

星から塵へ、塵から星へ

香川大学 松村 雅文

普段は身近には思われぬ宇宙の塵ですが、肉眼で確認することができます。街明かりがない所か、あるいはプラネタリウムのドームの中で夜空を見上げてみると、夏の星座の中の天の川が意外に明るいことに気付くと思います。更に注意して見ると、天の川は一様に光っているのではなく、黒い筋のようなものがあることにも気付くかもしれません（図1）。この黒い筋は、星間空間に漂う塵によって、遠方の星の光が隠されることによる影であると考えられます。塵と書きましたが、もう少し正確に説明すると、微小な固体微粒子のことです。このような宇宙の塵（固体微粒子）はどうやってできたのか、見てみましょう。

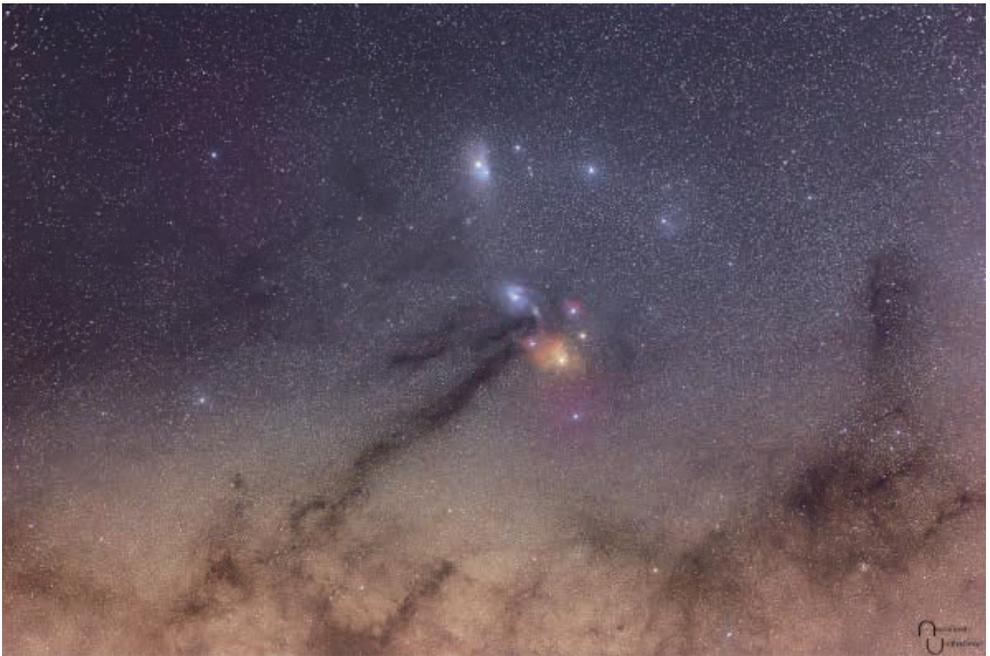


図1. さそり座からへびつかい座にかけての暗黒星雲。
中央のオレンジ色の星雲近くの明るい星はアンタレスです。

© Navaneeth Unnikrishnan

ちょっと待った、塵って、そんなに光を遮るものなの？

塵は星の光を隠すと書きましたが、塵の量はそんなに多いの？という声が聞こえそうです。はい、実際、宇宙を構成する物質としては、質量ではあまり多くはなく、水素やヘリウムなどガスの全質量の1パーセントくらいと考えられています。塵を作る物質として炭素を含んだ物質（煤のようなもの）や、珪酸塩からなる物質（岩石のようなもの）などが考えられており、これらの物質は、水素やヘリウムより重い元素（重元素）で構成されています。重元素全体の質量は、星間物質（ガスと塵）全体の質量の2～3%くらいなので、重元素のおよそ半分近くは、塵として存在していることになります。ではどうして、少ない量の塵が光を遮ることができるのでしょうか？

これには、塵がとても小さいことが関係しています。ある物体が、光を遮ることは、その物体の断面積に相当する部分の光が、散乱されたり吸収されたりすることによります。例えば、半径1cm（直径2cm）の不透明な球があったとすると、その球が光を遮る面積（つまりその球の断面積）は、 3.14cm^2 になります。この球を細かく分断して、大きさが10万分の1の球を多数作るとしましょう。そうすると宇宙の塵の大きさ程度の半径 $0.1\mu\text{m}$ の球ができます。この小さな球の断面積はとても小さく $3.14 \times 10^{-10}\text{cm}^2$ になります。しかし、半径1cmの球から多数の球を作ることができその総数は 10^{15} 個（10万を3階掛けした数）になります。この多数の小さな球の断面積をその数だけ足し合わせると $3.14 \times 10^5\text{cm}^2$ になり、これは半径約3mの球の断面積に相当しま

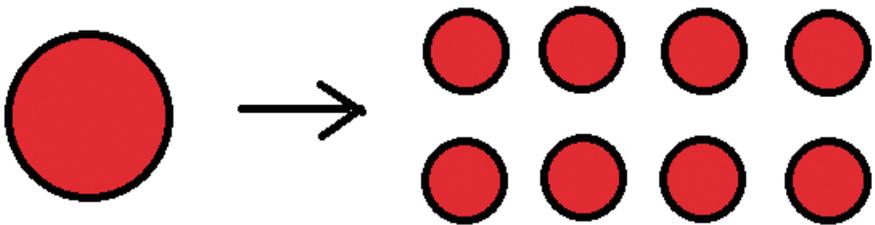


図2. 断面積倍増の術。球を切って、半分の大きさの球を作ると8個できる。小さい球の断面積は元の球の断面積の4分の1だが、8個あるので、小さい球の断面積の合計は、元の球の断面積の2倍になる。

す。つまり、ある量の物質が光を遮る時、大きな物体としてよりも、小さな多数の物体として光を遮るほうが効率的です（図2）。宇宙の塵の存在量はガスに比べるとわずかですが、塵が小さいために、効率よく光を遮ることができるわけです。実際、銀河系の円盤内では、平均的には、光が約3000光年進むと、約2.5分の1（等級で表すと1等）の減光（つまり約40%の光が失われる）を受けることになります。

宇宙の塵の“ふるさと”の条件

ではこの小さな宇宙の塵は、どこでできたのでしょうか？宇宙の歴史を思い起こすと、宇宙はビッグバンによってスタートし、宇宙の最初には、元素としては水素やヘリウムなどしかなく、塵を構成するような重元素はありませんでした。しかも宇宙の最初は高温でした。1000Kないし2000K以上の高温の環境では、通常の物質は気化するので固体として存在できません。つまり塵は宇宙の最初にはなかったはずで、ではどこで作られたのでしょうか？塵が作られる条件を考えると(1)重元素があること、(2)温度が1000~2000K以下であることが必要です。更に、重元素が塵になるには、重元素同士が会って結合することが必要なので、(3)ある程度、物資の密度が高いこと、も条件として課されることとなります。もちろん(4)できた塵の星間空間への移動が可能なのも必須です。そのような条件を満たすところはどこなのでしょう？身近な現象では、火が燃えて煤(=小さい固体微粒子)ができるときは、これらの条件が満たされています(但し(4)の条件は除く)。では宇宙ではどうでしょうか？

塵の“ふるさと”の候補：その1

候補の一つは、今から50億年後の太陽の周辺です！今から約50億年経つと、太陽は今のように主系列星として光ることができず、(広い意味での)赤色巨星になります。赤色巨星も色々な段階があって複雑ですが、その最後である漸近巨星分枝の段階では、自分自身のかんりのガスを宇宙空間に放出します(条件(4)がクリア)。太陽のガスには重元素が含まれているので条件(1)もクリアしています。この時、放出されるガスは徐々に温度と密度を下げていきますが、重元素が固体になりうる温度である1000~2000Kになった時に、密度がある程度に保たれていれば(つまり条件(2)と(3)がクリアされれば)、塵が形成されるはずで

今から50億年後の太陽はまだ観測することはできませんが、とも座L₂星という漸近巨星分枝星は、ほぼそれに近いであろうと推定されています。この星は肉眼でも見える明るさ(5等級)ですが、南天にある(赤緯マイナス44度)ので、大阪あたりからは見えません。しかし、この星の距離は約200光年と近いので観測しやすく、漸近巨星分枝星を研究するには最適の天体です。200光年は遠いと思われるでしょうが、銀河系の大きさは10万光年もあることを考えると、200光年はとても近いのです！

とも座L₂星について、KervellaたちがVLTとALMAを用いて観測して得られた結果を図3に示します。彼らが用いたVLT(Very Large Telescope)はチリにあり、口径8.2mの光学望遠鏡で構成されています。この望遠鏡と、観測装置SPHERE/Zimpolを用いて、20ミリ秒を切る高分解能で観測が行われました。またALMAはサブミリ波干渉計です。図3から、とも座L₂星の周囲

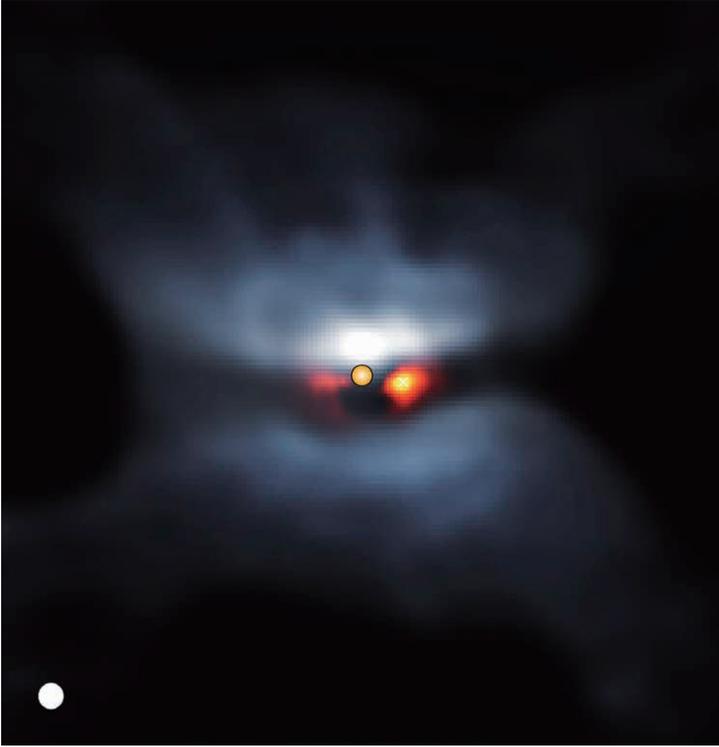


図3. とも座L₂星のVLTとALMAによる画像。青ないし白は、VLTによる可視のデータを、オレンジ色はALMAのデータを示しています。真中の黄色い丸は、中心星を示しており、この図では星からの光は除去して示されています。中心星の右側には、伴星があります。左下の白丸は分解能を示しています。

Credit: P. Kervella et al. (CNRS / U. de Chile / Observatoire de Paris / LESIA / ESO / ALMA)

に塵の円盤が存在すること、またこの円盤を地球からはほぼ横向きに見ていることがわかります。また彼らによると、円盤の星に近い側は、星から6天文単位の距離の所であるということです。それよりも星に近いと、温度が高すぎて塵が存在できないと考えられます。この観測結果と、この星はガスを放出していることをあわせて考えると、星から放出されたガスは徐々に温度を下げ、星から6天文単位のところに来るとガスから塵が作られた、と想像することができます。どうやらこの星（や50億年後の太陽）のような天体の周囲は、実際に塵が作られている現場（塵のふるさと）であると考えて良さそうですね。

なお、高温のガスから具体的にどのような塵が作られるのかは、うちゅう2009年12月号4～9ページに、茅原弘毅さんが解説されているのでご参照ください。

塵の“ふるさと”の候補：その2

塵の“ふるさと”について、この原稿を数年前に書いたならば、以上で話は終わっていましたが、最近、にわかに別の可能性も注目されてきたので、それも紹介しましょう。それは超新星残骸です。上に書いた漸近巨星分枝星からはゆっくりとガスが放出されるのですが、超新星は、急激にガスが星から星間空間へと放出される現象です。これは爆発的な現象なので、塵が生成されるにしてもその量は比較的少ないと考えられていました。ところが、超新星1987Aの場所を、Matsuuraたちはハーシェル望遠鏡を使って赤外線観測を行い、結果を解析して、0.3太陽質量の炭素質の塵と、0.5太陽質量の珪酸塩質の塵が存在していることを示しました。超新星1987Aが爆発した直後には、このような大量の塵は観測されなかったのに、現在は観測されていることは、爆発後、数十年かけて塵が作られたことを意味します。また、作られた塵の合計が太陽の質量の0.8倍もあることは、宇宙の塵の相当の割合がこの種の天体で作られる可能性を意味しています。宇宙の塵の本当(?)の“ふるさと”は、漸近巨星分枝星なののでしょうか、それとも超新星爆発なののでしょうか？あるいは「宇宙の塵」と一言で言いますが、塵にも色々あり、塵の“ふるさと”も一つではなく様々なのかも知れません。またどうやって数十年かけて塵が作られるのかも不思議です。塵が作られるために必要な4つの条件はどうやって満たされているのでしょうか？ まだまだ判らないことがたくさん残っているようです。

なお、超新星1987Aそのものについては、うちゅう2017年2月号の10～11ページに、江越 航さんの解説記事がありますので、ご参考にしてください。

塵よ、どこへ行く？

漸近巨星分枝星の周囲や超新星残骸などで作られた塵は、その後、どうなるのでしょうか？ 一つ確かなことは、太陽系が作られた約46億年前、惑星は宇宙の塵やガスが集まってできたことです。ということは、塵は巡り巡って、我々の地球を作ったことを意味します。でも、実際に星や惑星がどのようにしてできるのか、その詳細は必ずしも判ってはいません。少なくとも、重力の働きでガスや塵が集まり、天の川の中に黒い筋としてみるような暗黒星雲(図1)を作ることは確かなのですが、同時に磁場の力も働き、星や惑星の形成に影響を与えているようです。つまり磁場を調べることが、宇宙の塵を知るうえで重要になってきます。

現在、筆者も含め、サブミリ波の偏光観測を行い、星形成領域の磁場の様子を明らかにしようというBISTRO (BFields in Star Forming Region Observations) と呼ばれる国際共同観測の計画が進行しています(図4)。BISTROは、東アジア天文台(EAO)を中心に、イギリス・カナダ・韓国・中国・台湾・日本の計6つの国と地域の約100名の研究者によって構成されています。

具体的には、ハワイのJCMT望遠鏡とPOL2と言われる観測装置を用いて、グールド・ベルトの幾つもの星形成領域の系統的な観測を3年計画で行っています。星形成領域の磁場の様子を知り、塵やガスがどのようにして星や惑星などになっていくのか、塵の行方も含め、その様子を知りたいと思っています。

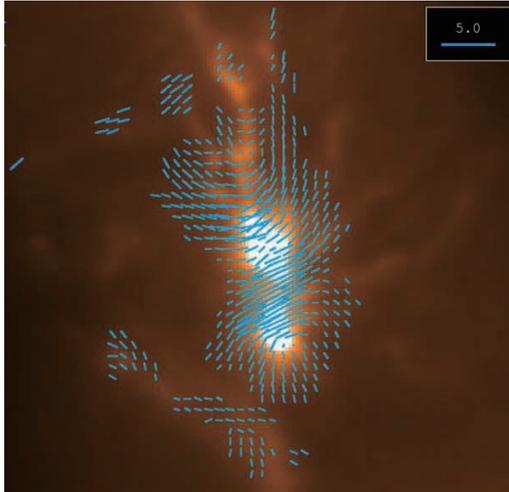


図4. BISTROの観測によるオリオン分子雲Aの磁場の様子。青い線が、磁場の向きを示しており、磁場が大きくカーブしている様子が判ります。

Credit: POL-2 Commissioning Team

本稿を執筆するに当たり、次の論文等を参考にしました：

Kervella, P. et al., 2015, AA 578, A77.

Kervella, P. et al., 2016, AA 596,A92.

Mauney, C. M. & Lazzati D., 2016, Planetary and Space Science 133, 31.

Matsuura, M., et al., 2015, ApJ 800, 50

Ward-Thompson, D. et al., 2017, ApJ 842, 66

著者紹介 松村 雅文(まつむら まさふみ)



香川大学教育学部教授。広島市出身(カープファン)。東北大学理学部天文および地球物理学科第一卒業。東北大学大学院理学研究科天文学専攻修了。大阪市立科学館学芸員補(1990~1991年)。1991年から香川大学。宇宙の塵がメインの研究テーマですが、最近はプラネタリウムを用いた天文教育についての研究も行っています。