

# 超臨界アウトフローとはなにか — 高光度ジェット, BLRの起源？



竹内 駿

〈東京都江戸川区〉

e-mail: takeuchi.shun@gmail.com

超臨界降着流とはエディントン限界を超えて落ち込む流れのことであり、成長期の超大質量ブラックホールや超大光度X線源、宇宙ジェットの謎をひも解く鍵の一つだと考えられている。その物理を理解するには物質と輻射場と磁場の相互作用を解く必要があり、計算機性能の向上によりようやく現実的な議論が可能になってきた。この多次元数値計算から、超臨界降着流に付随するガス噴出の姿が明らかになりつつあり、1970年代から始まった超臨界降着流の理論研究は新たな局面を迎えている。本稿では大局的輻射磁気流体シミュレーションで明らかになった新しい噴出現象について紹介する。

## 1. はじめに

中心光源周りのガスの動力学において、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）が釣り合う輻射光度をエディントン（Eddington）光度と呼ぶ<sup>1)</sup>。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最大の輻射光度を表しており、つまりは天体の古典的な限界光度として知られている。またその時の質量降着率はエディントン降着率と呼ばれ、ブラックホールをはじめ降着天体の質量増加の目安としてよく用いられている。

ただし、以上の話は理想化された球対称降着の状況下で成り立つことに注意する必要がある。円盤状降着の場合、輻射がガス密度の低い円盤上下方向に放射されることにより超エディントン（super-Eddington）光度、そして超エディントン降着が可能となる。

1970年代に N. I. Shakura と R. A. Sunyaev によって提唱されたブラックホール降着流モデルは、輻

射スペクトルを降着流の半径の温度に対応した黒体輻射スペクトルの重ね合わせで示し、多くのブラックホール天体の観測の説明に成功した。彼らは降着流を幾何学的に薄い円盤状と仮定し、半径方向の一次元モデルとして構築した。このように簡易化された降着流モデルは「標準円盤モデル」と呼ばれ、理論屋・観測屋問わず多くの宇宙物理学者の支持を得ている。

しかし標準円盤モデルにはその簡易化による限界があり、超エディントン降着期にある極めて高光度な降着流—超臨界降着流—や、極めて低光度な降着流—放射非効率降着流（RIAF: radiatively inefficient accretion flow）—には標準円盤モデルを適用できないことがわかっている。

本稿ではブラックホール超臨界降着流に焦点を置き、その特徴と筆者の研究で明らかになった新たな描像について紹介する。

## 2. ブラックホール超臨界降着流

### 2.1 光子捕捉とアウトフロー

超臨界降着流には大きく二つの特徴が存在す

る。光子捕捉とアウトフロー（噴出流）である。

エディントン降着率を超えてガスが降着する超臨界降着流は、高密度であり光学的に厚い。高温状態にある超臨界降着流では特にガスの電子との散乱が重要となり、降着流内部で発生した光子は降着ガスとの散乱で直進することができないため、降着流表面に伝播するまでに時間を要する。その結果、光子が降着流表面から放出される前に、降着ガスもろともブラックホールに飲み込まれる状況が発生する。この現象を光子捕捉と呼ぶ。標準円盤モデルではその輻射光度はブラックホールへの質量降着率に比例するが、超臨界降着流では光子捕捉のため輻射光度はエディントン光度におおよそ頭打ちになる。

一方、超臨界降着流は輻射圧が他の圧力に対して卓越しており、主にガス圧で支えられている標準円盤モデルと比べ鉛直方向に膨らんだ構造となる。さらに降着ガスの一部が、降着流自身の輻射により放出される状況が発生する。この現象をアウトフローと呼ぶ。超臨界降着流から吹くアウトフローの質量噴出率はエディントン降着率を上回るほどであり、そのような超臨界アウトフローは、大量の質量や運動量、エネルギーを周辺環境にまき散らす。

図1に超臨界降着流の概念図を示そう。超臨界降着流のもつこれらの特徴には本質的にガスと輻射の相互作用、つまり輻射輸送が関係していることに注目していただきたい。

## 2.2 課題の背景と方策

実のところ、超臨界降着流はShakuraとSunyaevの標準円盤モデルの論文でも、現象論的ではあるが、議論されている。40年近くの研究の歴史がある超臨界降着流だが、十分理解できたとは言いがたいのが現状である。これは複雑に絡み合うその物理機構に起因している。

まずは先に述べた輻射輸送である。輻射は観測者に天体の情報を伝達するだけでなく、時に天体そのものの運動量輸送やエネルギー輸送にも大き

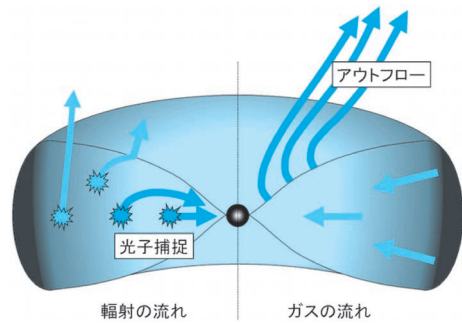


図1 ブラックホール超臨界降着流の概念図。左側は輻射の流れ、右側はガスの流れを表している。ブラックホール近傍では、降着流内部で生成された光子は降着流表面に伝播される前にブラックホールに降着ガスもろとも飲み込まれる（光子捕捉）。一方、ブラックホール近傍ではエディントン光度を超えるほどの大量の輻射が放出されるため、自身の輻射により降着ガスの一部が吹き飛ぶ（アウトフロー）。

く寄与し、その振る舞いを支配する。その物理を理解するには、放射・吸収・散乱といった物質と輻射場の相互作用を考慮した流体（輻射流体）の時間発展を解く必要がある。また、降着現象をもたらす角運動量輸送をはじめ、ガスの加熱や後述のジェット形成にとって本質的な物理である磁場も無視することはできない。

さらに超臨界降着流はその特徴（光子捕捉とアウトフロー）から多次元計算が要求される。つまり、多次元の輻射磁気流体力学が超臨界降着流を記述する基礎方程式であり、解析的な研究は困難を極める。

ここで強力な研究手法として挙がるのが数値シミュレーションである。対象とする系の支配方程式を数値的に解くことで、解析的研究が困難な対流や降着・噴出といった多次元現象、状態遷移や準周期的運動といった非定常現象を明らかにすることが可能となる。数値シミュレーションを用いた研究は計算機ハードウェアや最適化、並列化といった計算科学特有の知識が別途必要となるが、強力なツールであることには違いない。

## 2.3 輻射磁気流体研究

学部の卒業研究で超臨界降着流のアウトフローについてまとめた筆者は、超臨界降着流の輻射磁気流体力学モデルについて興味をもっていた。当時の超臨界降着流の理論研究は輻射流体力学的な研究が主流であり、磁場はほぼ無視されていた。一方で、降着流にとって磁場はその動力学に多大な影響を与えていることが磁気流体シミュレーションで明らかになってきたため、輻射場と磁場を両方取り入れてこそ、より現実的な超臨界降着流のモデルが構築できるはずだと筆者は考えていた。

そのような中、筆者が大学院に入学してまもなく、国立天文台の大須賀健氏らがブラックホール降着流の大局的輻射磁気流体シミュレーションを世界に先駆けて発表した<sup>2)</sup>。質量降着率の違いにより降着ガスに対する輻射の寄与が変化し、従来の研究で独立して調べられてきた三つの降着流モード (RIAF, 標準円盤, 超臨界降着流) を一つのシミュレーションコードで見事再現した研究である。この時期が幸いしたこともあり、大須賀氏、指導教員の嶺重氏との共同研究が始まった。輻射磁気流体シミュレーションを用いた、ブラックホール超臨界降着流が生み出す噴出現象の研究だ。

## 3. ハイブリッド・ジェット

### 3.1 宇宙ジェット形成論—40年来の謎—

宇宙ジェットは原始星や近接連星系、活動銀河核 (AGN: active galactic nucleus), 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絞られた高速プラズマ流である。特に原始星を除いたジェットは、相対論的な速度まで加速されていることが知られている。

宇宙ジェットの発見は、約1世紀前のH. D. Curtisによる楕円銀河M87の光学ジェットの観測までさかのぼる。その形成機構については1970年代から数多くのアイデアが提唱され、コ

ンパクト天体周りの降着流から噴出しているという理論モデルが今日では広く受け入れられている。しかし、肝心の加速や収束のメカニズムはいまだ論争中であり、統一的な理論はまだ構築されていないのが現状である。

その中で有力な理論モデルが、磁気流体ジェットモデルと輻射流体ジェットモデルである。磁気流体ジェットモデルは降着流の磁場によりジェットを駆動させるモデルである。ガスが電離状態にある降着流内部では、磁場が増幅されつつガスが降着する。磁気流体ジェットはいくつかタイプがあるが、その一例としては、降着流内で増幅された磁場の圧力により降着ガスの一部を上下方向にアウトフローとして噴出させ、磁気ピンチ効果によりアウトフローを収束させるものがある。

一方、降着流の輻射によってガスを加速するモデルが輻射流体ジェットモデルである。輻射は光学的に薄い (ガス密度の低い) 降着流上下方向に放射されやすいために、降着流上下方向にアウトフローが噴出される。しかし、輻射流体ジェットモデルの一番の問題点はアウトフローの収束機構だ。輻射は降着流の内縁ほど強く放射されるため、アウトフローは自然と放射状に近くなってしまう。なお、この輻射流体ジェットモデルにはブラックホールの重力を凌駕する大量の輻射が必要である。そのため本ジェットモデルには超臨界降着流が必然的に要求される。

では、どちらのジェットモデルが正しいのだろうか。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ほう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。たしかに輻射の寄与が期待できない低光度降着流 (RIAF) では、磁気流体ジェットモデルが最も自然だろう。しかし高光度降着流から噴出しているジェットは依然として謎である。輻射場と磁場を解析的に同時に解くことは困難であるため、輻射に支配され

た高光度降着流，つまり超臨界降着流から噴出するジェットに対しては，この40年間決定的な答えは与えられていなかった。

### 3.2 輻射磁気流体ジェット

この歴史的難問に取り組むべく，筆者らはブラックホール超臨界降着流の軸対称二次元輻射磁気流体シミュレーションを実行し，その振る舞いを調べた<sup>3)</sup>．計算モデルとしては，従来のRIAFの磁気流体シミュレーションと同様に，ブラックホールの周りに弱いポロイダル磁場をもつ回転ガストラスを初期に配置し，その時間発展を追うものである．磁気流体シミュレーションと異なる点は輻射輸送を同時に解いているところであり，物質と輻射場と磁場が相互作用する環境でのアウトフローの振る舞いを明らかにする試みである．

その計算で得られた結果は意外なものであった．磁場によって収束された輻射加速アウトフロー，ハイブリッド・ジェットの発見である．

超臨界降着流とそれに付随するジェットの鳥瞰図を図2に示す．鳥瞰図のボックスの一边は約150シュバルツシルト (Schwarzschild) 半径である．ここでシュバルツシルト半径とはブラックホールの半径を指す．トラス状にあるのは高密度ガス (つまり降着流) であり，降着流の上下方向に伸びる円錐状の領域でガスが加速されていること (つまりジェット) を示している．ジェットは光速の6割程度まで加速されている．

ジェットの加速と収束のメカニズムを定量的に見てみよう．図3の左図にジェットの加速方向 (鉛直方向) の力の分布を示す．網掛け部分はガスの速度が脱出速度を超えている領域，実線と破線はそれぞれ加速に寄与する力と減速に寄与する力を表している．加速方向では輻射力が卓越しており，ジェットは超臨界降着流から放射される光の力によって加速されていることがわかる．一方で磁場の力であるローレンツ力は加速に寄与していないこともわかる．超臨界降着流は輻射エネルギーに支配されているためこれはもっともな結果

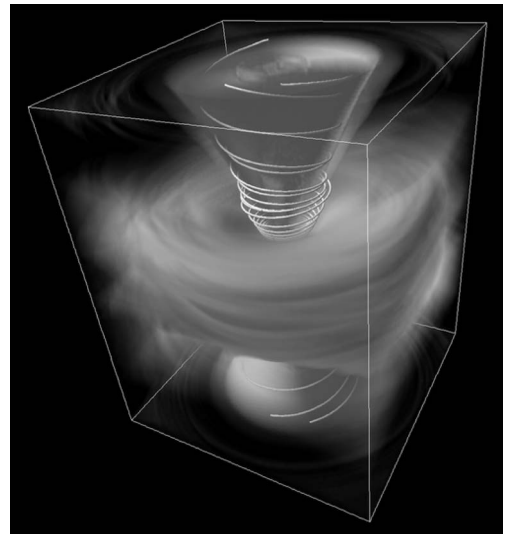


図2 ハイブリッド・ジェットの鳥瞰図 (©NAOJ)．超臨界降着流の上下方向 (円錐状の領域) にジェットが噴出している．ジェットガスは超臨界降着流の輻射により光速の6割程度まで加速され，降着流から噴出したらせん状の磁力線 (磁気タワー) により収束される．

であり，この傾向は従来の輻射流体ジェットモデルと同じである．

ではジェットの収束はどうだろうか．図3の右図にジェットの収束方向の力の分布を示す．実線と破線はそれぞれ収束に寄与する力と膨張に寄与する力を表している．図より加速方向と異なり，ローレンツ力がジェットの収束に寄与していることがわかる．なんと，エネルギー的には劣勢の磁場が，輻射を差し置いてジェットの収束に寄与していたのだ．図2において，ジェットに取り巻く螺旋形状は磁力線を表している．これは従来のRIAFの磁気流体シミュレーションで報告されていた磁気タワーと同様のものであり，ジェットを取り巻く磁場により輻射加速アウトフローを収束していることがわかったのだ．

ジェット領域では輻射エネルギーが磁気エネルギーを数十倍上回っているにもかかわらずジェットの収束に磁場が効果的な理由は，ほとんどの輻射エネルギーが降着流の上下方向 (つまりジェット

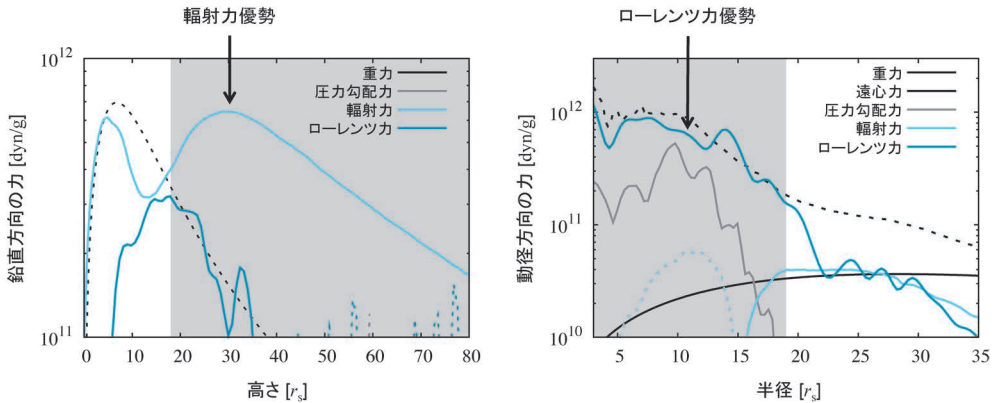


図3 ハイブリッド・ジェットの加速・収束機構。左図：10シュバルツシルト半径の半径における鉛直方向の力の分布。実線はガスの加速に寄与する力であり、破線は減速に寄与する力を示す。右図：赤道面から高さ40シュバルツシルト半径における半径方向の力の分布。実線はガスの収束に寄与する力であり、破線は膨張に寄与する力を示す。左図、右図ともに網掛け領域はガスの速度が脱出速度を超えている領域を示す。

の加速方向)に向けて流れているためである。その結果、輻射場はジェットの加速に、磁場はジェットの収束に効果的に働く状況になっているのだ。

輻射エネルギー優勢な系にもかかわらず、磁場の形状がRIAFの磁気流体ジェットのそれと同様なことは興味深い。これは磁気流体ジェットと輻射流体ジェットのそれぞれの利点が相補的に作用した言わば輻射磁気流体ジェットモデルであり、ガソリンと電気で行くハイブリッド・カーに倣い、「ハイブリッド・ジェット」と筆者らは名づけた。

本研究は、現象論的なパラメーターや仮定を導入することなく、第一原理計算から明るいブラックホール降着流に付随するジェットを初めて示した成果であり、この結果を見いだしたときは非常に興奮したことを覚えている。

### 3.3 輻射光度とジェットの関係

明るいブラックホール降着流における輻射スペクトルのハード・ソフト遷移期に、相対論的ジェットが形成されていることがマイクロエーサーの観測からわかっている。この降着流の典型的な輻射光度はエディントン光度程度(少なくともその数割)に達する<sup>4)</sup>。このハード・ソフト遷

移は降着流の状態遷移期であり、質量降着率が増加している期間を観測していると解釈されている。筆者らの研究成果は、観測で示唆されていたそのような高光度降着流ジェットの形成を例証するものとなった。

ただし、ジェットの加速と収束についてはまだ課題が残されている。まずジェットの収束の面として、観測から見積もられるジェットの細さは数度であり筆者らのシミュレーションで得られたジェットよりまだ細い。またジェットの加速の面として、筆者らが示したジェットは観測で報告されている高ローレンツ因子のジェットは再現できていない。これは筆者らのモデルがニュートン力学に基づいており、相対論的效果が十分に取り入れられていないことが要因として挙げられよう。

最近になって、特殊または一般相対論的な輻射磁気流体シミュレーションが遂に行われるようになってきた<sup>5)</sup>。今後は回転ブラックホールのエネルギーを利用した超臨界降着流の相対論的ジェット研究が進んでいこう。

## 4. クランピーアウトフロー

### 4.1 アウトフローの意義

前章の宇宙ジェットを含め、ブラックホール天

体に付随したアウトフローの存在は観測的にも数多く報告されている。アウトフローは青方偏移した吸収線として観測され、見積もられたアウトフローの質量噴出率がブラックホールへの質量降着率に匹敵することもしばしばある。このようなアウトフローは、星間ガス雲の形状変形や星形成の抑止、金属汚染といったフィードバック現象をもたらす可能性をもっており、星形成や銀河形成といった宇宙の多階層で多大な影響を与えていると考えられる。

従来のブラックホール・ガスダイナミクスシミュレーション研究は、その対象が降着流であったことから、アウトフロー領域の研究は十分に行われてこなかった。このような背景から、筆者らは超臨界降着流からのアウトフローの大局的振る舞いを明らかにするために、大規模かつ高解像度の計算ボックス（前章のシミュレーションに比べ面積が20倍以上の大きさ）を用いた輻射磁気流体シミュレーションを実行した<sup>6)</sup>。その結果、予想外のアウトフローの描像が明らかになった。

#### 4.2 アウトフローガスの微細構造

図4に大規模計算で得られた超臨界降着流とアウトフローの子午線面（降着流を縦にスライスし

た面）のガス密度の等値線図を示す。原点にブラックホールがあり、幾何学的に厚いトーラス状の超臨界降着流が形成されている（左図の白い領域）。降着流上部のガスは自身の輻射により外向きに加速されており、広範囲でアウトフローが形成されている。そして興味深い発見として、ブラックホールから遠方の領域でアウトフローガスが塊（クランプ）状になっていることがわかったのだ（右図）。

計算の結果、ブラックホールから200シュバルツシルト半径の辺りからアウトフローガスの非一様性が現れ、10シュバルツシルト半径程度の大きさのクランプとなっていることがわかった。クランプの典型的なガス密度は $10^{-13} \text{ g cm}^{-3}$ 程度（1億太陽質量の超巨大ブラックホールの場合）であり、クランプは光速の1割程度まで加速され、降着流の回転軸に対し10-50度程度にわたり広角に噴出される。

この超臨界降着流から噴出されるクランピーアウトフローの形成機構は何だろうか。クランプ構造形成には次の四つの特徴があるとわかった。

- 1) クランプのガス温度は状況により、上がったり下がったりする。

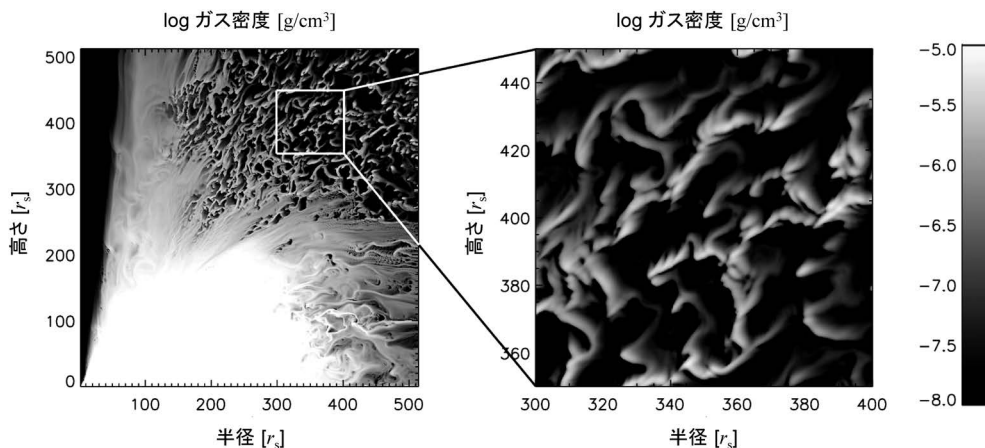


図4 超臨界降着流から噴出するクランピーアウトフロー。子午線面（降着流を縦にスライスした面）のガス密度の等値線図を示す。原点に恒星質量ブラックホールがあり、幾何学的に厚いトーラス状の超臨界降着流が形成されている。ブラックホールから遠方の領域（約200シュバルツシルト半径）から広角にわたってクランプ状のアウトフローが噴出されている。

- 2) クランプは磁場のない環境でも形成される。
- 3) クランプは超エディントン大気下にて形成される。
- 4) クランプの光学的厚みは1程度である。

まず、(1) から熱的不安定が却下される。星間ガスの非一様構造などは熱的不安定が原因と考えられており、今回のようなクランプ構造でも熱的不安定を筆者らはまずは疑った。熱的不安定によりクランプが成長する過程で、ガス温度は単調減少しているはずである。しかし超臨界降着流から噴出するクランプは、そのような傾向にないことがわかった。さらに、(2) から磁場の寄与も却下される。磁場をゼロにして同様の計算を実行しても、クランプ構造が形成されることを確認した。

興味深い特徴が (3) と (4) である。これらはクランプ構造が輻射流体力学的なレイリー・テイラー (Rayleigh-Taylor) 不安定で形成されていることを示唆している。ここで超エディントン大気とは輻射力が (逆向き) の重力に対し卓越した大気を指す。超エディントン大気下にあるクランプの形成現場では、正味の加速度が重力 (シミュレーションにおける原点の方向) とは逆の方向に働いていることになる。加えて、アウトフローは高密度の降着流から噴出していることからガス密度は遠方になるほど低下する。つまり、(正味の) 加速度の方向にガス密度が減少していることになり、レイリー・テイラー不安定の条件が成立する。この結果、アウトフローの非一様構造が生成されると予想される。

さらに (4) がクランプ形成において輻射が関連していることを後押しする。クランプの光学的厚みは1程度であり、降着流ガスと同様にガスと輻射が熱平衡状態になっている。一方、クランプ間の低密度領域ではガスと輻射は熱平衡状態から外れており、光学的に薄いこの領域に選択的に輻射が流れている。ちょうど光学的に厚い領域 (クランプ) と光学的に薄いクランプ間領域の二極化

が起こっており、輻射流体力学的な要因でクランプ構造が形成されていることを示唆している。

#### 4.3 超エディントン大気における輻射流体不安定

輻射流体力学的なレイリー・テイラー不安定によるクランプ構造形成を検証するために、筆者らは超エディントン大気の安定性を輻射流体シミュレーションにより調べることにした<sup>7)</sup>。前述の輻射磁気流体シミュレーションにおけるクランプは、降着流ガスの回転運動や磁場の存在など複雑な環境下に置かれており、その形成機構を調べることに妨げとなっている。そこで筆者らはよりシンプルな環境、つまり一様重力場かつ磁場が存在しない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検証した。

その結果が図5である。上層は光学的に薄い低密度ガス、下層は光学的に厚い高密度ガスを配置し、上向きに輻射が流れている系を考える。計算の結果、輻射力と重力、ガス圧勾配力の力学平衡にある大気では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、最終的に光学的厚みが1になるサイズの密度揺らぎが支配的になることを発見した。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、線形解析からも裏づけを得ることができた。

ただし、輻射優勢大気に非一様構造を作り出す機構はほかにもあることを注意しておく必要があるだろう。N. J. Shavivは光学的に厚い輻射優勢大気における大局的安定性解析を行い、圧力スケールハイトの揺らぎが音速のタイムスケールで成長することを示した<sup>8)</sup>。この不安定により光球面の上空では多孔質 (porous) な大気となる。また輻射優勢大気中に強い磁場がある場合、磁気光子泡 (magnetic photon bubble) 不安定により非一様構造を生み出すことも知られている。ただし、今回のクランピーアウトフローにおいて磁気光子泡不安定の寄与を検証するためにはさらに高解像度な輻射磁気流体シミュレーションを実行す

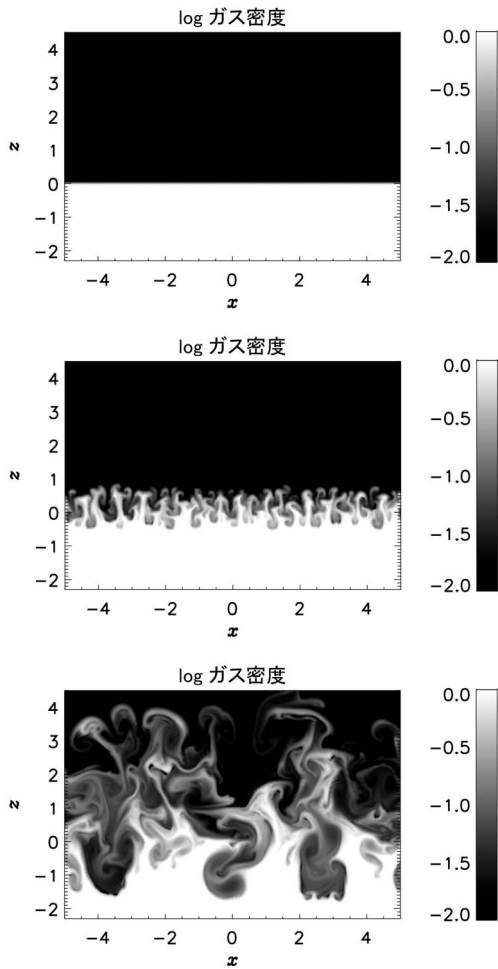


図5 超エディントン大気における輻射流体不安定. 初期の高密度ガスの密度に規格化されたガス密度の等値線図を示す. 上向きの輻射力が卓越した大気では力学平衡にあったとしても(上图), しだいに小さなサイズの密度揺らぎが発達し(中图), 最終的に光学的厚みが1となるサイズの揺らぎが成長する(下图).

る必要がある.

#### 4.4 クランピーアウトフローの候補天体

理論的に明らかになったクランピーアウトフローだが, 観測的に対応する天体はあるのだろうか. 超大光度X線源や明るいAGNといった高光度降着流において, クランプ状のアウトフローの存在を示唆する観測結果がいくつか報告されてきている.

表1 BLRガス雲の観測値との比較.

物理量	筆者らの計算	観測値 <sup>10)</sup>
数密度	約 $10^{-11} \text{ cm}^{-3}$	約 $10^{-11} \text{ cm}^{-3}$
温度	約 $10^4 \text{ K}$	約 $10^4 \text{ K}$
カバリングファクター	約0.3	約0.1
フィリングファクター	約 $10^{-7}$	約 $10^{-7}$

その中でも, クランピーアウトフローのAGN広輝線領域(BLR: broad line region)への適用は興味深いところである. BLRガス雲の起源は論争中であるが, 高光度降着流からのクランピーアウトフローを起源とするアイデアがM. Elitzurによって提唱されている<sup>9)</sup>.

BLRガス雲がアウトフローから成ると仮定した場合, BLRが存在するための条件として降着流光度の下限值が導かれる. その下限値はエディントン光度の1,000分の1程度であり, BLRは高光度AGNでは観測される一方で低光度AGNでは観測されないという観測事実も自然に説明できるというアイデアだ. ただし, 彼の研究ではクランピーアウトフローの形成機構は明らかにされていなかった.

筆者らのシミュレーションは彼のアイデアを支持する結果となった. クランピーアウトフローを発生させるには超エディントン光度をもたらす輻射が要求されるため, 低高度な降着流からクランピーアウトフローは発生しないはずである.

筆者らのシミュレーション結果からBLRガス雲の物理量を見積もった. 観測値と比較した結果を表1に示す. より具体的な検証は必要ではあるが, 筆者らのシミュレーションで得られたガスクランプの数密度や温度, カバリングファクター(covering factor), フィリングファクター(filling factor)はおおむねBLRガス雲の観測値と合致している.

## 5. おわりに

本稿では明るいブラックホール降着流である超臨界降着流に着目し, 輻射磁気流体シミュレー



ションで明らかになった新しい噴出現象について紹介した。輻射場と磁場が織りなすガスの振る舞いを明らかにすることで、現実的な超臨界降着流の議論が可能になってきた。今後は相対論的シミュレーションによるジェット研究や、AGNフィードバックといった周辺環境との相互作用の研究が進んでいくだろう。

またエディントン光度を超える輻射光度をもつ天体は超臨界降着流だけでなく、高光度青色変光星やウォルフ・ライエ (Wolf-Rayet) 星, 古典新星, 超新星などでもいくつか報告されている。本稿で得られた知見はブラックホール降着流以外の高光度天体にも応用できると考えられる。

## 謝 辞

本稿の内容は嶺重慎氏 (京都大学), 大須賀健氏 (国立天文台) との共同研究であり, 京都大学大学院理学研究科に提出した博士論文<sup>11)</sup> および投稿論文をもとにしている。これらは修士課程修了後, 一般企業に属しながらまとめたものである。研究を進めるにあたり, 両氏には休日の時間を割いてまで議論に付き合っていたいただいた。両氏のご理解とご協力がなければ本研究を成し遂げられなかったことは言うまでもない。さらに本稿についても貴重な意見をいただいた。深く御礼申し上げます。次に, シミュレーションデータ解析でたいへんお世話になった柴田一成氏, 磯部洋明氏をはじめとした京都大学附属花山天文台のメンバー, そして理論雑誌会で有益なコメントをくださった戸谷友則氏 (現・東京大学), 野村英子氏 (現・東京工業大学) に感謝したい。また本稿の執筆を薦めてくださった新田伸也氏 (筑波技術大学) と渡邊皓子氏 (京都大学) にも感謝したい。最後に宇宙物理学研究を始めるきっかけを与えて

くださった福江純氏 (大阪教育大学) と渡會兼也氏 (金沢大学附属高等学校) に感謝の意を表したい。本研究の数値シミュレーションには国立天文台 CfCA Cray XT4 および XC 30 を使用し, データ解析・可視化には CfCA 解析サーバおよび花山天文台サーバの AVS/Express, IDL を使用した。

## 参考文献

- 1) Eddington A. S., 1926, *The Internal Constitution of Stars* (Cambridge University Press)
- 2) Ohsuga K., et al., 2009, PASJ 61, L7
- 3) Takeuchi S., et al., 2010, PASJ 62, L43
- 4) Fender R. P., et al., 2004, MNRAS 355, 1105
- 5) McKinney J. C., et al., 2014, MNRAS 441, 3177
- 6) Takeuchi S., et al., 2013, PASJ 65, 88
- 7) Takeuchi S., et al., 2014, PASJ 66, 48
- 8) Shaviv N. J., 2001, ApJ 549, 1093
- 9) Elitzur M., 2012, ApJ 747, LL33
- 10) Peterson B. M., 1997, *An introduction to active galactic nuclei* (Cambridge University Press)
- 11) Takeuchi S., 2014, 京都大学博士論文

## Super-Eddington Outflow—The Origin of Luminous Jet and BLR Cloud?

Shun TAKEUCHI

Edogawa, Tokyo, Japan

Abstract: Super-Eddington accretion is one of the key process for understanding ultra-luminous X-ray sources, super massive black holes, and astrophysical jets. Due to the rapid development of high performance computing system, it has been possible to analyse the complex interaction between the matter, radiation, and magnetic field in the flow. The dynamics of outflow associated with super-Eddington accretion flow is recently unveiled from multi-dimensional simulations. We introduce novel outflow models obtained by global radiation magneto-hydrodynamic simulations.