

ブラックホールの自転による超高光度円盤の歳差運動を世界で初めて実証

ブラックホール周囲のガスの渦巻きである超高光度降着円盤が、ブラックホールの自転によって歳差運動することを、一般相対性理論に基づく大規模数値シミュレーションで実証しました。この結果、超高光度降着円盤の周期的な光度変動が、ブラックホールの自転に起因している可能性が示されました。

ブラックホールの周囲には、強大な重力によってガスが渦を巻いて形成される「降着円盤」が存在します。この降着円盤は、宇宙で最も効率的なエネルギー変換機構の一つであり、ブラックホール周辺で起こる光の放射やジェット（プラズマの噴出）と考えられています。ここで、ブラックホールが自転していると仮定すると、降着円盤が、回転するコマの軸がぐらつくような歳差運動を起こす可能性があり、これまで光度の低い円盤について調査・実証が進められてきました。しかし、強力な放射を生み出す超高光度降着円盤でも同じ現象が起こるかどうかは、まだ解明されていませんでした。

本研究では、一般相対性理論に基づく大規模な放射電磁流体力学シミュレーションを実施し、超高光度降着円盤がブラックホールの自転によって歳差運動することを世界で初めて実証しました。また、この歳差運動が、ブラックホールから噴出するジェットや放射の方向を周期的に変動させることが明らかになり、これまで原因が不明だった超高光度降着円盤の周期的な光度変動が、ブラックホールの自転に起因している可能性が示されました。

今後、さらに長期間のシミュレーションと観測データの比較によりブラックホールの自転の有無を検証することで、これが宇宙現象に与える影響が解明されると期待され、ブラックホールの時空構造や一般相対性理論のさらなる理解にも貢献すると考えられます。

研究代表者

筑波大学計算科学研究センター

朝比奈 雄太 助教

研究の背景

ブラックホールの周りには、その強大な重力に捉えられたガスが渦を巻いて回転する降着円盤が形成されます。この降着円盤は、宇宙で最も効率的なエネルギー変換機構の一つであり、ブラックホール周辺で起こる光の放射やジェット^{注1)}の発生源と考えられています。ブラックホールが自転^{注2)}していると仮定すると、降着円盤は、回転するコマの軸がぐらつくような歳差運動を起こし、その結果、放射やジェットの時間変動が引き起こされる可能性があります(参考図)。もしこれが検証されれば、ブラックホールが自転していることの強力な証拠となります。近年、光度が低い降着円盤の歳差運動については、M87 銀河中心部のブラックホールの観測などで実証が進んでいますが、超高輝度 X 線源^{注3)}に存在すると考えられる超高光度降着円盤^{注4)}のように、極めて光度の高い降着円盤においても同様の現象が見られるかどうかは、解明されていませんでした。

本研究チームは、物質が、ブラックホール周囲の歪んだ時空の中でどのように運動するかを、放射の伝搬や電磁場の変動と同時に解析する、天文学における最先端の数値シミュレーション技術として、一般相対論的放射電磁流体力学シミュレーションを長年にわたって開発してきました。この手法は、従来法とは異なり、放射の影響を考慮することで、非常に明るい円盤の挙動が解析できます。そこで今回、これを用いて超高光度降着円盤の挙動について解析を行いました。

研究内容と成果

本研究では、特に光度の高い超高光度降着円盤が、ブラックホールの自転によって歳差運動を起こすかどうかを解明するため、大規模な一般相対論的放射電磁流体力学シミュレーションを実施しました。その結果、従来の低光度の降着円盤だけでなく、超高光度円盤も歳差運動をすることを世界で初めて実証しました。さらに、この歳差運動により、強力な放射やジェットの噴出方向も、ブラックホールの自転軸の周りを回るように変化することが明らかになりました。この現象により、一部の超高輝度 X 線源で見られる 1 秒未満から数秒の周期的な光度の変化が説明可能であることから、超高輝度 X 線源のブラックホールが自転している可能性を強く示唆しています。

今後の展開

ブラックホールの自転によって引き起こされる降着円盤の歳差運動は、これまで主に光度の低い円盤で研究されてきましたが、本研究により、最も明るい降着円盤である超高光度円盤でも歳差運動が起こることが明らかになりました。今後はさらに長時間にわたるシミュレーションを行い、観測データと比較することで、ブラックホールの自転の有無や速度を検証することが必要です。これにより、自転するブラックホール周辺の時空の構造や、そこで起こる現象の理解が進み、一般相対性理論のさらなる検証にも貢献すると期待されます。

参考図

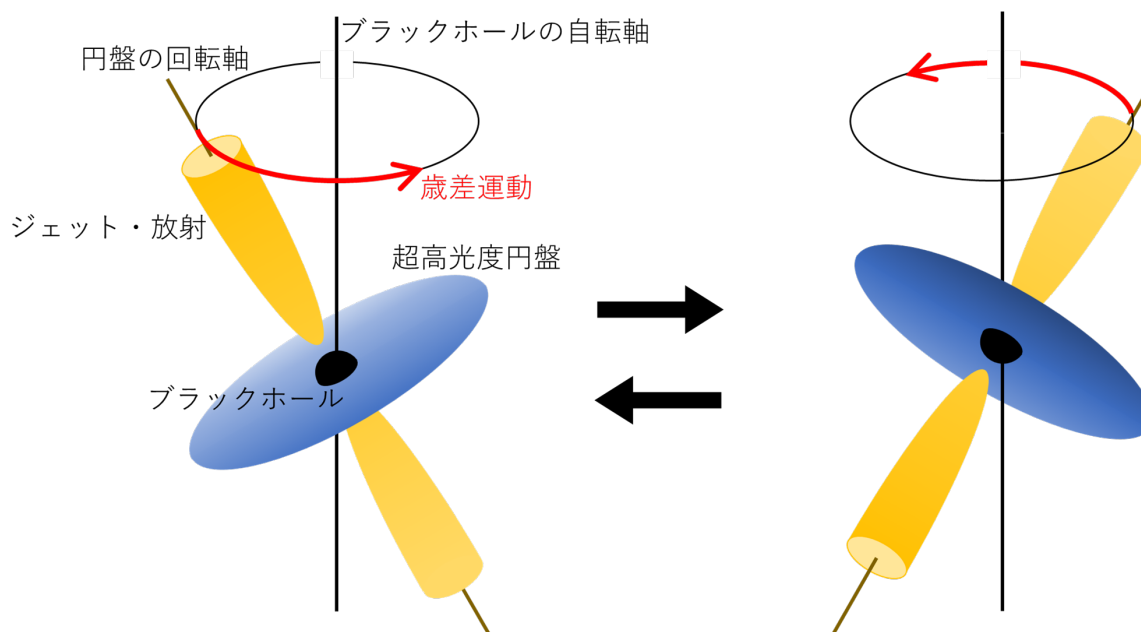


図 歳差運動する超高光度円盤の模式図

自転するブラックホールの周囲では、回転するコマの軸がぐらつくように降着円盤の回転軸がブラックホールの自転軸の周りを周回する(歳差運動)。円盤の歳差運動によってジェットや放射の噴出方向が変化する。歳差運動による時間変化は、ブラックホールが自転していることの証拠となる。

用語解説

注1) ジェット

ブラックホール周辺から光速に近い速度で噴き出すプラズマの流れ。ブラックホール天体が示す高エネルギー現象の一つ。

注2) ブラックホールの自転(スピン)

ブラックホールが持つ三つの基本的性質(質量、自転(スピン)、電荷)の一つ。自転によって周囲の時空が引きずられ、降着円盤の歳差運動を引き起こされる。

注3) 超高輝度X線源

太陽の数百万倍以上のX線を放つ、非常に高光度な天体。中心には超高光度降着円盤に取り囲まれたブラックホールが存在する可能性が高い。

注4) 超高光度降着円盤

光の放射圧がブラックホールの重力に匹敵するほどの光度を持つ最も光度の高いタイプの降着円盤。

研究資金

本研究は、科研費による研究プロジェクト(23K03445、21H04488)および「富岳」成果創出加速プログラム(JPMXP1020230406)、HPCIシステム利用研究課題(課題番号:hp240054, hp240219)の一環として実施されました。また、計算にはスーパーコンピュータ「富岳」(理研)、アテルイII(国立天文台)、Oakforest-PACS(東京大学、筑波大学)、Wisteria/BDEC-01 Odyssey(東京大学)を利用しました。

掲載論文

【題名】 General relativistic radiation-MHD simulations of Precessing Tilted Super-Eddington Disks

(歳差運動をする傾いた超エディントン円盤の一般相対論的放射電磁流体力学シミュレーション)

【著者名】 Y. Asahina and K. Ohsuga (Center for Computational Sciences)

【掲載誌】 *The Astrophysical Journal*

【掲載日】 2024年9月17日

【DOI】 10.3847/1538-4357/ad6cd9

問い合わせ先

【研究に関すること】

朝比奈 雄太 (あさひな ゆうた)

筑波大学 計算科学研究センター 助教

URL: <https://www2.ccs.tsukuba.ac.jp/public/asahinyt/>

【取材・報道に関すること】

筑波大学 計算科学研究センター広報・戦略室

TEL: 029-853-6260

E-mail: pr@ccs.tsukuba.ac.jp