

論文審査の要旨

博士の専攻分野の名称	博 士 (理 学)	氏名	河野 貴文
学位授与の要件	学位規則第4条第①・②項該当		
論文題目			
Study of black hole spin of Cyg X-1 with the X-ray spectral/timing analysis (X線のスペクトル/タイミング解析による白鳥座X-1のブラックホールスピンの研究)			
論文審査担当者			
主 査	教 授	深沢 泰司	
審査委員	教 授	小 嶋 康史	
審査委員	教 授	杉立 徹	
審査委員	教 授	吉田 道利 (宇宙科学センター)	
〔論文審査の要旨〕			
<p>ブラックホールスピン (ブラックホールの回転量) を測定することは、降着流から起こる相対論的ジェットへの効果を理解するために重要である。しかし、質量と違い、ブラックホールスピンはブラックホールに非常に近い時空特性にのみ影響を与えるために、観測で測定することは難しい。ブラックホールスピンを推定するためには、3つの方法がある。そのうち2つはX線スペクトル解析により、降着円盤の最内縁半径のスピン依存性、および、降着円盤によるX線反射鉄輝線形状のスピン依存性を調べる。残り1つは、特徴的なX線時間変動 (低周波・高周波における準周期的振動; QPO) を用いる。ブラックホール連星はX線で大変明るく、そのため、スピン測定の統計精度は良いが、系統的な不定性もあり、これらを定量化することは容易ではない。また、1つの天体において、3つの測定方法において異なった値が報告されている場合もある。系統誤差の大きな原因は、X線放射メカニズムの不定性である。スペクトルが降着円盤放射で支配的な時は、3つの方法で同じような結果が得られる慶應があるが、そのような状態が実現されないブラックホール連星も存在する。X線スペクトルにおいて高エネルギー側に降着円盤とは別の成分が無視できない場合は、それが全体の20%以上の時は、スピン測定の不定性が大きくなる。よって、ブラックホールスピンを測定するにおは、できるだけX線スペクトルにおいて高エネルギー側の別の成分の割合が小さいときのデータを用いることである。</p> <p>ブラックホール連星で最も有名で明るい天体であるCyg X-1は、X線スペクトルに置いて降着円盤が支配的な状態が実現されたことがない。そのため、これまでのスピン測定ではさまざまな値が報告されている。特に近年では、X線スペクトル解析を用いた方法によって、スピニングがブラックホールの最速回転近くである、という報告がなされている。しかし、そうしたX線スペクトル解析では、仮定したスペクトルモデルが単純すぎて、従来からタイミング解析で示唆されている複雑なスペクトルモデルを無視した結果となっている。そこで、本研究では、「すざく」衛星で観測されたデータの中から、できるだけX線スペクトルにおいて高エネルギー側の別の成分の割合が少ないCyg X-1を探し出し、そのデータを用いて、タイミング解析から示唆されているようなスペクトルモデルを用いてデータ解析を行い、Cyg X-1のスピン導出を試みた。</p>			

「すざく」衛星は、Cyg X-1を数10回観測しているが、高エネルギー側と低エネルギー側のカウントレートの比が最も小さくなる観測を探し出し、その観測の中でも、その比が最も小さく時間帯を選んだ。その結果、選んだ時間帯において高エネルギー側の別成分の割合は、今までのX線衛星で観測されたCyg X-1の中では最も割合が少ないことがわかった。つまり、Cyg X-1のスピン測定の不定性を最も小さくできると期待される。まず、最近行われていた簡単な放射スペクトルモデルで解析を行ってみた。このモデルは、降着円盤放射と高エネルギー側別成分を表す逆コンプトン散乱、および反射成分を含む。その結果、従来と同じく最速回転のスピン値が得られた。しかし、スペクトルフィットの残差には、中間エネルギー帯にデータとモデルの不一致がわずかに見られた。そこで、この不一致を解消すべく、降着円盤最内縁付近で弱い逆コンプトン散乱を伴う円盤放射を加えて解析したところ、残差は見られなくなった。得られたスピン量は最速回転よりも小さい値が得られ、誤差も大きくなった。このモデルにおいて、ブラックホールが回転していない仮定して解析してみたところ、残差は大きくは変化しないことがわかった。つまり、このモデルを適用する限り、ブラックホール回転はしていないと考えても無矛盾ということになり、ブラックホールが最速回転しているという従来の結果は棄却される。

次に、タイミング解析を行って、上で示された降着円盤最内縁付近での弱い逆コンプトン散乱を伴う円盤放射の存在について独立な検証を行った。これまでのブラックホール連星の観測から、一般的に、降着円盤からの放射は変動が小さく、高エネルギー側の逆コンプトン散乱は変動が大きいことがわかっている。そこで、低エネルギー側において時間変動のパワースペクトルを求め、周波数の大きい速い時間変動の割合を調べたところ、簡単な放射モデルで得られた高エネルギー側逆コンプトン散乱の割合に比べて小さく、一方、降着円盤最内縁付近で弱い逆コンプトン散乱を伴う円盤放射を考慮したモデルで得られた高エネルギー側逆コンプトン散乱の割合とconsistentな値であった。よって、本研究で考慮した降着円盤最内縁付近での弱い逆コンプトン散乱を伴う円盤放射を加えたことがもっともらしいことを示す結果となった。

ブラックホール回転の起源の理論的研究においても、ブラックホール連星の中のブラックホールの回転は、それほど速くないことが予想されていたため、従来最速回転を示唆する結果は議論を呼んでいたが、今回示した速くない回転というのは理論的予想と合う。よって、ブラックホールスピンを正しく測定するには、今回本研究で示したように、スペクトル放射モデルを注意深く仮定しないといけないことになる。

以上、審査の結果、本論文の著者は博士（理学）の学位を授与される十分な資格があるものと認める。

公表論文

T. Kawano, C. Done, S. Yamada, H. Takahashi, M. Axelsson, and Y. Fukazawa 2017, "Black hole spin of Cyg X-1 determined from the softest state ever observed", Publication of the Astronomical Society of Japan, accepted and in press.

参考論文

M. Chauvin, M. Jackson, T. Kawano, M. Kiss, M. Kole, V. Mikhalev, E. Moretti, H. Takahashi, M. Pearce 2016, "Optimizing a balloon-borne polarimeter in the hard X-ray domain: From the PoGOLite Pathfinder to PoGO+", *Astroparticle Physics* 82, 99-107

N. Ohmori, T. Kawano (14 番目), 他 26 名 2016, "Suzaku Wide-band All-sky Monitor measurements of duration distributions of gamma-ray bursts", *Publication of the Astronomical Society of Japan*, 68, SP1-S30, 11pp

M. Chauvin, T. Kawano (5 番目)、他 20 名 2016, "Observation of polarized hard X-ray emission from the Crab by the PoGOLite Pathfinder", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters*, 456, L84-L88

M. Chauvin, T. Kawano (5 番目), 他 16 名 2016, "The design and flight performance of the PoGOLite Pathfinder balloon-borne hard X-ray polarimeter", *Experimental Astronomy*, 41, 17-41