

## 学術発表その1

### 1 3 5 億年前の星形成の痕跡を発見！ ～最遠の「老けた銀河」探査～

1. 会見日時：2019年 9月 10日(火) 13:00 ～
2. 会見場所：熊本県庁知事公室 広報グループ県政記者室（熊本県熊本市水前寺 6-18-1）  
（日本天文学会秋の大会開催に伴い、現地での記者会見で発表）
3. 出席者：馬渡 健（東京大学宇宙線研究所 特任研究員/ICRR フェロー）  
井上 昭雄（早稲田大学 先進理工学部物理学科/理工学術院総合研究所 教授）  
谷口 義明（放送大学 教授）

#### 4. 発表のポイント：

- ◆ろくぶんぎ座近くの COSMOS 天域において、スピッツァー宇宙望遠鏡による近赤外線観測だけで見えて、すばる望遠鏡（可視光）やアルマ望遠鏡（電波）では見えない銀河が3つ発見されました。
- ◆これらの銀河はビッグバン後 10 億年の比較的初期の宇宙に存在したにもかかわらず、すでに「老けた」銀河の特徴を持っていることがわかりました。
- ◆その銀河の星たちは宇宙年齢わずか3億年の時代に生まれたと推測でき、間接的な方法ながらも宇宙最初期の星形成のようすを初めて捉えた成果となります。

#### 5. 発表概要：

宇宙で最初の銀河の探求は現代天文学の重要なテーマです。これまでにビッグバンから5億年後（約133億光年の距離）の銀河まで発見されました（注1）。さらに宇宙初期の銀河形成に迫るため、東京大学宇宙線研究所の馬渡健 特任研究員、早稲田大学の井上昭雄 教授らの研究チームは、年老いた恒星からなる銀河—「老けた」銀河—に注目しました。「老けた」銀河は、過去の星形成の痕跡を残す化石のような天体であり、発見された時代よりも過去の様子を探る重要な手がかりを与えてくれます。

研究チームは、ろくぶんぎ座の方向にある COSMOS という天域で、宇宙年齢 10 億年の時代の「老けた」銀河の探査を行いました。COSMOS 天域では、日本のすばる望遠鏡を含む世界中の望遠鏡が協力した観測がこれまでにこなわれ（注2）、全天で最も良質な画像データが揃っています。研究チームは、既存の観測データに加え、アルマ望遠鏡による超高感度電波観測も独自に行い、同天域にある近赤外線で見える 3 万 7 千の天体から「老けた」銀河の候補を 3 つ選び出しました。

詳細な解析から、これらの天体はいずれも、宇宙年齢 10 億年程度の時代にある約 7 億歳の星からなる「老けた」銀河である可能性が高いことがわかりました。つまり、宇宙年齢わずか 3 億年（135 億光年の距離）の時代に銀河が誕生していたことが推測できます。

本研究は、宇宙で最初期の星形成活動を垣間見た成果として、9月11日から熊本大学で開幕する日本天文学会秋季年会にて発表されます。

## 6. 発表内容：

### ① 研究の背景・先行研究における問題点

宇宙で最初の星や銀河の誕生について、世界中の天文学者の大きな関心が今まさに集まっています。近年の観測技術の目覚ましい発展により、これまでに人類は 133 億年前の銀河まで観測できるようになりました（注 1）。しかし、初代銀河の誕生はさらに宇宙史をさかのぼる宇宙年齢 1 億年から 5 億年の間（赤方偏移 30 から 10；注 3）であると推定されています。この時代の銀河を直接観測するには、将来の観測装置を待つ必要があるかもしれません。しかし、ほかに何か今できるアイデアは無いのでしょうか。

### ② 研究内容

東京大学宇宙線研究所の馬渡健 特任研究員、早稲田大学の井上昭雄 教授らの研究チームは、年老いた恒星からなる銀河—「老けた」銀河—に注目しました。銀河形成の多様なメカニズムの一つに、大量の星が一気に作られ、その後は星が単に年老いていくだけというシナリオがあります。このような「老けた」銀河は過去の星形成の痕跡を残す化石のような天体であるため、発見された時代よりも過去の様子を探ることが出来ると本研究をリードした馬渡 特任研究員は考えました。

「老けた」銀河は、遠方宇宙ほど数が少なく、スペクトルの特徴も少ないことから見つめるのは難しいと思われてきましたが、研究グループによると、COSMOS 天域（注 2）でこれまでに撮られた高感度・広視野・多波長の観測データをフル活用すれば発見できるということです。「老けた」銀河の数少ない特徴として、バルマーブレークというスペクトル中の段差があります（図 1）。バルマーブレークの強さは銀河をつくる星の年齢に比例し、赤方偏移 6 でほしい  $3\mu\text{m}$  の近赤外線波長域に現れます。研究チームはまず、スピッツァー宇宙望遠鏡の近赤外線画像に写る 3 万 7 千の天体の中から、 $3.6\mu\text{m}$  バンドで明るく、それより短波長側で見えない 6 天体を候補として選びました。ここでは特に、日本のすばる望遠鏡で撮った高感度の可視光データ（注 4）が、数多くある若い星形成銀河を取り除くのに役立っています。また、「老けた」銀河は星間塵の熱放射が少なく、遠赤外線で暗いはずですが、そこで 6 天体に対してアルマ望遠鏡（注 5）の超高感度観測を行い、星間塵の熱放射が見えない 3 天体を残しました。アルマ観測データの解析を担当した早稲田大学の橋本拓也 研究員によると、最高感度を誇るアルマでも未検出ということが「老けた」銀河である可能性を劇的に高め、他の研究と一線を画す本研究のオリジナリティになっているということです。

合計 15 波長の画像を用いた詳細なスペクトル解析（図 2）から、これら 3 天体は宇宙年齢 10 億年程度の時代（赤方偏移 6）にあり、その星の大部分は年齢 7 億歳という「老けた」銀河であると結論付けられました。つまり、宇宙年齢わずか 3 億年（赤方偏移 14、135 億光年の距離）の時代に誕生した銀河ということになります（図 3）。

赤方偏移 14 における星形成率密度（注 6）を求めたところ、直接的な観測が到達している赤方偏移 10 までの測定値に比べて小さいものの、減少率はゆるやかであることが分かりました（図 4）。銀河の合体・集積だけを考えると、赤方偏移 8 以上で星形成率密度がもっと急激に減少するので、今回の結果は、宇宙最初期の銀河の星形成活動は予想外に効率的であったことを示唆しています。

### ③ 今後の予定

宇宙の初期の研究では、活発な「若い」銀河が注目を集めていましたが、「老けた」銀河も、若い銀河にはない貴重な情報をもたらしてくれます。今回見つけた 3 つの天体が「老けた」銀河であると断定するには、バルマーブレークの詳細な分光確認が必須です。馬渡 特任研究員は、2021 年にアメリカ航空宇宙局 (NASA) が打ち上げを予定している James Webb Space Telescope を使えば確認できるとの見通しを立てています。その観測データから、宇宙最初期にどうやって効率的に大量の星が作られたのかという物理過程の解明も期待されるとしています。

## 7. 関連する学会講演：

講演番号 X54a (9 月 13 日 10:06)

再電離期のバルマーブレイク銀河候補と赤方偏移 1.4 以上の星形成率密度への制限

## 8. 発表雑誌：

雑誌:*Astrophysical Journal* に投稿中

タイトル: Balmer Break Galaxy Candidates at  $z \sim 6$ : a Potential View on Star-Formation Activity at  $z > 14$

執筆者: Ken Mawatari, Akio K. Inoue, Takuya Hashimoto, John Silverman, Masaru Kajisawa, Satoshi Yamanaka, Toru Yamada, Iary Davidzon, Peter Capak, Lihwai Lin, Bau-Ching Hsieh, Yoshiaki Taniguchi, Masayuki Tanaka, Yoshiaki Ono, Seiji Fujimoto, and Tohru Nagao

## 9. 問い合わせ先：

東京大学宇宙線研究所 観測的宇宙論グループ

特任研究員/ICRR フェロー 馬渡 健(まわたり けん)

Tel: 04-7136-3158

E-mail: mawatari@icrr.u-tokyo.ac.jp

## 10. 用語解説：

(注 1) これまでに観測されて距離が正確に求めた天体のうち、最遠方のは 2018 年に報告された MACS1149-JD1 であり、その赤方偏移は 9.11 (132.8 億光年の距離) である。この最遠方銀河を見つけた研究グループの主要メンバーは、橋本拓也 早稲田大学 研究員、馬渡健 東京大学 特任研究員、井上昭雄 早稲田大学 教授であり本研究と同じである。

(注 2) 宇宙進化サーベイ COSMOS プロジェクトという戦略的観測プロジェクトが 2000 年代前半から始まり、約 2 平方度 (満月 9 個分) の COSMOS 天域に対してこれまでに様々な望遠鏡による多様な観測が実施されてきている。ニック・スコビル カリフォルニア工科大学教授が代表を務め、日本からは谷口義明 放送大学 教授などが参加している。

(注 3) 赤方偏移とは宇宙論的距離を表す際に使われる指標である。宇宙の膨張に伴って遠方天体からの光は引き伸ばされ、赤方偏移  $z$  の場合に観測される光の波長は元の  $(1+z)$  倍となる。赤方偏移は時間指標としても有用であり、例えば赤方偏移 6 は現在から 130 億年前、赤方偏移 14 だと 135 億年前に相当する。添付資料に赤方偏移と宇宙年齢の関係の表を載せる。

(注 4) すばる望遠鏡では、超広視野撮像カメラ Hyper Suprime-Cam (HSC) を用いて、2014 年から 5 年間にわたる戦略的観測を行なっている。合計 300 平方度という広い視野を観測しているが、COSMOS 天域に対しては、特に長時間を割いて高感度の観測を実施している。本研究のメンバーである馬渡 特任研究員と小野宜昭 東京大学宇宙線研究所 助教は、この観測プログラムの遠方銀河ワーキンググループの議長を務めている。

すばる戦略枠プログラム ウェブサイト: [https://hsc.mtk.nao.ac.jp/ssp/home/home\\_jp/](https://hsc.mtk.nao.ac.jp/ssp/home/home_jp/)

(注 5) 銀河が一年あたりに太陽何個分の星を作っているかの指標を星形成率という。さらにある体積に含まれる全銀河の星形成率を足し上げて、単位体積あたりどれだけの星が生まれたかを表す物理量は星形成率密度と呼ばれている。

1 1. 添付資料 :

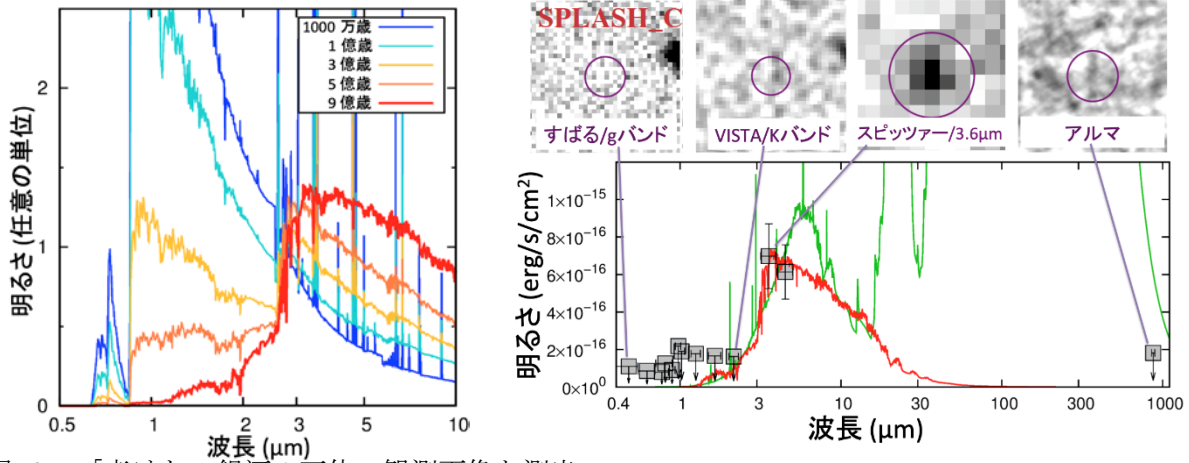
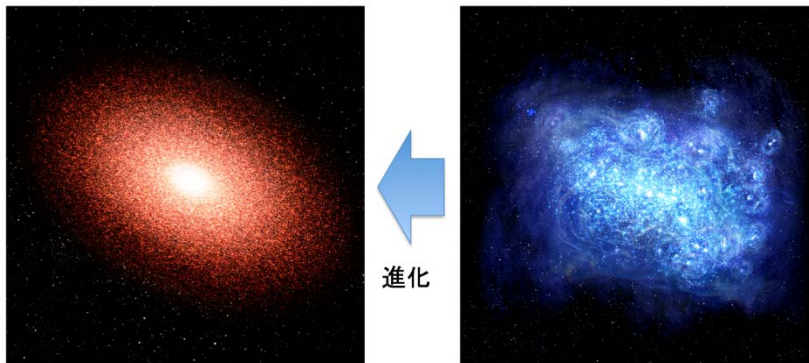


図 2. 「老けた」銀河 1 天体の観測画像と測光スペクトルエネルギー分布 (灰色四角)。赤線は観測を最もよく再現する赤方偏移 6 のモデル銀河スペクトル。緑線は赤方偏移 2 の星間塵の熱放射が多いモデル銀河スペクトルだが、アルマ観測により、このモデルは棄却される。

のモデル銀河可ほどスペクトルマープかる。



「老けた」銀河 @ 赤方偏移~6

星形成銀河 @ 赤方偏移~14

図 3. 観測された赤方偏移 6 の老けた銀河 (左) とその銀河が星形成をしていた赤方偏移 14 の時代における先祖 (右) の想像図。  
クレジット : 国立天文台

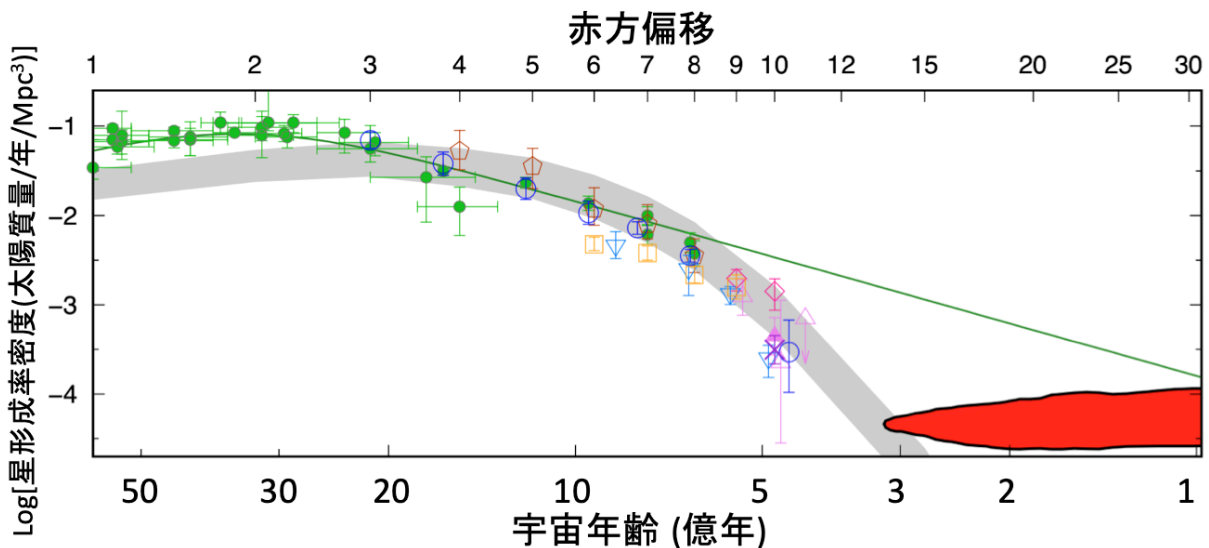


図 4. 赤方偏移 6 の老けた銀河から推定される、それらの先祖による星形成率密度（赤色塗りつぶし）。赤方偏移 1 から 10 の星形成銀河の直接観測に基づく測定値もプロットしてある。緑線は赤方偏移 1 から 8 までの測定値に対するフィット線で、赤方偏移 8 以上では緩やかな減少を予想する。灰色塗りつぶしは銀河の合体・集積だけを考えた理論予想であり、こちらだと赤方偏移 8 以降で急激な減少を示す。

表：宇宙年齢と赤方偏移の関係

宇宙年齢 ( $T$ : 億年)	赤方偏移 ( $z$ )
138.0	0
85.9	0.5
58.5	1
21.4	3
11.7	5
7.6	7
4.7	10
3.0	14
1.8	20
1.0	30

NASA Extragalactic Database (NED)

宇宙論パラメータ計算ツール

[http://ned.ipac.caltech.edu/help/cosmology\\_calc.html](http://ned.ipac.caltech.edu/help/cosmology_calc.html)

ここで用意されている Nick Gnedin 氏作成のツールを使用

<http://home.fnal.gov/~gnedin/cc/>

また、宇宙論パラメータについては Planck 2018 の成果を使用

<https://arxiv.org/pdf/1807.06209.pdf>

表 1 の一番右の列にある Combined の値を採用

## 学術発表その2

### 双子原始星からのふぞろいな分子流から連星3系形成の謎に迫る

#### 1. 背景：連星系とその誕生の謎

星の多くは、連星として生まれるということがわかっています。しかし、どのようにして連星が生まれたかはまだよくわかっておらず、連星が作られるメカニズムはいくつも提唱されています。例えば「乱流分裂モデル」は、星の材料である分子雲が乱流によって複数の分子雲コア（星のたまご）に分裂し、分子雲コアどうしが互いに回りあう中で星が生まれ、最終的に連星系ができる、というものです。また「円盤分裂モデル」では、原始星を取り巻くガス円盤（原始星円盤）が分裂してもうひとつの星を生み出すことで連星ができたと考えます。これらが複合的に合わさって最終的な連星系ができるという考え方もあり、どのモデルが優勢なのかまだ決着がついていません。

連星形成のメカニズムに迫るためには、数多くの若い連星系を観測し、これらの特徴を統計的に考察する必要があります。このときに注目すべき特徴のひとつは、原始星の周りにできる「円盤の向き」です。

#### 2. 観測：最も若く、連星間隔の狭い双子原始星VLA1623とアルマ望遠鏡による観測

今回、NEC/東京大学の原千穂美氏と国立天文台の川邊良平教授を中心とした研究チームは、最も若く、連星の間隔が狭い双子原始星VLA1623A(図1を参照)をアルマ望遠鏡で高解像度観測しました。

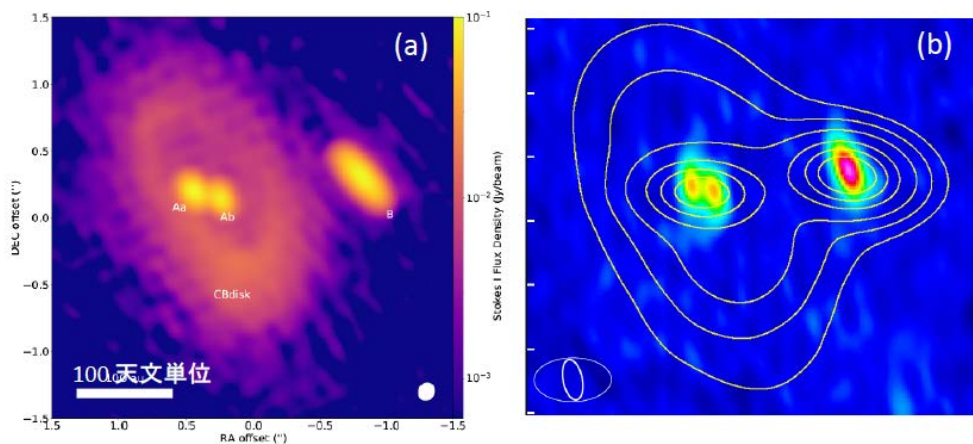


図1. (a) ハリス等(2018年)により得られた、ALMA望遠鏡の波長0.85ミリのイメージ。低温の塵からの放射を観測。非常に若い原始星VLA1623Aが双子原始星であり、その周りを塵の円盤(もしくはリング)が取り巻くことを明らかにした。(b) ほぼ同時期に、JVA (米国のcm波帯干渉計)の波長7mmの観測(カラー表示)でも、双子原始星の存在を示す結果が得られた(川邊等、2018年)。双子原始星の見かけの距離は30天文単位とこれまでの原始星の中でも特に間隔が狭い。右の天体(VLA1623B)は、衝撃波圧縮でできた天体説と原始星説がある。

観測の結果、双子原始星のそれぞれから噴き出す、これまで知られていなかった不揃いな分子流対を検出しました(図2、3を参照)。分子流は、原始星円盤の回転軸方向に飛び出すのが普通ですから、2本の分子流がそろっていないということは、ふたつの原始星円盤の回転軸も大きく傾いていることを示しています。分子流の中心部を流れるジェットの構造から、双子原始星の軌道運動に起因すると思われる、ジェットの波打ち現象を捉えることに成功しています(図4参照)。

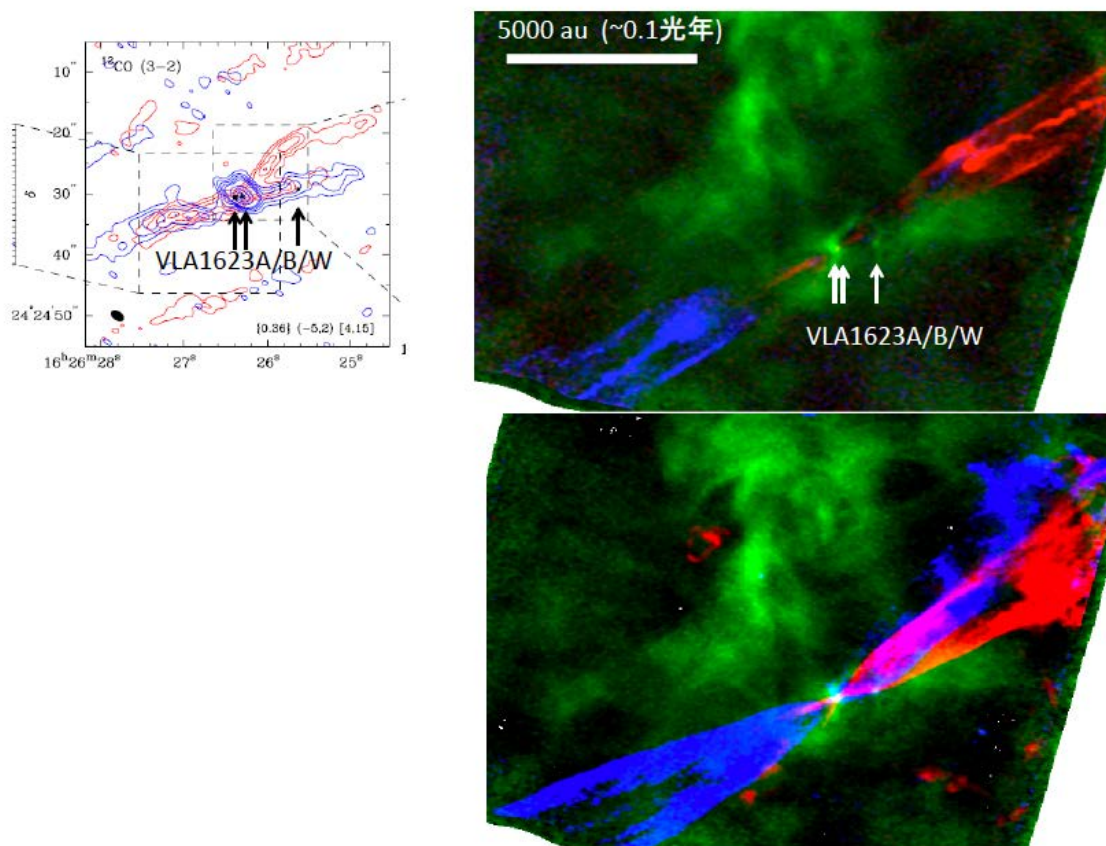


図2. (左図) ムリリヨ等による分子流の先行研究(2013)。(右図) 上図は、今回ALMA望遠鏡による一酸化炭素分子からの波長1.3mm輝線の観測で得られた、分子流の高速度成分の分布。赤い成分は、遠ざかる成分であり、青い成分は近づいてくる成分である。緑で示したのは、一酸化炭素分子、 $^{12}\text{C}^{16}\text{O}$ の同位体、 $^{12}\text{C}^{18}\text{O}$ 輝線、で得られた、高密度分子雲の分布(明るいほど電波強度が強い)。原始星VLA1623Aの領域には星を生み出す材料となる高密度ガスが大量にあり、分子流(もしくはジェット)が高密度ガスをかき分け外側に広がっている様子がわかる。下図は、比較的低速度の分子流の分布。高速度成分に比べて複雑な構造をしているが、それは2つの独立な分子流が視線方向に折り重なっているため。

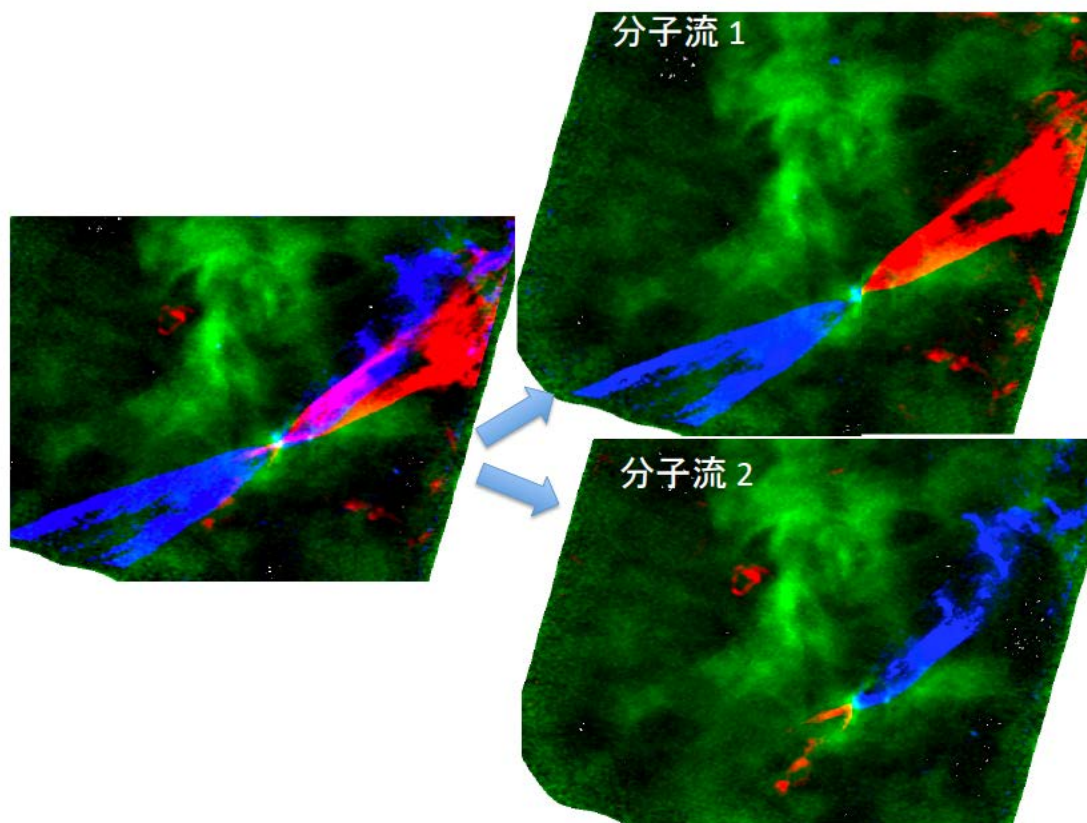


図3. 折り重なっている2つの分子流を分離してみると、放出角度は見かけ(イメージ上では)約10度異なり、近づく成分と遠ざかる成分のパターンが逆の2つの分子流から構成される。逆の速度構造を持つことも考慮すると、分子流の放出角度は3次的には約70度異なっていることがわかった。

間隔の狭い連星系で、不揃いな分子流が見つかった例は初めてです。従来の考え方では、間隔の狭い連星系の多くは「円盤分裂」によって形成され、円盤の向きはそろっているはずだとされてきました。しかし、磁場や乱流など現実的な様々な効果を取り入れた近年の「円盤分裂モデル」では円盤の向きがそろわない可能性も指摘されています。今回のVLA1623Aの結果はこれと合致するものですが、「乱流分裂モデル」を棄却するものでもありません。今後このような観測を増やすことで、連星系形成のモデルを検証し、どのようなモデルが支配的かを解き明かしたいと研究チームは考えています。また、回転軸が不揃いな円盤からは不揃いな惑星系が生まれてくる可能性もあり、なぜ多様な系外惑星系はこれほど多様なのかという、誕生の謎にも迫ることができると期待されます(図5, 6参照)。



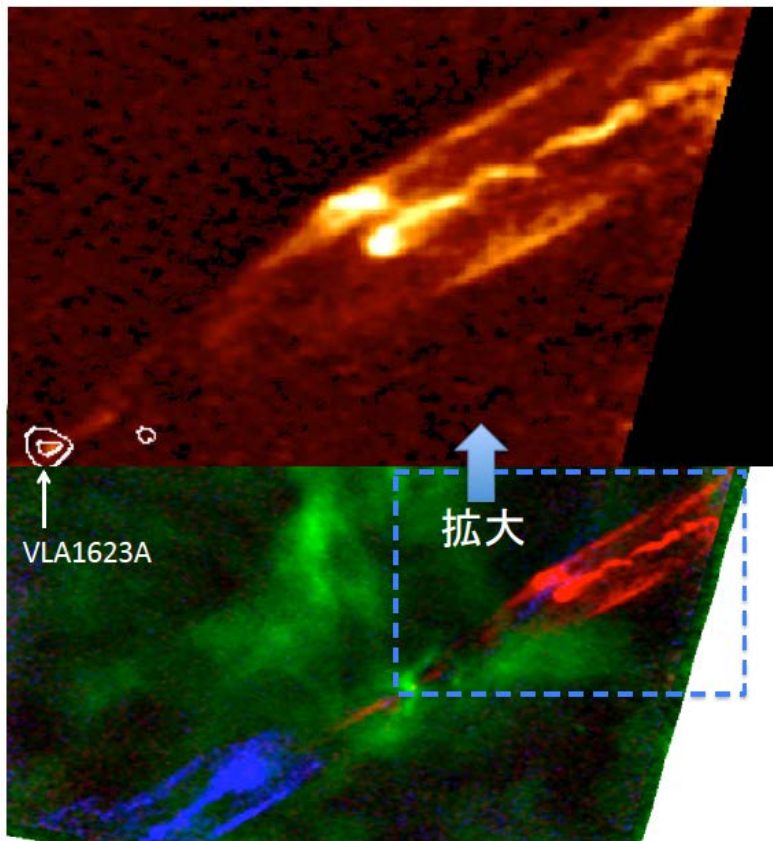


図 4. 高速度分子流で見られるジェット状の成分(遠ざかる成分)の拡大図(図 3 の”分子流 1”の中心部を突き抜けている成分)。このジェットには、波打つ構造(wiggle 構造)が、3 周期分ははっきりと確認される。1 周期の間隔は、時間で約 400 年であり、双子原始星の軌道周期とほぼ一致することがわかった。この波打ち現象は、双子原始星の一つからジェットが放出されていることの証拠である。

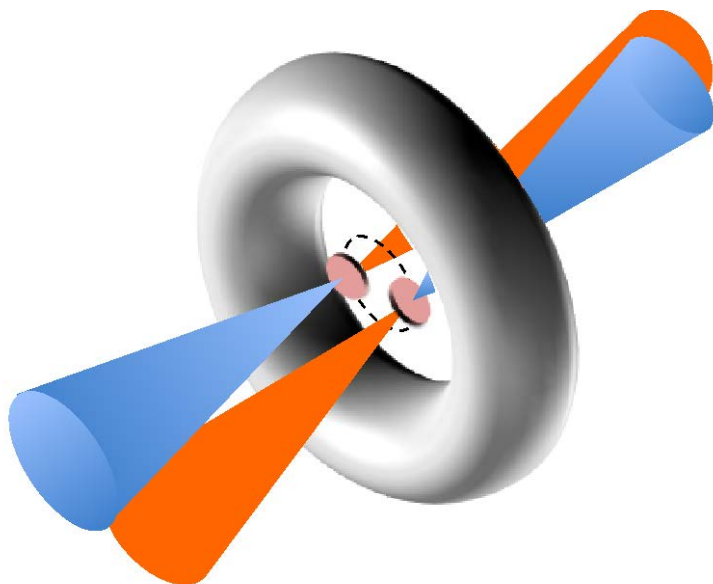


図 5. (左図) 不揃いな分子流(1、2)と、双子原始星、そしてそれを取り巻く共通の塵の円盤(もしくはリング)の相対位置関係。破線で示したものは、双子原始星の軌道であり、軌道面は外側に位置する共通の塵の円盤と同じほぼ同じ面内にあると考えられる。

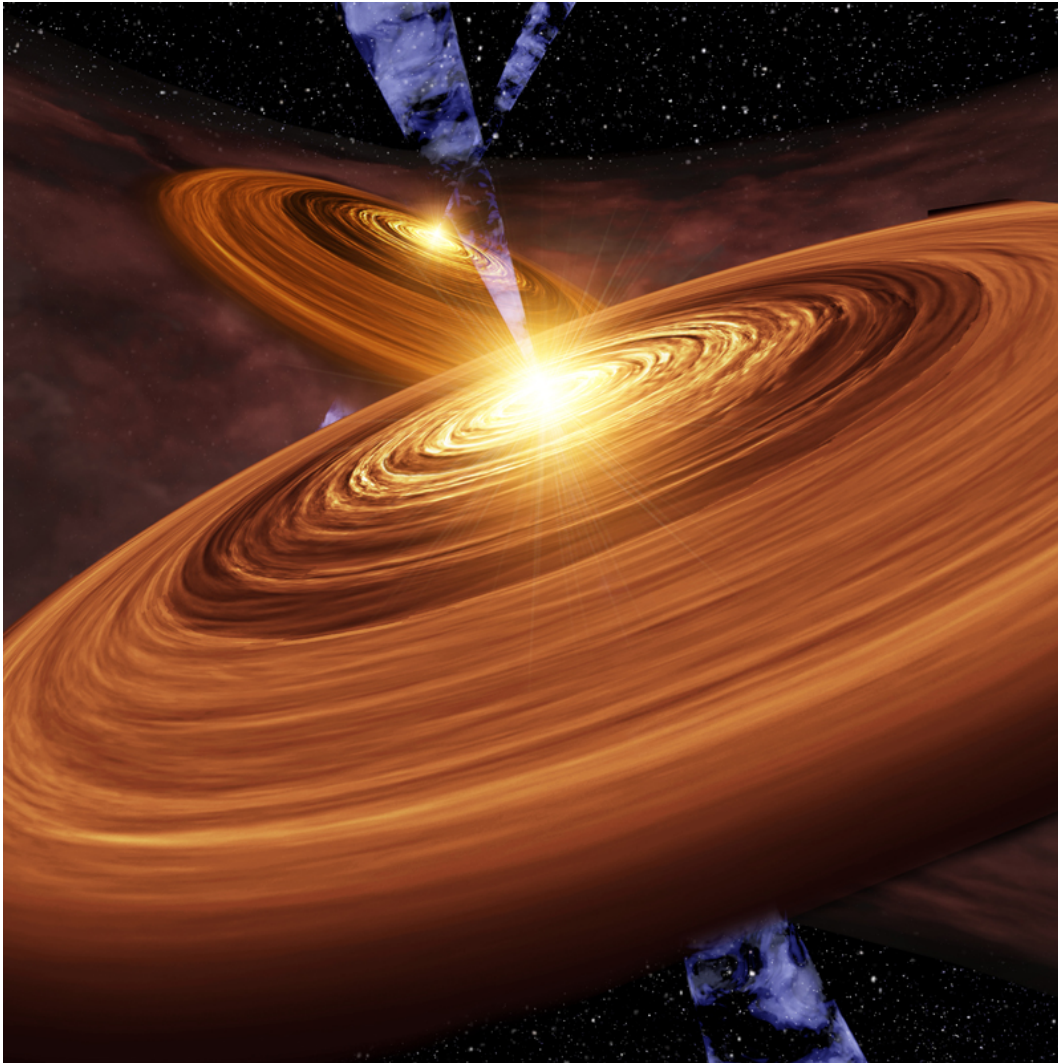


図 6. 双子原始星からの不揃いな分子流と円盤の想像図（クレジット：国立天文台）。  
不揃いな円盤からは、不揃いな惑星系ができるかもしれない。

### 3. その他

発表者：

川邊 良平（国立天文台）連絡先 [ryo.kawab@nao.ac.jp](mailto:ryo.kawab@nao.ac.jp)、0422-34-3900（内線 3120）

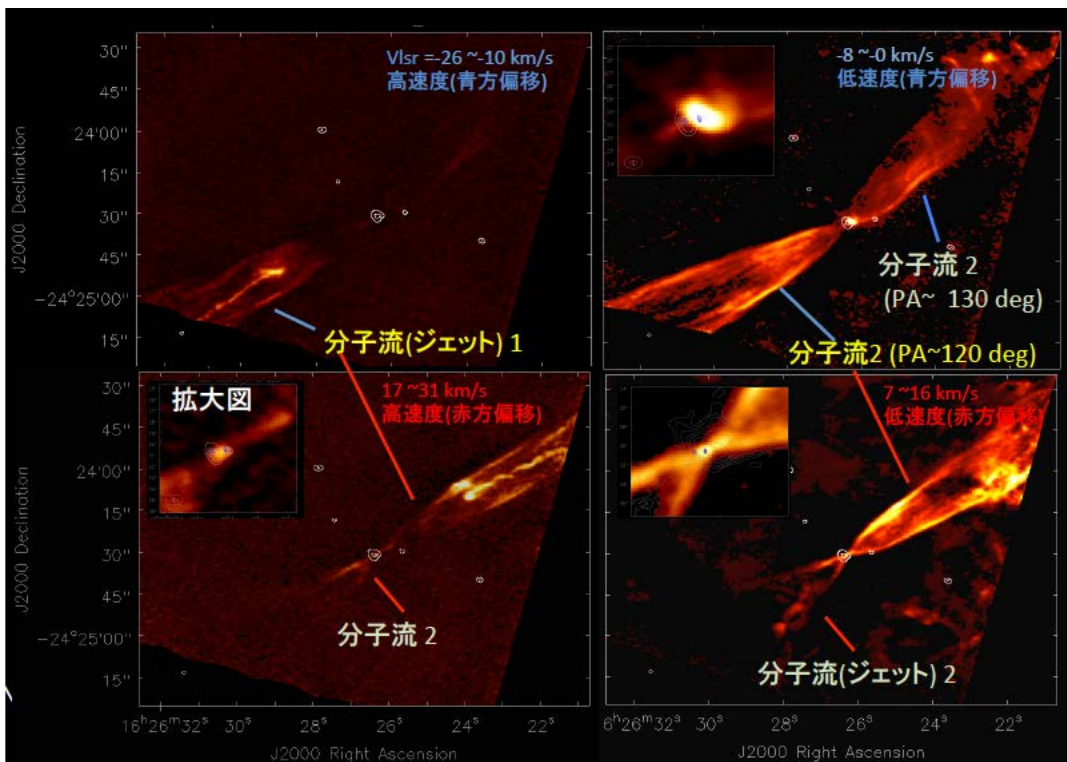
関連する学会講演：

講演番号 P141a（9月13日 9:54 - ）

タイトル：Class-0 原始星連星VLA1623Aからの不整列分子流対

発表者：原千穂美（NEC/東大）、川邊良平、中村文隆（国立天文台）、他（下線は講演者）

補足資料



補足図 1. 各速度成分での、一酸化炭素分子輝線の強度のイメージ(明るいほど強い)。イメージの中心部に、双子原始星VLA1623Aが位置している。また、中心部の拡大図を左上に示した(青方偏移の高速成分を除く)。ジェット状の構造は、双子原始星VLA1623Aから外側に伸びていることがわかる。今回のALMA望遠鏡で得られた、波長1.3 mm 塵連続波源の強度イメージは等高線(白)で示されている。