

アルマ望遠鏡で探る太陽系の起源 —物理と化学と天文学—

理化学研究所 坂井 南美

1. 「自然」ってどういう意味？

地球。この星には生命が溢れ、素晴らしく豊かな自然環境が存在しています。宇宙の中で、なぜ、どのようにして、このような環境が存在するに至ったのでしょうか。

小学生の頃、休み時間になると木の上で寝そべて枝の隙間から空を見上げていました。どうしたらこんな美しい世界になるのだろう。友人に聞いてみると、自然にこうなったんでしょ？という答えが返ってきました。「自然」ってなんだろう。どういう意味？今でも考え続けています。「材料」を準備して、ただほうっておけば、この宇宙のどこでも、こんな環境が作られるのでしょうか？もしそうだとしたら、そもそもどんな「材料」が必要で、どこでも同じ材料が準備できるのでしょうか？この疑問の答えが知りたくて、私は天文学者になりました。「天文学者」と聞くと、いまだに、夜な夜な星空を望遠鏡で眺め、星座や神話にも詳しい人を思い浮かべる方が多いのが残念な事実ですが、この現代、眺めるのはパソコン上のデータであり、星座、ましてや神話など知らない人のほうが多いのではと思います（もちろんそうではない人もいます）。

天文学は今、変革の時を迎えています。観測技術が進歩し、望遠鏡の感度や視力(空間分解能)が劇的にあがっただけでなく、分光学といって、星からの「光」を波長ごとに分けて分析することが可能となったからです。天体を観測したとき、その形や光(電磁波)の強さといった情報を得られますが、分光するとそこに何かあるのかもわかるのです。現代の天文学は、宇宙の成り立ちや、銀河や星・惑星などの「形」がどうやってできたのかを、物理学で探ってきたといっても過言ではありません。しかしそこに、化学が割り込んできたのです。元素がどのようにして作られ、化学反応を繰り返し、最終的に生命という存在を生み出すこととなったのか。この、一連の「物質史」を明らかにするのは、物理学だけでは不可能です。化学、そして、将来的には生命科学の力も当然必要となってくるでしょう。

星と星との間を漂う希薄な雲(星間分子雲)から新たな星や惑星系が生まれる過程で、どのような分子が生成され、惑星へともたらされていくのか。この問いに答えることが私たちの起源を問うことにつながります。従来の天文学にはおさまらない新しい研究分野です。本稿では、アルマ望遠鏡によって明らかになってきた最新の成果とその背景を、著者の体験に沿って紹介できればと思います。

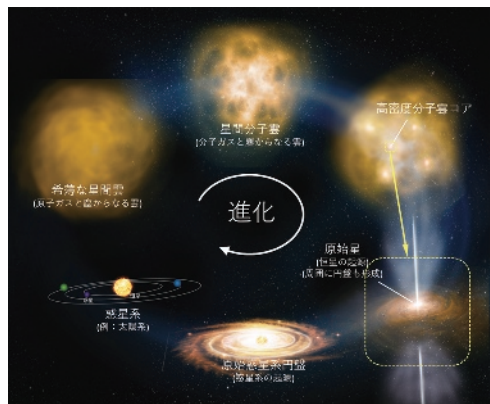


図1. 星・惑星の誕生過程

2. 夢の望遠鏡

高校生の夏休み、長野県の野辺山にある直径45mの電波望遠鏡を見に行く機会がありました。大きくて、離れて見ても首が疲れるほど。ぐおおーんという音がして動くや圧巻。見学室から観測をする部屋が覗けるようになっていました。当時は天文学者になるうなんて思っていませんでしたが、こんなすごい装置を使ってみたいな、と思った記憶があります。

そのチャンスは思ったよりも早くやってきました。星の誕生の場である星間分子雲の成り立ちを調べるために、富士山の山頂に日本で初めてのサブミリ波*1望遠鏡を作り、観測を行っている研究室があることを大学生の時に知りました。面白そう、と思った私は、就職をやめて大学院修士課程の学生としてそこへ入ることにし、意気揚々とその富士山望遠鏡を使った研究を始めようとした。しかし、その矢先に望遠鏡が使えなくなってしまったのです。望遠鏡へ電気の供給をしていた富士山測候所が閉鎖されてしまったためです。山頂では頻繁に雷が落ちることもあり、測候所の協力なくして安定して電気を手に入れることはできません。がっかりしていた私に、指導教官が「野辺山45m電波望遠鏡に観測提案書を出してみないか」と提案してくれたのです。

ほとんどの大型装置は、共同利用装置と呼ばれ、研究者であれば誰でも使うことができます。使いたい人やチームがプロポーザルと呼ばれる提案書を準備し、装置ごとに決められた期日までに投稿します。専門家の審査を経て、採択されると晴れてその望遠鏡で観測ができるという仕組みです。当時の45m望遠鏡の“倍率”は約2.5倍でしたが、指導教官から貰ったテーマが面白かったこともあり、運よく採択されました。

2003年に、へびつかい座領域にある原始星の周囲に、ギ酸メチルやエタノールなどの“複雑な有機分子*2”がすでに存在しているということが、フランスの研究者らによって報告されました。原始星とは、太陽のような恒星になる前の成長途中の段階の星です。周囲にガスや塵からなる雲を大量にまとって、惑星系もまだ誕生していない段階です。そんな段階の星の周りに複雑な有機分子がすでに存在していることは大変な驚きで、太陽系の過去もそうだったのではないかと、大変大きな注目を集めました。これが、例外的な原始星なのか、そうではなくどの原始星まわりでも同様のものか、それを調べるために、いわゆる「二匹目のどじょう」を狙う観測を提案したのです。夢の望遠鏡を使わせてもらい、ペルセウス座領域にある原始星まわりで同様の分子の検出に成功したときは、感激ひとしおでした。その時点で、その原始星のまわりに有機分子が存在していることを知っているのは世界で自分ひとり！という研究者としての喜びを味わった瞬間でもあり、研究の魅力に取りつかれていきました。



図2. 野辺山45m電波望遠鏡

分子や原子は、それぞれ決まった波長の電磁波を放出しています。そのほとんどが電波の波長帯の電磁波であるため、天体からくる電波を分光してあげると、逆に、そこにどのような分子があるのかがわかります。その分子を含むガスが太陽系に対して動いていれば、ドップラー効果によって波長がわずかにずれて観測されますから、ガスの動きも知ることができます。はるか遠い星の周囲にあるガスがどのような動きをしていてどのような分子を含んでいるのかが手に取るようにわかるわけです。

その後、別の原始星まわりでも同様の分子が検出され、有機分子が惑星系誕生の前に「自然に」つくられていることが常識となりつつありました。私たちの太陽系の過去もそうであったのだとすると、もしかすると太陽系のような惑星系はどこにでもあるのかもしれない、というある種の希望が生まれたといってもよいでしょう。ところが、です。修士課程2年の冬、おし座領域にあるL1527という原始星でも検出を試みようと、100時間も観測時間をもらって観測したのですが、検出が失敗に終わりました。この望遠鏡を1晩運用するのに100万円くらいの経費がかかっている、と言われていた望遠鏡を100時間も使わせていただいたのに、「失敗」で終わるわけにはいきません。意地でも……と同時に測定していた近くの波長帯のデータを丁寧に見ていたら、炭素鎖分子と呼ばれる変わった分子が代わりに検出されていることに気づきました。この分子は、星が誕生する前の若い雲には存在するものの、反応性が高いことや、その生成には若い雲に多く含まれる原子のままの炭素が豊富に必要であることなどから、原始星が誕生する段階では少なくなってしまうことが知られている分子でした。その後の追観測で、どういふわけかL1527という原始星まわりでは、そのような分子が原始星に温められた領域に大量にあることがわかったのです。

この発見は、次の2つの意味で、観測の「大成功」を意味していました。1つは、炭素鎖分子の新たな一面を知りえたこと。星間空間という、極低温・極低密度環境下での新たな化学プロセスの解明につながる成果です。もう1つは、原始星によって、その周囲を取り巻くガスや塵の化学組成は違い得る、ということで、大きな問題を提起します。似たような年齢・大きさの天体でも、環境が違い得ると言っているのですから、私たちの太陽系が“当たり前存在”ではない可能性を指摘しているのと同じです。

何がおきているのだろうか？これらの分子は、惑星へももたらされるのだろうか？もっと知りたいと願うのは当然でしょう。野辺山45m電波望遠鏡は、天体からくる微弱な電波を検出できる大口径望遠鏡です。電波望遠鏡としては当然視力(空間分解能)も高く、角度分解能は 0.004° (視力4)もあります。しかし、太陽系から一番近い星形成領域であっても、450光年かなたにあるわけですから、非常に小さく見えてしまっただけで分解できません。太陽と地球の距離を1天文単位(au)と呼び、太陽系の大きさは、だいたい100au程度です。しかし、450光年先に置くと 0.0002° となってしまいますから、全く足りないのがわかるでしょう。どんな分子があり、それらの分子を含むガスがどんな動きをしているのかまで分析できる電波観測ですが、この分解能と感度が難点でした。そこで登場したのがアルマ望遠鏡*3、電波天文学者の“夢の望遠鏡”です。

3. 化学的多様性と太陽系の価値

アルマ望遠鏡は、それまでの望遠鏡と比べて劇的に高い分解能と感度を持つ望遠鏡で、惑星系を分解して観測し、様々な分子の分布を調べることができます。建設途中である2011年から初期運用を開始し、一挙に研究が進みました。

最初に、おうし座のL1527という原始星まわりで炭素鎖分子がどのように分布しているのかを調べるべく、観測提案書を出しました。惑星系がつくられる場所、すなわち原始惑星系円盤の化学組成が円盤によって異なる可能性がある、という「化学的多様性」の面白さが認められ、9倍以上の高い倍率のもとで観測時間を確保することに成功しました。2012年末に観測が行われ、2013年になってようやく初めてのアルマ望遠鏡のデータを手に入れることができました。年に一度しか観測提案書を受け付けていませんし、観測は、天候やアンテナ配列(配列によって分解能が変わる)に応じて、観測所側で適宜行われ、十分な質のデータが取れると提案者のもとへデータが送られるという仕組みのため、提案から1～2年はかかってしまうのです。解析し、成果を論文として発表するにはさらに1年以上かかります。

データは、予想を大きく上回るものでした。まず、炭素鎖分子や同時に観測した他の分子の分布を解析したところ、原始惑星系円盤の「端」を同定することに成功しました。L1527のような若い原始星の場合、まだ周囲を大量のガスや塵が取り巻いてそれらが原始星へ降り積もっている、すなわち、原始星も成長を続けている段階です。このため、原始星まわりに惑星系のもととなる円盤ができていたとしても、それを周囲と区別することが困難でした。しかし、円盤と周囲のガスとの境目で、化学組成が大きく変化していたのです。円盤の端で衝撃が起こり、一酸化硫黄という分子がガス中に増量してただけでなく、密度が上がると他の分子と反応したりガス中に含まれる塵に吸着されたりしてしまう炭素鎖分子が、そこを境にガス中からなくなっていました。ガスの回転落下運動を調べると、なくなる位置が遠心力バリア(惑星軌道で言う近日点)と呼ばれる位置に相当していることがわかりました。星間ガスに含まれる水素分子の次に多い分子としては一酸化炭素分子が知られていますが、そのような分子の分布を調べると、外側のガスから内側の円盤領域までまんべんなく大量に存在しているために、例え高い角度分解能でその分布を調べられたとしても、円盤の端の同定が困難でした。しかし、より複雑な分子の分布が高分解能で明らかにできたこと

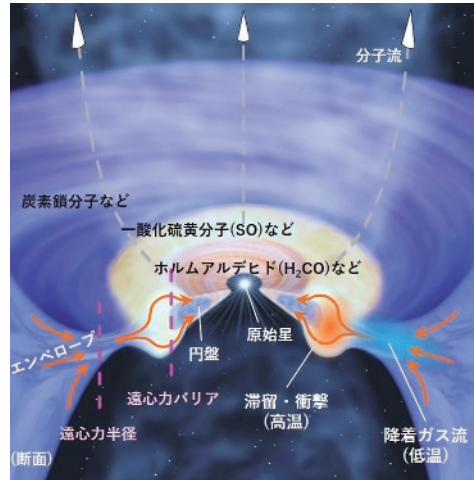


図3. 原始惑星系円盤誕生の様子と円盤の端での化学組成変化

で、明瞭に、円盤の端を同定できたわけです。周囲のガスは、円盤に取り込まれる際に一度その“化学変化”を経験することが分かった点でも大きな収穫でした。それだけではありません。もちろん、当初の目的も達成できました。L1527では、炭素鎖分子は円盤の端に到達するまではガス中に豊富に存在し、その後、塵に吸着されるなどしてガス中からはなくなること、その塵が将来惑星系へもたらされるため、惑星系における「化学的多様性」の存在が現実味を帯びてきたこと、などです。2016年には、ギ酸メチルなどの複雑な有機分子に富む天体でも同様の観測・解析が行われ、円盤の端が同定されるとともに、化学組成は異なるけれど円盤の端での化学変化はやはり存在することも明らかになりました。ここにきて、原始惑星系円盤は、円盤によってその化学組成が大きく違う異なることがはっきりしたわけです。

円盤の化学組成は、最初の「材料」だけでなく、それぞれの円盤が育ってきた環境の違いが影響していると考えられます。同じ「材料」を用意しても、育った環境が違えば別の組成の天体になってしまうということは、考えてみれば当たり前ですが、当初は全く予測されていませんでした。当然、太陽系がどちらのケースだったのかも未だわかっていません。今、数多くの天体で同様の観測を行い、統計的に、どのような化学組成の天体がどの程度の割合存在するのかを調べはじめています。2019年にデータが揃い、これから解析をすすめるところです。近い将来、私たちの太陽系が宇宙の中でどのような存在であるのか、その価値が見えてくるのではないかと期待しています。

4. その先へ

一方で、このような研究の難しさにも直面しています。例えば、アルマ望遠鏡で得られるデータが膨大であることです。1つの天体に対する限られた波長帯のデータであったとしても、データ解析は一朝一夕にはすみません。アルマ望遠鏡は、口径12mのアンテナ54台と7mアンテナ12台の合計66台のアンテナ群からなる巨大電波干渉計です。電波干渉計は、2台のアンテナが同時に受け取ったそれぞれの電波の干渉から天体の大きさや電波の強度などの情報を得るシステムで、アンテナ間の距離に応じた角度分解能のデータを得ることができます。様々な位置に置いたアンテナ同士を組み合わせることで、様々な方向・分解能の情報となり、それらを解析することで、1枚の「絵」として天体「画像」を再現することができる仕組みです。数学で組み合わせの数を習っていればわかると思いますが、アンテナ数が5台程度であれば、 $5 \times 4 \div 2$ で10通りの組み合わせしかありませんが、アルマ望遠鏡は66台もあるのです。大変さが容易に想像できるでしょう。1つの天体に対する1種類の波長帯の観測を数時間ほど行ったとしても、得られるデータは既に1TBを超えることがあり、解析にも時間がかかります。数10天体からの様々な分子の分布の情報を手に入れようとすれば、データの1次解析処理だけでも膨大な労力が必要となるのです。

まだまだほかにもたくさんあります。得られたデータから、ガスの動きや分子の存在量を正確に知ろうとしたとき、分子のスペクトル線の正確な波長の情報が必要になり

ます。これには、地上の実験室で、該当する分子を作り、分子分光測定することが必要となります。これは分子分光学と呼ばれ、化学の1分野です。また、極低温低密度環境下である星間空間での化学反応過程の詳細を知るためには、分子の性質をより詳しく知る必要があります。分子科学と呼ばれる分野の最先端技術で、ようやくそれが現在可能となりつつありますが、まだまだ圧倒的に知見がたりません。天文学者、物理学者、化学者が一丸となって取り組まなければ、私たち生命をはぐくむに至った太陽系の起源、そして宇宙の物質史を解き明かすことなどできないのです。情報科学や生命科学の力も必要でしょう。「自然」の背景にはさまざまな法則があり、結果としての1例が私たちの目の前に存在しています。ひとつの例に過ぎないものが、これほどまでに美しい世界であることが不思議でたまらない。そんな気持ちが、研究の難しさよりも楽しさを感じて頑張る原動力になっていると思います。



図4. アルマ望遠鏡

著者紹介 坂井 南美(さかい なみ)



理化学研究所 主任研究員。星や惑星の誕生過程を化学的手法を用いて探るとともに、惑星系環境がどのような化学進化の果てに決まるのかを明らかにすることで、太陽系の宇宙における存在価値を探っている。

- *1 電磁波を波長ごとに分けるとき、数百nmが可視光と呼ばれる目に見える光、それよりも長い波長で数 μm から数10 μm が赤外線、もっと長い波長のを電波と呼びます。電波の中でも、数mmから0.3mmくらいのをミリ波・サブミリ波と呼びます。
- *2 星間空間は、極低密度環境にあるため、数日から1年に1度程度しか、原子や分子がぶつかりません。地上では1 cm^3 あたり1秒間に数億回もぶつかるのと比べると、圧倒的に複雑な分子を作るのが難しいことがわかります。このため、星間化学では、原子6個以上からなる有機分子のことを“複雑な有機分子”と呼んでいます。
- *3 アタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計(ALMA: Atacama Large Millimeter/submillimeter Array)は、日本を含む東アジア諸国、ヨーロッパ諸国、北米諸国がチリ共和国と協力して、アタカマ砂漠の標高5000mの高原に建設した国際天文施設。これまでの電波望遠鏡の約100倍の感度と数10倍の空間解像度を持ち、星・惑星形成領域の観測に大きな威力を発揮している。