

氏 名	わたらい けん や 渡 會 兼 也
学位(専攻分野)	博 士 (理 学)
学位記番号	理 博 第 2606 号
学位授与の日付	平成 15 年 3 月 24 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当
研究科・専攻	理学研究科物理学・宇宙物理学専攻
学位論文題目	Super-Critical Accretion Disk around a Black Hole (ブラックホール周りの超臨界降着円盤)
論文調査委員	(主 査) 教授 嶺 重 慎 教授 柴 田 一 成 教授 大 谷 浩

### 論 文 内 容 の 要 旨

申請者は、極めて明るいブラックホール候補天体の X 線観測の諸特徴を、超臨界降着円盤の構造をきちんと解くことにより、世界で初めて理論的に説明した。

近年、X 線観測が進み、従来の標準降着円盤モデルでは説明できないような、極めて明るい天体が存在することが明らかになってきた。例えば、系内のマイクロクエーサーや系外の超大光度 X 線源 (ULXs)、中間質量ブラックホール候補の M82 X-1、狭輝線セイファート 1 型銀河 (NLS1s) などである。これらの天体は比較的明るい光度 (エディントン光度またはそれ以上) を持つ。観測されるスペクトルは通常熱的な黒体放射成分でよくフィットできるが、得られた最高温度は標準円盤で説明するには高すぎるのが問題となっている。例えば、ULXs の円盤内縁部の温度は、1keV をゆうに越すが、数十倍の太陽質量を持つブラックホールの場合に標準円盤モデルで予想される温度は 1keV 以下であり、両者の間に説明できない開きがある。

この矛盾の原因を理解するため、申請者はスリムディスクと呼ばれるモデルを考えた。このモデルによると、質量降着率がエディントン光度を与える値 (臨界値) を越えると、円盤深部で生成された光子は降着ガスに捕捉されたままブラックホールに飲み込まれるため、円盤の全放射光度はエディントン光度程度に抑えられる。そこで申請者は、スリムディスクモデルに従い、超臨界降着円盤の物理構造は標準円盤とどこが違うか、スリムディスクは観測的にどう見えるか、観測と標準円盤モデルの不一致は果たして説明できるか否か、を調べてみた。

まず、エネルギー輸送や遷音速点の効果を考慮した円盤の基本方程式をセルフコンシステントに解くことにより、質量降着率の高い降着流の解を得た。この際、降着円盤の内縁を従来のように、3 倍のシュバルツシルト半径 ( $r_g$ ) にせず、事象の地平線近傍 (およそ  $1.1r_g$ ) まで丁寧求めた。

得られた円盤の有効温度分布は、質量降着率の増加に伴い、光子捕捉効果により、標準円盤モデルの分布よりもフラットになった。更に興味深いことに、有効温度のピークは  $3r_g$  よりも内側に移動した。従来の標準円盤モデルでは、 $3r_g$  付近で急激に遷音速流になるため、その内側ではガス密度が極端に小さくなる。しかし、降着率が大きい場合、動径方向の流れができるために、 $3r_g$  付近でもガス密度は殆ど減らない。つまり、 $3r_g$  より内側の領域からも十分な量の輻射が期待できるのである。

申請者は、求めた円盤モデルから理論スペクトルを作り、X 線観測で用いられる多温度円盤黒体放射モデルを用いて、理論スペクトルのモデルフィッティングを行った。この結果、上で記した効果により、円盤光度が上がるにつれ、降着円盤内縁の半径は小さくなり、最大温度は上昇する傾向が顕著に現れた。このような傾向は、実際 ULXs の観測結果と定量的に一致する。そこで X 線の HR 図 (光度 - 最高温度) 上に、観測結果と申請者のモデルフィットの結果をプロットすると、ULXs は通常よりも大きめのブラックホール質量 (大体 10—30 太陽質量) で且つ、降着率は臨界質量降着率の 20—100 倍程度の天体で説明できることがわかった。

申請者の結果は、少なくとも幾つかの ULXs, またはマイクロクエーサーでは、臨界に近い降着率または超臨界降着が起こっていることを示唆する。また同時に、スリムディスクの、超臨界降着円盤のモデルとしての正当性を、X線観測に照らし合わせて実証するものである。

### 論文審査の結果の要旨

一般に、ブラックホールへの降着率（単位時間あたりの降着ガス量）は、エディントン光度を与える降着率（臨界降着率）を超えないといわれる。というのは、この値を超えると、中心部で発生する放射による（外向き）圧力が（内向き）重力を上回り、ガスは降着できなくなるからである。ところが、円盤降着の場合は、放射は円盤面に垂直方向に向けて飛び出せば、降着ガスに及ぼす放射圧が減じられエディントン降着率を超えられる、一方で、臨界降着率を越えると、降着流内で発生した光子がその中に閉じこめられ、ブラックホールにガスもろとも飲み込まれてしまう現象（いわゆる光子捕捉）が起き、降着流構造が大きく変化する。超臨界降着流の構造は一体どうなのか。これは永年の理論的課題である。

ところで近年、超臨界降着を起こしているらしい天体がいくつも見つかった（例えば ULX=超高光度 X線源）。また形成期の AGN も、中心核ブラックホールは小さかったため必然的に超臨界降着していたという研究もあり、理論研究の重要性は近年とみに増している、

超臨界降着流の2次元モデルを作るのは難しい。しかし1次元モデルでおおよそそのふるまいを見ることはできる。この考え方のもと1988年にスリムディスクモデルが提唱された。しかしながら、理論モデルと観測との対応研究は遅れている。申請者の研究は、超臨界降着円盤の構造を、スリムディスクモデルに則ってブラックホール事象の地平線付近まできちんと解くことにより、観測的に何が期待されるかを明らかにし、その結果、今まで説明のつかなかった観測の諸特徴をみごとに再現した点に大きな意義が認められる。

では、今までどんな問題があったか。例えば、標準円盤モデルによると、円盤内縁の最高温度はブラックホール質量が大きいほど、その $-1/4$ 乗に比例して低くなる。ところで、ULXのブラックホール質量は、エディントン光度を超えられないという条件から、太陽質量の数十倍以上と考えられる。一方、数倍の太陽質量のブラックホールをもつ銀河系内ブラックホールの最高温度はたかだか1keVなので、大質量ブラックホールをもつULXsの円盤内縁部の温度は、1keVを大きく下回るはずである。これは、1keV以上を示す観測と矛盾する。

申請者は円盤の有効温度分布を計算で求め、質量降着率の増加に伴って、温度分布がよりフラットになること、有効温度のピークは $3r_g$ よりも内側に移動して最内縁の温度は上昇することを見出した。すなわち円盤が明るくなるにつれ円盤内縁の半径は見かけ上減少して $3r_g$ より小さくなり、温度は1keVより高くなる、これは「(回転していないブラックホールを取り巻く)降着円盤の内縁は $3r_g$ 」という常識を覆す知見であり、高く評価できる。

さらに申請者は、この理論予測を観測により検証するため、X線天体の観測データをサーベイし、ULXsの中に、まさに理論で予測された傾向（すなわち、明るくなるにつれ、見かけの円盤内縁半径が減少する傾向）が確かにあることを発見した。

申請者の研究は、ULXsの素性を明らかにするとともに理論モデルの正当性を実証した独創性の高い研究であり、当該分野における極めて重要な成果と位置づけられる。よって、本申請論文は、博士（理学）の学位論文として価値あるものと認められた。なお、本論文に報告されている研究業績を中心とし、これに関連した研究分野について口頭試問を行った結果、合格と認められた。