

リング模様が示す、まだ見ぬ惑星と塵が自ら集まる仕組み

太陽系の外側にあたる遠い場所でも惑星の材料が集まることを示唆

ポイント

- ① 生まれたばかりの星を取り巻くガスと塵の円盤（原始惑星系円盤、※1）には、明るいリングと暗い溝が交互に並ぶ模様がよく見つかる。しかし、この模様が何によって作られるのかはよく分かっていない。溝の数だけ惑星があると考ええると、惑星の形成時間や軌道の安定性に無理が生じることが多い。
- ② おおかみ座の方向約 500 光年にある若い星 V1094 Sco の円盤を調べた。アルマ望遠鏡（※2）の公開データに、日本発の超解像技術 PRIISM（※3）を適用した。その結果、内側の二重の溝は隠れた低質量の惑星で説明できることを明らかにした。一方、外側の規則的なリングは、塵が自らの重力で集まる仕組み（永年重力不安定、※4）で説明できることを示した。
- ③ 太陽と海王星の距離の数倍も遠い、冷たい場所でも惑星の材料が集まり得ることを示す成果である。円盤の模様の起源と惑星の誕生を結びつける基準天体として、今後の観測や理論研究の進展が期待される。

概要

太陽系のような惑星系は、生まれたばかりの星を取り巻くガスと塵の円盤（原始惑星系円盤）の中で誕生します。アルマ望遠鏡の観測により、こうした円盤には明るいリングと暗い溝が交互に並ぶ模様が数多く見つかってきました。しかし、この模様が何によって作られるのかは分かっていません。溝の一つひとつを惑星が掘ったと考ええると、惑星ができるまでの時間や軌道の安定性の面で無理が生じることが多いのです。そのため、惑星に頼らない別の仕組みが求められていました。

本研究では、おおかみ座の方向約 500 光年にある若い星 V1094 Sco の円盤に着目しました。そして、リングの起源が場所によって異なることを示しました。内側にある二重の溝は、地球の数十倍の質量を持つ惑星が一つあると考ええると自然に説明できます。一方、外側に規則正しく並ぶリングは、塵が自らの重力で集まる「永年重力不安定」という仕組みで説明できることを示しました。

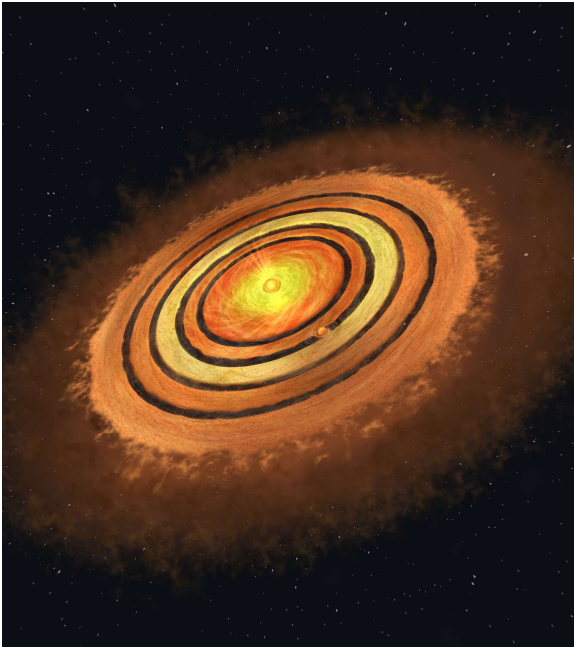
九州大学大学院理学研究院の山口正行特任助教（兼：国立天文台 特任助教）と町田正博教授は、国内外の研究者と共同で、この円盤を詳しく調べました。アルマ望遠鏡の公開データを一つに統合し、日本で開発された超解像技術 PRIISM を適用したのです。その結果、中心の星から 100～230 天文単位（※5）の範囲に四重のリングと溝を、これまでで最も鮮明に分解しました。この円盤は、近くの星形成領域で調べられているどの円盤よりも大きな円盤です。塵の円盤は太陽と海王星の距離の約 13 倍、ガスの円盤は約 25 倍にまで広がっています。さらに、円盤の表面をとらえた近赤外線の画像と比べました。すると、内側の二重の溝は、表面の溝と同じ位置にありました。一方、外側のリングには、表面に対応する構造がありませんでした。この違いが、内側と外側で異なる仕組みが働いていることを示す決め手となりました。

塵が自らの重力で集まる仕組みは、日本の研究者を中心に理論的に予言されてきました。しかし、実際の円盤でその条件が満たされるかを観測から定量的に調べた例はほとんどありませんでした。本研究は、太陽系の外側にあたる遠く冷たい場所でも、塵が自発的に集まって惑星の材料を準備し得ることを示しています。今後、この円盤に隠れているとみられる惑星の直接観測や、他の円盤への同様の解析が進むでしょう。それにより、惑星がどこでどのように生まれるのかの理解が深まることが期待されます。

本研究成果は、米国の天文学誌 The Astrophysical Journal に 2026 年 7 月 29 日（水）（現地時間）に掲載されました。

研究者からひとこと：

円盤に刻まれたリングは、すべて惑星が作ったものなのか。この素朴な問いに答えるため、公開データを日本発の超解像技術で徹底的に磨き上げました。その結果、リングの作り手は一つではなく、場所によって異なる可能性が見えてきました。とくに外側のリングを担うと考えられる、塵が自らの重力で集まる仕組みは、日本の理論研究が予言してきたものです。観測から得た温度や乱流の情報をもとに、実在の円盤でその条件が満たされ得ることを示せたのは、理論と観測をつなぐ一歩だと感じています。次は、この円盤に隠れているはずの惑星を直接とらえることが目標です。（山口正行）



V1094 Sco の円盤の想像図

（イラスト：

大学院理学府 地球惑星科学専攻 博士課程 2 年
Yurika Nakamura）

【研究の背景と経緯】

太陽系のような惑星系は、生まれたばかりの星を取り巻くガスと塵の円盤の中で作られます。この円盤は「原始惑星系円盤」と呼ばれ、惑星誕生の現場です。2015 年ごろにアルマ望遠鏡が本格的に稼働して以来、こうした円盤の観測が急速に進みました。その結果、明るいリングと暗い溝が交互に並ぶ模様は、ごく普通に見られることが分かってきました。そのため、いまや「模様を見つけた」というだけでは新しい発見とはいえません。本当に問うべきは、その模様が何によって作られたのか、という点です。最も広く受け入れられている考えは、円盤の中で生まれた惑星が周囲のガスと塵をかき分けて溝を掘る、というものです。しかし、中心の星から遠い場所に多くのリングが規則的に並ぶ円盤では、溝ごとに惑星を一つずつ置く解釈は行き詰まります。惑星ができるまでの時間や、軌道の安定性の面で無理が生じるためです。塵が自らの重力で集まってリングを作る「永年重力不安定」など、惑星に頼らない仕組みも理論的に提案されてきました。しかし、実際の円盤でその条件が満たされるかを、観測から定量的に検証した例はほとんどありませんでした。

V1094 Sco は、おおかみ座の方向約 500 光年にある、生まれて約 200 万年の若い星です。この星は、日本の ASTE 望遠鏡による観測で、際立って明るく冷たい円盤を持つことが見いだされました。その後のアルマ望遠鏡の観測で、複数のリングを持つ巨大な円盤であることも知られていました。本研究グループは、この円盤を「模様の起源を切り分けるための基準天体」と位置づけました。そして、アルマ望遠鏡の公開データを統合して詳しく調べました。

【研究の内容と成果】

本研究では、複数年にわたって取得されたアルマ望遠鏡の公開データを一つに統合しました。そこに、日本で開発された超解像技術 PRIISM を適用しました。これにより、従来の手法の約 2 倍の解像度を達成しました。その結果、中心の星から 100~230 天文単位の範囲に、四重のリングと溝をこれまでで最も鮮明に分解しました（図 2）。塵の円盤は、半径約 380 天文単位（太陽と海王星の距離の約 13 倍）にまで広がっていました。これは、近くの星形成領域で調べられているどの円盤よりも大きな値です。一酸化炭素分子の電波でとらえたガスの円盤はさらに大きく、半径約 760 天文単位（同約 25 倍）にまで達していました。ガスは円盤全体で整然と回転しており、母体の雲からガスが降り積もる痕跡は見られませんでした。この回転運動から、中心の星の質量を太陽の約 0.88 倍と精密に決めることができました。

円盤の明るさを中心からの距離に沿って調べると、内側（約 100 天文単位）には二つの溝が近接して並ぶ特徴的な構造がありました。その外側には、規則的なリングが続いていました。内側の二つの溝は、明るさの分布がアルファベットの「W」の形を描くことから、本研究では「W 字構造」と呼びます。また、各リングの幅から、円盤の中の乱流が非常に弱いことも分かりました。

次に、円盤の表面を映す VLT/SPHERE 望遠鏡の近赤外線画像と比較しました。すると、内側の W 字構造の位置では、円盤の表面にも溝があることが分かりました。円盤の中心面と表面で溝の位置が一致する例は、TW Hya や HD 169142 と呼ばれる円盤など、ごく少数しか知られていません。一方、外側のリングの位置には、表面に対応する構造がありませんでした。

これらの手がかりを、惑星と円盤の相互作用に関する理論と一つずつ突き合わせました。その結果、観測された溝の幅と深さの組み合わせは、「惑星一つが溝一つを掘る」という描像では説明できないことが分かりました。一方、内側の W 字構造は、地球の約 55 倍の質量を持つ惑星が一つあると考えると、乱流の弱い円盤で複数の溝が同時に作られる理論と整合します。外側の規則的なリングは、観測から求めた温度や乱流の弱さのもとで、塵が自らの重力で集まる永年重力不安定が働き得る条件を満たしていました。こうして、内側は隠れた惑星、外側は塵の自己重力という、場所ごとに異なる起源にたどり着きました。この組み合わせにより、この円盤の多重リングを無理なく説明できることを示しました（図 1）。

【今後の展開】

本研究が存在を示唆した惑星は、まだ直接には見つかっていません。すばる望遠鏡などによる高コントラスト観測でこの惑星を直接とらえることが、本研究の描像を確かめる次の一歩となります。また、塵が自らの重力で集まる仕組みは、リングを作るだけでなく、そこに集まった濃い塵が次の惑星の材料になる可能性を持っています。本研究で観測から求めたリングの位置や乱流の強さは、この仕組みを数値シミュレーションで検証する際の重要な基準となります。今後、同じ解析を多くの円盤に広げることによって、惑星がどこで、どのように生まれるのかという根源的な問いの理解が深まることが期待されます。

【参考図】

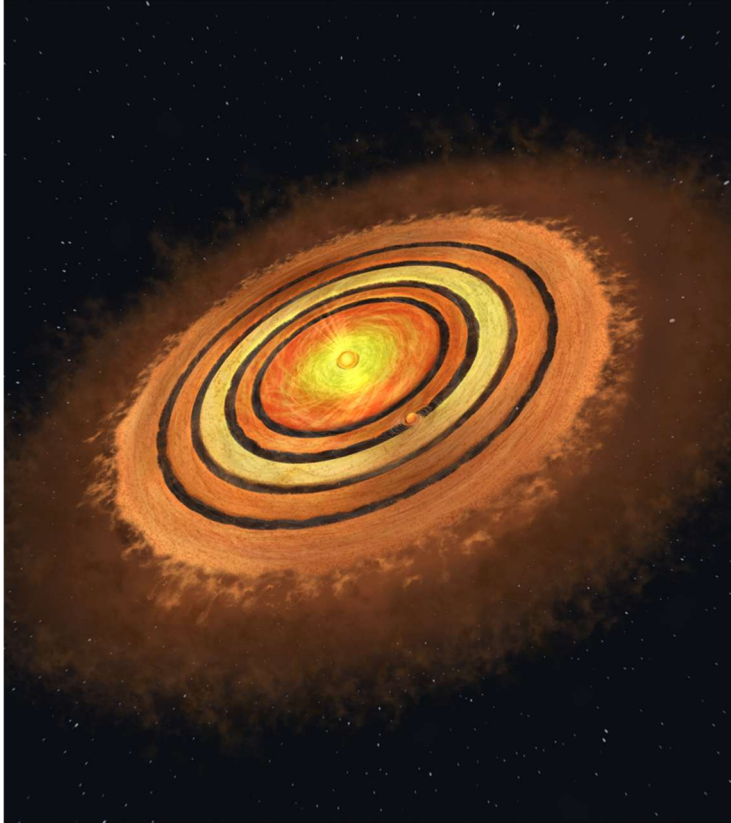


図 1 V1094 Sco の円盤の想像図（イラスト：Yurika Nakamura）

（説明）中心の星の周りに幾重ものリングと溝が刻まれ、内側の二重の溝の間には、まだ見つからない低質量の惑星が描かれている。本研究は、内側の二重の溝は隠れた惑星が、外側の規則的なリングは塵自身の重力が作ったと考え、全体を無理なく説明できることを示した。円盤を包む淡い広がりとは、塵の円盤の外側まで広がるガスの円盤を表す。

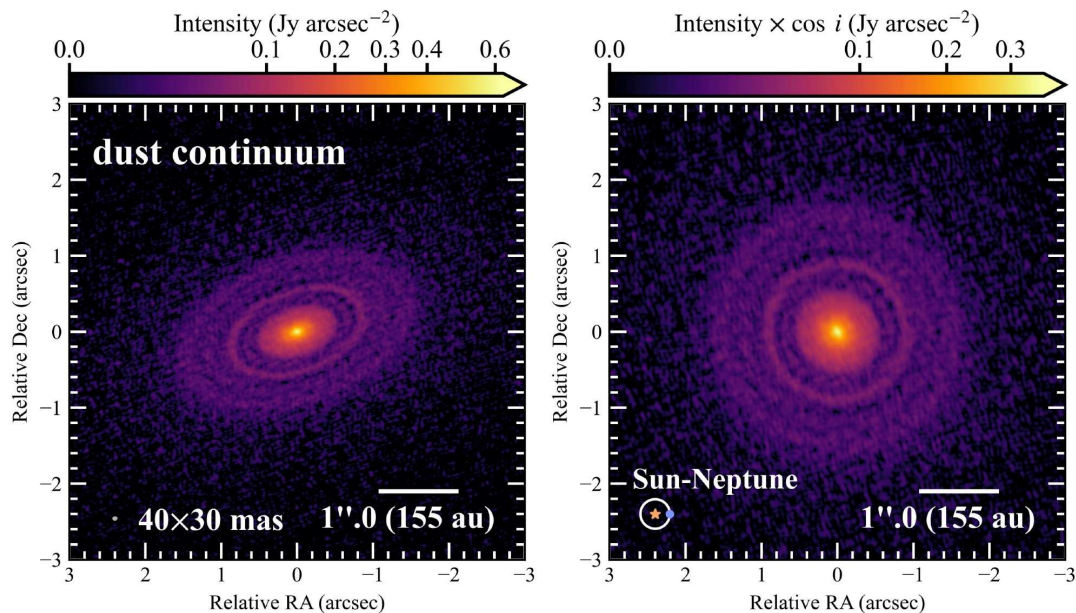


図 2 アルマ望遠鏡がとらえた V1094 Sco の塵の円盤

（説明）波長 1.3 ミリメートルの電波で見た塵の分布。左は天球面上の見え方、右は円盤を真上から見た形に補正したもの。日本で開発された超解像技術 PRIISM により、幾重ものリングと溝が鮮明に分解されている。右の画像の左下にある印は太陽と海王星の軌道の大きさ、白い線は 1 秒角（約 155 天文単位）を表す。

【用語解説】

(※1) 原始惑星系円盤

・・・生まれたばかりの星を取り巻く、ガスと塵からなる円盤。この中で塵が集まって惑星が作られる、惑星誕生の現場です。

(※2) アルマ望遠鏡

・・・南米チリの標高約 5000 メートルの高原に建設された、66 台のアンテナからなる巨大な電波望遠鏡。日本を含む国際協力で運用され、日本では国立天文台が担当しています。

(※3) PRIISM

・・・国立天文台と統計数理研究所で開発された、「スパースモデリング」という数理手法に基づく電波画像化ソフトウェア。従来の手法より細かい構造を描き出すことができます。

(※4) 永年重力不安定

・・・円盤の中の塵が、ガスとの摩擦を受けながら、自らの重力でゆっくりと集まっていく現象。乱流の弱い冷たい円盤で働き、塵をリング状に集めると理論的に予言されています。

(※5) 天文単位

・・・太陽と地球の平均距離（約 1 億 5000 万キロメートル）を 1 とする長さの単位。海王星は太陽から約 30 天文単位の距離にあります。

【謝辞】

本研究は、国立天文台 ALMA 共同科学研究事業（2022-22B）および JSPS 科研費（JP26K17220, JP26K00741, JP25K07369, JP25KJ1947）の助成を受けたものです。

【論文情報】

掲載誌：The Astrophysical Journal

タイトル：A Hybrid Origin for the Multiple Ring-gap Structures in the Large Protoplanetary Disk V1094 Sco: A Low-mass Planet and Secular Gravitational Instability

著者名：Masayuki Yamaguchi, Masahiro N. Machida, Ryosuke T. Tominaga, Jinshi Sai, Takayuki Muto, Michihiro Takami, Haoyu Baobab Liu, Ayumu Shoshi, Takashi Tsukagoshi, and Shu Ishibashi
DOI：10.3847/1538-4357/ae819b

【お問合せ先】

<研究に関すること>

九州大学 大学院理学院 地球惑星科学部門 特任助教 山口 正行（ヤマグチ マサユキ）
（兼 国立天文台 特任助教）

Mail：yamaguchi.masayuki.376@m.kyushu-u.ac.jp

<報道に関すること>

九州大学 広報課

TEL：092-802-2130 FAX：092-802-2139

Mail：koho@jimu.kyushu-u.ac.jp