反応

### 1. 研究開始当初の背景

プレソーラー粒子とは、隕石中に含まれる太陽系形成以前に存在した粒子の残存物であり、各種元素において太陽と大きく異なる同位体比を有している点が特徴である。それらの粒子は、その特徴的な各元素の同位体比から、AGB星、超新星、炭素星、そして新星において生成されたダストなどが含まれると考えられている(図1: Nittler 2008)。この中でも特に、非常に高い $^{15}\text{N}$ の存在比(=低い $^{14}\text{N}/^{15}\text{N}$ 比)を持つ粒子は、新星における熱核暴走反応においてのみ実現しうると理論的に予想されている(José et al. 2004)。しかし、新星爆発時の元素合成については、観測的には十分詳しく研究されておらず、炭素同位体比については観測から得られている例が若干あるものの、未だ、窒素同位体比についての観測例は皆無である。

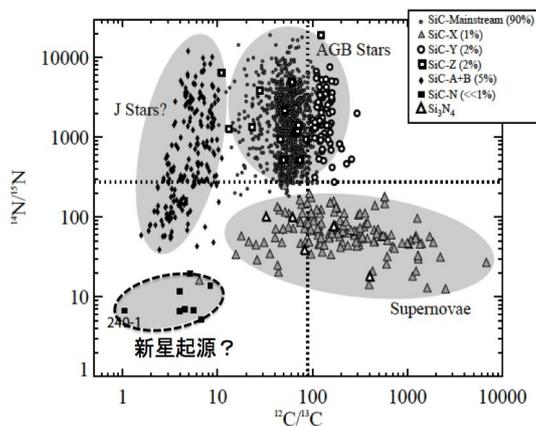


図1: プレソーラー粒子の同位体比

### 2. 研究の目的

太陽系の起源を探る上で重要な資料となるプレソーラー粒子中には、非常に高い $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ 比を持つ粒子が存在しており、新星起源と予想されている。これらの粒子の数は少ないものの、高い $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ 比ゆえにプレソーラー粒子全体の窒素同位体比に及ぼす影響は大きい。しかし、新星爆発で生成された窒素の同位体比が観測的に測定された例は、これまでに皆無である。新星において生成される窒素の同位体比は、太陽系の起源解明はもとより、銀河系の化学進化を解明する上でも不確定な因子となっている。そこで本研究では、新星爆発時に熱核暴走反応によって生成される窒素の同位体比を、新星エンベロープ中で生成される $\text{C}_2$ および $\text{CN}$ 分子の観測から直接、決定する。

### 3. 研究の方法

本研究では、これらの課題を克服するため、新星爆発における熱核暴走反応の結果として生じる窒素の同位体比を観測的に決定する。そのために、新星爆発時に一時的

に外層大気中で生成される $\text{C}_2$ および $\text{CN}$ 分子の吸収バンドを用い、窒素および炭素の同位体比を同時に決定する。

通常、原子の同位体・波長シフトは非常に小さいが、新星では膨張ガスの速度が大きく(約1000km/s)ライン幅が大きいいため、僅かな波長シフトの分離は事実上不可能である。ところが、分子の振動遷移における同位体・波長シフトは、原子の場合に比べて大きな値となり、波長分解能の低い分光計でも、同位体を含む分子が分離可能となる。近赤外線波長域における $\text{CO}$ 輝線の観測では、こうして新星における $^{12}\text{CO}/^{13}\text{CO}$ 比が得られている(Evans & Rawlings 2008)。同様な手法を用いて $\text{N}$ 原子の同位体比を決定する場合、 $\text{CN}$ 分子が最有力候補であるが、新星における分子の観測例は非常に少なく、 $\text{CN}$ 分子が検出された例は1934年の新星DQ Herのみであった。しかし、研究代表者を中心とするグループは2012年3月末に発見された新星V2676 Ophにおいて、 $\text{CN}$ および $\text{C}_2$ 分子を検出した(Nagashima et al. 2014a, *ApJ Letter* 780, 26)。新星における $\text{CN}$ の検出は2例目、 $\text{C}_2$ の検出は世界初となる。この低分散スペクトルから、波長560nm付近の $\text{CN}$ バンドでは、 $^{12}\text{C}^{15}\text{N}$ や $^{13}\text{C}^{14}\text{N}$ に対して約4~6nmもの同位体シフトがあり、(新星が $^{15}\text{N}$ や $^{13}\text{C}$ に富んでいることもあって)十分に同位体比が決定可能である。

本研究で狙う新星の $\text{CN}$ や $\text{C}_2$ 分子は、新星が最大光度となった直後から数日以内に観測されることが考えられ、最長でも1週間以内しか観測できない。そのため、世界にも他に類を見ない、迅速な分子検出と大型望遠鏡との連携を実現できる体制を整える。新星爆発初期における速やかな分子吸収スペクトル発見のために、中小口径の望遠鏡を持つ全国の大学/公共および個人の天文台で構成する監視ネットワークを構築する。また、世界の大型望遠鏡における突発天体観測体制(ToO観測プロポーザルの提案)をとり、分子検出から数日以内に集中的な観測を行って、 $\text{CN}$ や $\text{C}_2$ のみならず、 $\text{CO}$ 分子を含めた新星分子の観測を行い、新星における炭素および窒素の同位体比を観測的に決定する。

### 4. 研究成果

本研究では、日本国内および国外の観測拠点を整備し、新星の可視光・分光観測ネットワークを構築した。このネットワークは

- ・京都産業大学 神山天文台(京都)
- ・藤井・黒崎天文台(岡山)
- ・バンドン工科大学 ポッシャ天文台(インドネシア)

・その他、ブラジル他のアマチュア天文家と、プロとアマチュアを含め南北両半球におよんでいる。新しい新星が発見されれば、即時、分光観測を実施するなど、速やかな対応が可能な体制を実現した。研究を行った2015年から2017年にかけて、新規に発見された新星の可視光・分光フォローアップを実施したが、残念ながら本研究で狙っていたC<sub>2</sub>およびCN分子を生じるような新星を発見することはできなかった。十分に即応可能な体制ではあったが、これら二原子分子の存続期間が1週間程度ということもあり、時間的に十分に密な観測ができなかった可能性がある。こうした特殊なタイプの新星の存在割合についても、一定の制限がつけられると期待される。

一方で、本研究のきっかけとなった2012年に発見された「へびつかい座」の新星V2676 Ophについて、さらに詳細な観測・検討を行っている。以下、その成果についてまとめる。

V2676 Ophにおける炭素および窒素の同位体比決定：

Kawakita et al. (2015)では、我々が最初にV2676 OphでC<sub>2</sub>およびCNを検出した報告に加え、新たにアマチュア天文家等のデータを加えることで、同新星においてC<sub>2</sub>およびCNが2012年4月6日には検出されず、翌7日および8日に検出されていること、そして同月14日にはすでに消失していることを突止めた。最長でも7日間という存在期間は、1934年のDQ HerでのCN分子の検出期間と似ている。また、C<sub>2</sub>のSwanバンドおよびCNのRed systemバンドの吸収プロファイルから、炭素および窒素の同位体比について、<sup>12</sup>C/<sup>13</sup>C~4、<sup>14</sup>N/<sup>15</sup>N~2という結果を得た(図2)。これらの値は、プレソーラー粒子の中で起源が不明であったグループに相当しており、まさに新星爆発が太陽系起源物質の供給に寄与していたことを示している。

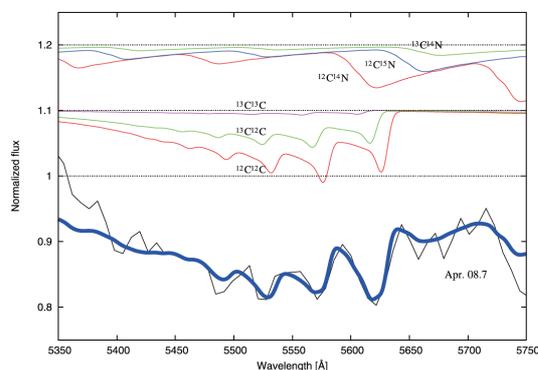


図2：V2676 Oph の分子バンド吸収

V2676 Ophにおける極大期付近での光球面温度変化：

Nagashima et al. (2014)やKawakita et al. (2015)で報告されたV2676 OphにおけるC<sub>2</sub>

およびCNの吸収バンドの起源について、これら二原子分子の形成について明らかにした。これら二原子分子は約5000K以上では解離してしまってほとんど存在できない。そのため、これら分子の存在領域は、約5000K以下のガスであったと考えられる。しかし、一般に新星の光球表面温度は、可視光極大期に最も低く、約8000Kである。C<sub>2</sub>やCNがどのような領域で形成されたのか？(光球面付近なのか、新星爆発放出物の先端付近なのか)を明らかにするため、爆発初期の新星光球面の温度を推定した。この時期にはほとんど輝線が存在しないため、観測された可視光スペクトルの色指数から、超巨星のモデル大気を想定して光球面温度が推定できる。しかし、新星は星間ガスによる赤化をうけており、その補正が必須である。Kawakita et al. (2016)では、吸収線が卓越して観測された2012年4月6日の可視光スペクトルを用い、これを超巨星のモデルスペクトルと比較することで(主に、Fe IIの吸収線強度の比較を通じて)、同日の光球面温度を推定した。この方法は連続光を規格化して行うために赤化の影響を受けない。その結果から新星の絶対光度が得られ、また、更には星間減光が決定できる。最後に、得られた星間減光を元にして、観測されている色指数(V-I)を用いて、光球面温度を推定した。

図3に示すように、発見直後にはすでに光球面温度は7000K程度まで低下しており、ほぼ一定のままである。これは可視光光度がほとんど変化していなかった事実とも整合的である。その後、可視光極大後に光球面温度が減少し、C<sub>2</sub>およびCNが検出された4月7日・8日の直前には5000K程度にまで低下している。そして、観測されたC<sub>2</sub>分子のSwanバンド吸収線プロファイルから得られる回転励起温度に連続的に接続している(分子形成時には4500~5000K)。この事実は、膨張した新星光球面の有効温度低下によって、主に光球面付近で二原子分子が生成された可能性を示唆している。

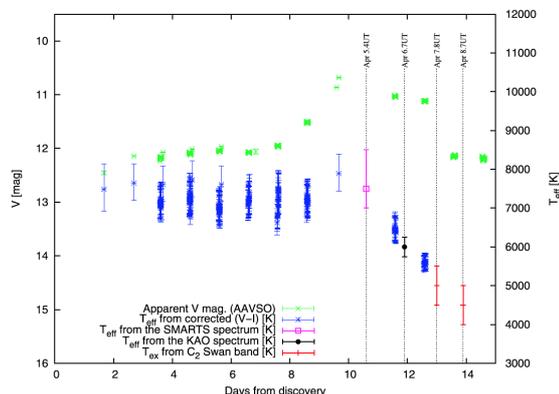


図3：光球面温度の時間変化

図3の温度減率から、冷却プロセスの起源として、一酸化炭素分子COによる放射冷却

が考えられる。ひとたび CO が生成され始めると、その効率的な赤外放射によって加速度的にガスの温度が下がり、C<sub>2</sub> や CN 分子の生成に至るものと考えられる。

V2676 Oph におけるダスト生成：

V2676 Oph は、その可視光および近赤外線光度曲線から、爆発の 90 日後くらいに大規模なダスト生成が生じたと考えられている。Kawakita et al. (2017) では、V2676 Oph について中間赤外線測光・分光観測を行った結果について報告し、この新星爆発の特徴について議論している。観測は爆発後 452 日および 782 日に実施している。それぞれにおいてダストからの顕著な赤外線連続放射と、未同定赤外線輝線(UIR)を検出した。ダストの成分は炭素質な粒子とシリケート粒子(酸素系)の両方が混在していることを示しており、非平衡な凝集プロセスでダストが生成されたことを意味している。また、UIR については、多環・芳香族炭化水素(PAH)あるいは Hydrogenated Amorphous Carbon (HAC) 粒子であると考えられる。爆発初期に炭素が豊富な外層大気であったことと、豊富な炭素質粒子が検出されたことは矛盾ない。また、0Ne 白色矮星で起きる新星で通常、見られる 12.8 μm の [Ne II] 輝線は検出されなかった。このことは、V2676 Oph が、CO 白色矮星を含む連星系で生じたことを示唆している。

V2676 Oph は、その光度曲線のゆっくりとした変化から、約 0.6 太陽質量の白色矮星が関与していると推定されている。このような軽い白色矮星は、中間赤外線分光観測の結果(上記のような CO 白色矮星であるという結論)と矛盾していない。しかし、Kawakita et al. (2015) で得られた炭素および窒素の同位体比は、TNR 理論に基づく計算では約 1.1 太陽質量以上でないと実現できない。このように、V2676 Oph を引き起こした白色矮星の質量については、明確な結論に至っていない。TNR 理論の改善が必要かもしれない。

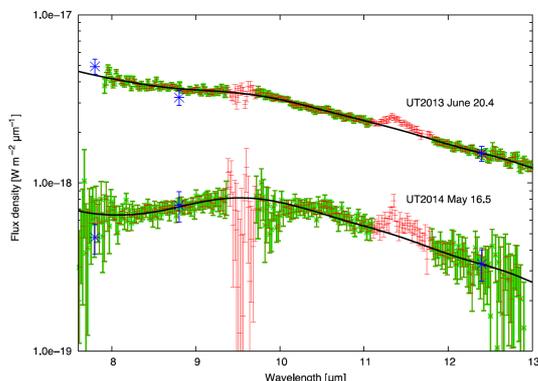


図4：ダストからの熱放射スペクトル

以上のように、本研究では V2676 Oph について現状で存在するデータを用いて様々な視点から研究を行った。その結果、新星爆発に

関する光度曲線の理論あるいは元素合成に関係する TNR 理論に問題がある可能性を明らかにすることができた。今後、次のサンプルの発見が最重要課題であることは議論を待たない。本研究で構築した観測ネットワークを今後も継続し、第二、第三の V2676 Oph の発見につとめる。

#### 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5件)

(1) H. Kawakita, T. Otsubo, A. Arai, Y. Shinnaka, M. Nagashima, MID-INFRARED SPECTROSCOPIC OBSERVATIONS OF THE DUST-FORMING CLASSICAL NOVA V2676 OPH, The Astronomical Journal, 153, 2017, article id. 74. (査読有り)

DOI: 10.3847/1538-3881/153/2/74

(2) H. Kawakita, A. Arai, M. Fujii, The evolution of photospheric temperature in nova V2676 Oph toward the formation of C<sub>2</sub> and CN during its near-maximum phase, Publication of the Astronomical Society of Japan, 68, 2016, article id. 87. (査読有り)

DOI: 10.1093/pasj/psw079

(3) A. Arai, H. Kawakita, Y. Shinnaka, A. Tajitsu, ORIGINS OF ABSORPTION SYSTEMS OF CLASSICAL NOVA V2659 CYG (NOVA CYG 2014), The Astrophysical Journal, 830, 2016, article id. 30. (査読有り)

DOI: 10.3847/0004-637X/830/1/30

(4) A. Tajitsu, K. Sadakane, H. Naito, A. Arai, H. Kawakita, W. Aoki, THE <sup>7</sup>Be II RESONANCE LINES IN TWO CLASSICAL NOVAE V5668 SGR AND V2944 OPH, The Astrophysical Journal, 818, 2016, article id. 191. (査読有り)

DOI: 10.3847/0004-637X/818/2/191

(5) H. Kawakita, M. Fujii, M. Nagashima, T. Kajikawa, N. Kubo, A. Arai, Formation of C<sub>2</sub> and CN in nova V2676 Oph around its visual brightness maximum, Publication of the Astronomical Society of Japan, 67, 2015, article id. 17. (査読有り)

DOI: 10.1093/pasj/psu150

[学会発表](計4件)

(1) H. Kawakita, Evolution of V2676 Oph: formation of molecules and dust grains, invited talk, The Golden Age of Cataclysmic Variables and Related Objects - IV (Sept. 11-16, 2017, Palermo, Italy).

(2) A. Arai, Origin of Absorption Systems and Ejecta Structure of Classical Nova V2659 Cyg (Nova Cyg 2014), invited talk, The Golden Age of Cataclysmic Variables and Related Objects - IV (Sept. 11-16, 2017, Palermo, Italy).

(3) A. Arai, Isotopic ratios of  $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$  and  $^{14}\text{N}/^{15}\text{N}$  as clues to nucleosynthesis in novae, invited talk, The Golden Age of Cataclysmic Variables and Related Objects - III (Sept. 7-12, 2015, Palermo, Italy).

(4) H. Kawakita, Dust grains in the molecular forming nova V2676 Oph, invited talk, The Golden Age of Cataclysmic Variables and Related Objects - III (Sept. 7-12, 2015, Palermo, Italy).

〔その他〕

ホームページ等

<https://www.kyoto-su.ac.jp/observatory/project.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

河北 秀世 (KAWAKITA, Hideyo)  
京都産業大学・理学部・教授  
研究者番号：70356129

### (2) 研究分担者

新井 彰 (ARAI, Akira)  
京都産業大学・神山天文台・主任研究員  
研究者番号：30582457

### (3) 連携研究者

渡部 潤一 (WATANABE, Jun-ichi)  
国立天文台・天文情報センター・教授  
研究者番号：50201190