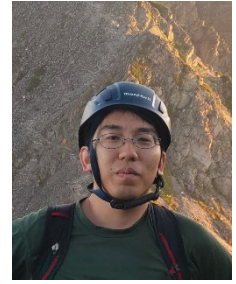


ブラックホール観測による
超弦理論由来のアクシオン探査に向けた研究
Towards detection of string axion through black hole observations

京都大学 大宮 英俊



ブラックホールは、光さえ脱出できない天体として知られている一方で、未知の素粒子を探るための自然の実験場にもなり得る。特に、究極理論の筆頭候補である超弦理論から予言され、暗黒物質の候補としても考えられているアクシオンと呼ばれる非常に軽い粒子の探査を可能にする。アクシオンが存在すると、回転するブラックホールの周囲で超放射と呼ばれる増幅現象が起こり、ブラックホールのまわりに巨大なアクシオン雲が形成される。この雲は重力波を放射するため、ブラックホールや重力波の観測を通して、アクシオンを検証することが可能になる。

本研究の目的は、アクシオンの雲がどのように成長し、どのような観測シグナルを残すかを定量的に明らかにすることである。従来の研究では、雲を一つの単純な状態として扱う近似がしばしば用いられてきた。しかし、アクシオンは自己相互作用を持ち、ブラックホール周囲の伴星による潮汐力を受ける。これらの効果は、散逸、状態間の遷移といった効果を通じて雲の進化に影響し、観測される重力波も影響される。

本研究では、まず自己相互作用するアクシオン雲が孤立した恒星質量ブラックホールの周囲で放射する重力波を解析した。その結果、自己相互作用は雲の成長を単に抑制するだけでなく、様々な状態を励起し、従来とは異なる低周波数帯の重力波を生み得ることが分かった。特に、準束縛状態間の遷移によって、将来の重力波検出器で重要となるデシヘルツ帯の信号が現れる可能性を示した。次に、アクシオン雲を伴うブラックホールが連星系にある場合を調べた。伴星の潮汐力は雲を散逸させるだけでなく、自己相互作用と組み合わせることで、連星重力波の位相補正や雲の動的不安定性を引き起こし得ることが分かった。これは、連星インスパイラル波形からアクシオンの自己相互作用を読み出す可能性を示す結果である。さらに、ブラックホール超放射を量子場理論の立場から定式化し、アクシオン雲のその時間発展を導いた。これにより、古典的な雲として扱われる対象が、量子的なゆらぎからどのように成長するのかを理解する基盤が整った。

今後は、自己相互作用、潮汐効果、量子論的生成過程を含むアクシオン雲の理論予測を、ブラックホールスピン分布、連続重力波、連星重力波波形と直接比較できる形に発展させる。これにより、将来の多周波数重力波観測を用いて、超軽量アクシオンの質量や相互作用を制限することを目指す。

【キーワード】 ブラックホール、重力波、新粒子探査

【参考文献】

- ・ A. Arvanitaki, S. Dimopoulos, S. Dubovsky, N. Kaloper and J. March-Russell, "String Axiverse," Phys. Rev. D 81 (2010), 123530
- ・ H. Omiya, T. Takahashi, T. Tanaka and H. Yoshino, "Deci-Hz gravitational waves from the self-interacting axion cloud around a rotating stellar mass black hole," Phys. Rev. D 110, 044002 (2024)
- ・ T. Takahashi, H. Omiya and T. Tanaka, "Self-interacting axion clouds around rotating black holes in binary systems," Phys. Rev. D 110, 104038 (2024).
- ・ L. Fu, H. Omiya, T. Tanaka, X. Tong, Y. Wang and H.-Y. Zhu, "Quantum Treatment of Black Hole Superradiance," arXiv:2512.06790 (2025).