

# 論文審査の結果の要旨

氏名 水本岬希

活動銀河核においてしばしば観測される「線幅の広い鉄輝線のようなスペクトル」は、超巨大ブラックホールの近傍における物質構造を反映しているものと考えられるが、その解釈については、発見以来、論争が続いている。本論文は、X線スペクトルの特徴的な時間変動に着目し、モデルを構築して数値実験を行うことにより、活動銀河核の近傍領域について新たな物理的描像を提示したものである。

本論文は7章と2つの補遺からなる。第1章は導入であり、本論文の背景や研究動機が簡潔に述べられている。超巨大ブラックホールの近傍から放射されたX線が周囲の物質で散乱された結果として鉄K輝線が現れるが、「線幅の広い鉄K輝線のようにみえるスペクトル」を説明するシナリオとして、散乱がブラックホールのごく近傍にある円盤反射に起因すると考えるか（円盤反射シナリオ）、ブラックホールから遠く（重力半径  $R_g$  に対して100倍程度）離れた物質（cloud）に起因すると考えるか（cloud反射シナリオ）、X線スペクトルだけでは切り分けが難しい。

第2章はレビューであり、本論文で扱う主要な概念が、詳しく記述されている。X線スペクトルの時間変動にみられる特徴、特に（1）鉄Kバンド放射の時間変動が、他のエネルギーバンドにおける放射の時間変動と比較して、時間変動率が顕著に低いこと（時間変動率のエネルギー依存性における凹み）、および、（2）鉄KバンドのX線は、ほかのエネルギーバンドのX線と比較して、遅れて観測されること（時間遅れ）、という2点の重要性が指摘されている。

第3章では、本論文の目的が端的にまとめられている。

第4章では、円盤反射シナリオにおいて、時間変動の2つの特徴が同時に説明可能か、数値実験に基づき調べた結果がまとめられている。具体的には、光線追跡法を用いて一般相対論的時空の下で光子の経路を計算し、数値シミュレーションを行った。得られた結果を、特徴的な時間変動が顕著に観測されている IRAS 13224-3809 と比較したところ、観測されている時間変動率のエネルギー依存性における凹みを説明するためには、太陽組成の10倍以上の鉄が必要となることがわかった。一方、時間遅れを説明するために必要な鉄は太陽組成程度であり、10倍以上の鉄では観測と矛盾することなどを示した上で、円盤反射シナリオで観測を統一的に説明することは難しいと結論づけている。

第5章では、cloud反射シナリオにより観測が説明できるかどうかについて、詳細な検討を行った結果が詳述されている。このシナリオでは、観測されている「線幅の広い鉄輝線のように見えるスペクトル」は、実は輝線ではなく、外向きに運動するcloudでの散乱が作る吸収端や吸収線によって生じる見かけ上のスペクトル構造であると解釈される。また、cloudの時間変動によって、時間変動のエネルギー依存性における凹みが説明できることはすでに知られている。そこで、cloudで反射が起きるとどのような時間遅れが生じ

るかを計算した。具体的には、中心から  $100 R_g$  の位置に部分球殻状の cloud を置き、そこで跳ね返った X 線がどのような時間遅れを示すか、モンテカルロ法による数値シミュレーションを行った。その結果、この cloud によって観測される時間遅れの特徴が全て説明できることを示した。中心から距離  $100 R_g$  程度にある、外向きに運動する散乱体としては、円盤風が有力であると考え、そこでの密度・電離度・速度の距離依存性を考慮した現実的な円盤風モデルを用いて時間遅れの計算を行った。この結果を、上述の IRAS 13224-3809 に加え、時間遅れが特徴的に観測されている Ark 564 および 1H 0707-495 と比較したところ、時間遅れが定量的に再現できることを示した。

第6章は、これらの解析の結果得られた活動銀河核近傍領域の描像を提示している。ブラックホール近傍からの円盤風が、超高速アウトフローとして観測される青方偏移した吸収線と共に時間遅れを作る。その外側には粒状の冷たい吸収体が存在し、これが中心の X 線放射領域の一部を隠すことで、X 線スペクトルに鉄 K 吸収端が現れ、「広がった鉄 K 輝線のようなスペクトル構造」を作る。冷たい吸収体が X 線放射領域を覆い隠す割合が変動することで、鉄 K 吸収端を示す吸収スペクトル成分と示さない直接成分の強度変動が打ち消し合い、時間変動のエネルギー依存性における凹みが生み出される。

第7章は論文のまとめである。

以上、本論文は、2 つのシナリオに基づく詳細な数値シミュレーションを行い、観測と比較することにより、鉄 K バンド放射の時間変動を統一的に説明する物理的描像を提示することに成功している。現実的なパラメーター設定に基づきシナリオの切り分けを定量的に行ったこと、そして近年 X 線観測で注目されている超高速アウトフローの存在と整合的な描像を提示するに至ったことは、活動銀河核近傍領域の構造を解明する上で大きな成果であり、高く評価される。

なお、本研究は海老沢研・辻本匡弘・Chris Done・萩野浩一・小高裕和・森山小太郎・嶺重慎・川中宣太との共同研究であるが、論文提出者が主体となって行ったもので、論文提出者の寄与が十分であると判断する。

したがって、博士（理学）の学位を授与できると認める。