

【学術発表1】

X 線がとらえた白色矮星の重力赤方偏移

発表者氏名： 林 多佳由

所属・職位： University of Maryland, Baltimore County & NASA's Goddard Space
Flight Center・Assistant Research Scientist

研究成果のポイント

1. X 線観測ではじめて白色矮星の重力赤方偏移を検出し、その偏移量から白色矮星の質量を測定
2. この手法は Ia 型超新星爆発をもうすぐ起こすような、重たく、相手の星からの質量流入が大きい白色矮星にも使用可能
3. X 線撮像分光衛星(XRISM)による飛躍的な測定精度向上に期待

概要

1. 研究成果とその背景

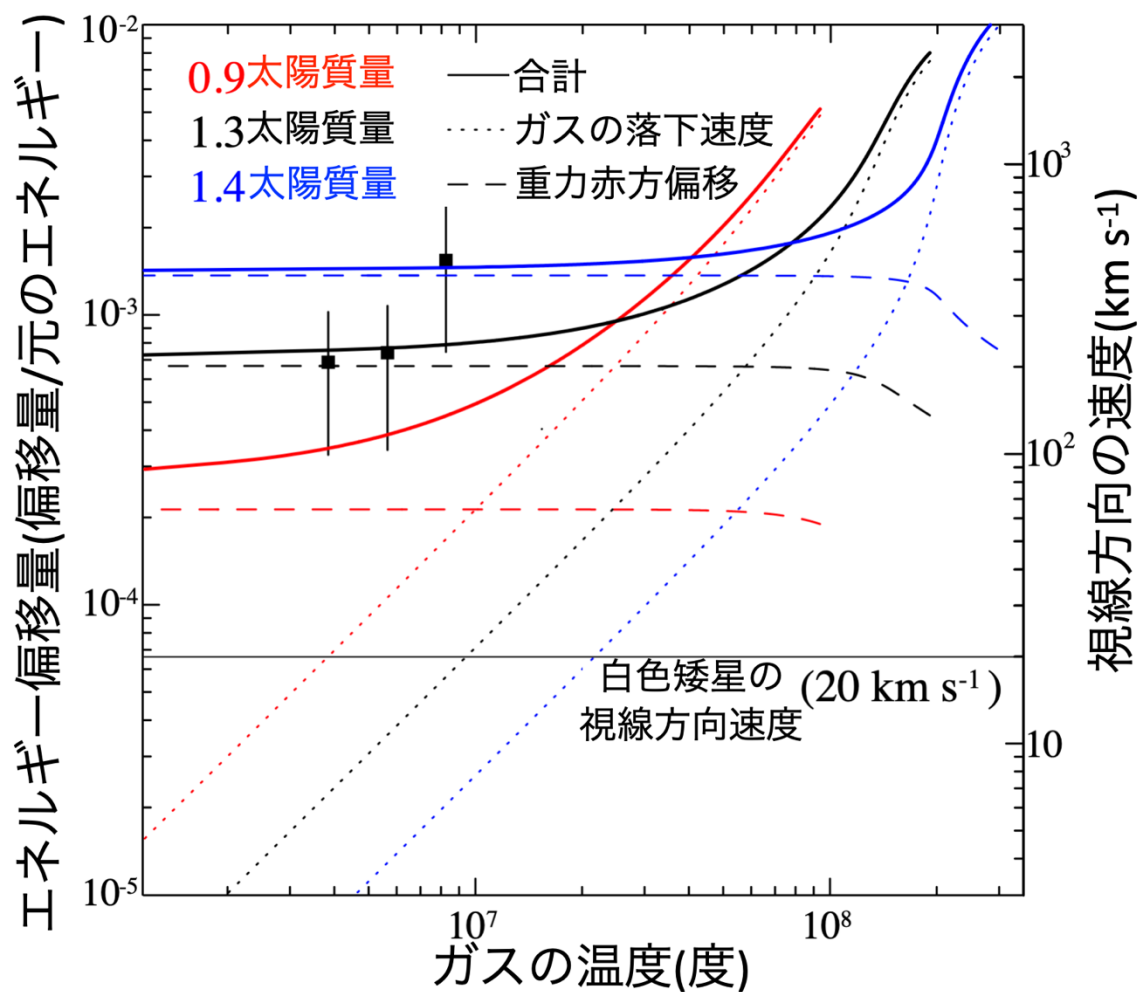
白色矮星からの重力赤方偏移は、可視光や紫外光では検出されていたが、X 線では精度不足のためこれまで検出されていなかった。今回、アメリカのチャンドラ衛星を 50 時間にわたって用いた観測から、X 線観測としては初めて白色矮星の重力赤方偏移を捉え、その偏移量から白色矮星の質量を測定することに成功した。

2. 成果にいたった経緯・手法

白色矮星へ落ちていく高温ガスの自由落下速度は、白色矮星の重力の強さで決まっているため、高温ガスが放出する X 線のエネルギー偏移から自由落下速度を測ることで、白色矮星の質量が求められる。今回はじめてこの手法を試した。実際に、X 線観測からエネルギー偏移が測られたが、その偏移量は高温ガスの自由落下に伴うドップラー偏移としては大きすぎた。さまざまな可能性を検討した結果、重力赤方偏移の寄与が支配的であると結論した。観測されたエネルギー偏移量と重力赤方偏移の理論値の比較から白色矮星の質量を測定した。

3. 今回の成果の意義・今後の展望

可視光や紫外光による白色矮星からの重力赤方偏移の観測は、相手の星からの質量流入が小さいものに限られるが、今回の X 線による手法は質量流入が大きい白色矮星にも適用が可能である。特に、Ia 型超新星爆発をもうすぐ起こすような、重たく、質量流入が大きい白色矮星の質量測定に適している点は重要である。また、今年打ち上げる X 線撮像分光衛星(XRISM)はエネルギー偏移量の測定精度を飛躍的に向上させるので、今回の質量測定法の飛躍的な精度向上が期待できるとともに、今回の天体にとどまらず、さらに多数の白色矮星の質量測定が可能になると期待される。



図の説明: X 線を放射している高温ガスの温度と観測されたエネルギー偏移(誤差棒着きの黒塗り四角)の関係。線は理論計算を示し、点線はガスの落下によるドップラー偏移、破線は重力赤方偏移、細い実線は白色矮星の視線方向移動によるドップラー偏移(過去の観測から)、太い実線はこれらの和。赤, 黒, 青はそれぞれ、白色矮星の質量が 0.9, 1.3, 1.4 太陽質量の場合。

詳細説明

1. 背景

白色矮星は太陽の8倍より軽い星が燃え尽きた後に残る、質量は太陽、半径は地球ほどのコンパクトな天体である。この星は重いほど半径が小さくなる性質があり、チャンドラセカル限界(太陽質量の1.4倍ほど)と呼ばれる質量になると、安定した半径を持つことができない。隣の星からガスが流入するなどしてこの質量に達すると、限界まで収縮した白色矮星は、一転、大爆発を起こす。これが、宇宙でも最大規模の爆発現象である、Ia型超新星爆発である。したがって、質量は白色矮星の重要なパラメータである。

X線による観測では、隣の星からのガス流入がある白色矮星、特に磁場が強い白色矮星に落下する高温ガスの温度を測ることで、白色矮星の質量が測られてきた。このような連星系を強磁場激変星と呼ぶ(図1)。強磁場激変星では、ガスは磁力線を横切ることができず、白色矮星の磁力線に沿って落下する。

白色矮星の強力な重力は流入ガスを光速の約1%にまで加速させる。この運動エネルギーは、ガスが白色矮星へ着陸する際に熱エネルギーに変換され、ガスは1億度以上の超高温になる(図2)。この温度は元々、白色矮星の重力に由来するため、この温度を測れば白色矮星の重力がわかり、質量を測定できる。1億度の高温ガスはX線を放射するため、この温度を測定するにはX線観測が必要になる。

近年は質量測定の精度を上げるため、ガスの温度分布も考慮した手法が主流になっている。1億度ほどの最高温度に達したガスは、X線を放射することで冷却しながら白色矮星へ落ちていくと考えられており、この時、熱に変換されずに残った速度も減速し、白色矮星の表面ではほぼ速度ゼロになると理論的に計算されている。

一方で、このような速度分布が観測されたことはない。そこで、我々は速度分布を直接観測することを試みた。



図1: 強磁場激変星。

<http://www.space-art.co.uk/>から引用。

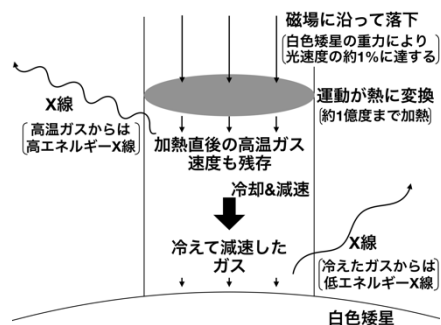


図2:隣の星から流入したガスが、磁場の強い白色矮星へ落下する様子。

2. 研究手法

我々は、さまざまな温度のガスから放射されたX線の、ドップラー効果によるエネルギー偏移を測定することで、ガスの温度と速度の関係を観測しようと試みた。ガスの

温度によって、放射する X 線のエネルギーは異なる(図 2)。つまり、ある特定のエネルギーの X 線のドップラー偏移を測定すれば、対応した、ある特定の温度のガスの速度を測ることが可能である。よって、さまざまなエネルギーの X 線のドップラー偏移を測定すれば、さまざまな温度のガス速度を測ることができ、温度と速度の関係を観測的に決められる。

この目的のため、現在までで最も高精度に X 線のエネルギー偏移を測定できる、米国のチャンドラ衛星を用いて、強磁場激変星 RX J1712.6-2414 を 50 時間かけて観測した。

3. 結果

観測で得られたデータを解析した結果、調査に使用した 6 つのエネルギー全てで、エネルギーは低い方へ偏移していた(ただしノイズと明確に区別できたのは 3 つ)。しかし、そのエネルギー偏移量はドップラー効果から予想される量よりもはるかに大きいことが分かった(図 3)。我々は、手前側から白色矮星へ落ちていくガス、つまり我々から遠ざかるガスのみ観測できるので、そこから放射される X 線のエネルギーが低い方へ偏移しているのはドップラー効果によるエネルギー偏移の方向と一致する。しかし、その偏移量が、理論的に計算されるドップラー偏移量の 4 倍以上も大きかった。

そこで我々は、エネルギー偏移を生じる他のしくみを検討した。1 つ目は、連星系全体が我々から高速で遠ざかっている場合である。しかし、この速度はすでに過去の観測から測られており、これによるドップラー偏移は、今回観測されたエネルギー偏移量の 1 割ほどにしかならなかった。2 つ目は、X 線が放射された後、高温ガスを抜け出す時にエネルギーが下がって見える現象を検討した。これはある粒子から放射された X 線は、同種の粒子に出会うと吸収されることで起こる。エネルギー偏移測定では、エネルギーが近すぎるため使用した観測機器では区別できない、2 つの X 線($K\alpha 1$ 線と $K\alpha 2$ 線)の平均エネルギーを使用している。この 2 つのうち、エネルギーが高い $K\alpha 1$ 線で上記の吸収は起こり易い。したがって、高温ガスを抜け出した後は、相対的にエネルギーが低い $K\alpha 2$ 線が多く残り、平均エネルギーは下がることになる。しかし、この効果も限定的で、観測されたエネルギー偏移量を説明するには数倍足りないことが分かった。

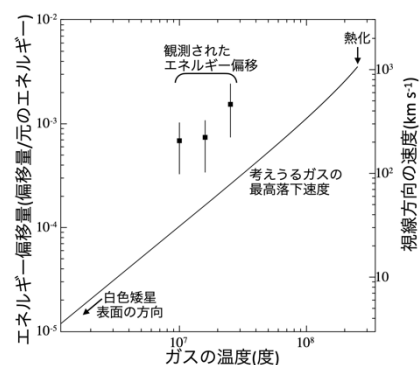


図 3: X 線を放射している高温ガスの温度と観測されたエネルギー偏移(誤差棒着きの黒塗り四角)の関係。実線は考える最高の落下速度を仮定したドップラー偏移。実線の右上の端は落下運動が熱化した点に相当し、高温ガスはここから左下の白色矮星表面に向かう方向へ落ちていく。

次に検討したのが重力赤方偏移である。これは一般相対性理論の基礎の一つである、等価原理(重力場と加速度系は等価)から説明され、白色矮星などの強力な重力場から光が脱出する際、エネルギーが下がる現象である。重力赤方偏移とドップラー偏移の和と、観測されたエネルギー偏移量と比較した結果、非常によく一致し、重力赤方偏移の寄与が支配的であることが示された(図4)。この結果、図らずも、白色矮星から初めて、X線によって重力赤方偏移を検出することになった。また、同時に白色矮星の質量は太陽の0.9倍以上であることも分かり、重力赤方偏移による新しい白色矮星質量測定法も確立できた。

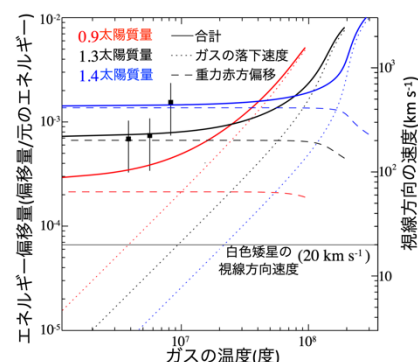


図4: 重力赤方偏移も考慮した理論的なエネルギー偏移量と観測されたエネルギー偏移量の比較。データは図3と同様。線は理論計算を示し、点線はガスの落下によるドップラー偏移、破線は重力赤方偏移、細い実線は白色矮星の視線方向移動によるドップラー偏移(過去の観測から)、太い実線はこれらの和。赤、黒、青はそれぞれ、白色矮星の質量が0.9, 1.3, 1.4太陽質量の場合。

4. 議論、今後の展望

今回、X線によって初めて白色矮星から重力赤方偏移を検出したが、可視光や紫外光による観測では先例がある。X線による重力赤方偏移測定の特長の一つは、ガス流入量が多い白色矮星でも適用可能な点が挙げられる。可視光や紫外光の観測では、白色矮星表面からの放射のエネルギー偏移量から重力赤方偏移が観測される。可視光や紫外光では、ガス流入量が多いと、ガスからの放射が明るすぎて、白色矮星表面からの放射を観測することが難しくなる。一方でX線の手法ではこのような制限はない。ガス流入が大きい白色矮星には、近い将来、Ia型超新星を起こすものも含まれ、その重力赤方偏移から直接、重力の大きさや質量を測定できれば面白い。

今年の9月に打ち上げが予定されているX線分光撮像衛星(XRISM)には、高い集光能力を持ち、かつ、エネルギー偏移量の測定が得意な観測機器が搭載されている。これによって、今回検出された高温ガスからの重力赤方偏移は、他の多くの白色矮星からも検出されるであろう。さらに、白色矮星表面からのX線も捉えられるはずで、ここからも重力赤方偏移を検出できる。XRISMの登場によって、多くの白色矮星から重力赤方偏移が捉えられ、その量から次々に重力や質量が測定されてゆく、新たな展開が期待される。

連絡先

- ・ 林多佳由、NASA's Goddard Space Flight Center、CRESST II、University of Maryland、Baltimore County、thayashi@umbc.edu
- ・ 森英之、宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所、mori.hideyuki2@jaxa.jp
- ・ 石田學、宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所、東京都立大学、ishida@astro.isas.jaxa.jp

【学術発表 2】

ジェイムズ・ウェッブ宇宙望遠鏡とアルマ望遠鏡の最強タッグで

最遠方の原始銀河団をとらえる

会見参加者

橋本 拓也（筑波大学）

菅原 悠馬（早稲田大学/国立天文台）

仲里 佑利奈（東京大学）

1. 背景：原始銀河団

銀河団は、銀河が 100 個以上も集まった天体であり、自らの重力で形を留めている天体としては、最大規模の構造である。とくに、遠方(すなわち過去)の宇宙に存在していた銀河団の祖先を原始銀河団と呼ぶ。宇宙初期の原始銀河団に属していた銀河は、その時代で星を作る主な担い手であったと考えられているため、できるだけ遠方の原始銀河団を調べることは、天文学において重要なテーマとなっている。さらに、原始銀河団に属する銀河は、同時代に存在していた一般的な銀河に比べ、急速に成長したと考えられている。つまり、生まれる場所によって銀河の成長に違いが見られることを意味しており、「環境効果」と呼ばれている。環境効果がいつ始まったのかを調べることは、銀河進化の研究において重要な課題である。

これまで、正確な距離の分かっていた最遠方の原始銀河団は、130.65 億光年かなたの天体であった (Tilvi ら 2020 年、Jung ら 2022 年)。2020 年から 2022 年ごろにかけて、ハッブル宇宙望遠鏡などの観測によって複数の遠方銀河の候補が見つかり、後にケック望遠鏡のスペクトル観測によって正確な距離が判明した。2021 年 12 月にアメリカ航空宇宙局 (NASA) が打ち上げたジェイムズ・ウェッブ宇宙望遠鏡 (JWST) は、従来の望遠鏡に比べて、可視光および赤外線波長域で圧倒的な感度をもつ。原始銀河団の研究もまた、JWST の登場によって急速に進展している。

JWST を用いた原始銀河団の研究のなかでも特に注目を浴びているのが、A2744z7p9OD である。JWST の第一期の観測では、3つの独立した国際共同研究チームが本天体の観測を実施しており、まさに激戦区とも言える天体である。というのも、これまでにハッブルおよびスピッツァー宇宙望遠鏡によって、およそ 129 から 132 億光年かなたにあると予想される銀河の候補天体が、20 個程度も発見されていたのである。A2744z7p9OD の正確な距離を最初に決定したのは、欧米の研究グループであった。研究をリードした森下貴弘氏（カリフォルニア工科大学）らのグループは、銀河候補のうち 7 天体の距離を決定し、A2744z7p9OD は 130.86 億光年かなたの原始銀河団であることを発見した (図 1: 森

下ら 2023 年)。

しかし、A2744z7p9OD の中で最も銀河候補が多いコア領域を隈なく観測することは出来ておらず、その全貌は明らかにされていなかった。また、これまでの最遠方の原始銀河団の研究では、原始銀河団に属する銀河における環境効果の有無は判明していなかった。

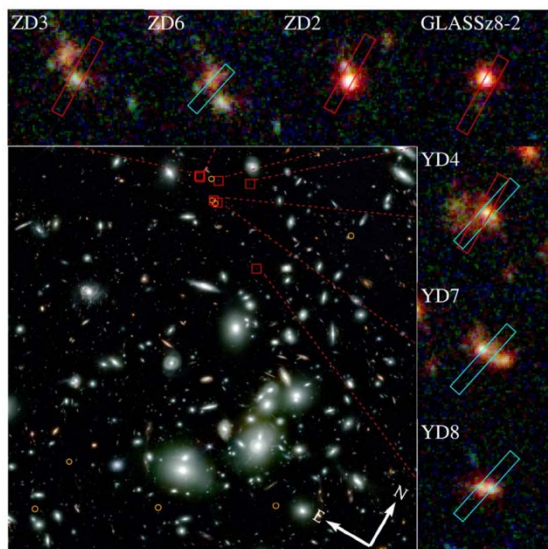


図 1: これまでに分かっていた A2744z7p9OD の様子。左下の大きなパネルは、JWST に搭載されたカメラで取得された写真。赤色の四角形は、森下氏らによって正確な距離が決定された 7 つの銀河（名称は ZD3, ZD6, ZD2, GLASSz8-2, YD4, YD7, YD8）の場所を示す。上および右のパネルは、いずれも各天体をズームインしたもの。森下ら 2023 年より引用。

2. 研究手法と結果①: JWST が明らかにした、最遠方の原始銀河団のコア領域

そこで、日本とスペインの国際共同研究チーム（共同研究責任者: J. Álvarez-Márquez および橋本拓也）は、A2744-z7p9OD のコア領域に注目して JWST の観測を実施した。JWST には波長や目的ごとに異なる複数の装置が搭載されており、本観測では可視光から近赤外線までの波長をスペクトル観測する装置 NIRSpec の面分光モードを使用した。面分光モードは、視野内のすべての場所のスペクトルを同時に観測できるため、ターゲット天体の内部構造まで空間的に分解した詳しい情報を得られる強みがある。さらに、ターゲット天体の近くに天体が偶然存在している場合には、そのスペクトルも同時に取得できる利点もある。

しかし、NIRSpec の面分光データの解析は極めて複雑であり、まだ世界的にも十分には確立していない状況である。解析に用いる公式のソフトウェアは、現在でも NASA によって改良が加えられている途中の段階であり、これをそのまま用いても素性の悪いノイズが残されてしまう課題があった。この状況を打開するため、研究チームの菅原悠馬 研究員（早稲田大学/国立天文台）、馬渡健 研究員（筑波大学）、J. Álvarez-Márquez 研究員、A. Crespo Gómez 研究員、C. Blanco-Prieto 大学院生（いずれもスペイン宇宙生物学センター）らがデータ解析を主導した。数ヶ月の検討の末に、公式のソフトウェアへ改良を施し、ノイズを除去することに成功した。

この結果、天の川銀河の半径のさらに半分相当の 36,000 光年を一辺とする四角形領域の中に、4 天体もの銀河から二階電離した酸素イオンの光 ($[\text{OIII}]$ 5008 Å) を検出することに成功した。これによって銀河の正確な距離が分かり、4 天体が密集していることを明

らかにした (図 2 左)。また、4 天体のうち 1 天体は、銀河の候補として知られてすらいなかった天体であり、本成果は面分光モードの威力を遺憾無く発揮した成果だといえる。

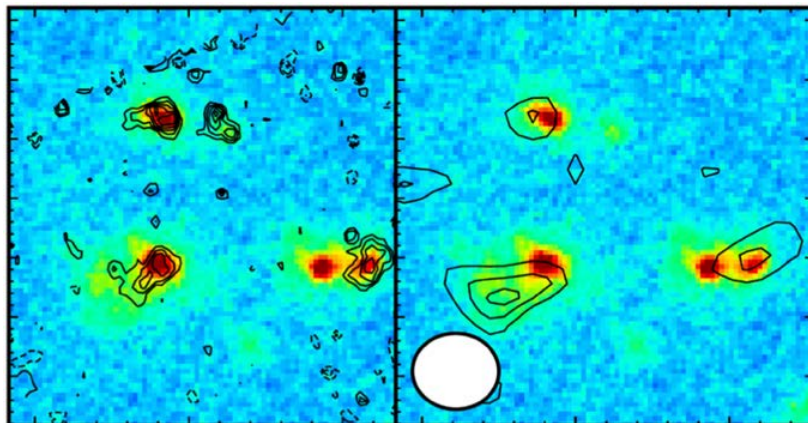


図 2. 背景のカラー画像は、いずれも JWST に搭載されたカメラで取得された、原始銀河団 A2744ODz7p9 のコア領域の様子。四角形領域の一片は、天の川銀河の半径のさらに半分程度の大きさ相当。(左) 等高線は JWST に搭載された装置 NIRSpec で取得したデータ。4 つの銀河が、130.68 億光年かなたに同定された。(右)等高線はアルマ望遠鏡で取得した宇宙塵の放射の空間分布図。メンバー銀河のうち 3 天体からの放射が認められる。

研究手法と結果②：アルマ望遠鏡によって暴かれた、コア領域の銀河の成熟の様子

国際共同研究チームは、JWST を用いた A2744z7p9OD のコア領域の観測に成功すると、ただちにアルマ望遠鏡のデータにも着目した。というのも、この領域では過去にアルマ望遠鏡でデータが取得されており、すでにアルマ望遠鏡のウェブサイト上で公開されていたのである。

アルマ望遠鏡は、JWST では観測できない電波という波長域で最高感度を誇り、JWST とは相補的な情報をもたらす。アルマ望遠鏡によって観測されていたのは、宇宙塵（炭素やケイ酸塩などを含む固体微粒子）の放射である。銀河における宇宙塵の供給源は、銀河を構成している重い星々が、その進化段階の終末期に引き起こす超新星爆発だと考えられている。このため、銀河に多量の宇宙塵があることは、銀河がすでに化学的な観点で成熟していることを意味するのである。

橋本拓也 助教（筑波大学）と札本佳伸 特任助教（千葉大学）は、アルマ望遠鏡のデータを解析したところ、4 つの銀河のうち 3 天体から、宇宙塵の放射を検出することに成功した (図 2 右)。これほど過去の時代にある原始銀河団として、宇宙塵の放射が検出された初めての例であり、多くの銀河が狭い領域に集まることで銀河の成長が急速に進んでいることを示している。

研究手法と結果③：シミュレーションが予言する A2744z7p9OD のコアの未来

A2744z7p9OD のような興味深い天体が発見された際、その天体が理論的に説明できるか否かを調べることは重要な研究手法である。そこで本研究では、D. Ceverino 氏（マドリード自治大学）が開発した宇宙論シミュレーション FirstLight を活用した。仲里佑利奈大学院生（東京大学）が、多数あるシミュレーションデータを網羅的に解析した。

本シミュレーションの強みは2点あり、シミュレーション可能な宇宙空間の体積の大きさ^{*1}と、銀河の内部構造まで詳細に調べられる解像度の高さ^{*2}を同時に実現している。これは、A2744z7p9OD のような珍しい天体をシミュレーションで探しつつ、さらにその内部構造までも調べる上で、最も適している。

この結果、シミュレーションはコア領域の観測的な性質（酸素イオンの光の明るさ、銀河の質量、宇宙塵の量）を再現することに成功した。さらに、シミュレーションの強みを活かして4天体の将来を予測したところ、数1000万年以内という、銀河や宇宙の進化としては短い期間で合体し、より大きな天体に進化することを明らかにした（図3）。

^{*1}シミュレーション可能な空間の一辺は、共動空間において2億光年である。これは、最大級の銀河団である「かみのけ座銀河団」の直径のさらに10倍程度に相当する。

^{*2}シミュレーションの解像度は、およそ50光年である。これは、大質量星や星団の形成現場として知られる巨大分子雲の直径程度に相当する。

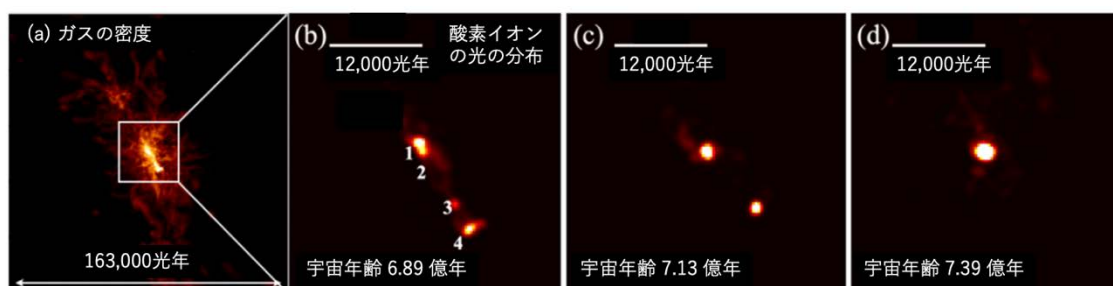


図3. 宇宙論シミュレーションによる本天体の成長の予想。(a)宇宙年齢6.89億年における原始銀河団A2744z7p9ODに似た領域のガスの密度の様子。(b)は(a)のコア領域の拡大図で、JWSTで観測された領域相当の領域。図の濃淡は、酸素イオンの光の分布を示す。(b)から(d)は、シミュレーション天体の進化の様子。4つの銀河が次第に合体を繰り返して、より大きな天体へと進化する様子を表す。

3. 結果の解釈と、今後の期待と展望

ジェイムズ・ウェッブ宇宙望遠鏡(JWST)とアルマ望遠鏡の最強タッグが威力を発揮し、最遠方の原始銀河団のコア領域の詳細な性質が明らかになった。①コア領域の銀河は多量の宇宙塵を含み成熟していること、②これらの銀河が合体の途中であると考えられることは、銀河の環境効果が宇宙年齢6.5億年の時代ですでに始まっていたことを示唆している。

田村陽一 教授（名古屋大）と札本佳伸 特任助教（千葉大）は、今後、アルマ望遠鏡を用

いてさらなる高感度で A2744z7p9OD を追観測することを予定している。高感度の観測で A2744z7p9OD の徹底的な解明を目指す。

また、JWST の登場以降、宇宙初期に数多くの原始銀河団の候補が発見されつつあり、ホットトピックの一つとなっている。今後、より多くの原始銀河団を JWST とアルマ望遠鏡を組み合わせることで詳しく調べ、当該分野における独自の研究を展開していきたいと考えている。

注) 宇宙論パラメータ: ハッブル定数 $H_0 = 70.4 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$, $\Omega_m = 0.272$, $\Omega_b = 0.045$, $\Omega_\Lambda = 0.728$

4. 本研究に関連する学会講演

- ・講演番号: X07a (2023 年 9 月 20 日 11:12)
- ・タイトル: 「JWST と ALMA による最遠方の原始銀河団のコアの同定: 宇宙年齢 6.5 億年における環境効果の始まり」
- ・発表者: 橋本 拓也 (筑波大学) ほか

5. 謝辞

この研究は、日本学術振興会科学研究費補助金 (課題番号 22H01257、23H00131)、日本学術振興会卓越研究員事業 (HJH02007)、ALMA 共同科学研究事業 (2020-16B) の補助を受けて行われました。

連絡先

筑波大学 数理物質科学研究科 物理学専攻/宇宙史研究センター
助教 橋本 拓也 (はしもと たくや)

E-mail: hashimoto.takuya.ga@u.tsukuba.ac.jp

研究グループ全員の氏名・所属:

橋本 拓也 (はしもと たくや) 筑波大学
菅原 悠馬 (すがはら ゆうま) 早稲田大学、国立天文台
仲里 佑利奈 (なかざと ゆりな) 東京大学
Javier Álvarez-Márquez スペイン宇宙生物学センター
札本 佳伸 (ふだもと よしのぶ) 千葉大学
Luis Colina スペイン宇宙生物学センター
井上 昭雄 (いのうえ あきお) 早稲田大学

Daniel Ceverino マドリード自治大学
吉田 直紀（よしだ なおき）東京大学
Luca Costantin スペイン宇宙生物学センター
Alex Crespo Gómez スペイン宇宙生物学センター
Carmen Blanco-Prieto スペイン宇宙生物学センター
馬渡 健（まわたり けん）筑波大学
Santiago Arribas スペイン宇宙生物学センター
Rui Marques-Chaves ジュネーヴ大学
Miguel Pereira-Santaella スペイン基礎物理学研究所
Tom T.J.L.C Bakx チャルマース工科大学
萩本 将都（はぎもと まさと）名古屋大学
橋ヶ谷 武志（はしがや たけし）京都大学
松尾 宏（まつお ひろし）国立天文台、総合研究大学院大学
田村 陽一（たむら よういち）名古屋大学
碓氷 光崇（うすい みつたか）筑波大学
任 毅（にん き）早稲田大学