

カリストの部分分化が明らかにする木星の衛星の形成過程

芝池 諭人 (鹿児島大学)

惑星や衛星がどのように形成されるかという問いは、天文学・惑星科学の根本的な課題の一つです。従来、「原始惑星系円盤」と呼ばれるガス円盤の中で、 $\sim 0.1\text{-}1\ \mu\text{m}$ サイズのダスト（塵）が合体成長を繰り返して、 $\sim 1\text{-}100\text{km}$ サイズの「微惑星」へと成長したのち、この微惑星が集積することで原始惑星が形成されると考えられてきました。しかし、ダストは大きく成長するにつれて円盤によるガス抵抗を強く受けるようになり、「ペブル」と呼ばれる $\sim 1\text{cm}\text{-}1\text{m}$ サイズになると、角運動量を失って中心惑星へと螺旋状に円盤内を落下してしまう問題が、指摘されていました。そこで提唱されたのが、「ペブル集積」シナリオです。「微惑星集積」シナリオと「ペブル集積」シナリオ、どちらが固体物質の主要な集積メカニズムであるのか長年議論されてきましたが、いまだに決着がついていません。

一方、木星の周囲にある四つの巨大な衛星、イオ、エウロパ、ガニメデ、カリストの形成過程について

も、同じ問題が存在します。「微衛星」（惑星形成における微惑星に相当）が集積して巨大衛星が形成されたのか、はたまた「ペブル」が集積して形成されたのか。近年議論の対象となっています。

私は、この惑星・衛星形成の未解決問題の新たな手がかりを、カリストの特異な内部構造に見出しました。ガリレオ探査機による重力場観測から、カリスト内部が部分的にしか分化していないと推定されています。そして、衛星の分化度は固体物質集積時の加熱の程度に強く依存します。そこで、「微衛星集積」と「ペブル集積」、どちらがカリスト内部を低温に保てるのか検証することで、集積メカニズムの制約に成功しました。

本研究では、微衛星集積とペブル集積の両シナリオにおける、カリストの内部の分化状態を数値計算しました。具体的には、固体物質集積時の衛星表面への物体衝突による加熱と放射冷却のエネルギーバランス、および短寿命放射性核種 ^{26}Al の放射壊変による加熱を考慮し、カリストの内部温度進化を計算し、氷の溶融温度と比較しました。

まず、微衛星による衝突は、比較的大きな質量と高い衝突速度を持ち、衝突エネルギーの一部を衛星

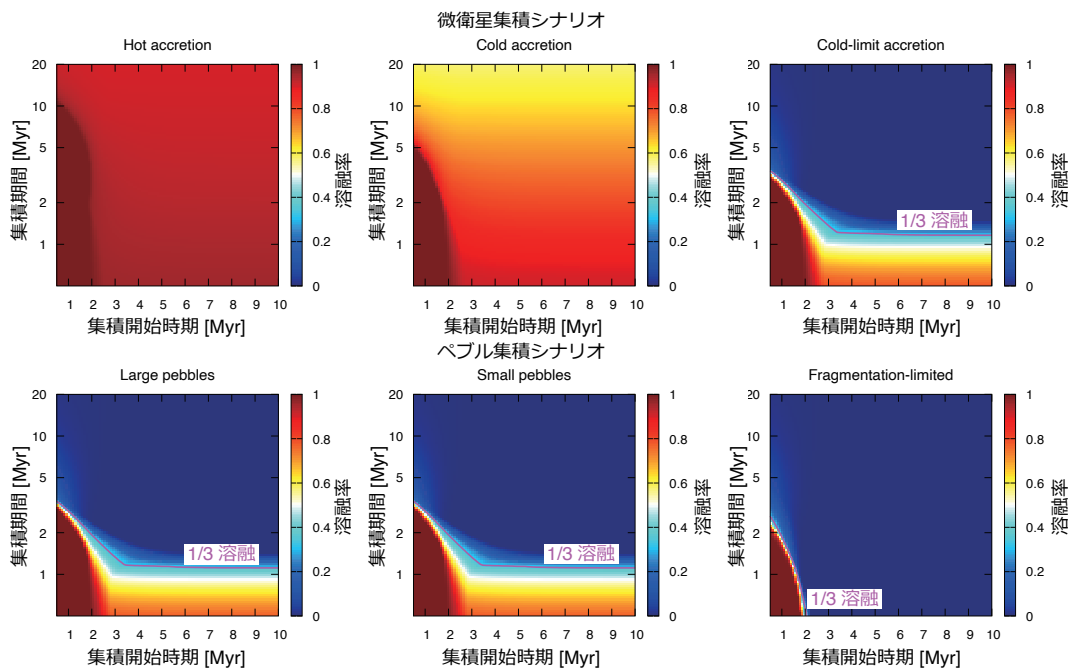


図1：微衛星集積シナリオとペブル集積シナリオにおける、カリスト内部の溶融率。ガリレオ探査機による観測から質量の1/3程度が溶融していると推定されているが、この溶融率を達成可能なのは、(現実的でない Cold-limit accretion を除けば)ペブル集積シナリオのみである。左下の濃い赤の領域は、 ^{26}Al の放射壊変加熱による溶融を示している。

表面下にまで伝えます。そのため、集積時に発生する加熱が放射冷却により十分に冷えず、広いパラメータ領域で内部が著しく分化してしまうことが示されました。実際、微衛星集積モデルでは、現実的でない極端な仮定（衝突エネルギーが全く衛星内部に伝わらない）を置かない限り、現在のカリストの「質量の約 1/3 が分化した状態」を再現できませんでした（図 1）。

一方、ペブル集積モデルでは、衝突エネルギーが衛星表面で散逸して効率的に放射冷却されるため、衛星が加熱されにくいことが分かりました。さらに、ペブルが非常に小さい場合、ガス円盤による空気抵抗がペブルの衝突速度を減速させ、さらに衛星内部の温度上昇を抑えられました。このため、ペブル集積シナリオでは、集積期間が 1.2 Myr（百万年）以上、かつ集積開始時期が材料の固体物質の生成後からおよそ 2 Myr 以降であれば、カリストの内部が部分的な分化状態を維持できることが示されました（図 1）。

つまり、カリストが部分的に分化しているという観測結果は、ペブル集積シナリオによってしか説明できないことが明らかとなりました。

今回の研究により、カリストの内部が部分的に分化している理由として、ペブル集積シナリオが有力であることが示されました。これは、衛星形成のみならず、惑星形成全体におけるペブル集積の重要性を示唆する結果です。もし今後の宇宙探査、特に 2023 年に打ち上げられ、2031 年からカリストでの重力場観測を開始する JUpiter ICy moons Explorer (JUICE) 計画 (ESA 主導・日本も参画) によって、カリストの内部構造がより詳細に解明され、部分分化状態が確認できれば、ペブル集積の初めての観測的証拠となり得ます（図 2）。

本研究は、カリストの形成に関する重要な仮説を幅広い条件で検証したのみならず、ペブル集積理論の実証に向けた道筋を示した点に大きな意義があります。JUICE をはじめとする今後の探査で得られるデータとの照合を通じて、惑星科学の根本的な疑問に迫る研究の進展が期待されます。

この文章は、2025 年 7 月の鹿児島大学によるプレスリリースを改変したものです。研究の詳細は、論文 Y. Shibaike, 2025, ApJL, 988, L32 をご覧ください。

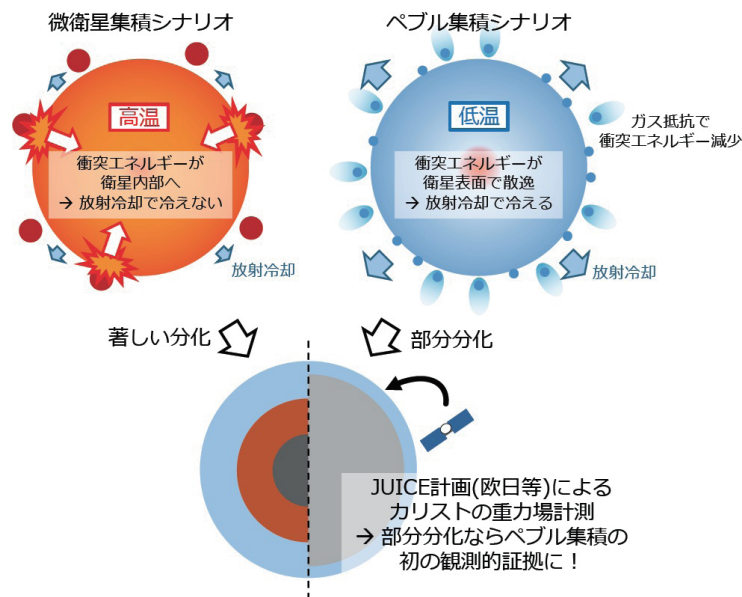


図 2: 微衛星集積シナリオとペブル集積シナリオにおけるカリスト内部の概念図。微衛星集積シナリオでは、衛星内部に衝突エネルギーが伝わり衛星が高温になるが、ペブル集積シナリオでは、衝突エネルギーが衛星表面で散逸し、放射冷却により衛星内部が低温に保たれる。また、ペブルはガス抵抗を受けやすく、衝突エネルギーが減少する。結果として、微衛星集積では内部が著しく分化し、ペブル集積では部分的にしか分化しない。もし JUICE 計画によるカリストの重力場観測により部分分化が確認されれば、ペブル集積の初の観測的証拠になりうる。

天の川円盤の星の年齢分布に刻まれる“棒状構造形成期”の痕跡

馬場 淳一（鹿児島大学 / 国立天文台）

天の川銀河は、中心部に「棒状構造（バー）」をもつ棒渦巻銀河です。バーは、単なる見た目の特徴ではありません。銀河円盤の中のガスや星の流れを大きく変え、長い時間をかけて銀河の進化に影響します。本研究では、天の川銀河を模した高分解能シミュレーションを用いて、バーが形成される短い“過渡期”に何が起こるのかを詳しく調べました。そして、観測で注目されている「星の年齢分布に現れるピーク（ある年齢の星が多い）」が、どのように生まれ得るかを明らかにしました。

観測で見える「年齢分布のピーク」は、星形成史そのものなのか？

近年、位置天文観測衛星 Gaia などにより、銀河円盤の星の年齢分布が高い精度で求められるようになってきました。その結果、「ある時代に星が増えた」ように見えるピーク構造が報告されています。単純には、「その時代に星形成率が上がった（星がたくさん生まれた）」と解釈したくなります。

しかし、銀河円盤の星は生まれた場所にずっと留まるとは限りません。渦状腕やバーが作る重力の作用によって、星は時間とともに半径方向へ移動することがあります（軌道移動）。そのため、「今その場所にいる星の年齢分布」が「その場所での星形成史」をそのまま表すとは限りません。では、観測で示唆されている年齢分布のピークは、天の川銀河の「星形成の変動史」を本当に語っているのでしょうか？

この疑問に答えるため、本研究では、自己重力、ガスの運動、星形成とフィードバックに加え、星が作る元素の生成と混合も考慮した、天の川銀河進化の数値シミュレーションを行いました。計算は国立

天文台のスーパーコンピュータ「アテルイ III」を用いて実行し、シミュレーションで得られる「星形成率の時間変化」と、「ある時点で観測される年齢分布」がどのようにつながるかを比較しました。

バー形成期：内側円盤で星形成が一時的に高まり、その後急減する

バーが形成され始めると、ガスはバーの重力の影響で中心方向へ流れ込みやすくなります。その結果、内側円盤（数 kpc 程度の領域）ではガス分布が大きく再編されます。シミュレーションでは、バー形成期に内側の星形成率が一時的に高まりました。しかしバーが成熟すると、内側の星形成率は急激に低下します。これは、バーがガスを中心へ集める一方で、バー領域のガスを減らし、星が生まれにくい状態を作るためです。近年、この効果は bar quenching（バー・クエンチング）と呼ばれています。ただし、バーが銀河全体の星形成を一様に弱めるわけではありません。星形成の活発な領域は半径方向に“分化”し、内側で弱まる一方で、外側円盤では星形成が続きます。

外側円盤の年齢分布ピークは「その場の星形成」だけでは作れない

次に、ある時刻に外側円盤に存在する星の年齢分布を調べました。すると、内側だけでなく太陽近傍から外側にかけても、バー形成期に対応する年齢で星数が増えるピークが現れました。しかし、外側円盤で「その場で生まれた星」だけに注目して星形成率を見ると、年齢分布のピークほど大きな増加は必ずしも見られません。つまり外側で見えるピークは、「外側で星が大量に生まれた」結果というより、「別の場所で生まれた星が後から外側へ運ばれてきた」と考える方が自然です。

このような星の半径方向移動（軌道移動）は特別な例ではなく、渦状腕やバーの影響によって多くの星で起こり得る現象だと考えられています。実際、私たちの太陽系も約 46 億年前に現在より内側の円



盤で生まれ、その後の長い時間をかけて現在の位置まで移動してきた可能性が指摘されています（馬場淳一ほか、2024年12月4日プレスリリース）。

バー形成期は“星の大移動”が最も強い時期

この解釈を裏づけるのが、「星がどこで生まれたか（誕生半径）」の解析です。外側円盤に現在いる星を年齢ごとに誕生半径で分類すると、バー形成期より前に生まれた星の多くが、より内側（数kpc付近）で生まれ、その後外側へ移動してきたことが分かりました。

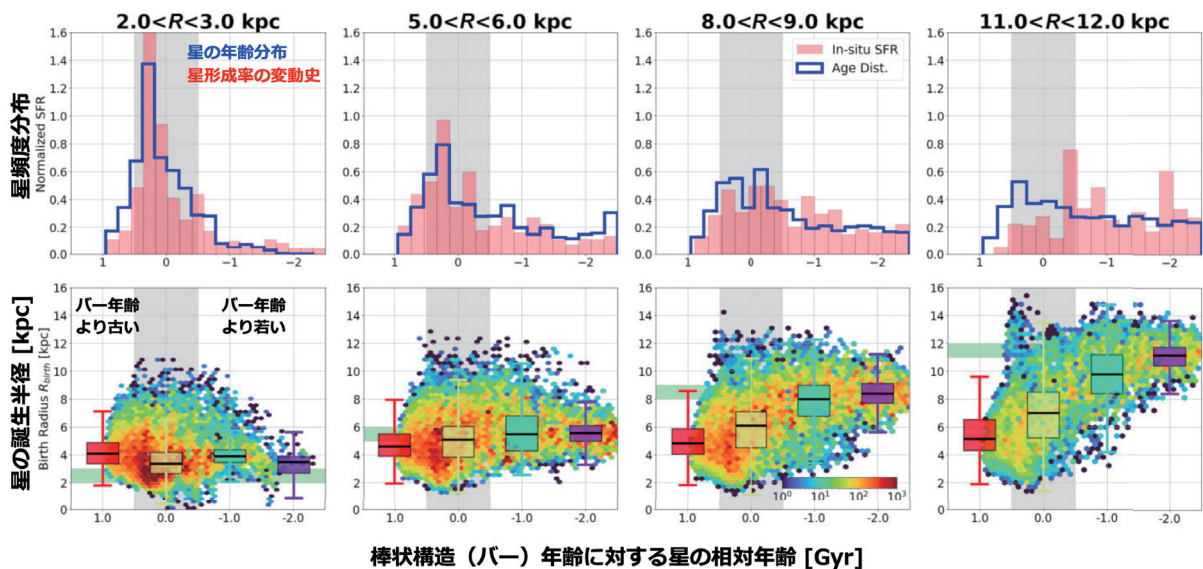
バー形成期は、円盤の非対称な重力構造が急激に強まり、星の軌道（角運動量）が変化しやすい時期です。そのため、半径方向の再分配が特に強く起こります。結果として、「内側で生まれた星が外側へ“供給”され、外側円盤の年齢分布にピークが作られる」のです。

天の川銀河考古学：年齢分布ピークは「バー形成の化石記録」かもしれない

本研究の結果は、天の川でも過去のバー形成により、太陽近傍や外側円盤の年齢分布に、その時代に対応するピークが現れても不思議ではないことを示唆しています。さらに、そのピークは必ずしも「外側で星形成が増えた証拠」ではなく、「バー形成期に起きた強い軌道移動が残した“化石記録”」である可能性があるということです。

掲載誌情報

J. Baba: "Influence of Bar Formation on Star Formation Segregation and Stellar Migration: Implications for Variations in the Age Distribution of Milky Way Disk Stars", 2025, PASJ, 77, 916



図：（上段）銀河系円盤の各半径における星の年齢分布（青）と星形成史（赤）の比較。（下段）対応する半径における各年齢の星の誕生半径の分布。外側円盤では、バー形成時期に内側円盤で誕生した星がたくさん軌道移動してきている。

星間ガスの視線速度から天の川の質量を測ると、中心を“重く”見積もってしまう

馬場 淳一（鹿児島大学 / 国立天文台）

銀河の「回転の速さ（回転曲線）」は、どこにどれだけ質量があるかを調べるための基本情報です。天の川銀河でも、星間ガスの視線速度を使って、回転曲線を推定してきました。その代表が「終端速度法」です。これは簡単に言うと、「ある方向を見たときに観測される“最大の速度”は、銀河を円運動しているガスの速さを反映するはずだ」という考え方にもとづきます。

ところが、天の川の中心付近（銀河中心から数 kpc 以内）では、星間ガスから推定した回転曲線が中心に向かって非常に急に立ち上がり、「中心に強い質量集中がある」と解釈されやすい一方で、恒星の運動を使って重力を推定する方法（恒星力学モデリング）とは合わない、という問題が知られてきました。そこで本研究は、この食い違いの原因を天の川銀河の数値シミュレーションで検証しました。ポ

イントは、天の川が「棒状構造（バー）」を持ち、中心付近のガスが単純な円運動をしていないことです。

天の川銀河を再現した“仮想観測

本研究ではまず、星の運動学の観測にもとづき、恒星系動力学モデリングによって構築された天の川銀河棒状構造モデルを採用しました。これは、観測された星の運動を再現できるように、銀河の重力場（バー、円盤、暗黒物質ハローに加え、中心の主要成分まで）を推定されたモデルです。

この重力場の中で星間ガスの流体シミュレーションを国立天文台のスーパーコンピュータ「アテルイ III」を用いて実行し、次に太陽の位置に相当する場所に「仮想観測者」を置いて、観測と同じ手順で銀経 - 視線速度図 (l-v 図) を作成しました (図 1)。さらに、各方向の視線速度分布をガウス混合モデルでフィットし、恣意的なしきい値に頼らずに“最大速度の輪郭(終端速度)”を抽出しました。

中心付近の“急上昇”は、バーの影響だけで起きる

星間ガスの終端速度法で得られる回転曲線の「急な立ち上がり」は、中心に特別な質量成分を追加し

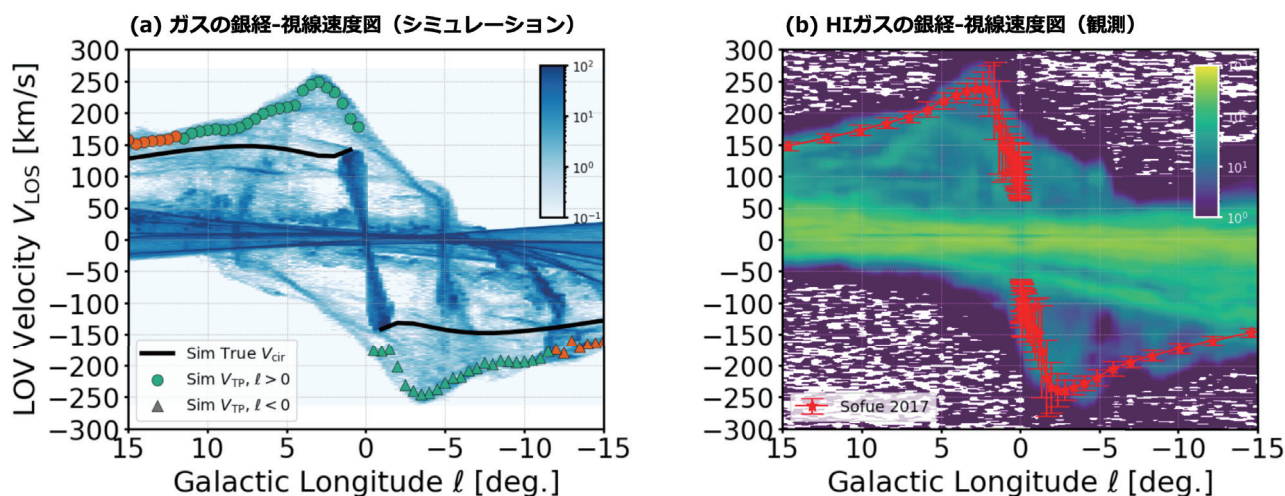
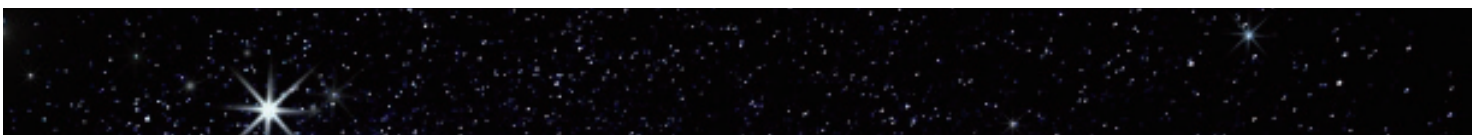


図 1：ガスの銀経 - 視線速度。(左) 本研究のシミュレーション結果。丸・三角の点は終端速度を示す。黒線は真の円運動速度の視線速度成分。(右) 中性水素ガス HI の観測データ。エラーバー付きのデータ点は観測の終端速度 (Sofue 2017)。



なくても、バーが作る非円運動だけで自然に再現できることが分かりました (図 2 左)。

さらに重要なのは、終端速度法が中心の速度 (ひいては質量) を系統的に過大評価しうる点です。銀河中心から約 0.4 kpc 付近で、終端速度法から得られる“擬似的”な円運動速度は、真の円運動速度より 2 倍ほど過大評価されるのです。この速度をもとに「中心までに含まれる質量」を球対称近似で見積もると、中心付近の包含質量は最大で約 4 倍も大きく見積もることになります (図 2 右)。

なぜ起きるのか：ガスが“円”ではなく“細長い流れ”になるから

終端速度法は、「ガスは円形に回っている」という仮定が暗黙に入っています。しかしバーがあると、ガスはバーに沿って引き伸ばされた流れ (細長い軌道に沿った流れ) を作りやすく、場所によっては、観測者から見た視線方向に速い成分が強く投影されます。

私たちの住む太陽系は、天の川銀河のバーの長軸に近い方向に位置しています。そのため、バーに沿った星間ガスの速い運動が視線方向に乗りやすく、終

端速度が高くなって過大評価につながるのです。

バルジや暗黒物質の質量分布推定に注意

中心付近の回転曲線の形は、「バルジの質量」や「暗黒物質が中心にどれだけ集まっているか」を議論する際の重要な手がかりとして用いられます。近年は、超軽量暗黒物質 (Ultra-Light Dark Matter; ULDM) が作るとされる「中心コア」の存在を、中心 100 ~ 500 pc の回転曲線に見られる“急な特徴”から制限しようとする研究も進んでいます。しかし本研究は、星間ガスの視線速度から回転曲線を推定する場合、バーに伴う非円運動を無視すると大きな系統誤差が入り得ることを示しました。中心部の質量分布 (バルジや暗黒物質) を議論する際には、バーの影響を考慮した解析が重要なのです。

掲載誌情報

J. Baba: "Bar-driven Streaming Motions Mimic a Massive Bulge in the Inner Milky Way", 2025, ApJ, 989, 121

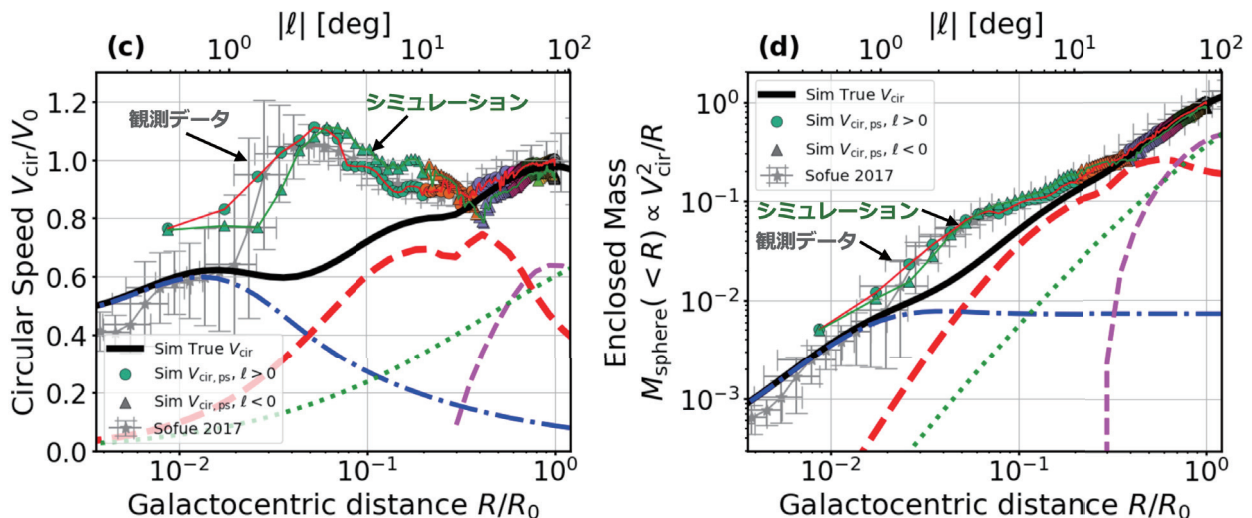


図 2：(左) 終端速度法で求めた“擬似”円運動の回転曲線。シミュレーション結果は観測に非常によく合うが、真の円運動速度 (黒線) より 2 倍程度速い。(右) 球対称近似に基づく内包質量。終端速度法による擬似円運動は真の内包質量 (黒線) を 4 倍程度過大評価する。

“惑星のゆりかご”を10万年追跡：原始惑星系円盤の長期進化を再現するシミュレーションコードを開発

小林 雄大（鹿児島大学 博士課程）、
高石 大輔，塚本 裕介（鹿児島大学）

惑星は、若い星の周りにできるガスと塵（ダスト）の円盤（原始惑星系円盤）の中で育ちます。この原始惑星系円盤は数10万年～数100万年という長い時間をかけて形を変えますが、その時間をまるごと計算機で追いかけるのは、従来とても難しい課題でした。私たちは、原始惑星系円盤を形づくる重要な要素である磁場の効果を取り入れながら、少ない計算量で長期間の進化を追えるシミュレーションコードを開発し、星の赤ちゃんである原始星が生まれた直後から10万年後までの円盤の成長を再現しました。

近年、ALMA望遠鏡などの観測より、星が生まれて間もない段階（Class 0/Iと呼ばれる時期）の円盤が詳しく見えるようになってきました。このClass 0/I段階の円盤は比較的滑らかな構造で、成長していくと（より後期のClass II段階では）リングやギャップのような構造が現れることも知られています。こうした観測結果に対して理論側は、「円盤がどのように成長し、どんな条件で形が変わるのか」を長い時間にわたって説明する必要があります。

円盤の進化には、ガスの流れ、重力、そして磁場が関係します。特に磁場は回転しているガスから“回転の勢い（角運動量）”を外部へ運ぶ効果があるため、円盤の大きさや質量に影響します。ところが、こうした現象を忠実に扱う3次元シミュレーションは計算量が多く、最新のスーパーコンピュータをもってしても、約1万年までしか円盤の進化を追えない、という制約がありました。そのため、

観測が見ている時間スケール（数10万年～）との間に10倍以上の大きなギャップが残っていました。

私たちは、円盤の本質的な振る舞いを捉えるために、円盤を“薄い円盤”として扱う1次元モデルを用いたシミュレーションコードを開発しました。3次元シミュレーションのような空間構造は表現できませんが、その分、計算量が少なく、長い進化過程を追跡できます。さらに円盤の進化の鍵となる磁場の物理を取り入れました。

このシミュレーションコードを用いて、星の母体天体である分子雲コアの重力収縮からシミュレーションを開始し、原始星形成後10万年までの進化を追跡しました。その結果、原始星が生まれた直後に数au規模の円盤が形成しました。その後、円盤は成長を続け、10万年後にはサイズが約40au（太陽系でいうと海王星軌道より少し外側の距離）に達しました。その円盤の質量は太陽質量の約2%でした。

今回の成果は、磁場を含む円盤進化を、従来の3次元シミュレーションよりも少ない計算コストで10万年スケールまで追跡できるシミュレーションコードを開発したことにあります。これにより、観測とシミュレーションの間に存在する円盤年齢というギャップを埋めることができ、ALMA望遠鏡などが捉える若い円盤のサイズや質量を、理論モデルで直接説明しやすくなります。将来的には、惑星の材料であるダストの成長や、若い原始星周囲に普遍的に見られるガスの放出（アウトフロー）によるガス質量の損失などの効果も取り入れ、観測される多様な円盤の長期進化を理解することを目指します。

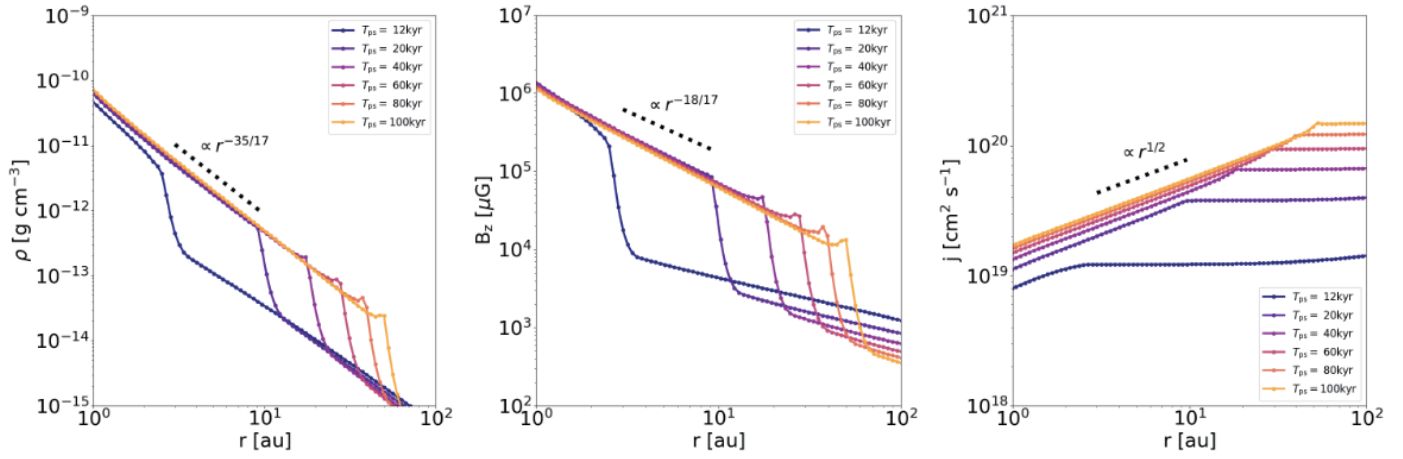


図1：ガス密度（左図）、磁場強度（中央）、比角運動量（右図）の時間進化
 横軸はそれぞれ中心星からの距離を表す。線の色は時間進化を表しており、紺色線（原始星形成後1万年）からオレンジ線（原始星形成後10万年）までの進化を表す。このシミュレーションでは、約40au程度の円盤を形成しており、円盤内の密度や磁場強度、比角運動量がそれぞれ特徴的なべき則に従って進化している。

鹿児島大学 1m 望遠鏡による 超新星を取り巻く星周ダスト の発見

山中 雅之, 永山 貴宏 (鹿児島大学)

恒星はその一生のほとんどを主系列と呼ばれる安定した状態で過ごします。これは内部における水素の核融合反応が、緩やかに続いているためです。やがて、水素の反応が終わり、次の段階に至ります。どんどん反応が変わり、最終的には中心核で鉄が生成されます。核は支えきれなくなり、崩壊を起こします。これを重力崩壊と呼びます。この時、反跳現象にともない、大爆発現象が起こります。これが超新星爆発です。タイプによって、数日で最大光度に到達するものもあれば、2～3週間程度かかるものもあります。その後、典型的なタイプであれば1年程度かけて6～8等程度暗くなります。つまり、織姫星のような明るさの星が1年かけて、肉眼で見えなくなるようなイメージです。

超新星は宇宙空間に重元素や物質を供給する重要な天体です。地球に見られる多様な元素も超新星なくしては説明ができません。また、とても大きな爆発エネルギーを持ち、明るく輝きます。実に太陽の10～100億倍近くまで明るくなると推定されます。これは、1つの銀河に匹敵する明るさです。この400年ほどは、天の川銀河では発見されておらず、現代天文学の研究対象となる超新星は銀河系外で発見されます。

近年、この超新星の探査を巡る状況にある劇的な変化が起こりました。地球から見える天の領域を毎晩のように探査する大規模観測プロジェクトが2019年頃から始まったのです。これによって、比較的短期間のうちに増光し、最大光度に到達するような超新星が多く発見されるようになりました。また、同時に従来は非常にレアな存在であると思われていたタイプの超新星も増光段階から発見されるようになりました。正に宝の山といえます。このような状況で、鹿児島大学では追跡観測のためのリソースを開発し、また観測の準備に備えてきました。近赤外線3色同時撮像装置

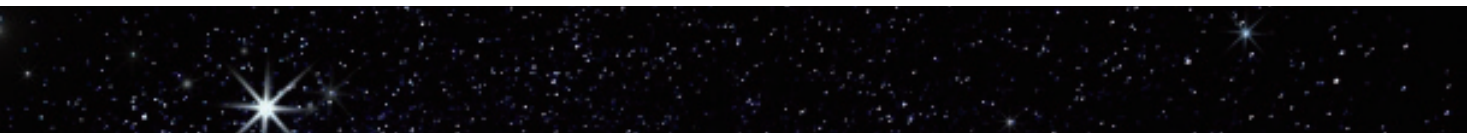
kSIRIUSは追跡観測にうってつけの強力な装置です。我々は、この装置を用いて2023年1月頃から本格的な運用を開始し、多種多様な超新星を観測してきました。これまで、ここで紹介する研究を含めて私が筆頭の論文が3編、大学院生の後藤颯太君を筆頭とする論文が1編、査読論文として出版されています。

ここで紹介する超新星爆発SN 2023xgoも、追跡対象の1つです。2023年11月9日に発見されました。初期段階において海外研究者グループによって、炭素が捉えられたことが報告されました。その後、ヘリウムが見られるようになり、状態が「遷移」していたことが明らかになりました。宇宙において最も多いのは水素で、一般的には星を取り巻くガスもほぼ水素です。しかしながら、いくつかの星では何らかの理由によって外層が剥ぎ取られてしまっているケースがあります。このSN 2023xgoもそのような星が爆発したであろうと考えられました。そのような外層剥ぎ取りの機構はまだ解決に至っていません。また、剥ぎ取られたガスが宇宙空間にどの程度まき散らされているのか、明らかになっているとは言えません。

私たちは2023年11月14日より観測を開始し、おおよそ100日後まで延べ13夜もの近赤外線データを取得することに成功しました。これ程の近赤外線データが得られたのは、プロトタイプであるSN 2006jcという天体以来のことです。Zwicky Transient Facility (略称ZTF)の公開する大規模サーベイデータを併せて、検討・分析を行いました。

我々は、得られたデータを見て驚愕しました。可視光線では1ヶ月で4等以上もの急減光を示した一方で、近赤外線ではその間わずか0.5等程しか減光しなかったのです。つまり、近赤外線は非常に緩やかに減光していたのです(図参照)。

我々は、これらの可視・近赤外線データを詳しく分析しました。まずは、kSIRIUSで取得された3つの近赤外線バンド間の“色”を確かめました。通常、超新星の色はとても青いことが知られております。しかしながら、この超新星の色は最大光度を過ぎてすぐに真っ赤な色へと変わっていったのです。

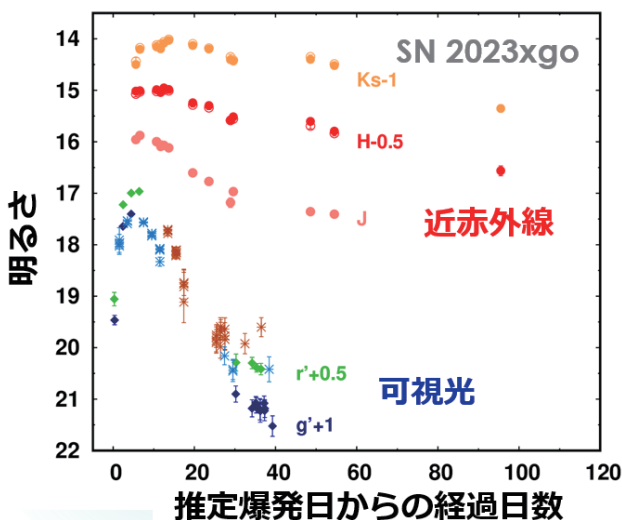


さらに、同じデータを用いて温度を調査しました。通常、超新星はおおよそ単一の温度で説明することが可能です。しかし、SN 2023xgo では説明することができません。赤外線波長域で非常に強い放射が出ているのです。特に、最大光度を過ぎた後はその傾向が顕著となりました。

そこで、我々はダスト（固体微粒子）の性質を模したモデルを用意して説明を試みました。その結果、超新星ガスによる高い温度だけではなく、1600K程度の温度を持つ炭素質ダストを合わせると説明可能であることを見出したのです。100日後まで温度を推定しました。緩やかに減りつつも、ほとんど一定の変化量でした。

また、同時にダスト質量を推定することができました。オーダーで 10^{-4} 太陽質量程度で、これも時間に対してほとんど一定の割合で留まっていました。

このダストがどこに由来するのか検討しました。最大光度を過ぎてすぐに赤外超過の兆候が見え始め、このダストによる寄与が認められました。



図：kSIRUS で得られた超新星 SN 2023xgo の光度変化。可視光線では公開されているサーベイ観測によるデータを用いている。可視光で急減光している一方で、近赤外線波長で非常に緩やかな変化だったことがわかる

この温度のダストが超新星爆発の強い放射によって蒸発しないためには、オーダーで 10^{16} cmより外側に分布している必要があります。この距離は、ちょうど10日ほどで光の速度で到達する距離に対応しています。少なくとも、超新星爆発によって吹き飛ばガスは速くともこの一桁小さい位置となるため、届いていません。仮に超新星噴出物の速度を10000km/s程度だとすると、光速の30分の1程度なので、到達に30倍の時間、すなわち300日程度が必要と考えられます。我々の観測で検出した赤外超過は少なくとも100日以上続いており、これと一致しています。

つまり、このダストは親星が超新星爆発を引き起こす前に、放出したガスによって形成されたものであると考えられます。これは「星周ダスト」と呼ばれます。仮に、ダストとガスの質量比が100倍だと仮定すると、 10^{-2} 太陽質量ものガスが存在していることとなります。親星の星風モデルに依りますが、1000km/s程度の速度で吹いていると仮定すると、実に1年あたり0.1太陽質量もの割合でガスを噴出していたこととなります。

このように大きなガス放出率は、単独で存在する親星ではやや説明が困難であると考えられます。ここからは、データが無いので類推になりますが、互いに重力で結びつき、相互作用がはたらく近接連星系であれば、親星の外層を効率よくはがすことができると考えられます。これによって、外層の水素を失い、ヘリウムや炭素から成るガスを放出するであろうと考えられます。

本研究は、近赤外線の観測によって超新星が起こる前に星の周りに広がるダストを捉えたものです。そのような観測研究が、連星進化の研究に重要な示唆を与えるものとなりました。このような研究手法が用いられるケースはそれ程多くなく、希少性が高いものと考えています。今後も、kSIRIUSを用いた観測に大きな期待がかかります。

1m 望遠鏡によってとらえられた星周物質構造の多様性

後藤 颯太 (鹿児島大学 修士課程),
山中 雅之, 永山 貴宏 (鹿児島大学),
前田 啓一, 川端 美穂 (京都大学),
D. K. Sahu (Indian Institute of Astrophysics),
Avinash Singh, Anjasha Gangopadhyay (Stockholm University),
Naveen Dukiya, Kuntal Misra, Monalisa Dubey,
Bhavya Ailawadhi (Aryabhata Research Institute of observational sciences)

初期質量が 8 ~ 10 太陽質量を超える大質量星は進化の最終段階として、超新星爆発と呼ばれる大爆発を引き起こすことが知られています。この超新星爆発は観測的な特徴によっていくつかの種類に分類されています。スペクトルに水素の特徴があれば II 型と分類します。このうち、スペクトルに水素の幅の狭い輝線が見られる超新星のことを、狭いを意味する narrow の頭文字の n を取って IIn 型超新星と呼びます。

この IIn 型超新星は超新星が爆発する際に、爆発前の星 (超新星親星) の周囲を星周物質 (CSM) と呼ばれる物質が取り巻いている状態で爆発していると考えられています。爆発によって凄まじい速度で膨張する超新星噴出物が、周囲を取り巻く CSM に衝突する際に、物理的な相互作用が発生します。膨張する超新星噴出物が持つ莫大な運動エネルギーを放射エネルギーに変換し、明るく輝くのです。このような物理過程によってエネルギーが放出されるため、CSM の性質 (質量や半径、密度構造など) が観測される放射の性質に大きくかかわっています。この CSM の起源は、大質量星が爆発の数年~数十年前に経験するとされる、大規模な質量放出にあるとされています。つまり、CSM の性質を調査することで、超新星親星がどのような質量放出を経験し

たのかを探ることができるのです。

近年では観測技術の向上によって、大規模な全天掃天観測 (全天サーベイ) が常に全天を監視しています。この全天サーベイが登場したことによって、驚くべきことに超新星親星の爆発前の活動が捉えられるようになりました。これによって、超新星になる星がどのような星なのか、また理論的にも未解明な点が多い大質量星の終末進化について、新たな知見をもたらすことが期待されています。

近年のこのような動向を踏まえて、注目されているのが SN 2009ip-like SNe と呼ばれる超新星のサブクラスです。SN 2009ip は 2009 年に発見され、当初は IIn 型超新星とされていました。しかし、他の超新星に比べて暗く、真の超新星ではないのではないかと、その正体について議論が巻き起こっていました。すると 2012 年に再度明るくなり、一時的に減光したものの、再び大増光し通常の超新星と同等の明るさまで到達しました。現在では 2009 年の増光は超新星親星の大規模な質量放出で、2012 年に真の超新星として爆発したと考えられています。その後現在に至るまで、同じような超新星前の増光が見られる超新星が発見され始め、それらは SN 2009ip に非常によく似た観測的特徴を示すことが明らかになってきました。これらの超新星たちを SN 2009ip-like SNe と呼びます。

このサブクラスは超新星親星の活動性を捉え、その後超新星として爆発するまでを追跡できる、重要なサンプルになります。今回、我々の研究グループはこのサブクラスに新たな 1 例を追加し、恒星末期段階における進化に対する理解を進める一助となる結果を提示しました。

SN 2023vbg は 2023 年 10 月 15 日に Zwicky Transient Facility (ZTF) の全天サーベイによって可視光で約 20 等で発見された超新星です。この SN 2023vbg は発見から約 80 日渡り、precursor



と呼ばれる光度変動を示しました。これは SN 2009ip が超新星の直前に見せた光度変動と同じく、超新星親星の活動性を反映した現象と考えられます。

この SN 2023vbg の最も興味深い点は、この precursor の後の振る舞いにあります。図 1 では明るさの時間進化を示す光度曲線を示しています。この図に明らかなように、SN 2023vbg にのみ、極大光度に向かう立ち上がりの途中に bump のような構造が見られます。我々はこの構造を「early-bump」と名付けました。高い一様性を持つとされてきた SN 2009ip-like SNe の中で、このような例外的な特徴が観測されたのは SN 2023vbg が初めてのことでした。我々はこの early-bump が全天サーベイによってとらえられたことが世界中に報告された直後から、即座に鹿児島大学 1m 望遠鏡をはじめとした、日印共同研究の枠組みを通じて、複数望遠鏡を用いた共同観測を実施しました。

観測したデータの詳細な解析の結果、我々はこの SN2023vbg が SN 2009ip-like SNe と共通の性質を持つ一方で、いくつかの明確な違いを持つことを明らかにしました。1つは超新星直前の precursor が他天体よりも明るい期間が長い点、もう一つは early-bump を持つ点、そして極大光度後の減光が比較的滑らかである点です。これらの違いは、爆発前に形成された CSM の構造や分布が、他の天体とは異なっていた可能性を示唆しています。

より明るい precursor が観測されたことは、爆発直前に超新星親星からの質量放出が特に活発であったことを示しています。その結果、周囲には高密度な星周物質 (CSM) が形成された状態で爆発が起きたと考えられます。このような環境が、他の天体では見られない early-bump と呼ばれる特異な構造を生み出した可能性があります。

一方で、極大光度後の減光が比較的滑らかである

ことは、周囲に存在した CSM が一様な密度構造を保っていたことを示しています。これは、爆発のかなり前から安定した、弱い質量放出が継続して起きていたことを意味します。

以上の結果から、SN 2023vbg は SN 2009ip-like SNe の中でも特に特徴的な CSM 構造を持つ天体であり、その形成過程には超新星親星の質量放出の履歴が深く関わっていると考えられます。これらの知見は、大質量星が超新星爆発に至る直前に経験する終末進化の多様性を示しており、その物理過程の理解に新たな視点を与えるものです。

本研究は 1m 望遠鏡をはじめとした超新星観測の国際協力による成果です。今後も我々鹿児島大学がこの協力関係をリードし、多くの成果を得ることが期待されます。

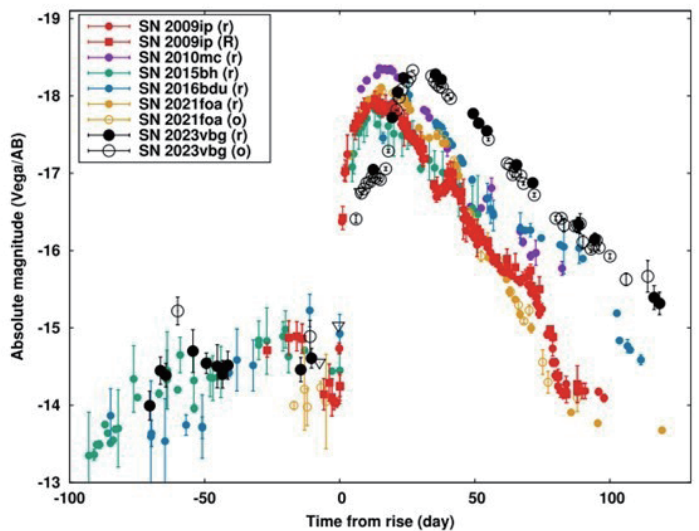


図 1 : SN 2023vbg (黒点) と過去観測された 2009ip-like SNe の光度曲線の比較。横軸は極大光度からの日数、縦軸は距離を補正した等級。