

史上最大質量の超高速恒星プロミネンス噴出

—せいめい望遠鏡が捉えた極限宇宙天気現象—

概要

京都大学大学院理学研究科 井上峻 修士課程学生、国立天文台 前原裕之 助教らの研究グループは、京都大学 3.8m 「せいめい」望遠鏡を用いてりょうけん座 RS 型変光星 V1355 Orionis のモニタ観測を実施し、巨大爆発現象「スーパーフレア」とそれに伴う超高速プロミネンス噴出を検出することに成功しました。

太陽・恒星フレアはプロミネンスと呼ばれる温度約一万度のプラズマの噴出現象を伴うことがあります。噴出したプロミネンスの速度が十分に大きい場合、そのプロミネンスは星の重力を振り払い、星の外にまで飛び出す質量噴出現象となることが太陽では確認されてきました。太陽以外の恒星でもフレアに伴ってプロミネンス噴出が確認された例はこれまでもありましたが、そのプロミネンスの速度が星の重力を振り払えるほど大きかった例はほぼ皆無でした。本研究チームが今回発見したプロミネンスは約 1600 km/s という極めて大きい速度で噴出しており、この星の重力を振り払うのに必要な最低速度である 350 km/s を大きく超過していました。さらに、今回発見されたプロミネンスが太陽での最大級のプロミネンス噴出の 100 倍以上の質量を持っており、観測史上最大の重さのプロミネンスであることもわかりました。恒星の活動が周囲の惑星環境へと影響を与える「宇宙天気現象」の最極端なケースが今回捉えられたこととなります。

本成果は、2023 年 4 月 28 日（日本時間）に国際学術誌「*The Astrophysical Journal*」にオンライン掲載されました。



オリオン座 V1355 星で発生したスーパーフレアと巨大プロミネンス噴出の想像図。（クレジット：国立天文台）

1. 背景

太陽・恒星フレアは星の表面で起きる突発的な爆発現象です。フレアに伴って温度約一萬度のプラズマの塊である「プロミネンス」が星から噴出することがあります。噴出したプロミネンスの速度がその星の重力を振り払うのに必要な最低速度である「脱出速度」を上回っていると、プロミネンスはより上層のコロナの一部を纏い星の外にまで飛び出していきます。このことは「コロナ質量放出」と呼ばれます。太陽におけるフレア、コロナ質量放出は周囲の惑星環境に多大な影響を及ぼし、これらは「宇宙天気現象」の一つです。実際に地球圏で暮らす我々も、通信障害や大規模停電といった形でその被害を被った経験があります。そのため、太陽以外の恒星においてもフレアやコロナ質量放出は周囲の惑星環境へと多大な影響を与えていると考えられ、近年注目されています。また、恒星の場合は最大級の太陽フレアの10倍以上の規模である「スーパーフレア」が発生することが知られています。フレアの規模が大きいほど、それに伴って起きるプロミネンス噴出も高速・大質量なものとなる傾向があることがこれまで知られてきました。つまり、恒星ではスーパーフレアに伴って、太陽の何十倍もの規模のコロナ質量放出が起きており、それが太陽のコロナ質量放出の比にならない規模で、周囲の惑星環境へと影響を与えている可能性があるのです。また、コロナ質量放出は星が自身の質量の一部を失う現象であることから、恒星進化という観点からも重要な意味を持ちます。

しかし、これまでにフレアに伴ってプロミネンスが噴出する様子を恒星において観測した例はありましたが、その速度が星の脱出速度を超過していた例はほぼ皆無でした。そのため、恒星においてプロミネンス噴出がコロナ質量放出へと発展したという証拠はありませんでした。惑星環境と恒星進化への影響という二つの観点から極めて重要な現象である恒星のコロナ質量放出を検出したという確固たる証拠は存在しなかったのです。

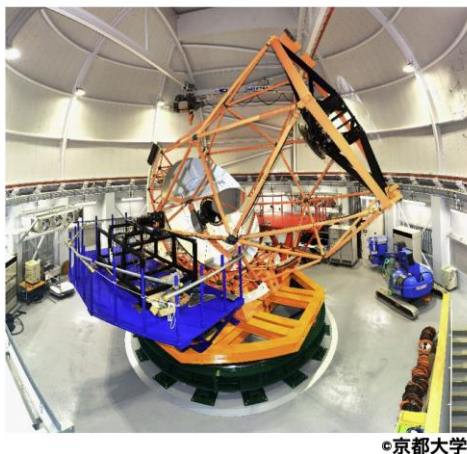
2. 研究手法・成果

<研究手法>

1. 今回我々は、オリオン座 V1355 星(英名: V1355 Orionis)を連続的に「分光」する観測を京都大学 3.8m「せいめい」望遠鏡を用いて 2020 年 12 月下旬に 1 週間ほど実施しました。また、それと同時に TESS 衛星(NASA)による「測光」観測も行いました。(図 1)
2. 「測光」観測によって得られたデータを解析することで、得られたフレアのエネルギーや持続時間を調べました。
3. 「分光」観測によって得られたデータを解析することで、フレア中の H α 水素線が「ドップラーシフト」という現象を起こしているかどうかを調べました。

地上からの可視分光観測

京都大学岡山天文台 3.8mせいめい望遠鏡



©京都大学

宇宙からの可視測光観測

NASA TESS衛星



©NASA

図 1 今回の研究で使用された望遠鏡

<成果>

- 2020年12月19日23時30分(日本時間)ごろ、TESS衛星とせいめい望遠鏡がそれぞれ、星からの白色光とH α 水素線が増大していることを検出し、その後3時間ほど増光が継続しました(図2)。星で起きたスーパーフレアがこの増光の原因でした。このスーパーフレアは最大級の太陽フレアの7000倍のエネルギー規模である極めて大規模なスーパーフレアであることもわかりました。
- スーパーフレアが起きている間、H α 水素線が「ドップラーシフト」を起こしており(図3)、スーパーフレアに伴ってプロミネンス噴出が起きたことがわかりました。検出されたプロミネンスは1600 km/sという超高速で噴出しており、星の脱出速度(350 km/s)を優に超えています。さらに、プロミネンスの質量は太陽での最大級のものの100倍の大きさである 10^{18} g以上で、史上最大の重さであることも判明しました。

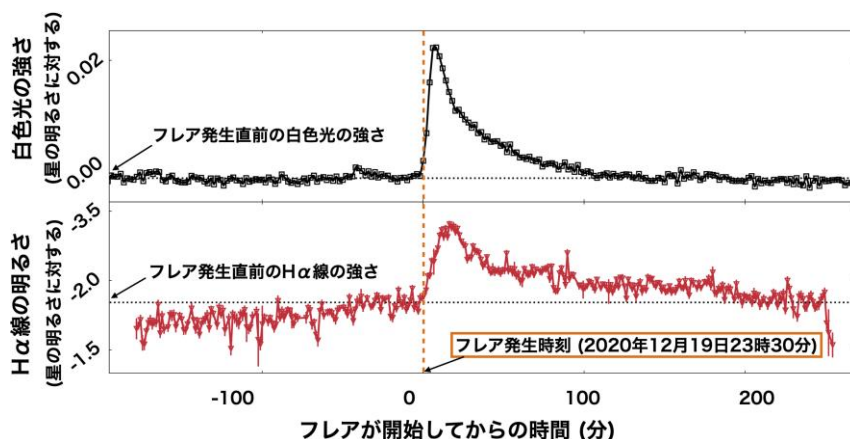


図2 スーパーフレアが起きた前後での星の光の強さの時間変動

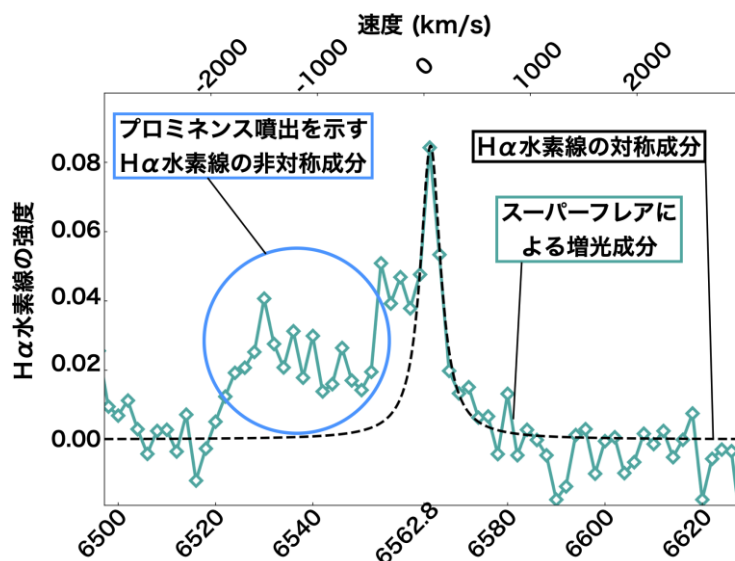


図3 スーパーフレアによるH α 水素線の増光スペクトル

3. 波及効果、今後の予定

プロミネンス噴出とその発展型であるコロナ質量放出は星の周囲の惑星環境と星自身の恒星進化という2つの観点から重要な意味を持ちます。前者については、星から噴出したプラズマが周囲の惑星と相互作用すると、惑星大気の損失を引き起こし、このことはその惑星で生物が存在し得るかを決定する重要な要因の一つとなります。後者については、星がコロナ質量放出により、どれほどの頻度でどれだけの質量と角運動量を失っているのかを調べることは、恒星が進化の過程でどのように変化していくのかを決める重要な指標となります。特に、今回発見されたプロミネンス噴出はその速度、質量ともに未だかつてないほどの大規模な事例であったことから、惑星環境と恒星進化への影響も極めて大きいと推定されます。星によっては、これほどにまで大規模なプロミネンス噴出が起きるという前例を作ったという点で、今回の我々の発見は、今後の恒星・惑星科学におけるプロミネンス噴出という現象の立ち位置を大きく変えるものです。

本研究では、可視光観測による脱出速度を超過するH α 線のドップラーシフトという形で、恒星のコロナ質量放出の確実な証拠を捉えました。恒星のコロナ質量放出を検出する方法は他にもあります。例えば、コロナは100万度以上の高温なプラズマであるために、定常的にX線を放出しています。コロナ質量放出が起きた直後はコロナの密度が一時的に低下するため、X線の明るさがそれまでよりも暗くなることが知られています。このX線での減光をH α 線のドップラーシフトと同時に捉えることができれば、より恒星表面でのプロミネンス噴出がコロ

ナ質量放出へと発展する過程を詳しく理解することができます。また、これ以外にも電波によりコロナ質量放出の痕跡を観測する方法などもあります。そこで、今後は可視光のみでなく、X線や電波を観測できる望遠鏡と連携しながら星の同時観測を行い、多波長でのプロミネンス噴出とコロナ質量放出の同時検出を達成し、恒星における大規模なコロナ質量放出の物理機構の理解を深めたいと考えています。

4. 研究プロジェクトについて

本研究は下記メンバーによって構成されるチームによって実施しました。

井上峻(京都大学大学院理学研究科物理学第二教室 修士学生)、前原裕之(国立天文台ハワイ観測所岡山分室 助教)、野津湧太(コロラド大学大気宇宙物理学研究所 研究員)、行方宏介(国立天文台アルマプロジェクト 研究員)、本田敏志(兵庫県立大学自然・環境科学研究所天文科学センター 准教授)、浪崎桂一(京都大学大学院理学研究科宇宙物理学教室 修士学生)、野上大作(京都大学大学院理学研究科宇宙物理学教室 准教授)、柴田一成(京都大学大学院理学研究科附属天文台 名誉教授 / 同志社大学工学部環境システム学科 特別客員教授)

本研究は JSPS 科研費 20K04032、20H05643、21J00106、21J00316、21H01131 の助成を受けたものです。

<用語解説>

※1 **りょうけん座 RS 型変光星**：磁気活動が活発な近接連星系であり、太陽に比べ大規模なスーパーフレアを頻繁に起こすことが知られている。

※2 **宇宙天気現象**：太陽や恒星が起こす、フレアやコロナ質量放出に代表される周囲の惑星空間へ影響を与える現象。

※3 **スーパーフレア**：太陽での最大級のフレア(10^{32} erg)の10倍以上のエネルギー規模のフレア。

※4 **分光観測と測光観測**：分光観測は、星からの可視光を波長に分けて観測する方法で、星のスペクトルを得ることができる。一方、測光観測は星からの可視光のある波長帯での明るさを測定する方法。

※5 **H α 水素線**：水素原子があるエネルギー準位間を遷移する時に放出する、肉眼で見える赤色の光。

<研究者のコメント>

自分のように研究業界に入ってまだ日の浅い学生であっても、間が良ければ今回のような極めて珍しい現象の発見を成し得るという点が、自然科学全般の中で突発的現象を研究することの醍醐味だと思います。今後はX線や電波などを加えた、より多数の望遠鏡での同時観測により、恒星におけるスーパーフレアとプロミネンス噴出の多波長同時検出に挑戦したいと考えています。(井上峻)

<論文タイトルと著者>

タイトル：Detection of a high-velocity prominence eruption leading to a CME associated with a superflare on the RS CVn-type star V1355 Orionis (RS CVn 型星 V1355 Orionis におけるスーパーフレアに伴う高速プロミネンス噴出)

著者：井上峻、前原裕之、野津湧太、行方宏介、本田敏志、浪崎桂一、野上大作、柴田一成

掲載誌：The Astrophysical Journal DOI：10.3847/1538-4357/acb7e8