

課題名(タイトル):

Study of Quantum Machine Learning for Detecting Anomaly X-ray Emission from Black Holes

利用者氏名:

○川室太希(1)

理研における所属研究室名:

(1) 玉川高エネルギー宇宙物理研究室

1. 本課題の研究の背景、目的、関係する課題との関係
宇宙には、超巨大ブラックホール (SMBH: Super-massive black hole) が数多存在するが、ある一定の割合について周辺から質量が降着し、その重力エネルギーが放射エネルギーに転化されることで、莫大な放射エネルギーが放出されている。このことは、SMBH 近傍からの放射の理解が、現代天文学の大きな課題である SMBH の成長史の解明に対して、極めて重要であることを示唆している。これまでの研究から一般的な SMBH からの X 線放射は、数時間から数年といった様々な時間尺度で変動することが知られているが、SMBH に関連する特異な現象、例えば星潮汐破壊現象や Quasi-periodic eruption (QPE) は、それとは異なる振る舞いを示す。これらの発生頻度は小さいが、SMBH への質量降着には様々なパスがあり、異常変動の検出が SMBH への降着メカニズムの完全理解に重要であると示している。そこで、未知の変動も含めてより大きなサンプルを構築し、理解を深めるには探査手法の検討が重要である。候補の一つとして機械学習が考えられるが、その中でも、我々は特に量子コンピュータもしくは量子回路を想定した量子機械学習の可能性を模索している。

2. 具体的な利用内容、計算方法

いま現在、第一歩として、一般的な SMBH の X 線放射の変動の模擬観測データを教師として、それらに QPE 現象が加わったものを異常データとして異常を検出できるかを検証している。教師データの作成には、一般的な Power spectrum density を仮定し、Timmer & Koenig (1995) に則り光度曲線を再構築した。QPE に関しては、5 天体から観測された QPEs を強度、継続時間、そして duty cycle で特徴づけを行い、それらの頻度分布をもとに様々な QPE データを作成した。学習には、短期的な情報に更に長期のトレンドも考慮できる Long Short-Term Memory (LSTM) ネットワークを用いた。量子機械学習では、特徴量 (フラックス値) を量子ビットの 2 状態 ($|0\rangle$ と $|1\rangle$) の複素振幅に埋め込み、それらが複素球面上でどのように時間変化す

べきかを学習させる。最終的には、量子計算機を用いた学習を行う予定であるが、その前の段階として、モデルの性能評価を計算しておくことが、効率的な量子計算機の使用には極めて重要である。そこで、HOKUSAI を通じて、構築した量子版 LSTM の有効次元 (モデルのパラメータの内、実行的に働いているパラメータの数) の計算を行った。

3. 結果

様々な量子回路を採用した量子版 LSTM の有効次元とさらに古典的な LSTM の有効次元を計算して、比較したところ、いくつかの量子版 LSTM において約 3-4 倍有効次元が高くなることがわかった。また、有効次元が高いモデルを用いて、X 線望遠鏡 XMM-Newton によって提供されている約 4 万の光度曲線の中から約 100 個もの異常を検知した。古典の場合では、約 60 個であり、量子版の方が高い検知率を達成できることがわかった。

4. まとめ

SMBH の成長史の理解に向けて、様々な降着現象を網羅的に研究するために、量子機械学習を用いた未知の降着現象のサーベイを目指している。量子版 LSTM を構築し、その性能評価を HOKUSAI を用いて行った。実際に高い性能 (高い有効次元) を有することがわかった量子版 LSTM を用いて、古典的な場合よりも多くの異常を検知することに成功した。

5. 今後の計画・展望

計算した結果を含めて論文にまとめ、欧文雑誌 Astrophysical Journal に投稿しており、掲載許可を目指す。また発展研究として、現状のアルゴリズムよりも量子計算機の特徴を活かした異常検知の手法の開拓を目指す。

2024 年度 利用報告書

2024 年度 利用研究成果リスト

【口頭発表】

1. Taiki Kawamuro, “Quantum Machine Learning for the X-ray Identification of Black Holes Linked to Gravitational Waves”,
JOINT N3AS - iTHEMS MEETING ON QUANTUM INFORMATION SCIENCE IN MULTIMESSENGER
ASTROPHYSICS, June 17, 2024, RIKEN
2. 川室太希、「活動銀河核研究の進展と展望」、XRISM の初期成果と未来への期待、2025 年 3 月 5 日、大阪大学