

(続紙 1)

京都大学	博士 (理学)	氏名	小川 拓未
論文題目	Observational Signatures of Super-Eddington Accretors: Views from Radiation Hydrodynamics/Radiation Transfer Simulations (輻射流体・輸送計算で探る超臨界降着流の観測的性質)		
(論文内容の要旨)			
<p>超臨界降着流とは、古典的な限界値を超えてブラックホールや中性子星に落ち込むガスの流れであり、亜臨界降着流には見られない、多様な観測的特徴を示すことが近年わかってきた。本申請論文は、超臨界降着流に特有の輻射場の性質を輻射流体・輻射輸送計算を用いて調べ、そのユニークな特性を報告したものである。</p> <p>申請論文は大きく前半と後半に分けられる。前半 (第2章) 「超高光度天体モデルとしての超臨界降着天体の輻射流体シミュレーション」において、申請者は2次元軸対称の輻射流体コードにより超臨界降着流とそれに付随する噴出流を計算し、その輻射特性が、観測の見込み角や質量降着率に依存してどのように異なるかという点に注意を払って調べた。具体的には10太陽質量のブラックホールの周りの降着円盤を考え、円盤への質量供給率がエディントン降着率の100倍、1000倍、10000倍という3つのケースについてシミュレーションを実行した。その結果、質量降着率が大きくなるにつれ、あるいは見込み角が大きくなる (円盤に沿った方向に近づく) につれ、観測される輻射の温度が下がることがわかった。これは光子補足半径が質量降着率に比例して大きくなるにつれ、ブラックホールから離れた低温部分からの輻射が卓越することで説明がつく。さらに観測角度が円盤軸に近い (見込み角30° 以内の) とき、超臨界降着流は超高光度X線源 (ULX) として観測され、質量降着率が大きくかつ観測角度が大きいときには超高光度軟X線源 (ULS) として観測されることが、シミュレーションによって初めて示された。</p> <p>後半 (第3章) 「光子ボルツマン輻射輸送による超臨界降着流のコンプトン化X線変動の研究」において、申請者は光子ボルツマン法により輻射輸送計算を行うコードを開発し、ブラックホールへの超臨界降着流からの放射がどのように観測されるかをより正確に調べた。過去の一般相対論的輻射磁気流体計算により得られた定常な流体場を用いポストプロセスとして輻射輸送計算を行った結果、輻射場の性質はジェットが噴き出している低密度で高温のファンネル領域と、それを取り巻くやや低速のアウトフロー領域で大きく異なることがわかった。すなわち、ファンネル領域では高温の電子により逆コンプトン散乱を受けてエネルギーが高く (20キロ電子ボルト) なった光子が卓越している一方、その他のアウトフロー領域では円盤由来の1キロ電子ボルト程度の光子が卓越していることが明らかになった。撮像イメージングを行うことで円盤軸方向から見たときと円盤方向から見たときでファンネル領域からの放射の寄与が異なること、この違いが観測されるスペクトルに如実に現れていることも判明した。さらに申請者は、超臨界降着流の最内縁部の温度を一時的に上げるというフレアを模擬</p>			

した計算を行い、よりエネルギーの高い光子が低いエネルギーの光子よりも先に観測者に到達することを見いだすとともに、これらの変化は見込み角に非常に敏感であり、ファンネルが見えないような 30° 以上の見込み角からは観測できないことを突き止めた。

(論文審査の結果の要旨)

超臨界降着流の際だった特徴は、物質と電磁波輻射間の密な相互作用から生まれる。物質・輻射相互作用の研究は天文学永年の課題とも言うべきもので、前世紀から数多くの研究がなされているものの、未だ完全解明に至っていない。本申請論文はこの難問に新しい観点から挑んだものであり、研究の歴史に際立った1ページを加えるものとしての評価ができるだろう。まだまだ荒削りだが、新しい手法を開発し、ブラックホール降着流の研究に適用した意義は大きい。今後の主流となる研究の先駆けとなる成果と言えよう。

申請論文前半(第2章)のテーマは、現実の奇妙な天体、超高光度X線源(ULX)および超高光度軟X線源(ULS)の正体解明であり、それらが恒星質量ブラックホール(質量はおよそ10倍~数十倍の太陽質量)への超臨界降着モデルで説明できるか否かを結論づけることが課題である。申請者は、超臨界降着流の輻射特性が、観測の見込み角や質量降着率に依存してどのように変化するかを、2次元軸対称輻射流体シミュレーションにより丁寧に調べた。ブラックホール質量は10太陽質量とし、ガス降着流としてはエディントン降着率の百倍、千倍、一万倍の3ケースを計算した。その結果、円盤回転軸方向から観るとULXとして観測され、円盘面方向から観るとULSとして観測されること、その境界となる(回転軸から測った)見込み角は降着率が高くなるにつれ大きくなることを見いだした。これは、観測家が観測を説明するために提唱した現象論的仮説を、シミュレーションで裏付ける結果であり、ブラックホール天文学における貢献は大なるものがあるといえる。

論文後半(第3章)で申請者は、画期的な輻射輸送計算コードの開発に取り組んだ。この計算コードはシュヴァルツシルト時空において振動数依存性も含めて輻射輸送の式を解くもので、超臨界降着円盤のような密度がある程度高い環境で重要になる多重コンプトン散乱をより正確に取り入れた点に特徴がある。将来主流となるであろう、輻射と流体を矛盾なく同時に解く計算手法への足掛かりとなるという点で、極めて有用性の高いものと評価できる。しかし今回の計算では、流体と輻射をフルに結合させることは計算機パワー不足の理由ゆえ断念し、代わりにその第一歩として、一般相対論的輻射磁気流体計算により得られた定常な流体場の上でポストプロセスとして輻射輸送計算を行った。ターゲットはブラックホール超臨界降着流である。この種の流れは、多重コンプトン散乱がエッセンスであり、本コードを適用するのに最適のターゲットである。申請者は撮像イメージを計算し、ファンネルとよばれる回転軸から30度程度以内の開いた領域が見込める角度から観測したときに限り、数十キロ電子ボルト超の硬X線光子が観測されることを見いだした。これはファンネル内でのみ高X線光子が生成されること、およびファンネルを取り巻く厚いガス層により、高エネルギー粒子はファンネル壁をすり抜けることができないことを示している。一方で数キロ電子ボルト以下の軟X線はファンネル外部で生成されるため、どの角度からみても観測できることも示された。さらに申請者は円盤

最内縁で発生するフレアの模擬計算を行い、よりエネルギーの高い光子が低いエネルギーの光子よりも先に観測者に到達することを示した。従来の方法（モンテカルロ法）ではこのような短時間変動を計算するのは苦手であり、申請者の開発したコードの威力が示された形となった。

本申請論文は、物質と輻射の相互作用の解明という観点からも、ブラックホール天文学の推進という観点からも、意義深いものと評価できる。よって、本論文は博士（理学）の学位論文として価値あるものと認める。また、令和3年1月15日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。なお、本論文は、京都大学学位規程第14条第2項に該当するものと判断し、公表に際しては、当分の間、当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。

要旨公表可能日： 令和 年 月 日以降