

遠方銀河の向きが示す、一般相対性理論の証拠

—宇宙を探る新たな手段の確立—

概要

中央研究院天文及び天体物理研究所の奥村哲平教授と京都大学基礎物理学研究所の樽家篤史准教授は、120万個にのぼる銀河の観測データを用いて、銀河の向きを系統的に調べ、数千万光年以上離れた銀河の向きが、重力を介してお互いそろっている証拠をつきとめました。

研究では、宇宙の3次元地図作成に使われた銀河の観測データをもとに、銀河の位置と向きの情報を使って、遠く離れた銀河の向きがお互いどれだけそろっているかを測定しました。その結果、数千万光年以上も離れた銀河どうしの向きがよくそろっていることを発見しました（図1）。測定結果は、宇宙に広がるダークマター分布が重力を通じてお互いの銀河に作用したと考ええると、うまく説明できます。研究ではさらに、重力によって銀河分布が徐々に密集していく速度の測定にも成功し、遠方宇宙でも一般相対性理論と矛盾がないことを明らかにしました。

今回の成果は、銀河の向きを使って、宇宙に関する新しい検証手段を確立できたことがポイントです。これまでは、分光観測された銀河の位置情報だけから検証が行われてきましたが、銀河の向きの情報を組み合わせることで、より強力な手段を切り拓くことができました。研究ではアーカイブデータを用いましたが、現在進行中の銀河観測プロジェクト、特に日本を中心としたすばる望遠鏡を用いた観測プロジェクトへ応用することで、さらに高い精度の測定が可能で、革新的な成果につながると期待されます。

本研究成果はアメリカ天文学会が発行する「*The Astrophysical Journal Letters*」に2023年3月13日付でオンライン掲載されました。

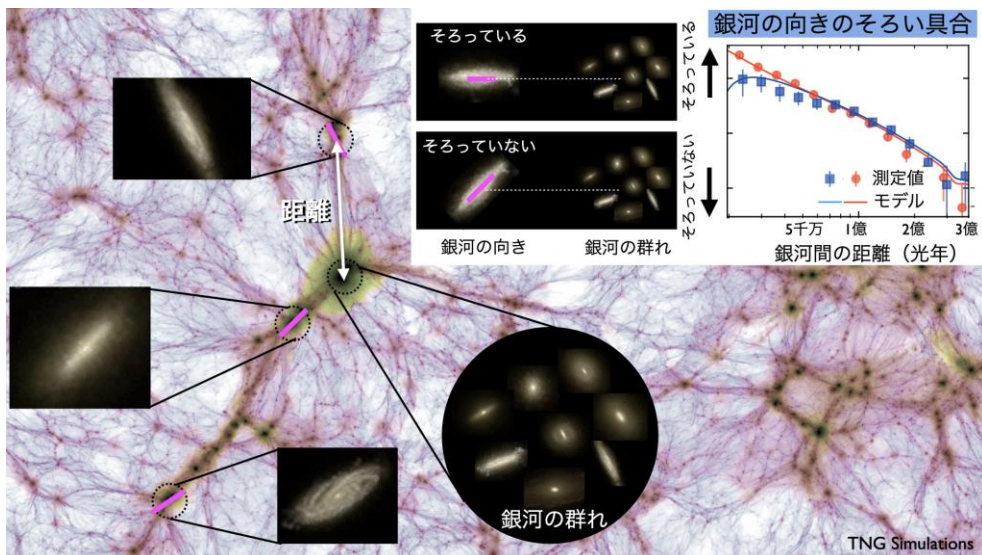


図1：銀河の向きが、フィラメント状のダークマター分布の重力に向かってそろう様子。図中にあるグラフは、銀河間の距離ごとに銀河の向きのそろい具合を測定した結果で、測定値がモデルとよく一致している様子を表している。（TNG simulations の画像と本研究成果をもとに作成）

1. 背景

宇宙の成り立ちと現在までの進化を探求する「宇宙論」は、観測技術の目覚ましい発展に支えられ、観測データをもとに理論を検証・精査できる実証科学へと変貌を遂げました。そのマイルストーンというべき成果が、一般相対性理論にもとづき、宇宙全体の様子を記述する「標準宇宙モデル」です。ただし、このモデルには、ダークマターやダークエネルギーと呼ばれる正体不明の物質・エネルギー体の存在が不可欠であり、大きな謎となっています。そのため、宇宙の未来がどうなるのかもよくわかっていません。こうした謎を解明していくには、標準宇宙モデルの根幹をなす前提条件や仮定を、宇宙の観測を通じて検証を進めていく必要があります。その過程で標準宇宙モデルのほころびを見出せば、大きなブレイクスルーへとつながり、新しい宇宙観が切り拓かれる可能性があります。標準宇宙モデルを超えた新たな宇宙観の確立に向け、現在、世界中で観測が進められています。

このような状況下で、宇宙にひろがる銀河を一つ一つ丹念に分光観測して作成された銀河の3次元地図は強力な観測手段を提供します。この3次元地図に見られる銀河分布の特徴的なパターンは、光では見えないダークマターの重力によって支配され、宇宙のごく初期にあった小さな密度ムラが徐々に成長することで形作られたと考えられています。そのため、銀河の3次元地図は、宇宙の構成要素やそれらの進化を特徴づける宇宙論パラメータを決定する上で、きわめて強力な手段となります。

これまで、銀河の3次元地図の観測データにもとづき、標準宇宙モデルの検証や宇宙論パラメータの決定が行われてきました。ただし、多くは、銀河の位置情報のみを使った研究に終始していました。つまり、広大な宇宙において、銀河を“点”とみなし、その点分布の個数密度ムラを標準宇宙モデルにもとづく理論計算と比較する研究が進められてきました。しかるに、実際には、銀河は有限のサイズで固有の形を持っています。このような観測データは、銀河の構造・進化を探る研究では貴重なデータベースとして大いに役立てられています。その一方、宇宙論の研究となると、積極的な応用が今までありませんでした。

しかしながら、形成された銀河はダークマターの重力によってほぼ支配されるため、銀河の形や向きも、ダークマターによる潮汐力の影響を受けることとなります。この描像が正しければ、数百万～数億光年離れた銀河どうしの向きもダークマターの重力を介して関係づくると予想されます。もしそうなら、銀河の形や向きの情報を使って、宇宙の成り立ち・進化に迫ることができます。

2. 研究手法・成果

研究では、現在、世界最大級の銀河観測データを提供する、スローン・デジタル・スカイ・サーベイから得られた120万にのぼる銀河のデータを用いて、銀河の向きのそろい具合を調べました。従来の研究では、銀河の位置情報だけを用いて、お互い離れた銀河のペアがどれだけ頻出するかを銀河間の距離に応じて測っていました。この手法を応用し、研究では、位置と向きの情報を組み合わせて、銀河間の距離ごとに、銀河の向きのそろい具合を測定しました。120万個の銀河は、観測者からの距離や銀河の明るさに応じて、3つのサンプルにわかれています。それぞれのサンプルについて銀河の向きのそろい具合を測定したところ、いずれの場合でも、クリアなシグナルが得られました（**図1**）。つまり、お互い数千万～数億光年離れた銀河でも、それらの向きが関係づいていることが、明らかになりました。

この結果を説明するため、研究では、「銀河の向きは、ダークマターの分布が作る重力に沿って決まる」とするモデルを考え、理論計算を測定結果と比較しました。その結果、モデルにもとづく理論計算が測定結果をよく再現できることがわかりました。なお、理論計算には、観測される銀河の3次元位置情報に銀河の運動の情報が紛れこむ影響が考慮されています。この影響を通じて測定結果は、ダークマターが作る重力によって銀

河が密集する速度に、顕著に依存します。そのため、逆に、測定結果から重力による成長速度を求めることができます。求めた成長速度を、標準宇宙モデルの予想値と比べたところ、お互い矛盾のないことがわかりました（図2）。つまり、数千万～数億光年離れた銀河間に働く重力は、一般相対性理論でよく記述されていることを意味します。重力による成長速度の測定は、これまでも様々な銀河観測データを用いて行われてきましたが、今回の研究では、銀河の向き情報を新たに組み合わせたことで、より精度よく求めることに成功しました。つまり、銀河の向き情報を用いることで、銀河スケールでの一般相対性理論をより強力に検証できたこととなります。

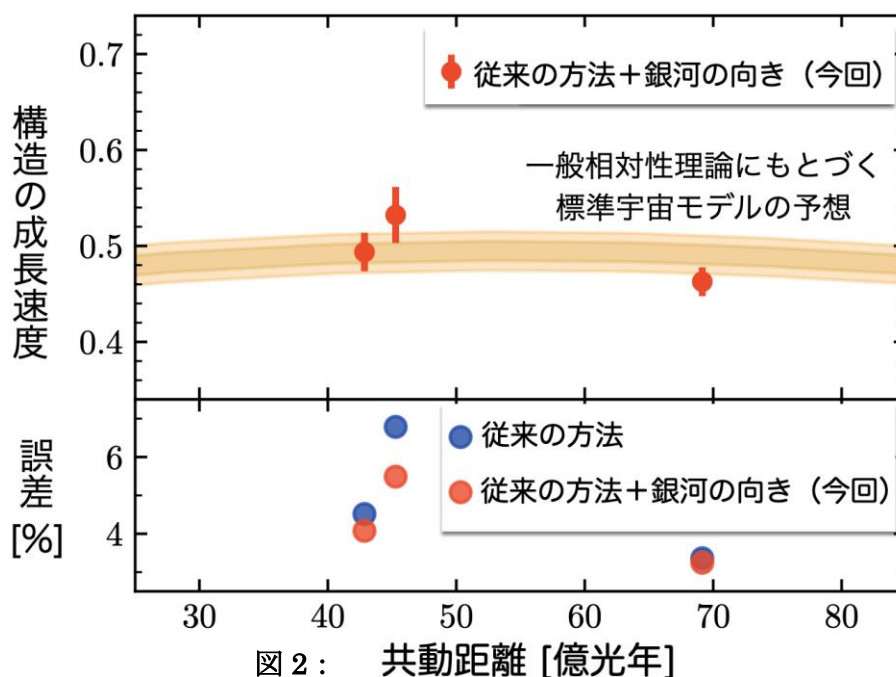


図2 上パネル: 重力によって銀河が密集する速度とその進化。横軸が、私たち観測者からみた銀河のサンプルまでの距離。縦軸は宇宙の構造が成長するスピードを表すパラメータで、値が大きいほど速く成長する。オレンジの帯は、一般相対性理論にもとづく標準宇宙モデルが予想する成長速度の予想範囲。誤差棒付きの3つの赤丸が、今回の研究で得られた3つの銀河のサンプルに対する測定結果。いずれも一般相対性理論と矛盾がないことを表している。

下パネル: 構造の成長速度の測定誤差の大きさ。縦軸は、誤差の大きさを表す。上パネルで得られた測定誤差（赤丸）を、従来の方法から得られた誤差（青丸）と比較している。青丸に比べて、赤丸は全て小さい値になっていることから、今回の測定結果は、構造の成長速度をより強く制限できたことを表している。

3. 波及効果、今後の予定

今回の研究により、銀河固有の向き情報が、宇宙を探る強力な検証手段となることが明らかになりました。銀河の向きは、これまでも、重力レンズ効果の測定に用いられてきましたが、銀河それ自身が持っている向きは、重力レンズ効果で生じるわずかな「ゆがみ」を捉える上で障害になります。そのため、クリアな重力レンズ信号をとらえるために、いかにして銀河固有の影響を取り除くか、という問題に焦点がおかれて研究が進んできました。今回の研究では、邪魔者扱いされていた銀河固有の向きを、逆転の発想によって、宇宙論の検証に活用することで強力な手段となることを示しました。研究ではアーカイブデータを用いましたが、現在、世界中で観測が進められており、膨大な観測データが出揃うことで、高精度の検証が進むと期待されます。特に、日本で進められているすばる望遠鏡を用いた宇宙論の観測プロジェクトでは、望遠鏡に搭載された超高視野カメラ HSC と多天体分光器 PFS によって、きわめて質の良い観測データがもたらされます。本研究の手段を応用することで、競合するプロジェクトよりも突出した成果を引き出すことも可能となります。

銀河が持つ固有の向きや形は、重力を介してダークマターと関わるだけでなく、宇宙の成り立ちと進化の過程とも密接に関係づいていると考えられます。それらの関係を解き明かすことができれば、銀河の向き・形状の観測から、従来の手法では難しい、初期宇宙に起こった未知の現象の痕跡探しが可能になるだけでなく、ダークエネルギーの性質の解明などの成果も期待できます。そのため、今後は、観測のみならず、理論的な研究を推し進めることも重要になります。

4. 研究プロジェクトについて

本研究は、国家科学及技術委員会 MOST 110-2112-M-001-045、MOST 111-2112-M-001-061、および、中央研究院キャリア形成賞 AS-CDA-108-M02（代表：奥村哲平）、科研費補助金・基盤研究（B）（21H01081、代表：樽家篤史）、科研費補助金・学術変革領域「ダークマター」計画研究 C02（20H05861、代表：安藤真一郎）、科学技術振興機構 AIP 加速課題（JP20317829、代表：吉田直紀）の支援を受けています。

<用語解説>

ダークマター：宇宙の構成要素の約 3 割を占める正体不明の物質。ダークマターは質量を持った未発見の素粒子だと考えられています。基本的に重力相互作用しからないため、普段の生活で、ダークマターの存在を感じることはありません。ただし、広大な宇宙空間では、ダークマターの重力が支配的になります。観測で見られる無数の銀河は、こうしたダークマターの重力に引き寄せられて形成されたと考えられています。

一般相対性理論：アルベルト・アインシュタイン博士が 1915 年に提唱した重力相互作用を記述する物理理論。重力を時空間のゆがみとして幾何学的にとらえることで、ニュートン以来考えられてきた万有引力を包含し、宇宙そのものの記述を可能とした画期的な理論です。一般相対性理論は、標準宇宙モデルの根幹をなし、膨張する宇宙のダイナミクスと物質分布の重力的構造進化を統合的に記述します。日常では、カーナビなどに使われる GPS（全地球測位システム）にも役立てられており、その正しさは様々な実験で検証されてきましたが、広大な宇宙空間で、どれだけ正しく成り立っているかはさらなる検証が必要です。

標準宇宙モデル：現在観測される宇宙の様子を、過去からさかのぼって統合的に説明するモデル。標準宇宙モデルは、一般相対性理論などの基礎物理学にもとづき、ミニマルな仮定のもとで、膨張する宇宙の進化から、物質の進化、さらに物質分布の構造進化までを、たかだか数個のパラメータで説明します。このモデルのもと

づく理論計算により、様々な観測結果を定量的に説明したり、精密な予言が可能です。ただし、標準宇宙モデルには、ダークマターやダークエネルギーなど、未知の構成要素が含まれており、その正体が何なのか、解明が必要です。最近では、異なる観測手段から求められたモデルパラメータがお互い一致しないという問題が報告されており、モデル自体の前提・仮定の精査が必要となっています。

ダークエネルギー：宇宙の構成要素の約3割を占める正体不明のエネルギー体。物質のように空間に局在せず、宇宙空間全体を満たし、宇宙の膨張に影響することで、加速度的な膨張を引き起こす原因と考えられています。アルベルト・アインシュタイン博士が一般相対性理論の提唱時に導入した宇宙定数が、有力候補の1つと考えられていますが、その真偽については今後の観測・検証が待たれます。

共動距離：宇宙論で用いられる距離の定義の1つ。観測する遠方天体からの光が、私たちに届くまでの時間に、これまでの宇宙の膨張を考慮して算出される距離。本プレスリリースの解説で用いられる距離は、この共動距離のことを指しています。

重力レンズ：大きな質量を持った物体が作る重力によって、光の進む向きが歪められる現象。重力レンズ効果は、遠方の天体から飛来する光が私たちに届くまでに、銀河やダークマターなどといった質量の大きな物体を横切る際に起こります。光の進行方向が変わることで、銀河のみかけの形状や向きが影響を受けるため、このことを用いて、重力レンズ効果そのものを捉える研究が盛んに行われています。

<研究者のコメント>

銀河の形状を用いて宇宙を支配する物理法則が調べられるという可能性は、これまで理論的な立場から指摘されてきました。今回の研究でそれを初めて観測的に示すことができ、たいへん嬉しく思っています。今後、日本が台湾や他の国々と共に進めている国際共同研究であるすばる主焦点多天体分光器 Prime Focus Spectrograph (PFS) など大規模な銀河地図に適用して、より詳細な解析を進めていきたいと考えています。
(奥村)

数千万光年も離れた銀河の向きが関係づいているという測定結果は、日常生活から考えればすごいことです。しかも、その結果が、一般相対性理論に基づくモデル計算とぴたりと一致した点は、もっと驚きです。もちろん、一般相対性理論に何らかのほころびが潜んでいるかもしれないので、今後の精査は必要ですが、今回の成果で新しい手法を開拓できたことは大きな収穫でした。今後は、現在進行中の観測プロジェクトなどを通じて、こうした研究を押し進めることで、宇宙のさまざまな謎の解明につなげていきたいと考えています。(樽家)

<論文タイトルと著者>

タイトル：First Constraints on Growth Rate from Redshift-space Ellipticity Correlations of SDSS Galaxies at $0.16 < z < 0.70$ (赤方偏移 0.16 から 0.70 における SDSS 銀河を用いた赤方偏移空間の楕円相関による成長率の最初の制限)

著者：Teppei Okumura, Atsushi Taruya

掲載誌：The Astrophysical Journal Letters

DOI：[10.3847/2041-8213/acbf48](https://doi.org/10.3847/2041-8213/acbf48)