



重力レンズって何？ 宇宙の始まりにまた近づいた



千葉大学先進科学センター 教授
大栗 真宗

「重力レンズ」とは、光の経路が重力によって曲げられる、一般相対性理論によって予言された現象です。今では様々な天文学観測によって当たり前のように観測されており、宇宙を調べる有用な道具として幅広く活用されています。この記事では重力レンズ効果について解説します。

1. 重力レンズとは

アインシュタイン氏が提唱した一般相対性理論によると、重力は時空のゆがみとして記述されます。光は直進する性質がありますので、そのゆがんだ時空をまっすぐ進み、その結果光の進む経路が曲がります。これが重力レンズ効果です。

この経路が曲がる効果は、光を質量を持った粒子とすれば高校物理の初期に習うニュートン力学でもおこって、その曲がり角についても計算ができます。これは、例えば地球に近づいてきた小惑星などが地球の重力で曲がって速度の方向が曲げられる計算と基本的には同じですが、光の速度はかなり大きいため速度の方向の変化はわずかにになります。この計算を太陽の場合に行くと、太陽の半径の位置をかすめて通ってくる光に対して曲がり角は0.87秒角（1秒角は1度角の1/3,600倍）程度と計算できます。ただし実際は光は質量を持たないため、ニュートン力学の枠内では本当に光の経路が曲がるのかどうかすらよくわかりません。

一方で一般相対性理論の枠内では、先述のとおり光の経路は曲がった時空をまっすぐ進むという考え方であいまいさなく計算できます。この場合に、先ほどと同様に太陽の縁をかすめて観測される光に対して曲がり角を計算すると、ニュートン力学の場合のちょうど2倍、1.74秒角という値が得られます。つまり遠方の星の位置が、太陽が近づいた時に天球面上でどれほど変化したかを観測できればニュートン力学と一般相対

性理論のどちらの計算結果が正しいか、が判定できるはずですが。これを日食を利用して実際に行ったのがエディントン氏らによる1919年の観測で、この観測で一般相対性理論が予言した値に近い観測値が得られたことから一般相対性理論は急速に受け入れられていくことになりました。

余談ですが、この辺りの事実をもって「ニュートン力学が間違っていた」と表現されることも度々ありますが、私としてはこういった表現は必ずしも適切ではないと思っています。というのも、物理法則は必ず適用範囲があって、その範囲内で近似的に十分な精度で様々な現象を予言できるものが「正しい」物理法則だと考えていて、その意味ではニュートン力学も正しいといえるからです。

太陽をかすめる場合には光の経路がわずかに曲げられるだけですが、太陽のような星がもっと遠方であった場合、あるいは光が銀河や銀河団といった非常に重たい天体の中心部を通過した場合にはもっと劇的な重力レンズ効果がおこります。具体的には、背後の天体が複数に分裂して観測される（図1）、天体からの光が集光され増光する、広がった天体の場合その形状がゆがんで観測される、などの現象がおこります。これらは天体画像を目で見てもその効果が明らかのため、天文学の一般向けの講演やポスターなどでも度々使わ

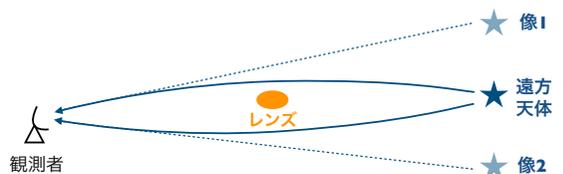


図1 重力レンズ効果が強い場合の模式図。複数の経路の光が観測者に到達するため、遠方天体が複数に分裂して観測される。

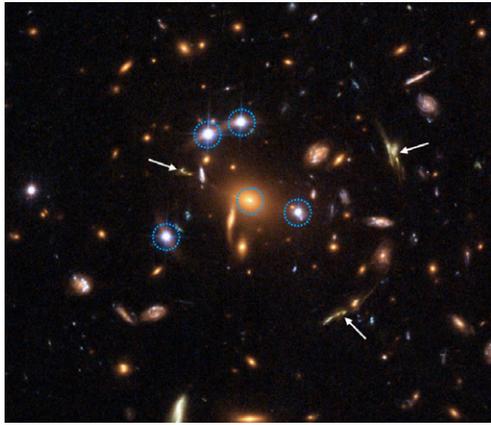


図2 重力レンズ効果が複数観測されている銀河団 SDSS J1004+4112 のハッブル宇宙望遠鏡画像。
(credit: NASA/ESA/K. Sharon/E. Ofek)

れますので、どこかで目にされた方も多いのではないかと思います。

実際に観測された重力レンズの例を図2に示します。この重力レンズは2003年に現在奈良高専教授の稲田直久氏と筆者により発見された、銀河団と呼ばれる非常に重たい天体により引きおこされた重力レンズです。図2の点線で示したものが、銀河団背後のクエーサーと呼ばれる、巨大ブラックホールにガスが落ち込み明るく輝いている天体で、もともと一つのクエーサーが重力レンズで5つに分裂して観測されているのが見てとれます。クエーサーはサイズが非常に小さく現在の望遠鏡では空間分解できませんので、それぞれの重力レンズ像は点状に観測されています。ただしその明るさは、重力レンズによる集光によってそれぞれ10倍から20倍程度、元の明るさよりも増光されて観測されています。一方、図2の矢印で示したのは重力レンズ効果で分裂して観測された銀河団背後の銀河です。銀河は望遠鏡で空間分解が十分可能な大きさをもつので、この画像でも広がった大きさを持つ天体として観測されていますが、重力レンズ効果によってその大きさも元々の大きさよりもずっと大きく観測されていて、またその形状も像によってはバナナのようにある方向に引き延ばされて観測されているのが見てとれます。

2. 重力レンズ効果を利用した遠方天体観測

重力レンズは光を集めて増光する効果があるため、その自然な応用の一つとしては重力レンズをいわば

「天然の望遠鏡」として使い、非常に遠方の天体やもともと非常に暗い天体の観測への利用が考えられます。

こうした重力レンズを利用した遠方天体探査はこれまで数多くの成果をあげてきました。例えば、宇宙の誕生とその進化を理解するために遠方の銀河を探査し、その性質を調べる研究は天文学の王道の一つですが、重力レンズの増光を利用することで、もともと暗すぎて発見が不可能な銀河を同定しその性質を調べることができます。一例として、2013年に米国宇宙望遠鏡科学研究所のコー氏らの研究グループは重力レンズで増光され、また3つに分裂して観測された、133億光年離れた銀河を発見しました。この銀河は、現在においても知られている最も遠方の銀河の一つです。光の速度が有限であることから、遠方の銀河はそれだけ宇宙初期の銀河ということになり、上記の銀河は宇宙誕生から5億年後の銀河の姿を私たちに教えてくれるという意味で貴重な研究対象です。

銀河は典型的には数百億個もの星から構成されています。遠方の銀河についてこれらの個々の星を直接観測できれば、どの程度の質量の星がどのくらい形成されるか、これが宇宙の進化の過程でどう変化してきたか、など宇宙を理解するうえで貴重な情報が得られます。しかし、遠方銀河に対しては個々の星は非常に暗くまた空間的に他の星との分離も難しいために直接観測は不可能です。一方で、重力レンズで特殊な配置がおこると、遠方銀河の一つの星が選択的に何千倍かそれ以上増光され、その星が観測されるという現象がおこります。2018年に筆者も参加する国際研究グループによってこの現象が初めて報告されました。この90億光年離れた単独の星「イカロス」の観測により、それまでの単独の星の最遠方記録を大幅に更新し、重力レンズをうまく利用することで遠方の銀河だけではなく単独の星の観測も可能であることが実証されたのです。

2022年、同じ手法を用いて129億光年離れた単独の星を観測したことが、筆者も参加する国際研究グループによって報告されました(図3)。古英語で明けの明星を意味する「エアレンデル」と名付けられたこの星は、宇宙年齢9億年という宇宙初期の時代の星の様子を私たちにもたらしたことになります。重力レンズによって数千倍かそれ以上増光されたため、これほどの遠方の星であっても観測が可能となったのです。

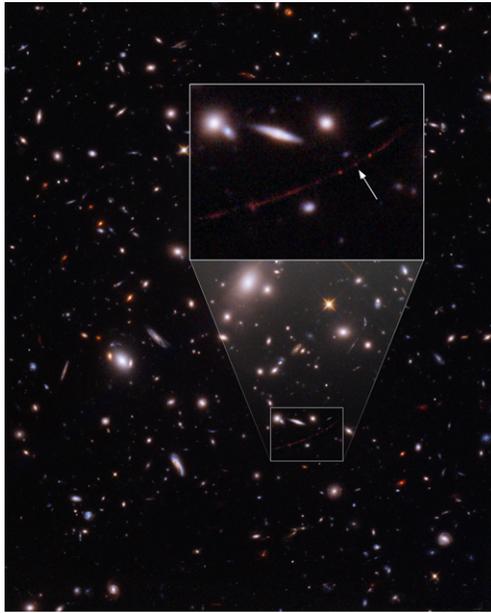


図3 ハッブル宇宙望遠鏡により観測されたエアレンデルの画像。矢印で示されている小さな赤い天体がエアレンデル。(credit: NASA/ESA/B. Welch et al.)

エアレンデルは理論的には重力レンズ効果で複数に分裂していると考えられていますが、その分離角が望遠鏡の分解能よりもずっと小さいため、画像では一つの点状の天体として観測されています。

解析の結果、この星は少なくとも太陽の50倍の質量を持ち100万倍以上明るいと見積もられています。宇宙初期はまだ重元素の量も少ないために、生まれる星の典型的な質量も現在よりも大きいと理論的に予測されていますが、エアレンデルのより詳細な性質については今後の追観測により明らかになると期待されています。

このように、重力レンズによる集光を利用することで、遠方の銀河や星の観測が進み、宇宙の果て、始まりにせまる遠方の星や銀河を観測できるようになってきています。これらの観測では、これまでは主にハッブル宇宙望遠鏡が活躍してきましたが、2021年12月にジェームズ・ウェッブ宇宙望遠鏡が無事打ち上げられたことによりさらに宇宙の果て、始まりにせまることができると期待されています。ジェームズ・ウェッブ宇宙望遠鏡(図4)はハッブル宇宙望遠鏡の約2.5倍の口径の主鏡を有することから宇宙遠方からのより微弱な光をとらえることができるからです。特

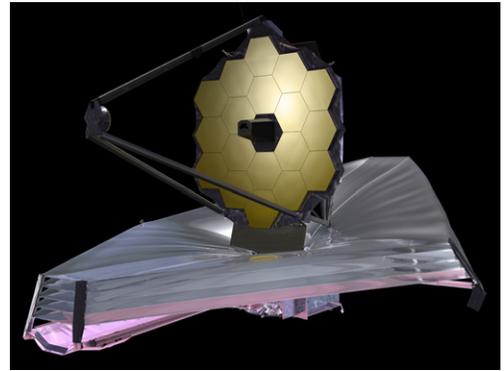


図4 ジェームズ・ウェッブ望遠鏡のイメージ図。(credit: NASA)

に、ジェームズ・ウェッブ宇宙望遠鏡と重力レンズを組み合わせることによって、宇宙開闢後に最初に誕生した、いわゆる初代星や初代銀河といった宇宙最初の天体の発見も可能になるかもしれず、大きな期待が寄せられています。ジェームズ・ウェッブ宇宙望遠鏡は現在望遠鏡の調整や性能試験を順調に進めていて、2022年夏から本格的な科学観測を開始しています。科学観測は世界中から観測提案を受けつけ、厳しい審査を勝ち抜いた観測提案が順次観測されていきます。その中にはエアレンデルを追観測し、星の年齢や重元素量を調べる観測も含まれています。また、ジェームズ・ウェッブ宇宙望遠鏡で銀河団などの効率的に重力レンズを引きおこす重たい天体を詳しく観測し、さらに遠方の星や銀河を探索する観測計画もあります。近い将来、ジェームズ・ウェッブ宇宙望遠鏡による遠方宇宙探索のビッグニュースも期待できますのでぜひ注目していただければと思います。

3. 重力レンズとダークマター

これまでは重力レンズ効果をうける、レンズ天体の背後の遠方天体に着目してきました。一方で、観測された重力レンズ効果の解析によって、重力レンズを引きおこす手前のレンズ天体の質量分布を調べる研究もさかんに行われています。こうした重力レンズの研究もふくめた様々な研究によって、宇宙には目に見える普通の物質の約5倍の量のダークマター(暗黒物質ともよべれます)が存在することがわかっています。重力レンズの観測からレンズ天体の質量分布を推定することで、レンズ天体内のダークマターの存在量やその空間分布を調べることができるわけです。

ただこのダークマターの正体はまだわかっていません。正体のわからないものの存在を仮定することは何か恣意的な印象を持つかもしれませんが、宇宙のいろいろな観測がダークマターの存在を仮定しないとことごとく説明がつかず、一方ある性質のダークマターの存在を仮定することでいろいろな観測がすんなりと統一的に説明がつくことから、ダークマターの存在はかなり確からしいものとして多くの研究者に受け入れられています。一方で、ダークマターを持ちださずに観測を説明しようとする研究ももちろんたくさんあり、例えば遠距離で重力が有名な逆二乗則からずれる、といった可能性を検討した研究もたくさんありますが、ダークマターほどうまく観測を説明できていません。

現在の有力な説は、ダークマターは重力相互作用を我々が知っている普通の物質（水素や炭素など）と同じように行いますが、他の相互作用は全くないしほとんど行わない、というもので、そういったダークマターになりうる素粒子を预言する具体的な理論もたくさんあります。ダークマターは、例えば周りより少し密集した領域があるとその自己重力によってさらに多くのダークマターが集積し塊をつくります。そのダークマターの塊の密度分布はいろいろなダークマターの理論で必ずしも同じではないので、重力レンズの観測でダークマターの密度分布を詳細に測定すればダークマターの正体について何らかの手がかりが得られるかもしれません。

こうした背景にもとづいて、重力レンズを用いてダークマター分布を測定する様々な研究がさかんに行われています。図2や図3のような重力レンズ効果が強い場合にももちろんダークマター分布を再構築できますが、重力レンズ効果が弱く、個々の銀河の形状がわずかに変形する場合でも、多くの銀河の形状を統計的に解析することでダークマター分布を「浮かび上がらせる」ことができます。この分野で活躍しているのが日本の国立天文台が運用するすばる望遠鏡で、視野の広い画像を取得できることから多数の銀河を一度に観測しその形状を測定することができます。

図5はすばる望遠鏡の広視野観測の重力レンズ解析から得られたダークマターの大域的分布です。このように、現在ではダークマターが存在するかどうかだけでなく、その空間分布も測定することができます。こうした空間分布の測定をより広い

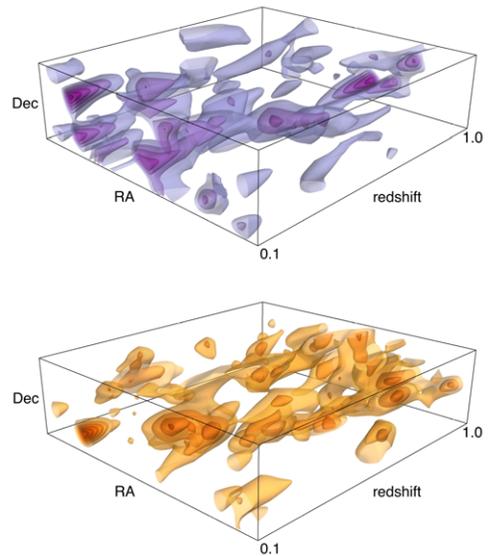


図5 上：すばる望遠鏡で観測された画像の重力レンズ解析から得られたダークマター分布の三次元地図。色の濃い領域がダークマターがより密集している領域。「redshift」が奥行き方向に対応している。下：同じ地域の銀河分布の三次元地図。

(credit: 東京大学 / 国立天文台 / 大栗真宗)

天域で行い、その分布がどの理論と適合するかを定量的に調べることでダークマターの正体にせまっていくことが期待されています。

4. 今後の展望

本稿では重力レンズが様々な形で観測され、宇宙の研究に使われているのを見てきました。今後は、先述のようにジェームズ・ウェッブ宇宙望遠鏡と重力レンズを組みあわせて、さらに遠方の宇宙を探索し宇宙の始まりにせまっていく研究が加速的に進むでしょう。ダークマターの分布を調べる研究は、今後欧州が主導するユークリッド衛星や、米国が主導するチリの大型地上望遠鏡ルービン天文台の始動によって、さらに精密なダークマター地図が広い天域にわたって得られていくと期待されています。ちなみに私の所属する千葉大学先進科学センターでは飛び入学制度を実施しており、宇宙の研究に必要な物理学についても手厚い教育を受けることができます。こうした最先端の研究にいち早く取り組みたい高校生はぜひ検討してもらえればと思います。