

クエーサーの明るさの変動に特性を発見

概要

京都大学大学院理学研究科 名越俊平 博士課程学生、岩室史英 同准教授の研究チームは、クエーサー^{※1}の明るさの時間変動が、天体が発する特定の輝線^{※2}の強さと関係していることを明らかにしました。

クエーサーの明るさはランダムに変動することが観測的に知られておりましたが、その規則性は未解明でした。今回、Sloan Digital Sky Survey^{※3}による約1万天体のスペクトル^{※4}から、輝線の強度と明るさの変動との関係性を調べました。その結果、ある時点での酸素と鉄の輝線強度が、後の明るさの変化量を決める重要な要素であることを発見しました。さらに、その輝線強度や明るさが、長期的には一定の相関関係を保ちながら変化していることを明らかにしました。

本研究結果は、クエーサーのランダムな変動がスペクトルから予測できる可能性を示しました。また、クエーサーの大規模な変動は、平均的な明るさを中心とした振動現象であることが示唆されました。つまり、スペクトルにはその天体の典型的な明るさの情報が含まれていると考えられるため、本結果はクエーサーの質量獲得の歴史を知る上で重要な考察を与えることが期待されます。

本研究成果は、2022年8月30日に日本の国際学術誌「Publication of the Astronomical Society of Japan」にオンライン掲載されました。



図1：クエーサーのイメージ図（画像生成AI、Stable Diffusionによる出力）。中心に超巨大ブラックホールがあり、その周りを取り囲むガスが円盤を形成し明るく輝いている。

1. 背景

宇宙に無数に存在する銀河は、超巨大ブラックホールと呼ばれる、太陽 1 億個分程度の質量のブラックホールを普遍的に保有していることが知られています。しかし、ブラックホールがそれほどの質量に成長した過程は未解明であり、天文学における重要な問いの一つになっています。

超巨大ブラックホールは、周囲のガスを取り込むことで重力エネルギーを光へと変換し、非常に明るく輝いている姿が観測されます。そのような天体はクエーサーと呼ばれ、非常に遠方からも見えることから宇宙の歴史を知るために重要な天体として調べられてきました。クエーサーは超巨大ブラックホールが今まさに成長している姿と言えるので、その性質を調べることは超巨大ブラックホールの形成過程を知る上で肝要であると考えられています。

近年、2000 年代から始まった大規模観測のデータが蓄積してきたことによって、クエーサーの可視光での明るさが数年で大きく変化 (1~2 等級) する現象が数多く発見されてきました。このことは、中心ブラックホールの質量獲得の激しさ (明るい時には中心のブラックホールがより多くの質量を獲得し、暗い時には質量の獲得が穏やか) が短期間でダイナミックに変化することを表しており、超巨大ブラックホールの成長の歴史を知る上で重要な現象と言えます。大規模な明るさの変動の解明へと近づくためには、クエーサーの明るさの変動と、他の特徴との結びつきを調べる必要があると考え、本研究が始まりました。

2. 研究手法・成果

本研究では、明るさの変動が大きい約 1 万天体のスペクトルを用いた大規模な解析を実施しました。Sloan Digital Sky Survey によって取得された可視光スペクトルから、鉄 (FeII) 、酸素 ([OIII]5007) 、水素 (H β) の輝線強度として等価幅^{*5}を測定し、天体ごとに輝線強度と後の明るさの変化量を図示しました (図 1)。図 1 によって、ある時期のスペクトルから計算された輝線強度が、その後の明るさの変化と密接に関係していることが発見されました。

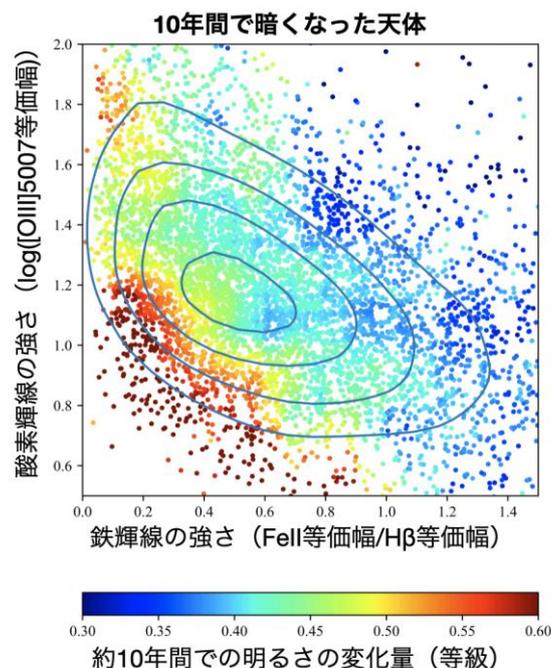


図 2：10 年後の明るさ変化を色で表した、クエーサーの輝線強度を表す散布図。カラーバーの値から、左下に分布する天体ほど暗くなりやすく、右上に分布する天体ほど変化が少ないことがわかります。

次に、別の時期に取られた同一天体のスペクトル同士を比較することで、各天体の明るさの変動に伴う輝線強度の変動量を調べました（図 2）。図 2 を見ると、クエーサーが暗くなる時には左下から右上へと遷移し、明るくなる時には右上から左下へと遷移しています。さらに、平均的には酸素輝線と鉄輝線が反相関^{*6}を示すような分布を示していることが分かります。つまり、各天体の明るさの変動というのは、平均的な状態を境にして暗い状態と明るい状態を振動するように遷移しているということが示唆されました。

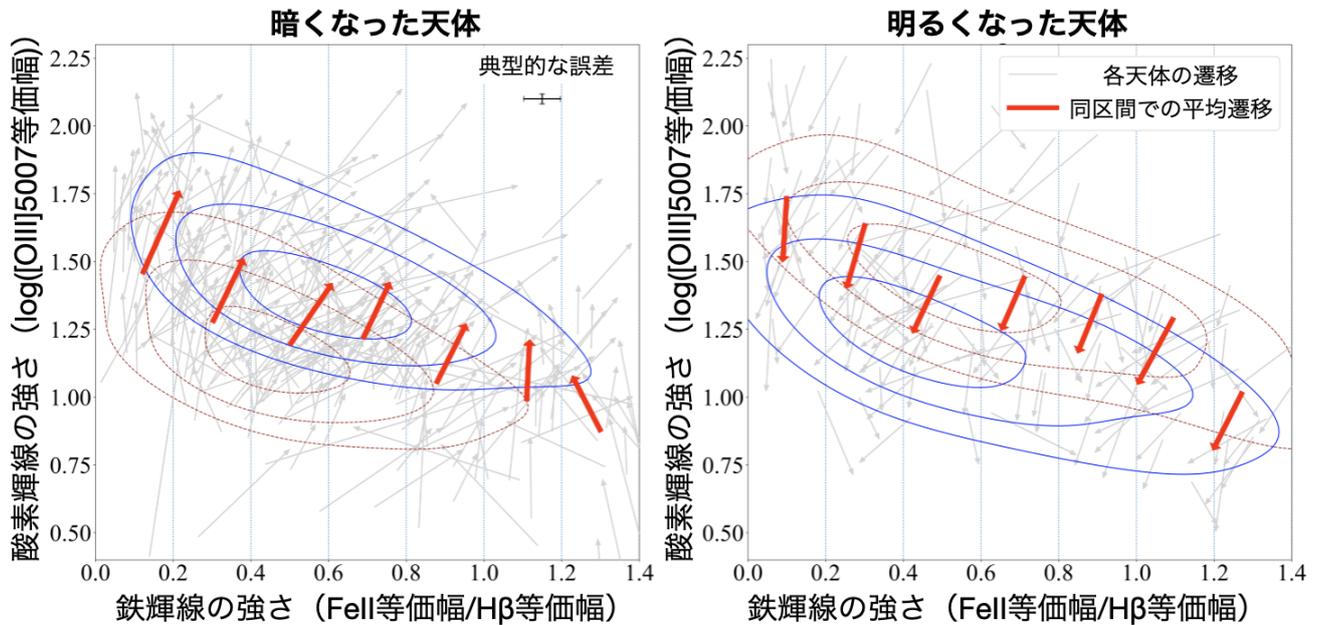


図 3：クエーサーの輝線強度がどのように変化したかを矢印の始点と終点で表した図。各天体の遷移は灰色の矢印で表しています。横軸で 7 等分して、各領域に含まれる天体で平均した遷移を赤色の矢印で示しています。明るい時の天体の分布が茶色の等高線で、暗い時の天体の分布が青い等高線で表されています。暗くなった天体は図の左下から右上に向かって遷移し、明るくなった天体は図の右上から左下に向かって遷移していることが分かります。

本研究の最大の成果を簡潔に言うと、クエーサーの酸素輝線の等価幅と鉄輝線に対する強度比がその後の明るさの変動と密接に結びついているという事実を発見したことです。さらに、クエーサーの大規模な変動が、その天体にとっての平均的な状態を中心に振動しているということが示されたことです。このことから、近年数多く報告されている明るさの変動現象は一時的なものではなく、繰り返し起きてきた現象であり今後も繰り返されることが示唆されます。

3. 波及効果、今後の予定

本研究結果から、ランダムだと思われていた明るさの変化が、スペクトルの情報だけから予測できる可能性が示されました。さらに、各天体の平均的な明るさからどの程度逸脱しているのかが推定できるため、クエーサーの質量獲得の歴史の中で、現在はどの程度活発に成長している段階なのかが議論できます。つまり、本結果は超巨大ブラックホールの成長過程を知る上で重要な考察を与えることが期待されます。

4. 研究プロジェクトについて

本研究は、日本学術振興会 科学研究費助成事業「特別研究員奨励費(JP22J13428)」の支援のもと、実施されました。

<用語解説>

※1 **クエーサー**：銀河中心にある超巨大ブラックホール（太陽の100万倍以上の質量のブラックホール）が光り輝いている状態。

※2 **輝線**：発光元素特有の波長を持つ光のこと。鉄輝線、酸素輝線、水素輝線はそれぞれ鉄、酸素、水素元素が由来の輝線のこと。

※3 **Sloan Digital Sky Survey**：全天の25%以上を対象とした観測プロジェクトであり、単一のプロジェクトとしては最大数のクエーサーを同定している。

※4 **スペクトル**：光のエネルギーを波長ごとに分解したもの。

※5 **等価幅**：輝線の強度を表す指標のこと。輝線の周辺の波長域で、輝線成分を連続光成分で割った値で表す。

※6 **反相関**：二つの変数の相関が負の値を示すこと。ここでは、酸素輝線が強くなるほど鉄輝線が弱くなる関係。

<研究者のコメント>

蓄積された時系列データを使った研究は、今後の天文学における大きなトレンドになると思います。特に、クエーサーの時間変動は数年単位のゆっくりとしたものが多く、数十年以上の長時間でどのように変化するのかが未解明です。現在着目されていないデータも多数あり、今後の展開も楽しみです。（名越俊平）

<論文タイトルと著者>

タイトル：The relation between quasars' optical spectra and variability（クエーサーの可視光スペクトルと明るさの変動性との関係）

著者：Shumpei Nagoshi and Iwamuro Fuminide

掲載誌：Publications of the Astronomical Society of Japan DOI：10.1093/pasj/psac063