

論文審査の結果の要旨

氏名 山田真也

1939年のオープンハイマーらの研究以来、理論上の存在であったブラックホールは、1970年代に発見された奇妙な時間変動をもつX線連星、白鳥座X-1 (Cyg-X-1) によって現実の存在として認識されるようになった。その後、銀河系内やマゼラン雲にある約20個のX線天体がブラックホール候補とされ、詳細な観測が行われてきた。近年ではブラックホール時空の精緻測定まで言及されている。ブラックホール連星の研究における残された重要課題にX線光度がエディントン限界の数%以下でみられる「ハード状態」における、激しく変動する強い硬X線放射の起源がある。これは1970年代から気球実験以来研究され、約100 keVまではべき関数的なスペクトルを持ち、それよりも高エネルギー側では指数関数的に曲がるスペクトルであることから、低エネルギー光子が光学的に薄い降着円盤などの高エネルギー電子により逆コンプトンされたものであるという熱的コンプトンモデルが提唱された。このモデルは観測とおおむね矛盾しないが種光子や高エネルギー電子の起源、後者が降着円盤のコロナのようなものだとして、そのサイズや形状、さらに数秒からミリ秒に至るタイムスケールで速いランダムな強度変動のエネルギー依存性、さらに変動を生み出す機構は何か、という根本的な問題が未解決である。

本研究で論文提出者は、ブラックホール連星のハード状態における硬X線放射のエネルギースペクトルと時間変動の関係を明らかにし、それによって硬X線放射の起源に迫ることを目的として、日本の5番目の宇宙X線観測衛星「すざく」のX線CCDカメラ(XIS; 0.2–12 keV)と硬X線検出器(HXD; 10–60 keV)を駆使して0.2–600 keVにわたる広帯域での白鳥座X-1の25回のモニター観測を行い、その中で高時間分解観測も行った。その主な結果として以下を得た。(1) 約2keV以下では1秒程度の時間尺度の時間変動が2keV以上のエネルギー帯に比べて急激に減少し、それは光学的に厚い降着円盤からの放射スペクトルを持つ変動の小さな放射成分の存在で説明できる、(2) 1秒以下の時間尺度の時間変動は、短い時間強度が上昇するショットと呼ばれる変動の重ねあわせで表現できると考えられているが、100–200 keVのエネルギー範囲でもそれ以下のエネルギーと同様にショットで時間変動を記述できる。(1)は、光学的に厚い降着円盤、それが弱く逆コンプトン化された成分、強く逆コンプトン化された成分からなるというエネルギースペクトルの3成分モデルに強い支持を与えるのである。また、逆コンプトン化される種光子が光学的に厚い降着円盤からくることを示唆する。(2)については、さらに、0.5から2keVのエネルギーバンドでは、ショットの振幅が他のエネルギー帯域に比べて小さいことを初めて明らかにし、またショットの立ち上がりでは時間と共にスペクトルが徐々にソフトになり、ショットのピークから突然ハードになる、というこれまで知られていた性質が200 keVまで成立していることを確認した。

以上から「ハード状態」においても、光学的に厚い降着円盤からの放射が存在し、ショットを含めて1秒以下の時間変動が小さいことがすることが明らかになった。ショットのスペクトル変動を逆コンプトン放射のパラメータの変化で表現すると、立ち上がりでは電子温度が徐々に下がり、逆にその光学的厚さは徐々に大きくなるが、ピークで突然、それらがもとに戻り電子温度が高く、光学的厚さは小さくなる、と解釈できる。このことは、ショットのピーク付近で、ショックあるいは磁気リコネクションのような電子のエントロピーが急に大きくなるような現象がおきていることを示唆する。

本論文は7章からなる。第1章ではイントロダクションとして論文全体の流れを記述し、2章でこれまでのブラックホール連星の観測と関連する理論をレビューしている。3章では、本論文で用いた観測装置であるすざく衛星について、特にHXDの性能較正に重点をおいて記述している。第4章では、すざく衛星によるはくちょう座X-1の観測について記述し、第5章にデータ解析とその結果が記述されている。第6章では、観測結果から示唆される硬X線放射機構や、時間変動の起源について議論した。最後の第7章では、論文の結果をまとめている。

以上、本論文はすざく衛星によるはくちょう座X-1の観測を系統的に研究し、時間変動を利用することでモデルの仮定に依存せずに硬X線放射機構と時間変動の起源に重要な示唆を与える新たなX線放射の性質を明らかにした。したがって、本論文はブラックホール候補としてのはくちょう座X-1の研究に大きく貢献する、新規かつ意義の大きな研究であり、博士（理学）の学位に相応しいものである。

また本論文の研究は、牧島教授らとの共同研究であるが、観測計画の立案、すざく衛星のデータ処理、得られた結果の解釈にいたるまで、論文提出者が主体となって行ったことを確認している、このため論文提出者の主体性と寄与は博士論文として認めるのに十分であると判断する。

したがって、本論文提出者に博士（理学）の学位を授与できると認める。