

星(キミ)がいたから私がいる： ある星の終焉

京都大学 大塚雅昭

太陽系、地球、そして、私たちヒトをふくむ生命体の創造には、宇宙誕生以来130億年間の星の生死が関係しています。星の生死を見つめ、私たちの起源について思いを馳せてみませんか？ 本稿では、太陽のような星の最期の姿である「惑星状星雲(わくせいじょうせいうん)」をご紹介します。

1. ヒト、星、宇宙の生命(いのち)を紡ぐもの

星と星とのあいだを意味する「星間空間」とは、どういう状態だと思いますか？ 星間「空間」というのだから、文字どおりに何もモノが存在していない空っぽの状態？ いえ、そうではありません。じつは「固体微粒子」や「分子」などのモノで満ち溢れている空間なのです。聞きなれない固体微粒子とは、半径が0.01-1ミクロン程度(金箔の厚さは0.1ミクロンくらいだそうです)の細かい石のツブツブと考えてください。研究者のあいだでは単に「ダスト」と呼んでいます。地球上でもダストは見ることができます。たとえば、黒鉛(鉛筆の芯)、ケイ酸塩などです(図1)。これらは星間ダストの主成分です。一方、分子は複数の原子からなる化合物のことです。たとえば、一酸化炭素や炭素原子がサッカーボール状に60個つながったフラーレンなどです。2022年1月時点で200種以上の分子が星間空間で観測され、確認されています。

近年、多数の太陽系外惑星が発見され、惑星形成と生命体の起源の解明への関心が非常に高まっています。私たちの住む地球のような岩石型惑星はダストの集積の結果と考えられています。また、原始地球には隕石が大量に降り注いでいたこともわかっています。宇宙空間から地球へ飛来してきた隕石の中でも炭素に富んでい

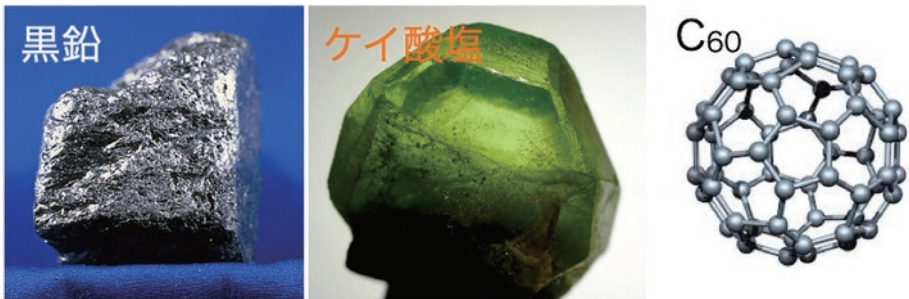


図1. 星間空間や惑星状星雲の分光観測で存在が確認されたダストと分子の一例。

る炭素質隕石の中には、アミノ酸など生命を発生させるのに不可欠な有機分子も付着しているものもあります。つまり、地球と太陽系の形成、そして私たちヒトを含む生命体の発生は、130億年にも及ぶ宇宙進化の途中で形成された星間ダスト/分子としても深い関係があるのです。そう、私たちは宇宙から生まれた子供たちなのです。

2. 星の誕生とその終焉

では、私たちの源となったモノはどこから、どのようにしてできたのでしょうか？ ちよつと遠回りかもしれませんが、まずは、星の進化と太陽系が属する天の川銀河、そして宇宙がどのようにして物質的に豊か(多種多様な物質で星間空間が満たされる状態)になったのかを図2をみながら理解しておきましょう。

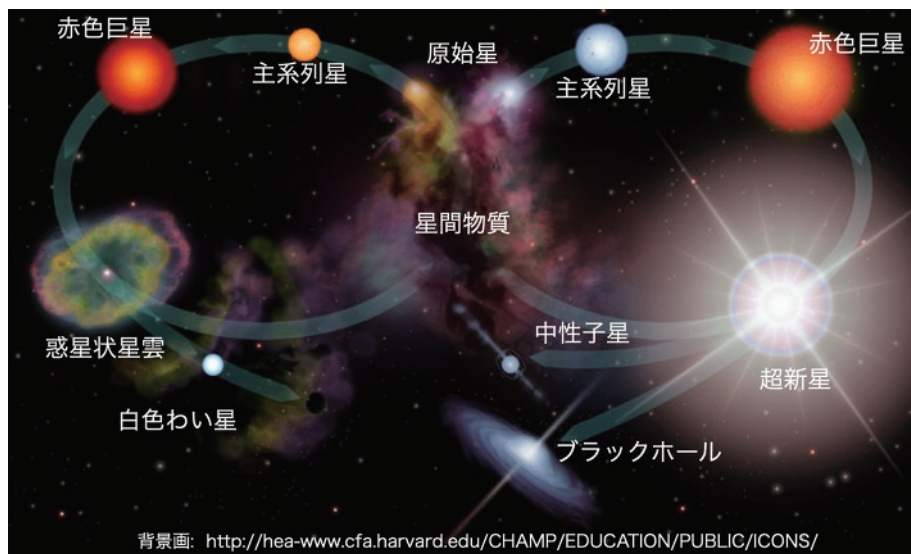


図2. 星の進化と共に宇宙がどのようにして物質的に豊かになったのかを説明する図。

先ほどご説明したとおり、星と星の間にはダストや分子などの星間物質があるわけですが、その密度が特に濃い場所では自己重力による集積と収縮によって100万年ほどの時を経て原始星(星の赤ちゃん)が誕生します。原始星は星間物質のさらなる集積と収縮によって大きくなり、中心核温度が1000万度を超えるようになると、中心部分で4つの水素原子から1つのヘリウム原子を作り出す核融合反応がはじまります。この核融合反応によってエネルギーを発生し、自ら輝くことができるようになります。「恒星」の誕生です。この状態にある星のことを主系列星(しゅけいれつせい)といいます。

星はこの主系列でその一生のほとんど(太陽程度の重さの星ですと100億年くら

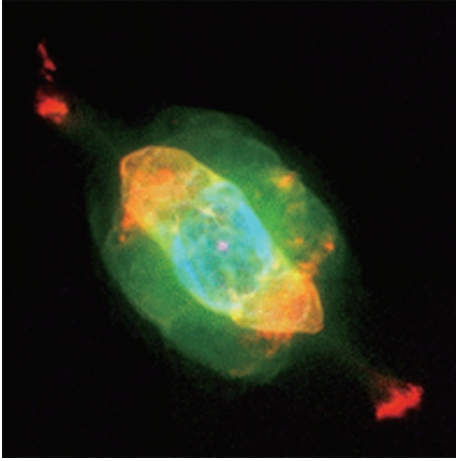


図3. ハッブル宇宙望遠鏡で撮影した土星星雲。真ん中にある白い点が中心星。

© ESA/Hubble and NASA

んせきしよきよせい)と進化したのちに惑星状星雲(わくせいじょうせいうん)となり、中心部分に冷えた白色わい星を残して星としての一生を静かに終えます。

い)を過ごします。水素燃焼によって星の中心部にヘリウムの芯ができる頃になると、主系列段階を離れ、赤色巨星(せきしよきよせい)へと進化するのですが、その後の星の運命は主系列星になった時点での質量によって異なります。

主系列星になった時点で太陽の8倍以上の星は、赤色巨星と進化した後、超新星爆発を引き起こして星としての一生を終えます。爆発後には中性子星やブラックホールを残します。天の川銀河のカニ星雲、大マゼラン星雲のSN1987Aなどは代表的な超新星/超新星残骸です。一方、8倍以下の星は、赤色巨星、漸近赤色巨星(ぜんきんせきしよきよせい)と進化したのちに惑星状星雲(わくせいじょうせいうん)となり、中心部分に冷えた白色わい星を残して星としての一生を静かに終えます。

3. 惑星状星雲と私たち

超新星と惑星状星雲へと進化途中の赤色巨星と漸近赤色巨星段階では、大きく膨らんだ外層を星の重力によって引き止めることができないために、外層の大部分を星間空間へと放出していきます。星間空間へと放出される星の外層中には、星の一生涯中にひき起こった核融合反応で合成された様々な元素、星が形成された場所に元々あった元素が含まれており、こうした元素をタネとして放出されていく外層中で様々なダストと分子が形成されていきます。放出された物質は最終的に星間物質の一部になり、次世代の星の材料となります。宇宙が物質的に豊かになり、その結果として、暖かな太陽光が降り注ぐ地球の上に私たちが存在していただけるのは130億年間の星の進化と生死の積み重ねの結果と言えるでしょう。このように考えると、宇宙の物質進化の主役である惑星状星雲と私たちは時を超えた深い絆で結ばれているように感じます。

4. どうして「惑星状」星雲という名前なの？

惑星状星雲とは、太陽質量の8倍以下の恒星進化の最終段階にある天体のことです。超新星残骸のカニ星雲も惑星状星雲とお思いの方がいますが、超新星と惑星状星雲は起源と進化が全く異なることをご理解いただけたと思います。ここまで、ちょ

っと難しい話ばかりだったので、閑話休題、惑星状星雲の発見史と「惑星」という名がつけられた経緯をご紹介します。

最初の惑星状星雲は1764年にシャルル・メシエ(Charles Messier)によって観測されました。彼の星雲カタログ中27番目の天体、M27、あらい状星雲という名で知られた惑星状星雲のことです。メシエの星雲カタログは三巻構成で合計103個の天体が登録されていますが、その中には、4つの惑星状星雲^[1]が登録されています。「惑星状」という名がついたのは歴史的な経緯からで、惑星とは全く無関係です。1782年、天王星の発見者であるウィリアム・ハーシェルは、土星状星雲(NGC7009、図3)を発見し、惑星の緑色をした円盤に似ている天体と報告しています。彼はのちにこうした天体を「惑星」のような星と表現しました。土星状星雲は高度に電離したガス星雲、なかでも2回階電離した酸素原子からの[O III]5007 Å輝線放射(Å: オングストローム。1億Å=1cm)が卓越しています。~5000 Åの発光体を人の目でみると緑色に見えます。土星状星雲はその名の通り低解像度の望遠鏡で観測すると土星のように見えますので、ハーシェルが上記のように報告したのも合点がいきます。

5. 原始惑星状星雲 - 美しい星雲はいつ決まるの？

話を元に戻しましょう。惑星状星雲は、漸近赤色巨星段階での質量放出を終え、白色わい星へと進化の途中にある高温の質量放出残余星と質量放出で形成された星雲(上で説明した星の外層が元です)から成ります。この残余星は星雲の幾何中心にあるので中心星(図3)と呼んでいます。正確には、漸近赤色巨星段階を終えたばかりの天体は惑星状星雲ではなく、原始惑星状星雲といいます。HD44179(red rectangle, 図4)などは代表的な原始惑星状星雲です。

原始惑星状星雲段階では、中心星の温度が星雲の主成分である水素原子を電離できるほどの高温に達していません。水素原子を電離するためには、およそ3万度以上である必要があります。そのため、この段階で観測できるのは、いわゆる「輝線」(きせん)とよばれる様々な原子からの再結合線^[2]や禁制線^[3]などではなく、中心星の光が星雲中に含まれているダストに当たって散乱した光と中心星の光で温められたダストの連続熱放射です。前者の光は可視から近赤外線波長域(0.4-3ミクロンぐらい)、後者は中間赤外線波長域からサブミリ波長域(3-1000ミクロンぐらい)で卓越していますので、可視波長域で見えているのはダストによる散

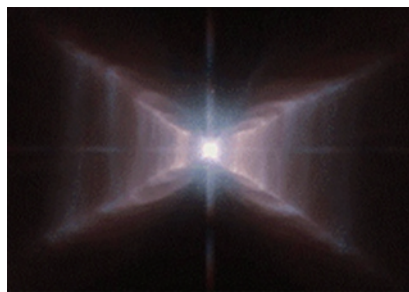


図4. ハッブル宇宙望遠鏡で撮影した原始惑星状星雲HD44179。

© ESA/Hubble and NASA

乱光ということになります。星雲内で形成された分子からの放射も見ることができますが、中心星からの直接の光は分厚いダストに阻まれているので見ることはできません。原始惑星状星雲の期間は星の一生と比べると短く、長くても数千年程度ですが、この期間中にのちに惑星状星雲に進化した際に見ることができる美しい星雲の姿が決定される点で重要です。実際の間接赤外線観測結果から、惑星状星雲の星雲の形状は原始惑星状星雲時代の物質分布によって決まると考えられています。たとえば、物質がドーナツ状に集中分布していれば、原始惑星状星雲から惑星状星雲へと進化の途中、中心星からの数千キロ毎秒の高速質量放出流が物質密度が薄い方向に星雲を押し進め、非球対称な星雲が形成される、という具合です。物質分布次第でほぼ球対称な星雲も形成されます。物質分布は中心星の高速自転、中心星が連星であれば星同士の相互作用の結果と考えられています。

6. 惑星状星雲 - 小さな天体物理学実験室

中心星が3万度以上になり、ガンマ線よりも長い波長域からの高エネルギー光子（光には波と粒子としての性質がある）を放出できるようになると、この光子によって中心星に近い星雲から順次電離されて、美しい星雲をまとった惑星状星雲へと進化します。天の川銀河中で確認されている惑星状星雲は現時点で3000個以上です。大小マゼラン星雲やアンドロメダ銀河など遠方の銀河中でも多数発見されています。

惑星状星雲の電離領域からは様々な原子からの輝線放射と連続光放射が見られますが、可視波長域で放射される輝線放射が全波長中で最も明るく輝いて見える部分です。みなさんの多くが見ているのは惑星状星雲の電離領域です。惑星状星雲の星雲は全部電離しているという訳ではありません。電離領域の外側には中性領域が広がっています。中性領域を赤外線波長からサブミリ波長で分光観測（さまざまな波長が含まれている光を波長成分に分ける観測のこと）すると、中性原子からの輝線とともに、様々なダストからの連続熱輻射と分子からの輝線を見ることができます。惑星状星雲は天体物理学でみられる過程の多くを観測できることから、小さな天体物理学実験室といっても過言ではありません。また、惑星状星雲はどの波長帯でも比較的明るく、遠くの銀河でも観測できるので、マゼラン星雲など、天の川銀河と違う化学環境下における星の進化、星と星間物質の間の物質循環を解明する上でとても重要な天体と言えるでしょう。

7. 京大せいめい望遠鏡で切り拓く惑星状星雲の研究

星雲には惑星状星雲の素となった星（親星）が誕生してから惑星状星雲に至るまでにひき起こった全ての歴史が刻まれています。私の研究はざっくり言うと、1. 親星の起源と進化の解明（銀河のどの場所で、いつ、どのような環境下で誕生し、どのような進化を経験したのか）、2. 星と星間物質の間の物質循環の解明（惑星状星雲や

超新星から星間空間へ返された物質によって宇宙はどのように物質的に豊かになったのか)です。この研究を行うためには、星雲全域を分光観測し、原子/ダスト/分子の化学組成/温度/密度/質量などの調査をすることが必要です。

これまでの惑星状星雲の分光観測では、研究者の興味や観測装置の制限、また、原子/ダスト/分子の空間変動はないという思い込みのためなのか、星雲の1ヶ所、多くても2-3ヶ所だけに限られて行われていました。こうした観測では原子/ダスト/分子について

の空間的変動に関する知見を得るのは不可能です(後述するKOOOLS-IFUによる惑星状星雲の観測によって原子/ダストの空間変動を発見しました)。また、星雲の数ヶ所を分光しただけですから、そこから得られる物理量が対象天体の代表的な値である保証はありません。歴史的に見ると、可視波長域で明るい惑星状星雲の分光スペクトルは天体物理学そして原子物理学の理解と発展に貢献し、可視波長分光データの蓄積が進んだのですが、星雲全域をカバーしているデータはありませんでした。

そこで、私は岡山県西部の浅口市にある京都大学岡山天文台の日本初の分割鏡主鏡を採用している口径3.8mせいめい望遠鏡(図5)と三次元分光器KOOOLS-IFUを使って天の川銀河中の惑星状星雲を観測し、上記二つの課題について取り組んでいます。三次元分光器を使えば、図6のように一度に星雲全域の分光データを得ることが可能だからです。



図5. せいめい望遠鏡。口径3.8mの主鏡は花びら構造をなす18枚の鏡からなっている。

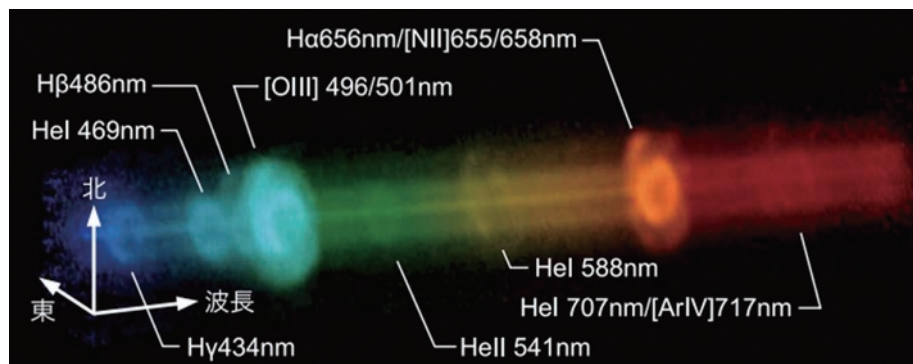


図6. せいめい望遠鏡KOOOLS-IFUによる惑星状星雲NGC7662の三次元スペクトル

最近、KOOLS-IFUの分光データからすばる望遠鏡で得られる惑星状星雲の星雲像と比べても遜色ない高い解像度を有する星雲像を再構築する方法を開発しました。また、可視波長域の分光データのみから原子ガスとダスト両方の質量分布マップを抽出する方法の確立にも成功しました。これらの手法を駆使した惑星状星雲の研究成果を論文としてまとめ、先月末に歴史ある天体物理学の国際専門誌に掲載が決まったばかりです。

今後もせいめい望遠鏡を使って独自性と創造性が豊かで、専門家でも、またそうでなくても楽しめる、楽しい気分になれる惑星状星雲研究をしていきたいと思えます。

著者紹介 大塚 雅昭(おおつか まさあき)



観測天文学者。2007年東北大学大学院より博士号を取得後、STScI(米国)、ASIAA(中華民国)、すばる望遠鏡に在籍。10年間の海外放浪後、2018年から縁あって京大岡山天文台で特定助教。研究課題は宇宙における物質進化の解明。宇宙フラウン同定の黎明期に7つの惑星状星雲でフラウンを発見するなど、惑星状星雲の観測研究で世界をリードしている。趣味は世界の観測所巡りとそこでの楽しい食事♪

- [1] M27(NGC6853)、M57(NGC6720、リング星雲)、M76(NGC650-1、小あれい星雲)、M97(NGC3587、ふくろう星雲)の4つ。NGCはNew General Catalogueのことで、M27はこのカタログの6853番目の天体です。
- [2] 電離した原子が電子と結び付いてもとのエネルギー準位に戻る際に発せられる輝線のこと。水素原子の再結合線 $H\alpha$ 6563 Å などです。
- [3] 基底状態にある原子が自由電子との衝突によって準安定準位に励起される。通常の密度状態だと、自由電子や原子と衝突によりすぐに元の基底状態に戻るために放射は伴わないが、希薄な密度下だと衝突は稀なために短いながらも励起状態に滞在でき、放射を伴う遷移ができる。その際に発せられる輝線のこと。通常の遷移規則では禁止されているので禁制(遷移)線と呼ばれている。禁制線であることを示すために[]をつける。酸素原子の2階電離した禁制線 [O III] 5007 Å などです。