

令和 6 年 6 月 10 日現在

機関番号：82645

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2023

課題番号：18K03714

研究課題名(和文) 未知の突発的質量放出現象の解明

研究課題名(英文) Unveiling the nature of a new-type episodic mass-loss phenomenon

研究代表者

山村 一誠 (Yamamura, Issei)

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・准教授

研究者番号：40322630

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、2012年に我々が発見した、過去約30年の間に大規模な質量放出を行い、急激な赤外線光度の変動を見せた天体 WISE J1810 の素性を、我々がこれまで取得した赤外線および電波領域の観測データと、放射輸送計算による詳細な解析により、明らかにすることを目的としたものである。本研究により、(1) WISE J1810 のダストエンベロープの見かけのサイズ、概形を信頼性高く測定し、(2) 測光精度が向上したデータに基づく放射計算からダストエンベロープのサイズ・質量を推定し、(3) この天体の距離や光度を推測し、これまでに知られているいかなる天体とも異なる性質を示すことを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

WISE J1810 は、もともと「突発的質量放出」を現在進行中の天体として初めての観測例と認識され、その詳細な分析により恒星進化・質量放出研究の理解を深めることが期待されていた。しかし、本研究を通じてこの天体の持つ特異性、例えば放出物質の質量、エンベロープの膨張速度などがこれまで知られているいかなる天体とも異なることが明確になった。本研究期間では、この天体のすべての性質を解明するには至らなかったが、今後のフォローアップ研究により、恒星進化研究の新たな一面を拓き、また宇宙の化学進化研究へ影響を与える可能性もあると考えている。

研究成果の概要(英文)：The research is aiming to reveal the nature of a unique object WISE J1810, which experienced a drastic change of infrared luminosity due to an explosive mass loss in the last 30 years, by intensive analysis of infrared and radio observation data with precious radiative transfer calculations. We gained the following results during the period of KAKENHI support: (1) re-analysis of the observation data especially with the ALMA high-resolution data enable us to measure the size of the dust envelope of this object, (2) with an improved photometry dataset and intensive radiative transfer analysis the parameter ranges that describe the observed SED are derived, (3) the distance and luminosity of the object are then estimated. These results emphasize the uniqueness of this object.

研究分野：恒星物理学

キーワード：質量放出 ダストエンベロープ 恒星進化

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

本研究は、2012年に我々が発見した、過去約30年の間に大規模な質量放出を行い、急激な赤外線光度の変動を見せた天体の素性を、我々がこれまで取得した赤外線～電波領域の観測データと、輻射輸送計算による詳細な解析により、明らかにすることを目的としたものである。

1970年代からの赤外線および電波による天文学観測技術の発達により、進化末期の赤色巨星が表面の物質を宇宙空間に放出する「質量放出」を活発に行っていることが分かっている。質量放出は、次世代の星の原料となる物質を供給するが、そこには星中心部で行われている核融合反応により新たに合成された元素が追加されるため、宇宙の化学進化を進める原動力ともなっている。

質量放出は、星自身の進化にも影響を与えるため、星の初期質量や金属量、連星系の有無、そして年齢といった様々なパラメータが関与する複雑な現象であり、その理解は長年の課題である。1980年代後半以降、質量放出は単調な現象ではなく時々刻々放出量に変化するダイナミックな現象であることが分かってきた。特に、星内部のヘリウム層の暴発的燃焼に伴う「突発的質量放出」によって形成された、物理的に薄い星周エンベロープがいくつも確認されていた。

我々は、赤外線全天サーベイ衛星 WISE による、近・中間赤外線点源天体カタログの解析中に、WISE J180956.27-330500.2 (以下 WISE J1810 と略す) という特異な性質を持つ天体を偶然発見した。この天体は、1983年の IRAS による全天サーベイ観測時には未検出だったが、2009年の WISE では赤外線で見え輝いていること、また 1998年の 2MASS サーベイでは近赤外線波長で見え輝いていたにもかかわらず、2010年には検出できないほど暗くなっているなど、10年単位で赤外線光度の大きな変動を見せていた。当初我々は、この天体が前述の突発的質量放出を起こした直後の天体として、初めて認識された例ではないかと考え、恒星内部の各燃焼から恒星進化過程を理解するために重要な天体と貼ると認識し、研究を進めてきた。しかし、予備的な解析から、放出された物質の量が過去の観測例よりも相当大きいことが予想され、既知の恒星進化の過程とは別のシナリオを考える必要がある可能性を認識し、詳細な解析を行うために本科研費研究を開始した。

2. 研究の目的

あらためて、本研究の目的は、(1) WISE J1810 の星周エンベロープの構造を、それまでに得られた 2MASS, Subaru, WISE, AKARI, Herschel, ALMA 等のデータをもとに、精密な放射輸送計算に基づくモデル解析を行うことで、この天体の星周エンベロープの構造を決定すること、(2) その結果から、この天体の性質を導き、その進化段階について議論することである。また、これらの研究過程において、(3) 非常に光学的に厚いダストエンベロープに適応可能な放射輸送モデルの構築、(4) これまでに取得したデータ、特に ALMA, Herschel の観測データの再解析による信頼性向上、についても進める。

3. 研究の方法

本科研費によって導入した、高速の Linux 計算サーバーおよび同等以上の計算能力を持つ MacStudio 等により、放射輸送モデル計算を行い、測光観測結果を再現するダストエンベロープの構造を決定する。特に ALMA, Herschel については、データ処理システムが更新されるに応じて最新の解析を行うこととする。平行して、ALMA による CO J=3-2, 2-1 輝線の観測データを分子エンベロープのモデルにより解析し、ガスエンベロープの膨張速度も含めた構造を決定し、ダストエンベロープの解析結果と合わせて天体の構造を議論する。

この天体のダストエンベロープは、光学的に極めて厚いことが予想されるため、そのような状況でも正確な計算ができる、モンテカルロ法を用いた放射輸送モデルを、北海道大学の小笹隆名誉教授の協力により作成する。ただし、このモデルは本質的に計算量が膨大となるため、広範囲のパラメータ空間をサーベイして適切なモデルパラメータを求めるには大変時間がかかることが予想される。そのため、ダストシェルの構造をすべてパラメータで表現した(それらパラメータ間の物理的整合性は問わない)簡易モデルによる計算を行い、パラメータ範囲を制限することとした。

4. 研究成果

本研究の成果は以下の通りである。なお、新型コロナウイルスの影響も含め、申請者の業務量の予測不能な変動により、結果を論文として発表する作業については、今後継続して行うこととしている。

(1) ALMA, Herschel データの再解析

2021年より、ALMA 観測データの再解析を、最新の解析ソフトウェアおよび ALMA ユーザーサポートのアドバイスに基づき進めた。観測直後の解析より、230 GHz 帯の連続波画像(ダストエンベロープからの放射を見ていると考えられる)に、天体の位置から片側に延びた放射成分が認められ、ジェットあるいは太古の質量放出を示唆することが課題となっていたが、2023年頃にさらに念入りな解析を行ったところ、これが装置の一時的な補正エラーに起因することが

確認された。この異常データを除いて解析を行ったところ、ダストエンベロープからの放射は天体位置のみ存在することが確認され、誤った成果を報告することを免れた。また、最新の高解像度解析画像では、ダストエンベロープの形状に非等方性が認められ、この天体の質量放出がさらに議論を要する可能性が明らかになった。

一方 *Herschel* については、プロジェクトによるデータ処理とアーカイブ化が進み、2023 年時点で十分信頼できる解析結果がアーカイブにて配布されている。これをもとに慎重に強度測

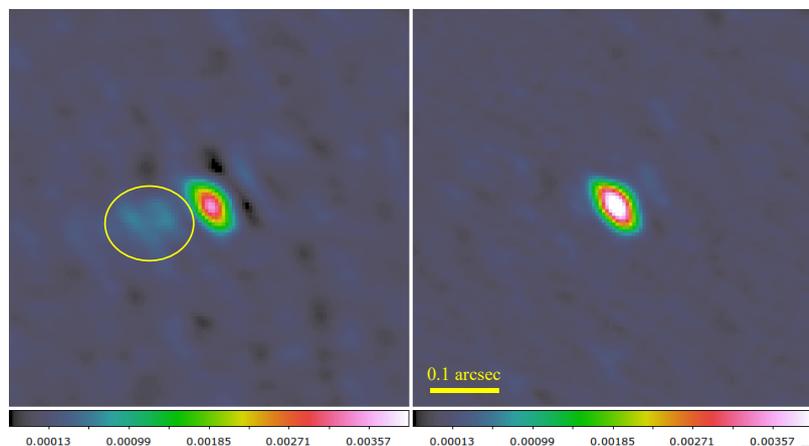


図 1 WISE J1810 の ALMA による 230GHz での連続放射画像。(左)データ処理改善前と(右)改善後。改善前の画像には、中心の天体の左側に広がった成分が見られていたが、処理の見直しにより、消失した。

定を行い、他のデータと合わせて確定値と見なせる測光データセットを構築した(図 2)。

図 2 に示す、最新の SED を見ると、この天体の放射は波長 1 mm を超える電波領域までほぼ黒体放射的であり、すなわちこの天体のダストシェル連続波放射が、光学的に極めて厚く、かつほぼ等温(すなわち物理的には薄い)な構造から放射されていることが示唆される。

(2) モンテカルロ法による放射輸送モデルの構築と高速化

北海道大学の小笹隆名誉教授の協力により、モンテカルロ法を用いた放射輸送プログラムを構築した。WISE J1810 の想定される構造に合わせて、2つの独立したダストエンベロープ層それぞれの内径、外径とダスト量(実際には光学的厚み)をパラメータとして与えられるようにしている。

Fortran で書かれた計算コードを、実際に走らせながら並列計算を効果的に行い高速化できるように最適化を行い、当初のコードに対して最大 3 倍程度の高速化に成功した。

(3) ダストエンベロープの構造解析

前述した、構造をすべてパラメータで記述し計算を高速化した簡易モデルによる解析により、WISE J1810 のダストエンベロープの構造に制限をつけることを試みた。60 万通りを越える組み合わせから、最も観測 SED を再現する 100 通りのパラメータの範囲を図 3(左)に、ベストフィットスペクトルを図 3(右)に示す。結果として、想定通り、観測された SED を再現できるのは、ダストエンベロープが物理的に薄く、光学的に厚いケースのみであることが確認された。

この結果に基づき、モンテカルロ法を用いた放射輸送モデルを用い、物理的に整合性のとれた精密な放射輸送計算で構造決定を進めており、パラメータ間の依存関係などについて一定の知見が得られてきた。しかし、計算機資源の増強にもかかわらず個々の計算に非常に時間がかかること、また申請者の想定外の業務多忙のため本研究に費やせる時間が限られてしまったことから、解析は研究期間を超えて進行中である。

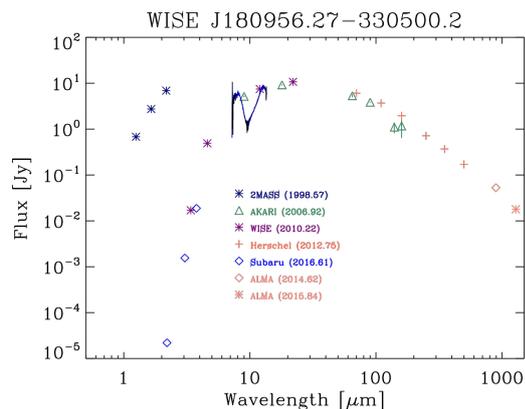


図 2 WISE J1810 の各種観測データからなる Spectral Energy Distribution (SED)。

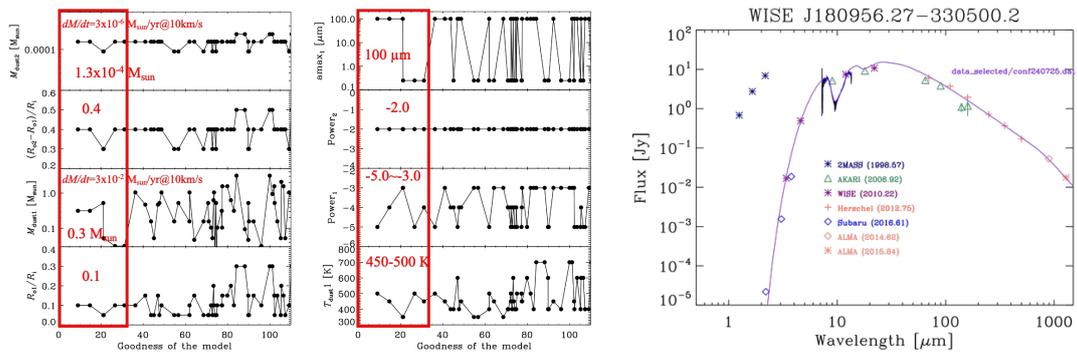


図 3 先行して行った簡易モデルによる、最も観測をよく再現するパラメータ範囲の決定 (左)およびベストフィットスペクトルの例(右)。遠赤外線～サブミリ波領域まで黒体放射的な SED と、 $10\ \mu\text{m}$ 帯のシリケートダストの吸収バンドをよく再現している。

いずれにせよ、これまでに得られたダストエンベロープのパラメータと、ALMAにより直接測定したダスト放射領域の大きさから、この天体までの距離が約 $8\ \text{kpc}$ であること(すなわち、銀河系内天体である可能性が高いこと)、絶対光度が約 7400 太陽光度であることが推定される。これは、低・中質量の進化末期(AGB期)赤色巨星と矛盾しないが、放出質量、膨張速度などについて前例が見つからず、新たな種類の天体の可能性を含めて今後も研究を進める必要がある。

本研究の最終結果の発表は今後の作業となったが、研究期間内に上記のような様々な新しい知見が得られ、この特異な天体の性質が徐々に明らかになってきている。これは、本科研費による支援がなければ成し遂げられなかったことである。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 山村 一誠 (JAXA宇宙科学研究所), 小笹 隆司 (北海道大学), Poshak Gandhi (サウサンプトン大学), 植田稔也 (デンバー大学), 泉浦秀行 (国立天文台), 瀧田怜 (東京大学)
2. 発表標題 突発的質量放出天体 WISE-J180956.27-330500.2 のダストシェル構造(2)
3. 学会等名 日本天文学会2023年春季年会 N21a
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 山村 一誠、 (JAXA宇宙科学研究所), 小笹 隆司 (北海道大学), Poshak Gandhi (サウサンプトン大学), 植田稔也 (デンバー大学), 泉浦秀行 (国立天文台), 瀧田怜 (東京大学)
2. 発表標題 突発的質量放出天体 WISE-J180956.27-330500.2 のダストシェル構造
3. 学会等名 日本天文学会2022年春季年会 N20a
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山村一誠
2. 発表標題 謎の突発的質量放出天体 WISE J1810
3. 学会等名 「銀河の化学進化とダスト形成」研究会 北海道大学 2021/03/19,20
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------