

氏名 大間々 知輝

学位(専攻分野) 博士(理学)

学位記番号 総研大甲第 2484 号

学位授与の日付 2024 年 3 月 22 日

学位授与の要件 物理科学研究科 宇宙科学専攻
学位規則第6条第1項該当

学位論文題目 Joint Analysis of X-ray Spectral and Timing using the
State-Space Model: Application for the Black Hole Binary
MAXI J1820+070

論文審査委員 主査 植村 誠
広島大学 宇宙科学センター 准教授
堂谷 忠靖
宇宙科学コース 教授
藤本 龍一
宇宙科学コース 教授
山本 幸生
宇宙科学コース 准教授
辻本 匡弘
宇宙科学コース 准教授
大澤 亮
天文科学コース 助教

博士論文の要旨

氏名 大間々 知輝

論文題目 Joint Analysis of X-ray Spectral and Timing using the State-Space Model: Application for the Black Hole Binary MAXI J1820+070

A black hole binary (BHB) is a binary system consisting of a black hole and a non-degenerate star. The black holes came into existence with Cygnus X-1 in the 1970s, when two pioneers of X-ray astronomy, Minoru Oda and Ricardo Giacconi, boldly speculated that the rapid X-ray variability distinctively seen from this source could only be attributable to a black hole. Since then, many features of BHBs have been identified, such as spectral changes and transient behaviors, but the rapid variability of milli-seconds to seconds remains one of the most distinctive features of BHBs. The origin of the rapid variability is still unknown, but it is believed to carry information about the accretion and ejection processes and the strong gravitational field in the vicinity of a black hole.

X-ray observations of BHBs record the energy and arrival time of individual X-ray photons from BHBs. Spectral and light curve analyses have been performed, but they were done independently from each other. On one hand, the traditional spectral analysis was done for time-sliced spectra ignoring the correlation among them in time. On the other hand, the traditional light curve analysis was done without considering the changing contributions of spectral components in time. We need to develop a method for the joint spectral and timing analysis.

The statistical modeling approach provides the answer. If we denote the observed count in a time bin $n \in \{1, \dots, N\}$ and an energy bin $m \in \{1, \dots, M\}$ as c_{nm} , we regard c_{nm} as a realization of the probability variable C_{nm} . The goal is then to estimate the joint probability distribution of $p(C_{11}, \dots, C_{NM})$. In this manner, the timing and spectral information can be modeled jointly. This approach also has advantages including noise as a model component and the use of latent variables to describe the changes in the system behind the observations.

The statistical modeling approach sounds straightforward and suitable for the analysis of BHB data but has been scarcely used. Several reasons hampered the application to real data, including data quality, modeling techniques, computational resources, and physical models to interpret joint probability. However, recent advances in all of them are clearing these obstacles. It is high time to start using statistical modeling as the norm of X-ray spectral and timing analysis. In this thesis, we demonstrate that this is possible and even crucial in deriving new insights from BHBs by applying the method to the actual data of a BHB.

We use the data of MAXI-J1820+070 observed with The Neutron star Interior Composition Explorer (NICER). MAXI-J1820+070 is a transient BHB discovered in 2018. The source exhibited many spectral and timing features common among BHBs both in the hard and soft states. The low interstellar extinction and the proximity made the source to be extremely bright reaching ~ 4 Crab. NICER is the X-ray observing instrument onboard the International Space Station. The unprecedented collecting area and a large dynamic range of NICER and the brightness of the source resulted in an extreme count rate of $\sim 10^4 \text{ s}^{-1}$, which is rich enough to apply the statistical modeling. We focus on a 50-s length of data during the hard state near the flux peak of the BHB.

We applied classical time series modeling to the X-ray light curves constructed at 0.5–2.0, 2.0–5.0, and 5.0–10-keV. We first used the autoregressive (AR) model was applied for each light curve and a reasonable fit was obtained. Because the noise is included in the AR model, the univariate characteristic functions (e.g., correlation function and power spectrum) are less noisy than those made by the traditional analysis using the raw data. We next used the vector autoregression (VAR) model. Because the mixture among the multi-band light curves is included, the fitting improved from the AR model. This implies the importance of the spectral mixture for the observed light curves.

We therefore proceeded with the linear Gaussian state-space modeling of the multi-band X-ray light

curves in five energy bands. The observed light curves are treated as observation variables, whereas the intensity change of the physical spectral components (Comptonized, disk blackbody, and soft excess components) was treated as latent variables. The system equation was described by the VAR model and the observation equation was described by a linear matrix. In this manner, we included both the spectral mixture and the correlation in time in a single model. As a result, we could derive the multivariate characteristic functions (e.g., cross-covariance, cross spectra, and coherence) among the spectral components, not among the multi-band light curves. This is the advantage of using the latent variable in a model.

We produced the spectrally-decomposed power spectra and derived the break frequencies of the Comptonized, disk blackbody, and soft excess components. We also produced the spectrally-decomposed cross spectra to derive the time lags among them. From these results, we found that the three components affect each other in the causality order of the disk blackbody, Comptonized, and soft excess emission. The different break frequencies in the three components, the time lag between these components, and the mutual power contribution all point to the truncated accretion disk geometry.

This research is one of the first successful applications of the state-space modeling approach to BHB data analysis. We demonstrated the possibility and utility of the joint spectral and timing analysis by applying it to the actual data and obtaining new insights into BHBs. We consider that this should be one of the standard approaches to analyzing the data to come in the near future with advanced observing technologies.

博士論文審査結果

Name in Full
氏名 大間々 知輝

Title
論文題目 Joint Analysis of X-ray Spectral and Timing using the State-Space Model:
Application for the Black Hole Binary MAXI J1820+070

出願者は、ブラックホール X 線連星の X 線データからブラックホール近傍の情報を得るために、状態空間モデルを応用した新しいモデリング手法を開発した。ブラックホール X 線連星 MAXI J1820+070 のアウトバースト極大時に X 線望遠鏡 NICER によって取得された X 線データに対して、この独自の手法を適用し、従来は得られなかった、降着円盤やコロナといった天体を構成する要素の時間変動を抽出することに初めて成功した。その結果、降着円盤の内縁付近で発生した変動がブラックホール直近のコロナに伝搬し、そこから放射された硬 X 線が降着円盤の比較的外側を照射して軟 X 線とその変動を生み出していることを明らかにした。

ブラックホール X 線連星は、ブラックホールへの降着現象や、それを通したブラックホールそのものの理解を深めるための理想的な天体である。しかし、見かけの角サイズが小さいため、直接その構造を分解して観測することはできない。そこで、天体のエネルギースペクトルを再現するような降着円盤やコロナからの放射モデルから、ブラックホール近傍の構成要素が調べられてきた。ただし、このアプローチでは構成要素の位置や因果関係まではわからない。一方、ブラックホール X 線連星からの X 線放射は幅広い周波数帯で時間変動していることが知られており、最も高い周波数帯はブラックホール直近からの放射に対応する。この時間変動を利用して、パワースペクトルや異なる X 線エネルギー帯間の相関関係から、放射源のサイズや因果関係が間接的に調べられてきた。しかし、ある X 線エネルギー帯域には通常、降着円盤やコロナなど、複数の成分からの放射が混ざっている。そのような状況では時間変動の典型的な周波数や、エネルギー帯域間のタイムラグなどの情報は正しく抽出されないことが既に知られている。

本論文では 1 章から 4 章にかけて、ブラックホール X 線連星の X 線データからブラックホール近傍の情報を得る研究について、これまでに得られた理解と、上述のような問題点について、具体的な先行研究の紹介と共に、丁寧に議論されている。そして、現状の問題を打開する方法として、出願者はエネルギースペクトルと時間変動の同時モデリングを提案し、その具体的な手法として状態空間モデルに着目した。

状態空間モデルは主に時系列データの解析手法として知られる手法である。直接は観測できない潜在変数に対して、その時間発展を記述するシステムモデルと、潜在変数と観測データとの関係を記述する観測モデルの 2 つの統計モデルで記述される。状態空間モデルは統計学分野で以前から知られている古典的なモデリング手法と言えるが、ブラックホール X 線連星の X 線データに対する応用はもちろん、天体の時系列データ全般に対してもその応用例はごく限られている。

出願者は MAXI J1820+070 の X 線データからエネルギー帯域を 5 つに分け、それぞれの光度曲線を入力データとし、ブラックホール近傍の構成要素である降着円盤、コロナ、軟 X 線放射源からの 3 つの放射強度を潜在変数とする状態空間モデルを構築した。これら潜在変数は不規則に時間変動することが予想されるが、宇宙物理学分野ではこれまでそのような変動のモデリングの研究は十分に発展してこなかった。出願者はシステムモデルとして、ベクトル自己回帰モデルを導入することで、天体の不規則な時間変動のモデリングを可能にすると共に、構成要素間の因果関係の情報もモデルに組み込んでいる。また、観測モデルは各構成要素の重ね合わせでデータを説明しており、従来の宇宙物理学的な描像とも矛盾がない。

このモデルをデータに最適化することで、3 つの構成要素の時間変動を抽出し、それぞれのパワースペクトル、相関関数、パワー寄与などの情報を得ることに初めて成功した。得られた結果から、ブラックホール重力半径の 100 倍程度の位置で降着円盤が途切れ、降着円盤内で生じた変動がそれより内側のコロナに伝搬し、コロナからの硬 X 線が、1000 重力半径付近の降着円盤を照射することで軟 X 線が放射されることが明らかになった。

以上、出願者は本論文によって、当該分野では全く新しいモデリングによる、ブラックホール X 線連星のデータ解析方法を確立し、宇宙物理学的に新しい知見を得た。直接は観測できないブラックホール近傍の構成要素に対して、潜在変数を用いる状態空間モデルは最適な選択と言える。データから抽出された情報は従来とは質的に異なるものであり、特に構成要素間の因果性に関する情報が抽出できる点は高く評価できる。また、このようなモデリングはブラックホール X 線連星の X 線データ以外でも、他の天体の時系列データに応用が可能であり、その波及性の高さも評価に値する。したがって、本論文は博士論文として十分ふさわしい内容であり、審査結果は合格と判定した。