

The Nature of Super-Eddington Outflow around Black Holes (ブラックホール周りの超エディントン噴出流の特性)

竹内 駿

中心光源周りのガスのダイナミクスにおいて、中心光源の重力場によって働く重力（引力）とその輻射場によって働く輻射力（斥力）が釣り合う光度をエディントン光度と呼ぶ。エディントン光度は中心光源が自身の重力場により周囲のガスを束縛できる限界光度を示しており、つまりは天体の古典的な限界光度として知られている。ところが実際には、高光度青色変光星やウォルフ・ライエ星、古典新星、超新星、超光度 X 線源、活動銀河核など、エディントン光度を超えて輝く天体がいくつか報告されている。そのような超エディントン天体では、強烈な輻射によって発生するガス放出やエネルギー放出が星形成活動の抑制や金属汚染といったフィードバック機構をもたらす可能性を持っており、星形成から宇宙進化まで宇宙の多階層で多大な影響を与えていると考えられている。このように輻射は天体の情報を観測量として伝達するだけでなく、天体自身の運動量輸送やエネルギー輸送にも寄与しており、宇宙物理学において本質的な役割を担っている。

超エディントン天体の中でも、ブラックホール天体における超エディントン現象（超エディントン降着流）は特に活動的な現象である。中心ブラックホールの重力エネルギーの一部を放出することで、距離スケールとして約 1 万倍の活動銀河核自身の進化にも影響を与えるほどである。また、超エディントン降着流における噴出流は本質的に高密度であるため、その放射スペクトルにも大きく影響してくる。

一方で、超エディントン天体現象は約 30 年前から議論されてきたにもかかわらず、定性的な研究がほとんどであり、十分理解できたとはいえないのが現状である。というのも、このダイナミクスを理解するには、放射・吸収・散乱といった物質と輻射の相互作用と輻射の非当方性による多次元性の時間発展を解く必要がある。さらに天体のダイナミクスには磁場の効果も無視できないケースが多々あり、解析的な研究が困難だったためである。本学位論文ではブラックホール周りの超エディントン降着流が生み出す噴出現象（超エディントン噴出流）に着目し、近年の計算機の発達によりようやく可能となった大局的輻射流体および輻射磁気流体シミュレーションを実行して明らかになった三つの事実（輻射磁気流体ジェット、クランプ状の噴出流、クランプを生み出す輻射流体不安定）について論じたものである。

1. 輻射磁気流体ジェットモデルの提唱

宇宙ジェットは原始星やマイクロクエーサー、活動銀河核、そしてガンマ線バーストといった宇宙の幅広い階層で見られる細くしぼられたプラズマジェット流である。宇宙ジェットの発見は約 1 世紀前までさかのぼり、その形成機構についても数多くのアイデア

が提唱されてきたものの、統一的な理論はまだ構築されていないのが現状である。現在は、輻射流体ジェットモデルと磁気流体ジェットモデルの 2 つのモデルがよく議論されている。輻射流体ジェットモデルは、加速は説明できる一方で収束は一般に説明できないため、加速と収束の両方が自然に説明できる磁気流体ジェットモデルの方がジェットモデルとして有力である、というのが従来の定説である。しかし輻射場と磁場を解析的に同時に解くことが困難なため、輻射エネルギーが優勢な極めて明るいブラックホール降着流から噴出するジェットに対しては、どちらのモデルが正しいのかという問題に対する決定的な答えは与えられていなかった。

そこで我々は超エディントン降着流の大局的 2 次元輻射磁気流体シミュレーションを世界に先駆けて実行し、磁場によって収束された輻射圧加速ジェットが噴出していることを発見した。強烈な輻射力がジェットを相対論的速度 (光速の約 6 割) まで加速し、降着流の動径方向には磁場が効率的に働いてジェットを収束していることを明らかにした。従来の低光度降着流の磁気流体ジェットと同様に、超エディントン降着流からも磁気タワーが形成されることもわかった。超エディントン降着流に付随するジェットの領域では輻射エネルギーが磁気エネルギーと比べ約 20 倍上回っているにもかかわらず、そのジェットのダイナミクスに磁場が効いていることは一見奇妙である。しかしながら、輻射が降着流の鉛直方向に集中して流れることで、動径方向に対して磁場が効果的に効くことを明らかにした。強烈な輻射力によって加速される超臨界降着流のジェットは、輻射が効かない標準円盤や低光度降着流のジェットと比べ、ジェットの速度がより光速近くまで加速される。これより、ジェット形成にとって磁場の存在は本質的であり、輻射と磁場がカップルして初めて相対論的なジェットが形成されうることを示した。この結果は、降着流の光度が高いときに相対論的ジェットが形成されるというマイクロクエーサーの観測事実とも符合する。

2. クランプ状の噴出流の発見

紫外線や X 線観測により、ブラックホール天体に付随した噴出流の存在は広く一般的なものとなっている。噴出流は吸収線として観測され、その速度はしばしば相対論的な速度 (光速の 1 割程度) にも達するものもある。特に興味深い観測的事実として、超光度 X 線源や活動銀河核において吸収スペクトルが激しく時間変動していることが挙げられる。これはクランプ状の噴出流の存在を示唆している。しかしながら、降着流に付随したクランピーな噴出流の研究は現象論的なモデリングに留まっており、その形成メカニズムを理論的に示した研究はこれまで報告されていない。

そこで我々は超エディントン降着流における噴出流を詳細に調べるため、これまでにない高解像度かつ大規模な計算ボックスを用いた大局的 2 次元輻射磁気流体シミュレーションを実行した。その結果、超エディントン降着流から普遍的にクランプ状のガスが広角に噴出されることを発見した。解析の結果、クランプのサイズは 10 シュバルツ

シルト半径程度であり、電子散乱に対する光学的厚みがおよそ 1 となるサイズであることが分かった。クランプはおよそ光速の 1 割の速度で放出される。このクランプ状の噴出流は中心ブラックホールの質量に依存せず形成される。またシミュレーションから得られたデータを基に見積もったクランプの電子密度や電離パラメータ、カバリングファクター、フィリングファクターが活動銀河核の幅広い輝線領域 (BLR) の観測量とよく一致することを示した。

さらにクランプ形成機構の特徴を調べたところ、輻射流体力学的なレイリー・テイラー不安定が発生する条件を満たしていることを見出した。一方でクランプ形成における磁場の効果を調べるために、磁場を無視した輻射流体シミュレーションを実行した。結果、磁場がない計算でもクランプが形成されることがわかり、クランプ形成にとって磁場は本質でないことが分かった。

3. クランプ状の噴出流を生み出す輻射流体力学不安定の解明

前述の解析で明らかになった超エディントン降着流からのクランपीな噴出流であるが、その形成機構は十分に明らかになっていない。前述のシミュレーションにおけるクランプは、ガスの対流運動や磁場の存在など複雑な環境に置かれており、その形成機構を調べることへの妨げとなっている。そこで我々はよりシンプルな環境、一様重力かつ磁場なしの超エディントン平行平板大気を設定し、超エディントン大気の安定性を 2 次元輻射流体シミュレーションを用いて検証した。その結果、初め輻射流体力学的なレイリー・テイラー不安定が発生して擾乱が成長して、最終的にクランプサイズの波長の密度揺らぎが支配的になることを発見した。相関解析より、その特徴的な波長は、前述のクランプと同様に、電子散乱に対する光学的厚みが 1 になるサイズに相当することが分かった。輻射圧とガス圧の反相関が特徴的な波長をもたらす原因であり、前述のクランपीな噴出流も同様の状況にあることを確認した。この光学的厚み 1 のサイズを生み出す輻射流体力学不安定は、超光度 X 線源や活動銀河核といったブラックホール天体を始め、高光度青色変光星、ウォルフ・ライエ星、古典新星に対しても発生していることを示唆する。

以上