

PRESS RELEASE

2019 年 3 月 28 日

理化学研究所

国立天文台

大阪大学

アルマ望遠鏡で迫る大質量連星系の起源

ー誕生のダイナミクスを解明ー

理化学研究所（理研）開拓研究本部坂井星・惑星形成研究室のイーチェン・チャン基礎科学特別研究員、大阪大学大学院理学研究科宇宙地球科学専攻の田中圭特任研究員（常勤）（国立天文台）らの国際共同研究グループ※は、「アルマ望遠鏡^[1]」を用いて、形成段階にある「大質量星^[2]の連星系^[3]」を発見し、その公転運動の解明に成功しました。

本研究成果は、誕生時の大質量連星系のダイナミクスを明らかにした初めての例であり、今後、まだ謎の多い大質量連星系の誕生過程を調べる鍵となることが期待できます。

大質量星は太陽の 8 倍以上の質量を持つ恒星のことで、そのほとんどは連星系として存在しています。大質量星は、高密度なガス雲が重力的に収縮することで生まれると考えられていますが、その誕生過程は、分厚いガスの雲に覆われているため観測が困難だとされてきました。

今回、国際共同研究グループは、最先端のアルマ望遠鏡を駆使することで、今まさに形成中である二つの若い大質量原始星から構成される大質量連星系を発見しました。観測結果の詳しい解析から、二つの原始星の合計質量は太陽質量の 18 倍以上で、お互いを公転する周期は 600 年以下であることを明らかにしました。さらに、連星周囲のガス降着流構造から、先に生まれた主星に付随するガス円盤が分裂することで伴星が誕生した可能性が高いことを示しました。

本研究は、英国の科学雑誌『*Nature Astronomy*』のオンライン版（3 月 18 日付け：日本時間 3 月 19 日）に掲載されました。

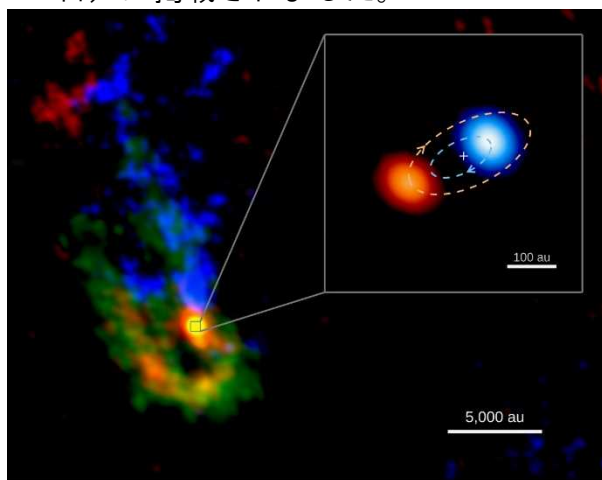


図 発見された誕生中の大質量連星系（右）とその母体となるガス雲（左）

※国際共同研究グループ

理化学研究所 開拓研究本部 坂井星・惑星形成研究室
 基礎科学特別研究員 イーチェン・チャン (Yichen Zhang)
 チャルマーズ工科大学 宇宙地球環境学部
 教授 ジョナサン・タン (Jonathan C. Tan)
 (バージニア大学 天文学部)
 大阪大学 大学院理学研究科 宇宙地球科学専攻
 特任研究員(常勤) 田中 圭 (たなか けい)
 (国立天文台 アルマプロジェクト)
 NASA エイムズ研究センター SOFIA-URSA
 研究主幹 ジェイムズ・デビューザー (James M. De Buizer)
 バージニア大学 天文学部
 博士課程学生 メンヤオ・リウ (Mengyao Liu)
 INAF アルチェトリ天文台
 研究員 マリア・ベルトラン (Maria T. Beltrán)
 アリゾナ大学 天文学部
 助教 ケイトリン・クラッター (Kaitlin Kratter)
 (スチュワード天文台)
 チリ大学 天文学部
 教授 ディエゴ・マラドネス (Diego Maradones)
 教授 ギド・ガライ (Guido Garay)

※研究支援

本研究は、National Science Foundation Grant「Astrophysical and Astrochemical Tests of Massive Star Formation Theories (ジョナサン・タン)」、European Research Council Advanced Grant「MSTAR(ジョナサン・タン)」、ALMA 共同科学研究事業「ALMA のための観測的可視化フレームワークの構築(田中圭)」、the Chilean Fund for Sciences and Technology project Basal AFB-170002(ディエゴ・マラドネス、ギド・ガライ)による支援を受けて行われました。

1. 背景

太陽質量の 8 倍以上の質量を持つ恒星を大質量星と呼びます。大質量星は一生の終わりに大爆発を起こし、さまざまな重元素(水素、ヘリウムよりも重い元素)を宇宙空間にばらまきます。それらの一部は私たちの身体を構築する元素であることから、大質量星の誕生過程を理解することは重要だといえます。

ほぼ全ての大質量星は兄弟星を伴う連星系として存在することが、近年の研究から分かっています。大質量星は、高密度なガス雲が重力的に収縮することで誕生すると考えられていますが、そのガス雲収縮の中でどのようにして連星系が誕生するのかについては、これまでに二つのシナリオが提案されています。一つ目は、先に生まれた主星の周りのガス円盤が分裂することで伴星が誕生するというもの、もう一つは、高密度なガス雲が収縮する過程で二つの大質量星がそれぞれ独立に誕生するというものです。

しかし、どちらのシナリオが正しいのかはまだ明らかにはなっていません。こ

の「大質量連星系」の誕生の謎を解く鍵は、形成段階にある大質量連星系の性質をつぶさに観測することにあります。しかし、星から放たれる波長の短い光は母体となるガス雲に隠されて直接観測することはできません。一方、波長の長い電波であれば、分厚いガス雲を通り抜けることができるため、原始星周囲のガスの情報を地球まで届けられますが、地球から遠く離れた大質量星誕生の現場を十分な空間解像度で観測することは容易ではありませんでした。

そこで、国際共同研究グループは、世界最高性能を誇る「アルマ望遠鏡（アタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計）」を用いて、この謎を解くことを試みました。

2. 研究手法と成果

国際共同研究グループは、地球から約 5,500 光年離れた IRAS07299-1651 という大質量星形成領域から放射される波長 1.3mm の電波を、アルマ望遠鏡を用いて観測しました。その結果、その領域の中心に二つの若い大質量原始星が約 180 天文単位 (au) ^[4] 離れて存在することを発見しました (図 1)。これは、これまでに見つかっている中で最も近接した大質量連星系です。また、それぞれの原始星の周囲のガスから水素再結合線^[5]が観測されたことから、どちらの原始星も既に強力な紫外線を放出する程度まで質量を獲得していることが分かりました。

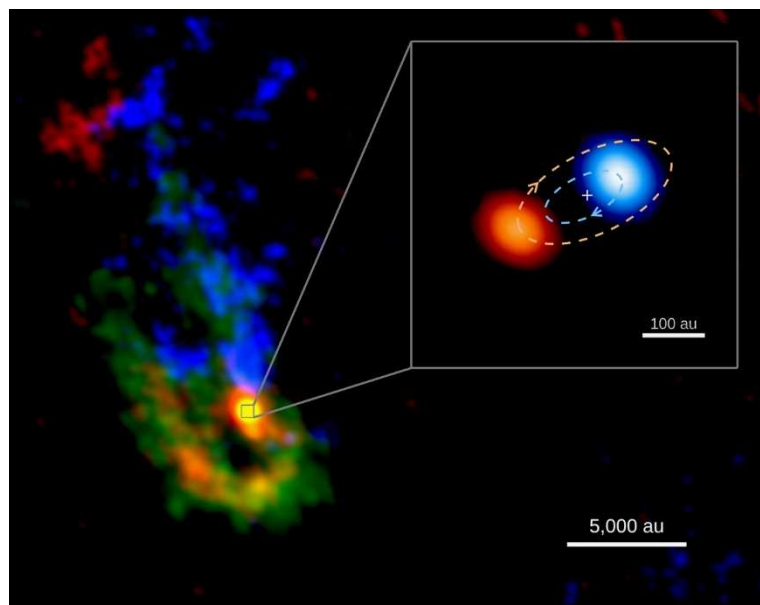


図 1 アルマ望遠鏡が捉えた大質量連星系の姿

全体観測 (左) から、連星系の母体となるガスと塵の雲の分布 (緑) がわかる。分子ガス輝線を用いて速度構造 (赤: 地球から遠ざかる運動、青: 地球に近づく運動) を解析し、10,000au 程度の大規模なガス雲から中心にある 100au 程度の連星系へ質量降着が続いていることを示した。右側の四角内は、中心の四角の部分の拡大で、今回、形成段階にある二つの若い大質量原始星が発見された。水素再結合線を用いて、主星 (青) が地球に近づく方向に、伴星 (赤) が地球から遠ざかる方向に運動していることを明らかにし、その公転運動を調べた。赤破線および青破線は、それぞれの原始星の軌道の例を示す。

さらに、電離ガスから放出される水素再結合線により、二つの原始星の視線方向の速度差が約 9.5km/秒であることを突き止めました。得られた原始星間の距離と速度差から、公転軌道が円形の場合には、二つの原始星の合計質量は太陽質量の 18 倍以上、楕円軌道を考慮しても太陽質量の 9 倍以上であると見積もられました。その他にも、伴星の質量は最大で主星の約 8 割、お互いを公転する周期は 600 年以下だということも分かりました。これらは、形成段階にある大質量連星系のダイナミクスを明らかにした初めての研究成果となります。

次に、深くガス雲に埋もれた原始星の質量を正確に測定することは非常に難しいため、他の異なる手法を用いて原始星質量の推定を行い、その信頼性を確かめました。大規模なガス雲から連星系へ流れ込む降着流の運動からは、降着ガスも含めた合計質量が太陽質量の約 27 倍であること、電離ガスの明るさからは、二つの原始星の質量がそれぞれ太陽質量の 12 倍と 10 倍程度と見積もられました。また、水素再結合線の運動情報からは、主星の質量が少なくとも太陽質量の 4~8 倍以上であることも分かりました。このように、いずれの手法からも、先に述べた連星系の公転運動と整合的な値が得られ、本成果の信頼性を高めることとなりました。

さらに、連星系の公転運動（約 100au）だけではなく、それを取り囲む大規模な降着流（1,000~10,000 au）と、それぞれの原始星を取り囲むガス円盤（約 10au）を含む多重スケールにわたる大質量連星系の誕生の様子を明らかにしました（図 2 左）。この 3 桁にもわたるスケール（10~10,000au）は、例えば、人間の体で全身から爪の厚さ程度までを詳細に調べたことに匹敵し、強力なアルマ望遠鏡だからこそ達成できた成果といえます。

二つの原始星の質量が同程度であることや、ほかに小質量星が同時に誕生していないことなどから、「この連星系は、先に生まれた主星に付随するガス円盤が分裂することで伴星が誕生した可能性が高い」と結論づけました（図 2 右）。しかし、連星公転面と主星円盤面にズレが存在するため、単純な円盤分裂シナリオでは、この連星系の誕生を説明することは難しいことも指摘しています。

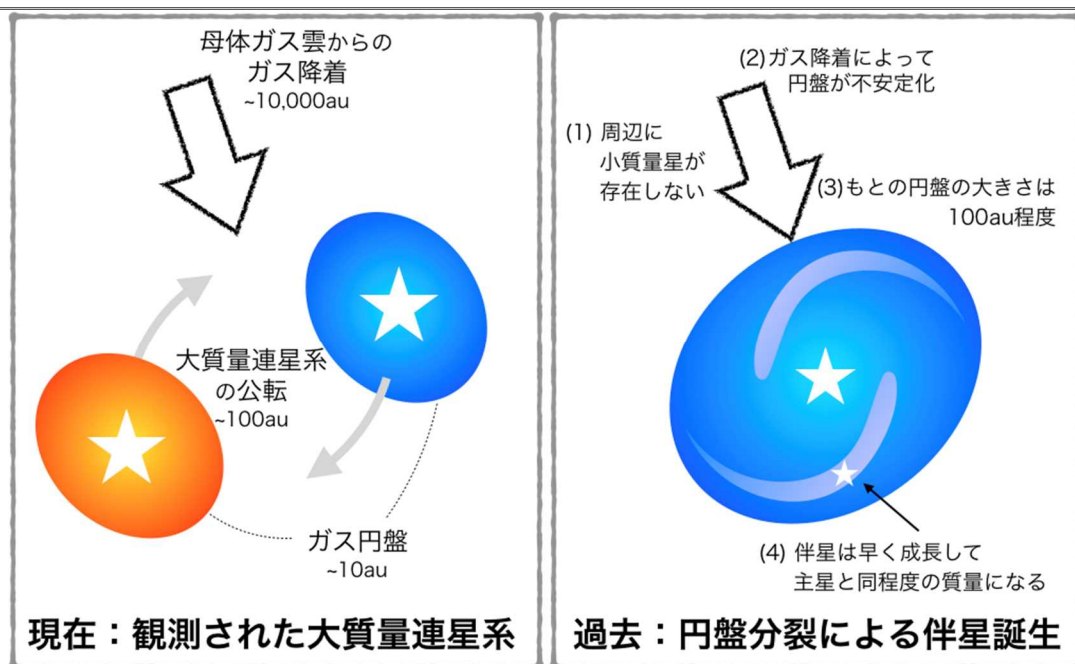


図2 発見された大質量連星系の現在と過去の概念図

- [左] 現在の大質量連星系の姿。大規模なガス降着流、それによって成長を続ける大質量連星系、それぞれの原始星に付属するガス円盤という多重スケールにわたる構造とそのダイナミクスを解明した。
- [右] 伴星誕生時の姿。現在の観測結果は、円盤分裂による伴星誕生のシナリオから予想される事柄〔図中(1)~(4)〕とよく一致する。

3. 今後の期待

本研究では、大質量連星系の誕生時のダイナミクスを初めて明らかにしました。円盤分裂シナリオでは、公転軌道が円形に近い連星系が誕生すると示唆されているため、将来、観測によってその形状が分かれば、この連星系の起源を決定づけられる可能性があります。さらに、異なる波長での観測を行うことにより、中性ガスと電離ガスが正確に区別され、それぞれの原始星へのガス降着の様子をより詳しく調べることができます。

また、今回、深くガス雲に埋もれた大質量連星系の検出と精査のための新たな手法も示しました。大質量原始星の近傍では、ガス中の分子のほとんどが破壊（電離）されているために、低質量原始星の周りのガス円盤の運動を調べるのによく用いられる一酸化炭素分子などのスペクトル線を用いることができません。今回の観測ではこれを逆手にとり、原始星近傍で水素再結合線を観測・解析することで、原始星自身の公転運動を探る重要な手がかりを得ることに成功しました。今後、より多くの天体に同様の観測手法を適応すれば、その有効性が検証されと考えられます。

さらに、今回観測された多重スケールの構造（大規模なガス降着流、連星系、ガス円盤を伴う各原始星の性質など）が一般的なのか、それとも特殊なのかを明らかにするためにも、今後もより多くの高解像度観測が待たれます。

4. 論文情報

<タイトル>

Dynamics of a massive binary at birth

<著者名>

Yichen Zhang, Jonathan C. Tan, Kei E. I. Tanaka, James M. De Buizer, Mengyao Liu, Maria T. Beltrán, Kaitlin Kratter, Diego Mardones, Guido Garay

<雑誌>

Nature Astronomy

<DOI>

10.1038/s41550-019-0718-y

5. 補足説明

[1] アルマ望遠鏡

アタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計 (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array : ALMA、アルマ望遠鏡) は、ヨーロッパ南天天文台 (ESO)、米国国立科学財団 (NSF)、日本の自然科学研究機構 (NINS) がチリ共和国と協力して運用する国際的な天文観測施設。直径 12 m のアンテナ 54 台、7 m のアンテナ 12 台、計 66 台のアンテナ群をチリ共和国のアンデス山中にある標高 5,000 m の高原に設置し、一つの超高性能な電波望遠鏡として運用している。2011 年から部分運用が開始され、2013 年から本格運用が始まった。感度と空間解像度でこれまでの電波望遠鏡を 10 倍から 100 倍上回る性能を持つ。

アルマ望遠鏡の建設・運用費は ESO、NSF およびその協力機関であるカナダ国家研究会議 (NRC)、台湾行政院国家科学委員会 (NSC)、NINS およびその協力機関である台湾中央研究院 (AS) と韓国天文宇宙科学研究院 (KASI) によって分担されている。建設と運用は、ESO がその構成国を代表して、米国北東部大学連合 (AUI) が管理する米国国立電波天文台が北米を代表して、日本の国立天文台が東アジアを代表して実施している。合同 ALMA 観測所 (JAO) は、ALMA の建設・試験観測・運用の統一的な執行および管理を行うことを目的とする。

[2] 大質量星

太陽質量の約 8 倍以上の質量を持つ恒星のこと。数は少ないが、星は重いほど明るく光るため、夜空でも目立つ存在である (オリオン座のベテルギウスなど)。大質量星はその寿命を終える際に大爆発を起こし、さまざまな元素を宇宙空間にばらまく。その一部は私たちの身体を構築する元素でもあり、そのため大質量星の誕生の過程を理解することは非常に重要である。しかし、その数は太陽質量程度の星 (小質量星) と比べて 2 桁程少なく、また深くガスと塵の雲に埋もれたまま誕生するため、大質量星の形成過程はまだよく理解されていない。

[3] 連星系

二つの恒星が互いの重力によって引き合い、公転運動をする天体のこと。双子星などと呼ばれることもある。明るい方 (重い方) を主星とよび、暗い方 (軽い方) を伴星と呼ぶ。三つ以上の星が重力的に束縛されている系も存在し、その場合には多重連星

と呼ばれることもある。連星は稀な存在ではなく、太陽質量程度の恒星では半分程度、大質量星はそのほとんど全てが連星であることが知られている。

[4] 天文単位 (au)

天文学で用いられる距離の単位。1 天文単位は地球と太陽の距離に由来し、約 1 億 5000 万 km。au は astronomical unit の略。

[5] 水素再結合線

正の電荷を持つ「水素イオン」と負の電荷を持つ「電子」が結合する際に放出されるスペクトル線。中性ガスが大質量星などから放射される紫外線によって電離破壊され、水素イオンと電子に分かれたものが、再び結合したときに放出されるため「再結合線」と呼ばれる。13.6 eV 以上のエネルギーを持つ電磁波（紫外線）でなければ電離破壊が起こらないため、再結合線が観測されるということはそのような紫外線環境下にあることを意味する。

6. 発表者・機関窓口

<発表者>

理化学研究所 開拓研究本部 坂井星・惑星形成研究室
基礎科学特別研究員 イーチェン・チャン (Yichen Zhang)

※研究内容については下記にお問い合わせ下さい

理化学研究所 開拓研究本部 坂井星・惑星形成研究室
主任研究員 坂井 南美 (さかい なみ)

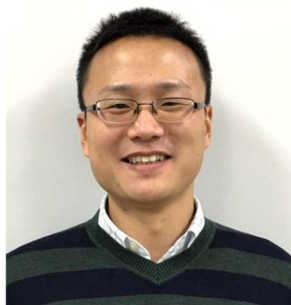
TEL : 048-467-1411 (坂井) FAX : 048-467-1411 (坂井)

E-mail : yichen.zhang[at]riken.jp (チャン)
nami.sakai[at]riken.jp (坂井)

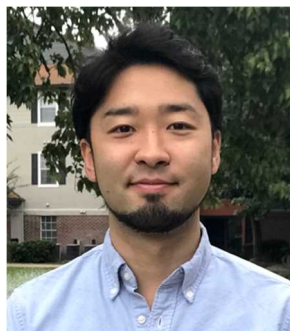
大阪大学 大学院理学研究科 宇宙地球科学専攻
特任研究員 (常勤) 田中 圭 (たなか けい)
(国立天文台 アルマプロジェクト)

TEL : 06-6850-5482

E-mail : ktanaka[at]astro-osaka.jp



イーチェン・チャン



田中 圭



<機関窓口>

理化学研究所 広報室 報道担当

TEL : 048-467-9272 FAX : 048-462-4715

E-mail : ex-press[at]riken.jp

国立天文台アルマプロジェクト 教育広報主任 平松正顕

TEL : 0422-34-3630

E-mail : hiramatsu.masaaki[at]nao.ac.jp

大阪大学 理学研究科 庶務係

TEL : 06-6850-5280 FAX : 06-6850-5288

E-mail : ri-syomu[at]office.osaka-u.ac.jp

※上記の[at]は@に置き換えてください。
