

JWST, 超新星 1987A と惑星状星雲 NGC 6302 のダストに挑戦する



松浦 美香子

連合王国 ウェールズ カーディフ大学

〈School of Physics and Astronomy, Cardiff University

Queen's Buildings, The Parade, Cardiff CF24 3AA, UK

Ysgol Ffiseg a Seryddiaeth, Prifysgol Caerdydd

Adeladau'r Frenhines, Y Pared, Careddydd CF23 3AA, UK〉

e-mail: matsuuram@cardiff.ac.uk

JWSTの高感度と高分解能な赤外線装置は、新たな研究展開に向け主導的役割を果たすことが期待されている。ここでは、星の周辺のダストに関する二つのプロポーザルを書く過程を述べ、ダストの研究の展望を記す。一つ目のプロポーザルの観測天体は超新星1987Aで、超新星からのショックが周辺にあるダストを破壊していく様子を捉えていくことが期待される。二つ目の天体は惑星状星雲NGC 6302で、中にある円盤の中で、次第にダストの結晶が育つ過程が捉えられるかもしれない。

1. JWSTで期待できるダストの観測

2021年12月に打ち上げ予定のジェームズ・ウェブ宇宙望遠鏡 (James Webb Space Telescope: 以下JWST) は赤外線ですべて非常に高い感度を誇り、以前の衛星よりも感度が桁違いに改善される。望遠鏡の直径は6.5 mと、近・中間赤外線の衛星としては、ハッブルの2.4 m, ISOの60 cm, Spitzerの85 cmから非常に大きくなり、空間分解能も上がる。さらに人工衛星であるので、地球大気の影響を受けず、赤外線の幅広い波長で観測することができる。こういった特徴を考慮すると赤外線の観測はダストに関連した研究が一つの大きな研究テーマになることは予測されていた。そこで、私は星のダストに関する研究テーマで二つのJWSTのプロポーザルを書くことにした。一つは超新星1987A, もう一つは惑星状星雲NGC6302にあるダストである。幸いにも、両方のプロポーザルが

受理されるという幸運に恵まれた。ここでは、二つのプロポーザルを書くことになった経緯をつづる。

2. 超新星 1987A

そもそもの始まり

2016年6月、アメリカの研究者Geoff Clayton教授が私にメールを送ってきた。「超新星に関するサイエンスをまとめて、JWSTのERSのプロポーザルを書こう。美香子は超新星1987Aに関するサイエンスの部分を書いて」とあった。オッケー、普段から超新星1987Aの研究をしているから、プロポーザルの一部を書くのは、なんとかなるであろう、と私は考えた。

超新星1987AはSpitzer宇宙望遠鏡で20年近くの間、赤外線での光度変光曲線が測定され続けられていて、2010年くらいまでは、明るくなり続けて、それ以降は少しずつ暗くなっていることが

知られている。超新星1987Aには、爆発前の赤色超巨星の時期に質量放出で出てきた物質が溜め込まれてできたリングがあり、そのリングに超新星爆発の衝撃波が猛スピードでぶつかって、衝突されたリングが明るく輝いていると考えられている。ただ、2010年以降は、超新星の衝撃波が段々リングの外側にまで到達して、衝突のエネルギーが少なくなって、だんだん暗くなっているとされている。Spitzerの測光は、リングにあるダストが衝突によって温められて、光り輝いているのを捕らえていると考えられている。

もちろん、「考えられている」では、物足りない。そこでJWSTの登場である。Spitzerで測光観測された3-4 μm の波長は、実際にリングにあるダストが光り輝いていることを、イメージとして分解観測すれば証明できる。Spitzerは解像度が2秒程度なので、超新星1987Aのリング（最大径2秒弱：図1）は空間分解できない。リングの他に、居座っている超新星放出物（エジェクタ ejecta）から赤外線の光が来ている可能性もあるので、これは空間分解能が高い（1ピクセル0.031秒）JWSTのNIRCamでイメージを取るに限る、というわけである。

超新星1987Aは、すでに中間赤外線観測器MIRIのGuaranteed Timeのターゲットに選ばれていた。これは、私がロンドン大学にいたときの直属のポストであるMike Barlow教授も含めての国際研究協力チームからのGuaranteed Timeの観測

提案である。複雑なのは、アメリカの研究所に属する研究者は、Guaranteed Timeに後からでも自由に入れるのに対して、ヨーロッパの研究所に属する研究者は（ヨーロッパもMIRIの装置開発などに参加していて、Guaranteed Timeを持っている）、最初からguaranteed teamに参加していないと、後から追加での参加はできないことになっている。「そんな十年近く前の私が駆けだしのポストの頃の状況を持ち出して、guaranteed teamに参加できないのは厳しい」と思いつつも、「まあ、しょうがない、一般公募で超新星1987Aの観測時間を取るよう努力するしかない」と考えることにした。

さて、Early Release Science (ERS) で何をするかアイデアを温めていて、MIRIでの観測はすでにGuaranteed Timeでの観測が決まっているので、NIRCamとNIRSpecで近赤外線の測光と分光観測を試みようとして、プロポーザルの大まかな案を研究協力者のチームに回した。そうしたところ、ストックホルム大学のClaus Fransson教授が、「NIRSpecの観測をGuaranteed Timeの観測に加えよう」と、言い出した。「JWSTは競争が激しくて、共同利用だとプロポーザルが通る保証はないから」とのこと。そのころGuaranteed Timeのターゲットリストは既に発表されていて、ERSの公募概要も既に交付されていたのにもかかわらず、まだGuaranteed Timeの観測計画は変更できたのであった。私はプロポーザルを書

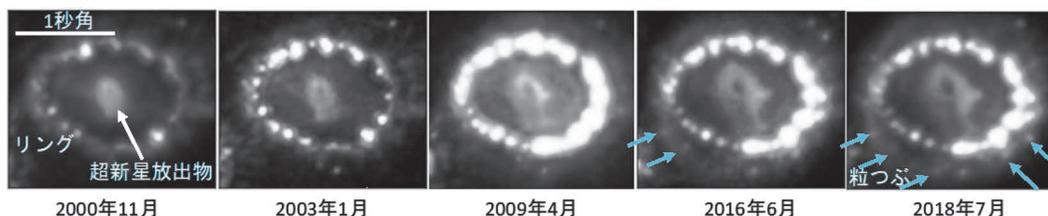


図1 ハッブル宇宙望遠鏡で捉えられた超新星1987Aの時間変化。2000年頃から超新星からのショックがリングに到達し、リングの中のガスが高温になり、明るく輝きはじめた。2016年頃からショックがリングの先にまで行きつき、リングの外側にあったガスが光り輝くようになった。JWSTは、ショックによってリングやその先にあるダストがどのような影響を受けるのかを観測することができる [5,7]。

き始めたのに、計画変更である。「プロポーザルが通る保証がない」のFransson教授の言葉にめげつつも、書かなければプロポーザルは通らないので、気を取り直して書くことにした。近赤外線分光に関しては、Fransson教授に一日の長があるので、教授が観測を提案するのも、もっとなことである。むしろそれまでGuaranteed Timeの観測計画に入っていなかった方が不思議である。

さて、大体の観測計画の方向性が見通せたところで、プロポーザルを書いて、Clayton教授に送った。Clayton教授は超新星1987Aも含めて、カシオペアAなど複数の超新星残骸のターゲットを組み合わせてERSのプロポーザルを書く予定であった。さて、ERSの締切りの一週間まえにClayton教授がすべてのターゲットを含めた全体のプロポーザルの原稿を送ってきた。それを読んだ私は、「これは落とされる」と思った。ERSプログラムは普通のサイエンス中心のプロポーザルと違い、どういったツールを開発してJWSTなどのコミュニティに貢献するかを書かなければならない。ところが、Clayton教授の原稿にはサイエンスしかなく、ツールのことはなにもなかった。Clayton教授にそのことを伝えるとともに、超新星1987Aの場合は、近くにある明るい星の影響を抜くツールを開発するとすればよいと提案した。でもほかのターゲットはどんなツールを開発するのだろう。そんなことをしているうちに、締切りは過ぎた。結果は、案の定、落選であった。

第一回公募観測

それから半年後、今度は最初の一般公募の締切りがやってくる。そこでClayton教授は決断した。「ターゲットを分割して、別々のサイエンスのプロポーザルとして提案しよう」。確かにその方が書きやすい。同じ超新星残骸とはいえ、サイエンスの目的も、使う装置も異なるので、複数のターゲットを組み合わせて、なおかつ一貫したストーリーを築くのは難しい。Clayton教授の英断である。エゴ抜きの判断ができる人がいると、助かる。

一般公募第一回目では私は超新星1987Aのプロポーザルを担当することになった。超新星1987Aの近赤外線「ダスト」（と思われる）連続放射はSpitzerで、冷媒がなくなった後の観測も含めて20年近く観測されていて[1]、この温度が高いダストの放射は超新星1987Aでもショックが起きているリングから来ているとは推測されていた[4]。しかし、実際にダストがどこから来ているのか確証がなかった。Spitzerでは空間分解能が足りないからである。例えば、中心にある超新星の放出物からもダストは検出されているので[3, 9]、観測で確かめるのは重要である。近赤外線カメラNIRCamの空間分解能を使えば、その仮説を証明できる。ただ、近赤外線分光器NIRSpecで超新星1987AのGuaranteed Timeの観測をするとすると、NIRSpecでもNIRCamほどの空間分解能はないものの、リングと超新星放出物の区別はつき、この仮説を証明するのに必要なデータはとれる。その問題に気づきつつも、締切りの2018年4月6日は近づいてきた。JWSTのプロポーザルは観測のパラメータなど、色々と複雑なチェックが必要である。ただ、締切りの前であれば何度でも投稿し直せるので、チェックを兼ねて一週間前にプロポーザルを投稿しよう決めていた。さて、投稿しようボタンを押そうとしたところ、一通のメールがきた。『JWST打ち上げの延期と、第一回観測公募の無期限延期』。これには血の気が引いた。

二年が過ぎ、第一回観測公募が再開されることになった。締切りは2020年11月である。同じ波長をカバーすることができるNIRSpecの観測計画が既にあるのに、なぜさらにNIRCamの観測が必要なのか、という問題点を考えてみることにした。ふと、超新星1987Aのイメージを見ると、NIRSpecではリングの一個一個の粒は分解できない。NIRCamだと一個一個分解できる。そのうえ、現在、新たにショックが起きつつある場所と考えられている、リングの外側の粒つぶ（図1）

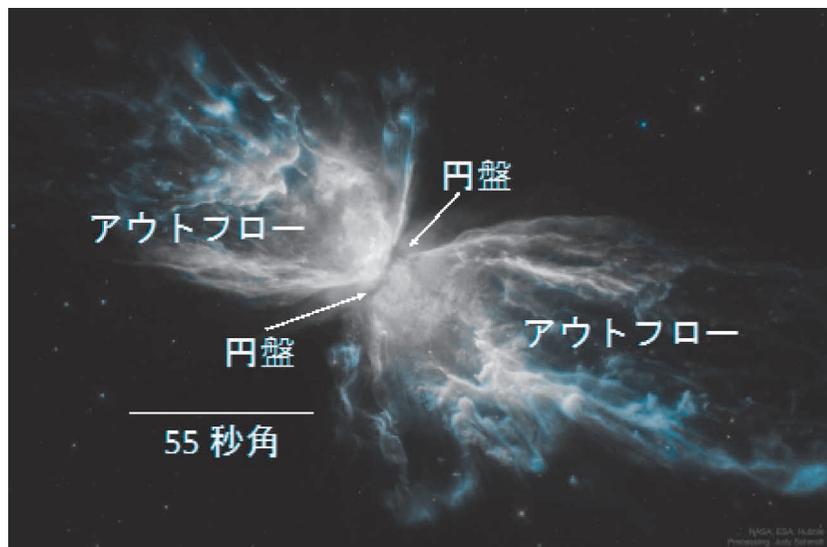


図2 ハッブル望遠鏡で捉えられた惑星状星雲NGC 6302のイメージ。可視光では、円盤は中にあるダストが光を吸収、反射して、黒く見えている。(Astronomy Picture of the Day 2020 July 21) Image credit: NASA / ESA / Hubble / STScI / J. Schmidt / Kastner et al. [6]

まで観測できる感度がある。やっと、骨格ができた！骨格ができたところで、夏休みの授業がなく、自分の時間がある時に、一気に書き上げた。

10月に入り、締切りの11月24日が近づいてきた。大学の授業はオンラインで行っていて、通勤にかかる時間がないのは幸いである。ただ、授業の準備で忙しく土日も全くない状況であった。が、二年前に行った観測の露出時間に大きな間違いがあることに気がついた。なぜか、露出時間を増やしても、S/Nが増えない。どこかで間違えたに違いない、と思いつつも、時間がないので非常に焦る。JWSTの露出計算のソフトは非常に複雑で、設定に何日もかかるので知られている。こんな焦燥する時期に、心強いのは研究協力者である。焦ると、ますます間違いを誘導してしまうので、Tea Temim博士にメールを送って、超新星1987Aの明るさはこのくらいなのだけれど、露出時間の間違いを直して、と伝えたところ、彼女は「まっさらから計算し直したほうが速い」と、計算を送ってくれた。私の計算では2分の露出で十分だったのが、新たな計算では2時間以上の露出

が必要だった。締切り前にエラーが見つかっただけありがたい、と思って、投稿した。結果が出るまでしばらく待つのみである。

3. 惑星状星雲NGC 6302のダスト

2016年1月、オランダのライデンで、AGB星、惑星状星雲の将来観測の方針を考える研究会が開かれていた。そこで私は、ダストに関係する将来の案として、JWSTのMIRIはダストの放射を空間分解するのに非常に有用な装置であると発表をした。特に、有力なターゲットはNGC 6302(図2)であるとして。

2018年の当初の一般公募の締切りの時は、二つもJWSTのプロポーザルを書くのは無理そうなので、とりあえずNGC6302の計画は見送ることにした。2020年2月、マンチェスター大学にALMAのデータを解析するために行き、昔、一緒にNGC 6302の論文を書いたAlbert Zijlstra教授の顔を見ると、なんとなくNGC 6302のプロポーザルを書きたくなくなった。マンチェスターのホテルに泊まっている間、ふと朝5時に目が覚

めて、寝られなくなってしまったので、大学に行くまでの2時間ほど、プロポーザルを書いてみた。書き出してみると、意外に書けるものである。二年間、プロポーザルの締切りが延期されて、超新星1987Aのプロポーザルはそれなりにできている段階であるので、ふたつのプロポーザルを書くのも可能な、と思い始めた。

さて、プロポーザルの締切りである11月が迫ってくるものの、とにかく、授業で時間が取れない。ただ、幸いにして、Jeronimo Bernard-Salas氏が、惑星状星雲、AGB星のいくつかのプロポーザルのグループを束ねて、サイエンスの批評をするZoomの会議をしてくれているので、サイエンスは書きやすい。研究協力者がどんどん、書き直してくれる。NGC 6302は一つの天体の中で、シリケートとPAHs (Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, 多環式芳香族炭化水素)の両方が観測されていることで知られている天体である[11]。天文学の化学では、酸素と炭素原子の数の比が重要で、ガスが次第に冷えていく状況では、結合温度が最も高い分子であるCOがまず生成される。酸素原子の方が炭素原子より数が多いと、残った酸素が他の原子と結合して、 H_2O 、 OH^- といった分子を作り、また、ダストとしてはシリケート (Mg_2SiO_4 や $MgFeSiO_4$ など酸素と珪素を含む鉱物)ができる。太陽や星間空間は一般的に酸素の方が炭素よりも多い。

一方、中小質量星が進化した星であるAGB星 (Asymptotic Giant Branch stars, 漸近赤色巨星)は星の内部で炭素を合成することができるので、一部のAGB星の大気は、酸素よりも炭素の方が多ということになる。こういった大気では、COのほかにHCNやCNといった分子、炭素と水素がくっついたPAHsや炭素ダストなどができる。AGB星からさらに星の進化を続けた惑星状星雲も、過去の酸素と炭素の組成比を引き継ぐはずである。惑星状星雲NGC 6302から酸素系のダストであるシリケートと、炭素系のダストである

PAHsの両方が観測される[11]のは一つの疑問であった。酸素系と炭素系のダストが一つの天体に混在していることについては、仮説が長年あり、最初は大気の中に酸素の方が多かったのが、次第に星が進化するにつれ、炭素の方が多くなると一般的に考えられている。

さらに、NGC 6302で観測されるシリケートは、天文学で広く観測されている、非結晶質シリケートだけではなく、結晶構造を持っているシリケートが含まれている。なぜ、結晶構造を持つシリケートができるのかは、さらに謎であった。AGB星の星風は、ガスが星を離れたら、あっという間に温度と圧力が下がってしまい、非結晶シリケートしか作られない。車や電車のディーゼルエンジンをふかすと出てくる黒いすすは、ガスが急激に冷却されると非結晶質なダストができる過程の代表的な例である(ただし、黒いすすの組成はシリケートではなく炭素からなるダストである)。ダストの結晶ができるには、比較的圧力が高くなければならず、しかも、その状態がしばらくの間続かないと結晶は成長できない。一方、一部のAGB星や惑星状星雲は星の周りに円盤が観測されることが知られており、NGC 6302はその代表格である(図2)[8, 10]。どうして円盤ができるのかというのは、別の問題で、星風の一部のガスが連星系の伴星に引き込まれたなど諸説はあるものの[2]、観測的に円盤があるのは事実である。もし、その円盤の中で、ガスの温度と圧力が適度に高い状況を保つことができれば、円盤の中で結晶シリケートができているのかもしれない[11]。

JWSTのMIRIを使えば、NGC 6302の円盤は空間分解でき、スペクトルをとれば、実際、結晶シリケートがどこにあるのかを明らかにすることができる。結晶シリケートのスペクトルは、一部の天体では $10\ \mu m$ の波長帯にもあり地上から観測できないわけではないが、主なスペクトルは $20\ \mu m$ の波長帯にあり、地上の望遠鏡では大気の

水の吸収が邪魔となり、非常に観測が難しい波長である。しかも、結晶シリケートのスペクトルは、ダスト連続波に比べて非常に弱く、S/Nが20を超える非常に高いコントラストと感度が必要である。そうすると、JWSTの独断場である。結晶シリケートは、25年ほど前に赤外線天文衛星ISOによって見つけられていたが[11]、観測の困難さから、なかなか進展がなかった分野に、JWSTが一気に目を当てることができるのである。

4. 結果通知

2021年4月、ヨーロッパはイースターの前後、長めに休暇をとる習慣がある。この日、4月のイギリスではめずらしく青空が広がったので、近くの公園まで夫とドライブに出かけた。ドライブをしている車の中で、携帯電話に急に何通ものメールが届き始めた。ふとタイトルをみると、JWSTの結果通知である。自分が書いた2つのプロポーザルのほかに、何個か研究協力者が書いたプロポーザルもあるので、それらの結果通知が一気に届いたようである。ただ、私は結果をみるのが怖かったので、しばらく放っておいた。ドライブから帰ってきて、あまりメールを放っておくわけにもいかないのでメールを開けることにした。結果通知は研究協力者全員に行くので、「おめでとう」と「残念だね」のメールが行き交い、メールの数が十倍にもあっという間に膨れ上がってしまったのである。最初の結果通知のメールを探し出してみたところ、なんと、私が主となって書いたプロポーザルは二つとも受理されていた。ただ、驚き

である。

参考文献

- [1] Dwek, E., et al., 2010, ApJ 722, 425
- [2] Balick, B., & Frank, A., 2002, ARA&A, 40, 439
- [3] Cigan, P., et al., 2019, ApJ, 886, 51
- [4] Arendt, R. G., et al. 2020, ApJ, 890, 2
- [5] Fransson, C., et al., 2015, ApJ, 80, L16
- [6] Kastner, J., et al., 2021, ApJ, submitted (arXiv: 2105.13953)
- [7] Larsson, J., et al., 2019, ApJ, 886, 147
- [8] Matsuura, M., et al., 2005, MNRAS, 359, 383
- [9] Matsuura, M., et al., 2011, Science, 333, 1258
- [10] Santander-Garcia, M., et al., 2017, A&A, 597, A27
- [11] Waters, L. B. F. M., et al., 1998, Nature, 391, 868

Prospects of JWST Investigations of Dust in Supernova 1987A and the Planetary Nebula NGC 6302

Mikako MATSUURA

School of Physics and Astronomy, Cardiff University, Queen's Buildings, The Parade, Cardiff CF24 3AA, UK;

Ysgol Ffiseg a Seryddiaeth, Prifysgol Caerdydd Adeiladau'r Frenhines, Y Pared, Careddydd CF23 3AA, UK

Abstract: High-sensitivity and high-angular resolution infrared instruments on board the James Webb Space Telescope (JWST) will provide excellent opportunities to study dust in space. This article describes prospects of dust studies in Supernova 1987A and the planetary nebula, NGC 6302.