

氏 名	かわ なかのり た 川 中 宣 太
学位(専攻分野)	博 士 (理 学)
学位記番号	理 博 第 3236 号
学位授与の日付	平 成 20 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	Theory of X-ray Emissions from Black Hole Accretion Disks with Coronae (コロナを伴ったブラックホール降着円盤からのX線放射の理論)
論文調査委員	(主 査) 教 授 嶺 重 慎 教 授 川 合 光 教 授 小 山 勝 二

### 論 文 内 容 の 要 旨

川中氏は、ブラックホールからのX線放射スペクトルを、ブラックホールをとりまく円盤コロナモデルに基づいて計算し、観測の諸特徴を再現することに成功した。

活動銀河核やX線連星系といったコンパクトでかつ明るく輝いている天体の中心には、ブラックホールと、それをとりまくガス降着円盤が存在し、降着するガスの重力エネルギーが放射エネルギーに変換されることによって輝いていると考えられている。特にX線のような高エネルギー放射は円盤の中心付近、すなわちブラックホール近傍から生じていると思われるので、そのスペクトルや時間変動の様子はブラックホール近傍の物理状態を探るための重要な手がかりを与えてくれるはずである。

このX線の典型的なスペクトルは、大きくわけて数十keVに至る連続成分と、6～7 keVにある鉄輝線成分とから成っている。連続成分は、比較的低温の円盤本体(数十万度～1000万度)からの熱放射が、その円盤を取り囲む高温コロナ(数十億度)の電子によって逆コンプトン散乱を受けることによって生成され、鉄輝線成分は、コロナからの高エネルギー放射が円盤本体を照らすことによって生じた、鉄の蛍光輝線であるとする考え方が広く受け入れられている。しかし、現象論的なモデルを別にすれば、なかなか物理を極められていない現状がある。

川中氏は、(1) シンプルな円盤コロナモデルをもとに鉄輝線のプロファイルを計算し、次いで(2) 磁気流体シミュレーションデータを用いて連続X線放射スペクトルを計算し、共に観測の基本的特徴を再現することに成功した。以下に詳しく説明する。

(1) 川中氏は、シンプルな円盤コロナモデルとして、磁気リコネクション加熱説に基づいて構築された円盤コロナモデルを用いた。このコロナモデルは、太陽コロナのモデルの類推によって構築されたモデルで、コロナのエネルギーバランスと、円盤本体ガスからコロナへのガス供給を表す二本の方程式から、コロナ密度と温度の分布を決めるものである。その結果、コロナにおいて生成されるX線がどのようなスペクトルで円盤上の各点に照射するかが計算できる。川中氏は、モンテカルロシミュレーションでコロナ中の輻射輸送を解くことによって照射スペクトルを求め、それに対する応答として円盤上から蛍光鉄輝線がどのような強度分布で放射されるかを計算した。それによると、円盤上では中心からの距離の5乗に反比例するような、中心集中した輝線放射強度分布が得られた。これに基づいて、遠方の観測者が観測しうる鉄輝線プロファイル、光線の曲がりやドップラー効果といった相対論的効果をフルに取り入れて計算した。フリーパラメータは円盤面の傾斜角(観測者が円盤を見込む角度)のみである。こうして彼は、セイファート銀河MCG-6-30-15において観測されているプロファイルを、傾斜角をうまく調整することにより再現することに成功した。

(2) 次に川中氏は、磁気流体シミュレーションデータを用い、コロナからのX線放射スペクトルと時間変動について調べた。コロナモデルとしては、光学的に薄い放射冷却が非効率な降着流の3次元大局的磁気流体シミュレーション結果を用いた。この中に、光学的に厚い降着円盤が存在すると仮定し、標準円盤からの黒体放射光子がコロナ中の高温電子により逆

コンプトンされる過程を、3次元モンテカルロシミュレーションで計算した。放射冷却の無い磁気流体シミュレーションでは、密度の絶対値は自由に選べるため、密度の規格化した値はフリーパラメータとなる。彼は、このように連続線スペクトルを計算し、うまく密度の規格化をすることにより、実際に観測されているようなスペクトルの冪に合わせることができた。ところで、磁気流体シミュレーションデータには磁気回転不安定性によって引き起こされる乱流が見えており、したがって密度分布に細かな時間変動がある。そこで、シミュレーションの各時間ステップにおいてスペクトルを求めたところ、数十%ほどのX線変動が得られた。

## 論文審査の結果の要旨

連星系にあるブラックホールや活動銀核にあるブラックホールなど、ブラックホール天体の特徴は、X線を含む高エネルギー電磁波放射と、激しい時間変動であることは1960年代から知られている。その起源を理解するために、天体の発見後からブラックホールに降着するガス流に関する理論研究が進められ、それは、降着円盤の標準モデルという形で結実した。これですべて説明されたように思われたが、これは光学的に厚く、数十万度～1千万度の温度で黒体放射する円盤なので、軟X線放射がせいぜいで、硬X線からガンマ線に至るべき型スペクトルは説明できない。また、標準円盤は極めて安定なシステムなので、激しい時間変動の起源も、謎として残されている。

この矛盾を解決するために、1970年代からすでに、数十億度の温度をもつ高温降着流モデルや、円盤の上下に存在する、太陽で知られているような高温コロナ（円盤コロナ）といったモデルの研究が進められていた。しかしながら、前者では幅の広い鉄輝線プロファイルの説明できないという欠点があり、また、後者のモデルも、現実的な物理プロセスに基づいた理解が、課題として残されている。

一方、ブラックホール天体のX線観測は、近年、米国のチャンドラ衛星、欧州のXMM-ニュートン衛星、そして日本のすざく衛星といったX線観測装置により行われており、また次世代X線観測衛星の計画も進んでいることから、ブラックホールからのX線放射の観測的研究は、今後ますます盛んになっていくものと思われる。しかしながらその観測データからブラックホール近傍の物理情報を抜き出すためには、基礎物理過程をきちんと考慮に入れたX線放射の理論モデルを構築し、そこからスペクトルやその時間変動の様子を予言しておく必要がある、理論的課題は多々ある。

川中氏の研究は、まさにこの点に鑑み、より現実的なX線放射モデルの完成に向けて新しく2つの方向から光を当てるもので、これで問題がすべて解決したわけではないが、研究の新しい可能性を示した重要な成果であると位置づけることができる。

具体的には、川中氏は、以下の二本立てで研究を行った。

川中氏は、まずシンプルな円盤コロナモデルをもとに鉄輝線のプロファイルを計算した。このコロナモデル自体は他の研究からもってきたものだが、川中氏はそのモデルに基づいて、円盤コロナの物理量分布（密度、温度、光学的厚みなど）を計算し、どういったスペクトルの放射が円盤本体に照射するかを丁寧に計算した。この照射量から、円盤本体の各部分における鉄輝線強度が計算できる。そしてその値は、ポテンシャルエネルギーの一定割合が円盤に放射するとした単純なモデルと相違し、ブラックホールに近いほど、より効率的に高エネルギー照射がきいて、鉄輝線強度が高まることを発見した。こうして観測の鉄輝線プロファイルが自然に説明できた。これは、過去の研究でフリーパラメータとして扱っていた鉄輝線強度の起源を解明した点が、高く評価できる。

川中氏は次いで、やや現実的な円盤コロナモデル、すなわちブラックホール降着流の磁気流体シミュレーションデータを用いて、放射特性を調べた。このシミュレーションデータは、放射冷却を全く考慮していない。しかし、円盤コロナでは逆コンプトン散乱による冷却が多少効く点に注意が必要であるが、この冷却は円盤自体の加熱に勝ることは無いことを川中氏は丁寧に論証している。川中氏は、独自にモンテカルロ計算を実行し、観測のべき型スペクトルおよび時間変動の特徴を再現することに成功した。これは従来のコロナモデルの常識を打ち破る新しい考え方であり、特に高く評価できる。難をいえば、シミュレーションデータをもとに鉄輝線プロファイルを再現する研究があればさらによかったとの評もあった。将来の発展に期待したい。

以上の理由により、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、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。