

双子の赤ちゃん星を育むガスの渦巻きを発見

MATSUMOTO, Tomoaki / 松本, 倫明

(出版者 / Publisher)

法政大学人間環境学会

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

人間環境論集 / 人間環境論集

(巻 / Volume)

16

(号 / Number)

1

(開始ページ / Start Page)

87

(終了ページ / End Page)

106

(発行年 / Year)

2015-11-30

双子の赤ちゃん星を育むガスの渦巻きを発見

松本 倫明

1. はじめに

2014年12月4日に筆者が所属する研究グループはプレスリリースを発表しました。「双子の赤ちゃん星を育むガスの渦巻きを発見」と題されたプレスリリースは、法政大学だけでなく、国立天文台、千葉大学、台湾中央研究院、香港大学からも共同で発表されました(たとえば法政大学 2014; 国立天文台 2014)。

この研究の概要はつぎの通りです。誕生しつつある双子の星 L1551 NE を、ALMA 望遠鏡を用いて観測したところ、二つの星を取り囲むように円盤が見えました。この円盤は二つの特徴がありました：一つは双子の星に向かってガスが落下していること、もう一つは円盤に渦巻き状の構造が見つかったことです。この観測結果を、数値シミュレーションを用いた理論モデルと比較すると、両者の特徴は驚くほどよく一致しました。筆者はこの理論モデルの構築を担当しました。これらの結果は2014年11月発行の天文学専門誌「アストロフィジカル・ジャーナル」に掲載されました (Takakuwa et al. 2014)。

本稿ではプレスリリースで発表された研究内容を解説します。分野外の読者を念頭におきつつ平易に解説します。

2. 研究の背景

2.1. 暗黒星雲から生まれる星の赤ちゃん L1551 NE

恒星はガス星雲から誕生します。天文学者は恒星のことを単に星と呼ぶので、この慣例に習って以降では恒星のことを単に星と呼ぶことにします。星が誕生するガス雲は温度が絶対温度 10K 程度（摂氏マイナス 260℃に相当）と大変低温です。この低温のためにガス星雲は可視光線で光ることができず、背景の星の光を遮断して真っ黒な雨雲のようにシルエットとして見えます。ゆえに暗黒星雲と呼ばれています。

地球から見て、おうし座の方向に距離 450 光年離れたところに、大きな暗黒星雲があります。おうし座暗黒星雲と呼ばれています。おうし座暗黒星雲は活発に星を生み出していることで天文学者の間では有名な暗黒星雲です。その状況証拠として、この暗黒星雲には星の赤ちゃんが沢山見つかっています。今回の双子の赤ちゃん星 L1551 NE もおうし座暗黒星雲で生まれたと考えられています。

暗黒星雲から生まれた直後の星は原始星と呼ばれています。原始星を人間に例えると赤ちゃんに対応します。原始星は暗黒星雲の中に埋まっていて、周囲にある暗黒星雲のガスを取り込みながらどんどん大きくなっています。今回の双子の赤ちゃん星 L1551 NE は原始星です。また双子星のことを連星と呼ぶので、今回の双子の赤ちゃん星 L1551 NE は原始連星です。

2.2. 連星の誕生は未解明なことが多い

実は、星は双子（連星）や三つ子（三重星）で生まれることが多いのです。太陽のようなひとりっ子の星（単独星）は全体の半分以下のマイノリティなのです。ところが、これまでの研究でいろいろ解明されてきたのは、おもに単独星についてでした。単独星は、生まれる星が1個なので状況が単純だからです。一方、連星や三重星では状況は複雑です。たとえば、連星についてはつぎのようなことがわかっていません。

・双子の星はどちらがどれくらい大きくなるか。人間の双子にも体格差があるように、双子の星にも大きい方と小さい方があります。双子の間でどのくらいの格差で成長するか、どのように格差ができるのかは未解決の問題です。

・双子の星はどのくらい離れるか。連星なので、2個の星は互いに回り合っています。2個の星の間の距離はどのように決まるのか、星の成長とともに距離は広がるのか、縮まるのか、なども未解決の問題です。

これらの未解決問題は連星の誕生において代表的な問題です。これらの問題を含め、様々な問題が未解決となっています。単独星よりも連星や三重星のほ

うがメジャーであることを考えると、これらの問題の解決が急務です。

2.3. 電波望遠鏡

暗黒星雲は普通の天体写真では真っ暗に写ります。一方、暗黒星雲は電波を放射する性質を持っていて、電波望遠鏡を使うと暗黒星雲をシルエットではなく実像として観測することができます。同様に、原始星が暗黒星雲から取り込んでいるガスも電波望遠鏡を用いて観測することができます。

似たような例は、サーモグラフィーです。サーモグラフィーは物体が放射する赤外線の高さを観測して、物体の温度を見積もります。同様に、電波望遠鏡は天体が放射する電波の高さを観測して、ガスの温度や密度（濃度）を見積もります。

電波望遠鏡はパラボラアンテナの形状をしています。見た目では通信用のパラボラアンテナと区別が付きません。

電波望遠鏡を含め、天体望遠鏡の性能は、アンテナやレンズの大きさ、すなわち電波や光を受ける部分の大きさに決まります。プロ仕様の電波望遠鏡にもアマチュア向けの天体望遠鏡にも共通した性質です。アンテナやレンズが大きいと、つぎの二つの点で有利です。第1に、大きなアンテナやレンズは沢山の電波や光を集めることができるので、暗い天体を観測することができます。第2に、大きなアンテナやレンズを用いると、より細かい像を得ることができます。これを分解能が高いと呼びます。

したがって性能が良い電波望遠鏡は、必然的に巨大なパラボラアンテナになります。では実際、パラボラアンテナをどれくらい大きくできるでしょうか。あまりに巨大なパラボラアンテナは重くなり向きを変えるのも大変になり、現実的ではありません。そこで、現実的に取り回しが可能な大きさのパラボラアンテナを沢山作って、それらを連結して使う技術があります。この技術を干渉計と呼びます。干渉計を使うと、沢山のアンテナを合成して、あたかも1個の巨大なアンテナのように使うことができます。

2.4. 国際共同プロジェクト ALMA 望遠鏡

ALMA（アルマ）望遠鏡は干渉計の技術を用いて66個ものアンテナを連結します（図1）。66個のアンテナのうち、主力の50個のアンテナの直径は12メートルもあり、1個のアンテナだけでも第一線で活躍できる性能を持ちます。ALMA望遠鏡はこれらを連結して、あたかも1枚の巨大なアンテナのようにし



図 1 ALMA 望遠鏡の空撮写真。撮影は 2012 年 12 月に行われ、66 台全てのアンテナは写真に写っていない。Credit: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)

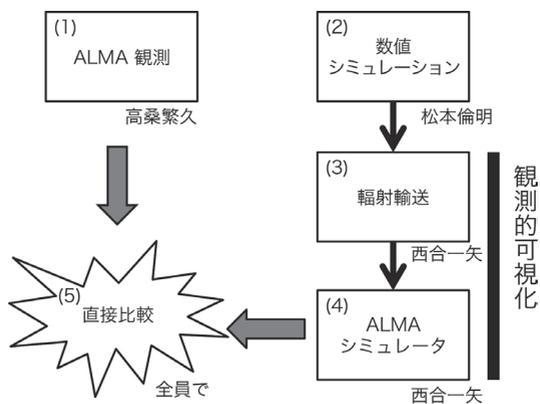


図 2 研究体制の模式図。(1) ALMA による観測を高桑氏が中心となって行いました。これと平行して図中右側の (2, 3, 4) 理論モデルを構築しました。理論モデルの構築では、まず (2) 数値シミュレーションを筆者が中心となって行いました。(3) その結果にもとづいて輻射輸送の計算を行って、天体が放射する電波を予想しました。(4) さらに ALMA シミュレータによる擬似観測を行い、ALMA 望遠鏡が観測する天体像を予想しました。行程 (3, 4) は観測的可視化と呼ばれる行程で、西合氏が中心となって行いました。最後に (4) 観測結果と理論モデルを、研究グループのメンバー全員で比較し、議論をしました。

て天体を観測します。その結果、従来の電波望遠鏡よりも格段に良い分解能を得ることが出来ます。

ALMA 望遠鏡は、南米のチリ共和国にあるアタカマ砂漠に建設されました。建設は国際共同プロジェクトで行われ、日本の国立天文台を代表とする東アジア、米国国立電波天文台を代表とする北米、ヨーロッパ南天天文台を代表とするヨーロッパがこのプロジェクトに参加しています。ALMA 望遠鏡の計画全体にかかる費用は 1000 億円程度と見込まれています¹。この費用をプロジェクトに参加する国が分担します。観測時間も東アジア、北米、ヨーロッパの天文学者に割り当てられています。2011 年 9 月に科学的な観測が開始されました。

このように ALMA 望遠鏡は巨大な国際共同プロジェクトのため、ALMA 望遠鏡の成果は世界的に注目されています。今回の原始連星 L1551 NE の観測も、ALMA 望遠鏡を用いて行われました。観測日は 2012 年 11 月 18 日です。このときはまだ 66 台のアンテナうち 16 台しか運用していない初期運用の期間でした (Cycle 0 運用期間と呼びます)。それでも、従来の電波望遠鏡に比べて格段に良い性能が期待されていました。

3. 研究方法

この研究では、従来行われてきた研究と比べると新しいスタイルを採用しました。従来は、観測してその結果を議論しておしまい、または数値シミュレーションを行って、その結果を議論しておしまいというスタイルが多かったのです。ところが今回は、観測の結果と数値シミュレーションの結果を付きあわせて、深く考察するというスタイルです。

図 2 に研究体制の模式図を示します。まず ALMA による観測は高桑繁久氏(台湾中央研究院天文及天体物理研究所 副研究員)が PI (研究代表者) となつて行われました(図中(1))。これと平行して理論モデルが構築されました(図中右側)。理論モデルは数値シミュレーションにもとづいています(図中(2))。数値シミュレーションは筆者が担当しました。数値シミュレーションの結果を観測結果と比較するために、観測的可視化を行いました(図中(3, 4))。観測的可視化は西合一

¹ 国立天文台 ALMA 望遠鏡、よくある質問 <http://alma.mtk.nao.ac.jp/j/faq/faq07/>

矢氏（国立天文台チリ観測所研究員、現在は大阪府立大学研究員）が担当しました。最後に、観測結果と理論モデルを研究グループ全員で比較し、議論しました（図中(5)）。また研究全体を高桑氏が統括しました。

議論は高桑氏、西合氏、筆者が中心となって行われました。3名とも職場が異なるので、議論はもっぱらスカイプを用いて行われました。このようなスカイプを用いた会議はスカイプ会議と呼ばれています。スカイプ会議は、遠方にいる研究者が打ち合わせをするときにしばしば行われる方法です。幸い西合氏と筆者がいる日本と高桑氏がいる台湾とでは、時差は1時間だったので、深夜や早朝にスカイプ会議をすることはありませんでした。それでも3名はそれぞれ忙しく、3名全員が参加できるスカイプ会議の時間は限られました。とくに2014年度に筆者は学部教授会主任を拝命しており、毎日目の回るような忙しさでした。したがっ

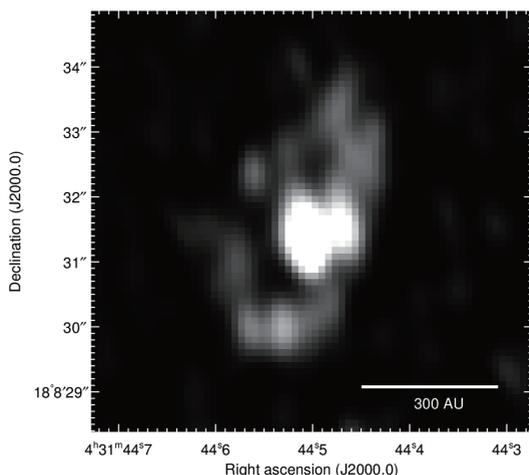


図3 ALMA望遠鏡で観測された原始連星 L1551 NE。横軸と縦軸は天球面の座標（赤経・赤緯）を表します。ダストが放射する電波の強度を色で表し、電波が強い部分を白く、電波が弱い部分を黒く表示しています。電波の強さはダストとガスの量を反映しているため、ダストとガスが濃い部分は白く、ダストとガスが薄い部分は黒く表示されます。白い水平線は300 AUの大きさを示しています。1 AUは太陽と地球の間の距離です。中央部の2つの白い部分が、主星（左側）と伴星（右側）の星周円盤です。これらを取り囲むように、周連星連星が存在することがわかります。出典：Takakuwa et al. (2014) のデータにもとづいて筆者が可視化。

てスカイプ会議が土日や平日夜の帰宅後に行われることもありました²。

4. 観測結果

ALMA 望遠鏡を用いて原始連星 L1551 NE を観測した結果を図3に示します。電波の強さをグレーの濃淡で表しています。電波が強い部分を白く、電波が弱い部分を黒く表示しています。電波の強度はガスの濃さを反映しているので、ガスが濃い部分が白く、ガスが薄い部分が黒くなっています。図の中央付近の白い二つ目玉は連星に対応します。左側が主星で、右側が伴星です。連星のうち、質量が大きい方を主星と呼び、軽い方を伴星と呼びます。電波を放射しているのは、主星と伴星本体ではなく、主星と伴星それぞれを取り囲む星周円盤であると考えられます。さらに、この連星を取り囲むように、図中で大きく広がったガスがあることが確認できます。このガスは複雑な形をして分布していますが、おそらく周連星円盤であると考えられます。しかし、これだけでは確かなことは言えそうにありません。

電波の強度とガスの量の関係について少し説明します。暗黒星雲の主成分は、水素分子のガスです³。暗黒星雲には水素分子ガスに混じってダストと呼ばれる固体の微粒子が含まれています。ダストは氷や砂の微粒子のようなものを想像すると良いでしょう。微粒子の大きさは1ミクロン以下です。水素分子ガスは透明ですが、ダストは固体なので光を遮断して影を作ります。暗黒星雲が暗黒に見える理由は、ダストが作る影（シルエット）です。

ダストは電波を放射する性質があります。2.3節でサーモグラフィーの例で説明したのと同じ仕組みです。放射する電波の強さはダストの量に比例します⁴。したがって、電波が強いところには、ダストが沢山あることを意味します。ダストはガスに対して質量で1%程度含まれていることが知られているので、ダストの

² このため筆者のMacのスピーカーから子どもの声が聞こえることもありました。声の主はおそらく共同研究者のご家族であろうと思われます。同様に、通信相手の共同研究者のMacからも私の家族の声が聞こえたかもしれません。

³ 暗黒星雲は水素分子ガスでできた星雲なので、分子雲と呼ばれることもあります。

⁴ 放射する電波の強度は、ダストの量だけでなく、ダストの温度にも依存します。

量を 100 倍したものがガスの量となります。したがって、電波の強度が強い部分はダストとガスが濃く、電波の弱い部分はダストとガスが薄いと考えます。

5. 理論モデルの構築と観測との比較

観測された連星のまわりのぼやとした構造 (図 3) は、何なのでしょう。周連星円盤なのでしょう。周連星円盤であれば、それはどのような構造をしているのでしょうか。いくつかの可能性を上げることができますが、観測結果だけから自信をもって言えることは限られます。そこで理論モデルを構築し、観測結果と比較します。理論モデルと比較することによって、より深い考察ができます。

5.1. AMR 法を用いた高精度な数値シミュレーション

我々の理論モデルは、数値シミュレーションにもとづいています。したがって、物理的に合理的なモデルです。この点が我々の研究の強みです。図 4 に数値シミュレーションの様子を示します。数値シミュレーションでは適合格子細分化 (AMR 法) と呼ばれる高度な技術を用いています。

AMR 法について説明します。通常、流体力学シミュレーションでは同じ大きさの格子を並べて計算します。格子はデジタル写真のピクセルに相当します。一方、AMR 法では、高解像度が必要な部分にだけ細かい格子を貼り、低解像度が十分な部分には粗い格子を貼ります。しかも、細かい格子を貼るべき場所を自動的に検出し、格子を計算の途中で逐次貼替えます。つまり、計算資源の選択と集中を行い、全体として計算のパフォーマンスを向上させます。

図 4 の場合、原始連星とその周囲に細かい格子を貼り、原始連星から離れた場所には粗い格子を貼りました。原始連星に近い場所で細かい構造が現れるからです。解像度が 2 倍ずつ異なる格子を 6 階層準備し、もっとも細かい格子の大きさは 0.85 AU^5 、もっとも粗い格子の大きさは 27 AU としました。格子の大きさが最大 32 倍 (= 2^5 倍) の比をつけました。なお、この数値シミュレーションでは、最初に図 4 に示す格子を作り、計算途中での格子の逐次貼替えの機能は使いませんでした。連星の位置が予め決められていて、細かい格子が必要になる場所が

⁵ 1 AU は太陽と地球の間の距離です。

自明だからです。連星が自由に動きまわるような状況では、格子の逐次貼替え機能を有効にする必要があります。

AMR 法はもともと衝撃波を精度よく計算するために開発された技術でした (Berger & Colella 1989)。衝撃波を選択的に細かい格子で分解するのです。衝撃波は、飛行機が超音速で飛ぶときや、爆弾が爆発するときが発生します。我々が日常で利用する旅客機は超音速では飛びませんし、日常生活において爆弾を見かけることも少ないため、日常生活において衝撃波を見かけることはまずありません。一方、宇宙には、衝撃波は様々な場面で発生し、天文学において衝撃波はおなじみの現象です。このような事情により、衝撃波を精度よく計算する AMR 法は早くから天文学に取り入れられました。また天文学ではしばしば重力を考慮した数値シミュレーションが行われますが、この状況においても AMR 法は大変有効です。今回の数値シミュレーションでも原始連星の重力を考慮しています。したがって、今日では AMR 法は衝撃波を計算する目的だけではなく、天文学で広く使われるようになりました (松本倫明 2007)。

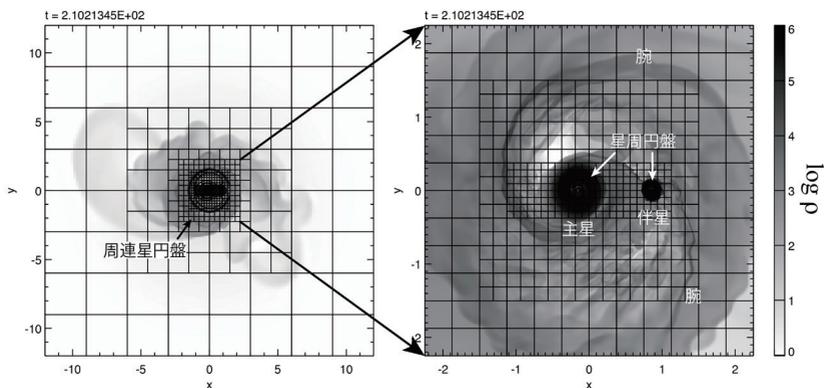


図 4 原始連星 L1551 NE の数値シミュレーションの様子。右のパネルは左のパネルの中心部の拡大図です。色はガスの密度を表します。右図の中央部に主星があり、その右側に伴星がありますが、その大きさはとても小さく、図では点になります。主星と伴星はそれぞれ星周円盤に囲まれています (図中の黒く丸い部分)。2 個の星周円盤からは 2 本の腕が螺旋状に伸びています。これらを取り囲むように周連星連星が存在します (左図)。なお、格子状の線は適合格子細分化法 (AMR 法) におけるブロックを表します。1 個のブロックの中に 163 個の格子点があります。細かい格子の部分の解像度は高く、粗い格子の部分の解像度は粗くなります。

筆者は AMR 法を早くから研究に取り入れ、国内で最初の AMR 法を用いた宇宙流体シミュレーションのソフトウェアを開発しました (Matsumoto 2007)。このソフトウェアは SFUMATO (Self-gravitational Fluid-dynamics Utilizing Mesh Adaptive Technique with Oct-tree) と名付けられ、現在は日本の研究コミュニティに部分的に公開しています。

数値計算には、国立天文台にあるスーパーコンピュータ・アテルイを使用しました。このスーパーコンピュータは、共同利用という仕組みで広く天文学の研究者に利用されています。

5.2. 数値シミュレーションの結果

図 4 に示した数値シミュレーション結果の説明をします。

この数値シミュレーションでは、互いに回転する原始星 (つまり原始連星) を考えます。この原始連星に向かってガスを降らせませす。ガスは暗黒星雲にある水素分子ガスを見立てています。ガスは原始連星の重力に引かれて落下してゆきます。

ガスは 3 個の円盤を作ります。主星を取り囲む星周円盤と、伴星を取り囲む星周円盤、そして、連星全体を取り囲む周連星円盤の合計 3 個の円盤です。主星と伴星の星周円盤のガスは濃いので図では黒く表示されています。この 2 個の星周円盤から螺旋状に腕が外側に伸びています。この螺旋状の腕が本稿の表題にもなっている渦巻きに対応します。螺旋状の腕は周連星円盤に広がっています。周連星円盤は比較的ガスが薄い灰色で表示されています。

このような星周円盤と周連星円盤の入れ子の構造は、過去の数値シミュレーションでも再現されてきました (Artymowicz & Lubow 1996; Bate & Bonnell 1997; Ochi, Sugimoto & Hanawa 2005; Hanawa, Ochi & Ando 2010)。しかしここまで細かい構造まで再現できたのは、この数値シミュレーションで採用した AMR 法の恩恵です。

ここで注意したいことは、これらの構造は自然に発生したということです。星周円盤、周連星円盤、腕などが物理法則に従って自然に発生しました。著者が恣意的に手で置いたわけではありません。この点がコンピュータグラフィック (CG) とは異なる点です。CG では見栄えを良くするために、物理法則を無視することがあります。つまり CG は見栄え優先ですが、数値シミュレーションは物理法則が最優先です。

5.3. 輻射輸送による可視化

さて、数値シミュレーションで再現された原始連星はどのように観測されるでしょうか。ALMA 望遠鏡は天体が放射した電波を観測するので、数値シミュレーションで再現された天体がどのような電波を放射するかがわかれば、この天体がどのように観測されるかがわかります。そこで、数値シミュレーションの天体が放射する電波を計算します。この計算は輻射輸送という物理法則にもとづいて行われます。

輻射輸送の計算では、数値シミュレーションで得られたガスの密度⁶の他に、ガスの温度を仮定します。原始星から近いガスは、原始星からの光が当たっていて温まると考えられるので、原始星から近いガスには高い温度を、原始星から遠いガスには低い温度を仮定します。

図 5 に輻射輸送の計算結果を示します。観測を再現するように天体の向きを調整しました。図の中央付近にある白い楕円状の部分が主星の星周円盤に対応します。その右側にある白い領域が伴星の星周円盤に対応します。主星と伴星の星

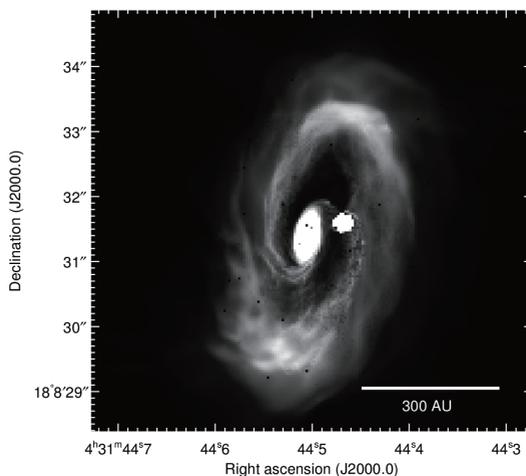


図 5 数値シミュレーションから予測される電波強度の分布。数値シミュレーションの結果にもとづいて輻射輸送の計算を行い、その結果を天球面上に射影しました。観測結果を再現するように、天体の向きを調整しました。出典：Takakuwa et al. (2014) のデータにもとづいて筆者が可視化。

⁶ 密度は濃度と同じ意味です。

周円盤から螺旋状の腕が伸びて、周連星円盤になっています。周連星円盤は右上・左下に延びた楕円の形に見えます。これは周連星円盤が傾いているからです。左側が我々に近い側、右側が我々から遠い側です。図 7 の想像図も参考にすると理解しやすいでしょう。

さて、理論モデルの図 5 と観測結果の図 3 を比べましょう。両方の図で主星と伴星の星周円盤は明るく見えています。図 3 の二つ目玉は主星と伴星の星周円盤を見ていると考えて間違いないでしょう。周連星円盤についてはどうでしょうか。図 5 の理論モデルでは周連星円盤の内側に穴が開いています。この穴をギャップと言います。図 3 の観測でもギャップがありそうです。原始連星 L1551 NE の周連星円盤にギャップが存在すると、図 3 のように観測されるのでしょうか。そのあたりがはっきりしません。

5.4. ALMA シミュレータによる擬似観測

そこで ALMA シミュレータによる擬似観測を行います。ALMA シミュレータでは、輻射輸送計算から求めた天体が放射する電波を、ALMA 望遠鏡で観測

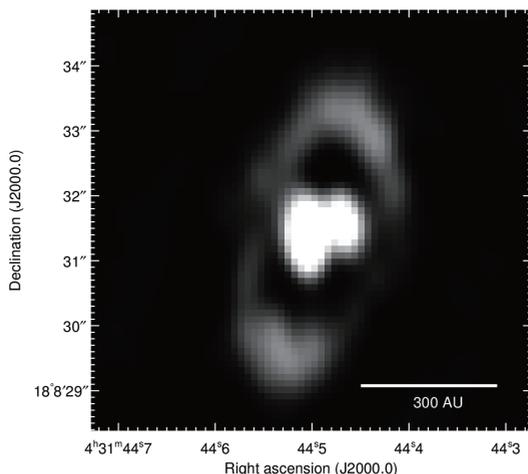


図 6 数値シミュレーション結果から予測される ALMA 望遠鏡の観測結果。図 5 に示した電波強度に対して ALMA シミュレータを用いて擬似観測を行いました。望遠鏡の配置などの観測条件を、図 3 に示した実際の観測と同じであると仮定しました。出典：Takakuwa et al. (2014) のデータにもとづいて筆者が可視化。

するとどのような像が得られるかを予測します。16台のアンテナの配置などの観測条件を、実際に行われた観測と同じものに仮定して、図5の電波をALMA望遠鏡で観測するとどのように見えるのかを計算します。

ALMAシミュレータによる擬似観測の結果を図6に示します。図5と比べるとずいぶんピンぼけになります。図5は無限に性能が良い望遠鏡で観測した天体像に対応します。もっとも理想的なものです。一方、図6はALMA望遠鏡で観測した天体像を予測しており、理想的な天体像よりは像はボケますが、図3の実際の観測と近いボケ具合です。

観測結果の図3と擬似観測の結果の図6を比較しましょう。中心部に白く表示された2個の星周円盤は、両方の図でそっくりに見えます。したがって、今回の観測で原始連星の主星と伴星のそれぞれ星周円盤が観測されたことは間違いありません。

周連星円盤はどうでしょうか。周連星円盤とそのギャップは両方の図で同じように見えます。したがって、今回の観測では周連星円盤が確認され、さらにギャップの構造も確認されたと言えます。とくにギャップに関しては、観測の結果(図3)だけでは自信を持ってギャップの存在を言うことがはばかられますが、理論モデルと比較することによってそれが可能になりました。

螺旋状の腕はどうでしょうか。数値シミュレーションから輻射輸送を計算した結果(図5)でははっきり見えていた螺旋状の腕は、擬似観測の結果(図6)ではよくわからなくなりました。したがって、観測結果(図3)において螺旋状の腕が確認できないとしても、螺旋状の腕が存在しないとは言えません。仮に螺旋状の腕が存在していても、それを図3の観測で確認することはできないことが、擬似観測を行うとわかるからです。

5.5. 渦巻きが存在を示す速度

今回のダストが放射する電波の観測では、螺旋状の腕(渦巻き)の構造を直接分解することはできませんでした。ところが観測された速度を詳しく調べ、理論モデルと比較すると、螺旋状の腕に特徴的なガスの速度があることがわかりました。さらに、周連星円盤から主星と伴星に向かって落下しているガスの速度も検出しました。

図3に示されたものは、ガスの中に一定の割合で存在するダストが放射する電波を描いたものです。ダストの放射からはダストやガスの速度はわかりません。

一方、ALMA 望遠鏡はダストの放射以外に、水素分子ガスの中に微量に存在する一酸化炭素分子の輝線も同時に観測しました。輝線を観測するとガスの速度がわかります。ドップラー効果を利用した測定です。ドップラー効果を用いた速度の測定は、日常生活では、スピードガン（野球などで球速を測る装置）や、自動車の速度違反を取り締まる装置などでも応用されています。救急車が通過するときにサイレンの音の音程が変化して聞こえるのもドップラー効果のためです。

ガスの速度についても、数値シミュレーションから輻射輸送の計算と ALMA シミュレータによる擬似観測を行い、観測から得られたガスの速度と比較しました。速度については専門的になるので図で示しませんが、螺旋状の腕がつくる渦巻きに特徴的な速度が、観測でも確認されました。これは原始連星 L1551 NE の周連星円盤に螺旋状の腕が作る渦巻きがあることを強く示唆しています。原始連星の周連星円盤に渦巻きを確認したのは、世界ではじめてです。

螺旋状の腕におけるガスの速度について、図 7 の模式図で説明しましょう。こ

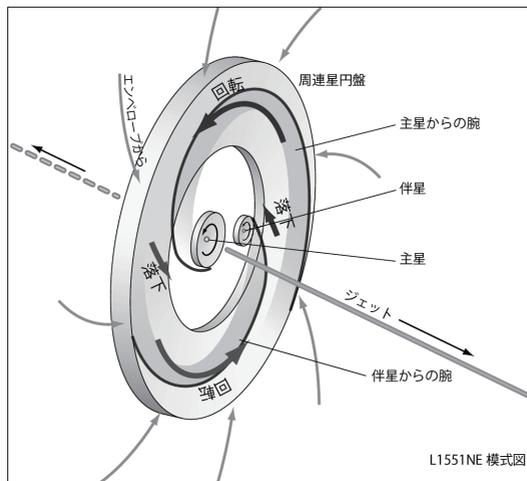


図 7 原始連星 L1551 NE の模式図。主星と伴星はそれぞれ星周円盤に囲まれています。これらを周連星円盤が取り囲んでいます。星周円盤と周連星円盤では、ガスは回転しています。周連星円盤には、主星と伴星から伸びる 2 本の腕があります。これらの腕が周連星円盤に渦巻きを作っています。周連星円盤には周囲（エンベロープ）からガスが落下し、さらに腕の近くでガスは主星と伴星へ落下します。以前の観測により、主星からはジェットが放出していることが知られています。図では、観測された像を再現するように天体の向きを調整しています。

の図は、今回の観測結果と理論モデル、そして過去の観測結果にもとづいて我々が理解している原始連星L1551 NEの想像図です。周連星円盤には主星の星周円盤から伸びた腕と、伴星の星周円盤から伸びた腕があります。周連星円盤ではガスは回転運動をしています。ガスの回転速度は、腕の直後で速く、腕の前方では遅いことが理論モデルで示されています。この腕の前後における回転速度の変化を、今回にALMAによる観測で確認しました。

また腕の前面では、ガスが周連星円盤からギャップへ落下することが理論モデルで示されていますが、この落下する速度も観測されました。ギャップへ落下したガスは、主星の星周円盤か伴星の星周円盤かのどちらかに降着します。そして、主星か伴星の質量をふやします。しがって、周連星円盤におけるガスの落下は、原始連星の質量の増加に直接関係しており、この速度が観測できたことは、原始連星の成長の観点から大変重要な意味を持ちます。

6. 論文投稿そしてプレスリリース

通常、科学的な成果は論文にまとめられて、科学専門誌に投稿され、出版されます。今回の研究成果も同様です。さらに今回はALMA望遠鏡を用いた注目されるべき成果なので、論文の出版以外に、プレスリリースも行うことになりました。

論文の執筆では、研究を統括する高桑氏が全体に執筆を担当し、数値シミュレーションの部分は筆者が担当し、放射輸送とALMAシミュレータの部分は西合氏が担当しました。論文の執筆の段階においても、4章で述べたようなスカイプ会議を何度も行いました。そして最終的に、論文はアメリカ天文学会が発行する専門誌 *The Astrophysical Journal* に掲載されることが決定しました。

プレスリリースの準備は国立天文台の広報室が中心となって進められました。プレスリリースの文章は国立天文台チリ観測所の広報担当者が原案を考え、高桑氏と筆者が修正を加えるという流れで作られました。また、筆者はプレスリリースのために数値シミュレーションの動画を新たに作りました。この動画はYouTubeにアップロードされ⁷、国立天文台プレスリリースのページからリンクされました。高桑氏の所属する台湾中央研究院だけではなく、法政大学、国立天

⁷ <https://www.youtube.com/watch?v=IKYMtFth2QU>

文台、千葉大学、香港大学でもプレスリリースが行われることになりました。法政大学のプレスリリースについては、法政大学広報課の職員と筆者が電子メールで打ち合わせを行いました。台湾では高桑氏による記者会見も行われました。

こうして、プレスリリースは行われましたが、その後は報道機関からの取材に電話で応対することになります。日本の報道機関からの電話の対応には、筆者が担当しました。この時期、筆者は教授会主任を拝命していたので、会議の予定が沢山ありましたが、学部長に事情を説明していろいろとやりくりしました。そして、筆者自身で数件の電話に対応しました。

結局、日本では二つの新聞にプレスリリースに関する記事が掲載されました（朝日新聞 2014, 読売新聞 2014）。これら以外にも日本経済新聞の動画ニュースに数値シミュレーションの動画が掲載されました。また、いくつかのウェブ媒体にも掲載されました。2ちゃんねるにもスレッドが立ちました（スレッドは伸びませんでした）。法政大学広報課によると、今回のプレスリリースは、これまでのプレスリリースと比べて反響があったほうであるとのことでした。

7. 今後に向けて

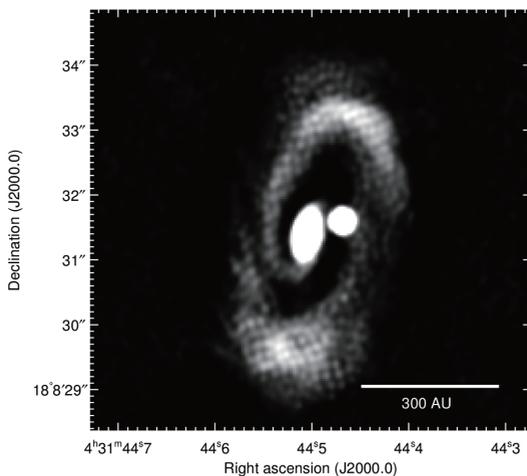


図 8 ALMA 望遠鏡のアンテナ 66 機をすべて用いた場合の予想される、ALMA シミュレータによる擬似観測の結果。図 6 と比べると分解能が向上し、細かい構造まで分解できます。主星と伴星の星周円盤から伸びる 2 本の腕も確認できます。ALMA シミュレータの設定では、Cycle-2 の運用を仮定しました。出典：西合氏・高桑氏によるデータにもとづいて筆者が可視化。

今回の観測は、Cycle 0 と呼ばれる ALMA 望遠鏡の初期の科学的な観測で、アンテナは 66 台中 16 台しかない状態での観測でした。ALMA 望遠鏡の 66 台のアンテナが全てそろったとき、原始連星 L1551 NE はどのように観測されるでしょうか。そこでアンテナが 66 台全てそろった仮定して ALMA シミュレータによる擬似観測を行いました。擬似観測の結果を図 8 に示します。アンテナが全てそろくと、周連星円盤の渦巻きがはっきりと観測できると予想されます。近い将来にこのような鮮明な画像が得られると期待しています。逆にアンテナが全てそろっても渦巻きが確認できないとすれば、理論モデルの修正が必要になります。それはそれでおもしろいことです。

今回の研究成果は、惑星の誕生についても重要な示唆を与えます。通常、惑星は、星周円盤と周連星円盤の中でダストが集まって作られると考えられています。地球もこのようにして誕生したと考えられています。円盤でガスとダストが静々と回転していれば、ダストが集まりやすいことが知られています。しかし、今回の原始連星 L1551NE の周連星円盤では、渦巻きがぐるぐると回っていて、渦巻きがガスとダストをかき乱しています。周連星円盤の内部はおそらく激しい乱流状態にあると考えられます。このような乱流状態の中ではダストが集まりにくくなり、惑星ができにくいとされています。一方、連星のまわりに惑星が見つかっているという現実を考えると、渦巻きのある周連星円盤でも効率良く惑星を作る方法を考える必要があります。星の多くは連星であることを考えると、惑星形成の一般的なシナリオに一石を投じる研究成果です⁸。

8. おわりに

今回のプレスリリースは法政大学からも行ったということも、本稿ではプレスリリースで発表した研究内容をわかりやすく紹介しました。今回の研究の特徴は、(1) ALMA 望遠鏡による観測であることと (2) 数値シミュレーションによる理論モデルとの直接比較です。

後者の理論モデルとの比較という特徴は、最近多くなってきた研究スタイルで

⁸ もちろん地球環境の形成を考える上でも重要な研究成果です。

す。その理由として、(1) ALMA 望遠鏡のような高解像の天体像が得られる望遠鏡が登場したことと、(2) AMR 法などのハイテクな計算方法と高性能なスーパーコンピュータの登場によって高解像の数値シミュレーションが可能になったことがあげられます。つまり観測も理論も高解像になり、両者を直接比較できるようになりました。今後もこのような研究スタイルが多くなると予想されます。

筆者自身も、最近では観測と理論を比較する研究が多くなりました。最近では本稿で紹介した研究の他に、二つのプロジェクトにおいても観測と理論の比較を行いました。

一つ目のプロジェクトでは、ALMA 望遠鏡を用いて多重星形成の様子を観測し (Tokuda et al. 2014)、この観測を説明する理論モデルを構築しました (Matsumoto et al. 2015)。この研究では観測と理論の成果が別々の論文になりました。この研究成果は大阪府立大学と国立天文台によってプレスリリースが行われました。例によって筆者が作成した数値シミュレーションの動画が YouTube にアップロードされ⁹、国立天文台のプレスリリースのページからリンクされています。

二つ目のプロジェクトでは、国立天文台野辺山電波観測所にある口径 45 メートルの電波望遠鏡を用いて、巨大な暗黒星雲を観測しました (Dobashi et al. 2014)。この観測結果と筆者の理論モデルを比較することによって、暗黒星雲同士が衝突して、星が激しく作られるという状況がわかってきました。論文 Dobashi et al. 2014 には観測だけでなく理論モデルの成果も掲載しましたが、理論モデルだけ深く考察した論文を別途出版しました (Matsumoto, Dobashi & Shimoikura 2015)。

このような観測と理論を組み合わせた研究は、シナジー効果でより深い研究成果を生み出します。また観測家と理論家が議論しつつ研究を進めるスタイルは大変楽しいものです。私自身が学部運営で忙しい時期にもかかわらず、多くの研究成果があげられました。これもチームで研究するという研究体制の賜物だと思います。

この研究紹介の主な部分は Takakuwa et al. (2014) にもとづいています。研究チームのメンバーは、高桑繁久 (台湾中央研究院天文及天文物理研究所)、齋藤正雄 (国立天文台野辺山宇宙電波観測所 / 総合研究大学院大学)、西合一矢 (国

⁹ <https://www.youtube.com/watch?v=IXY1od8ykDc>

立天文台チリ観測所)、松本倫明 (法政大学)、Jeremy Lim (香港大学)、花輪知幸 (千葉大学)、Paul T. P. Ho (台湾中央研究院天文及天文物理研究所) です。

参考文献

- Artymowicz Pawel, Lubow Stephen H. (1996) "Mass Flow through Gaps in Circumbinary Disks." *Astrophysical Journal Letters* 467, L77.
- Bate Matthew R., Bonnell Ian A. (1997) "Accretion during binary star formation - II. Gaseous accretion and disc formation." *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 285, 1, 33-48.
- Berger M. J., Colella P. (1989) "Local adaptive mesh refinement for shock hydrodynamics." *Journal of Computational Physics* 82, 64-84.
- Dobashi Kazuhito et al. (2014) "Colliding Filaments and a Massive Dense Core in the Cygnus OB 7 Molecular Cloud." *The Astrophysical Journal*, 797, 1, article id. 58.
- Hanawa Tomoyuki, Ochi Yasuhiro, Ando Koichi. (2010) "Gas Accretion from a Circumbinary Disk." *The Astrophysical Journal*, 708, 1, 485-497.
- Matsumoto Tomoaki. (2007) "Self-Gravitational Magnetohydrodynamics with Adaptive Mesh Refinement for Protostellar Collapse." *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 59, 5, 905-927.
- Matsumoto Tomoaki, Dobashi Kazuhito, Shimoikura Tomomi. (2015) "Star Formation in Turbulent Molecular Clouds with Colliding Flow ." *The Astrophysical Journal*, 801, 2, article id. 77.
- Matsumoto Tomoaki, Onishi Toshikazu, Tokuda Kazuki, Inutsuka Shu-ichiro. (2015) "An origin of arc structures deeply embedded in dense molecular cloud cores." *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters*, 449, 1, L123-L127.
- Ochi Yasuhiro, Sugimoto Kanako, Hanawa Tomoyuki. (2005) "Evolution of a Protoplanetary: Accretion Rates of the Primary and Secondary." *The Astrophysical Journal*, 623, 2, 922-939.
- Takakuwa Shigehisa, Saito Masao, Saigo Kazuya, Matsumoto Tomoaki, Lim Jeremy, Hanawa Tomoyuki. (2014) "Angular Momentum Exchange by

Gravitational Torques and Infall in the Circumbinary Disk of the Protoprostellar System L1551 NE." *The Astrophysical Journal*, 796, 1, article id. 1.

Tokuda Kazuki et al. (2014) "ALMA Observations of a High-density Core in Taurus: Dynamical Gas Interaction at the Possible Site of a Multiple Star Formation." *The Astrophysical Journal Letters*, 789, 1, L4.

国立天文台. 双子の赤ちゃん星を育むガスの渦巻き. 2014年12月4日. <http://alma.mtk.nao.ac.jp/j/news/pressrelease/201412047486.html>.

松本倫明. (2007) "12章 適合格子細分化法." 著: シリーズ現代の天文学 14巻 シミュレーション天文学, 編集: 富阪幸治、花輪知幸、牧野淳一郎. 日本評論社.

朝日新聞. "双子星、ガス取り込み成長." 2014年12月11日: 31.

読売新聞. "双子星の赤ちゃん チリの望遠鏡で観測." 2014年12月9日: 13.

法政大学. 双子の赤ちゃん星を育むガスの渦巻きを発見. 2014年12月4日. <http://www.hosei.ac.jp/NEWS/newsrelease/141204.html>.