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

（日本物理学会推薦）

代表研究者　　京都大学　大宮　英俊　　Kyoto University　Hidetoshi OMIYA

Black hole superradiance provides a way to probe ultralight axions predicted in string theory through astrophysical observations. When a bosonic field is gravitationally bound to a rotating black hole, superradiant amplification can produce a macroscopic axion cloud, which extracts angular momentum and emits gravitational waves through annihilation and level transitions. We investigated the time evolution of such clouds beyond the commonly used linear and single-mode approximations, focusing on axion self-interactions, tidal perturbations in binary systems, and the quantum origin of superradiant growth. For isolated stellar-mass black holes, we found that self-interactions excite higher bound modes and induce level transitions whose gravitational waves can lie in the deci-Hz band. For black holes in binary systems, we showed that tidal perturbations coupled with self-interactions can modify the inspiral gravitational-wave phase and, in some regimes, trigger dynamical instabilities of the cloud. We also formulated black hole superradiance within quantum field theory, deriving the evolution of particle number, energy, and angular momentum and clarifying the relation to Hawking radiation and adiabatic backreaction. These results establish a more systematic framework for using black-hole spins and gravitational waves to constrain axion masses and self-interactions. The resulting predictions are relevant to future multi-band gravitational-wave observations.

研究目的

本研究の目的は，回転ブラックホール周囲に形成される超軽量アクシオン雲の時間発展と，そこから生じる観測シグナルを定量的に予言することである．特に，従来の理論予測でしばしば理想化されてきたアクシオン自己相互作用，ブラックホールへの反作用，および周囲環境による潮汐効果を，可能な限り同一の枠組みで扱うことを目標とする．

アクシオンおよびアクシオン類似粒子は，超弦理論において自然に現れる超軽量粒子候補として期待されている[1]．また，QCD アクシオンは強い CP 問題の解決と関係し，より一般のアクシオン類似粒子もダークマター候補として研究されている．このような粒子は，その質量と自己相互作用で特徴づけられ，したがって，アクシオンの検証は，超弦理論の低エネルギー帰結，強い CP 問題，ダークマターといった基礎物理の重要課題を観測的に調べる手段となる．

回転ブラックホール周囲にアクシオン場が存在すると，ブラックホール超放射によってマクロスコピックな雲が形成され得る[1]．ブラックホール超放射は，入射波が回転ブラックホールからエネルギーと角運動量を引き抜いて増幅される現象である．この過程が重力的に束縛された準束縛状態に対して起こると，アクシオンの占有数が増大し，ブラックホール周囲に雲が成長する．特に，ブラックホール半径とアクシオンのコンプトン波長が同程度となる質量帯では成長率が大きくなる．

アクシオン雲の存在は，ブラックホール観測によって検証できる可能性がある．第一の観測量は，雲がブラックホールから角運動量を引き抜くことによって生じるブラックホールスピン分布の変化である．アクシオン質量に応じて，特定の質量・スピン領域に特徴的な欠損が現れると期待される．第二の観測量は，雲から放射される重力波である．アクシオン対消滅や準束縛状態間の遷移は，連続重力波として

観測される可能性がある．また，連星の運動が雲との潮汐相互作用により変化する場合は，連星重力波への補正から検証できる．

本課題では，これらの観測シグナルを信頼できる形で予言するために，非線形効果と環境効果を重点的に扱う．アクシオン自己相互作用は，雲の内部で異なる準束縛状態を結合させ，散逸，モード混合，動的な不安定性を通じて雲の成長と重力波放射を変化させる．また，連星伴星や降着円盤などの環境が作る潮汐場は，雲のモード遷移や非束縛状態への散乱を誘起し，連星重力波の位相にも影響し得る．これらの効果を個別に評価するだけでなく，相互作用するアクシオン雲が実際のブラックホール環境でどの程度存続し，どのような観測量を残すかを明らかにすることが本研究の狙いである．最終的には，アクシオン質量，崩壊定数，ブラックホール質量・スピンを変えた広いパラメータ領域で，スピン分布，連続重力波，連星重力波波形への影響を比較可能な形で整理することを目標とする．

研究経過

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周囲で放射する重力波シグナルを解析した[2]．過去の研究で構築した断熱近似に基づく雲の長時間進化計算法を用い，非相対論近似や二モード近似に制限されない範囲で，高次多重極モードを取り入れた数値計算を行った．その結果，成長率が最大となる主超放射モードだけでなく，自己相互作用によって複数の高次モードが順に励起され，高次モードも観測シグナルに寄与することが分かった．特に，角運動量量子数が 2 だけ異なる準位間遷移から強い重力波が生じることを示した．この信号は恒星質量ブラックホールではデシヘルツ帯に現れ，将来の中間周波数帯重力波検出器による探索対象になり得る．このような過程を考えない場合は，キロヘルツ帯にのみ信号が現れる．自己相互作用が単に雲の成長を抑制するだけでなく，新たな周波数帯の重力波チャンネルを開くことを明らかにした．

次に，自己相互作用するアクシオン雲を伴うブラックホールが連星系に属する場合について，雲と連星軌道のインスパイラル中の進化を調べた[3]．自己相互作用が無視できる場合，潮汐相互作用は主として雲を散逸させる効果として働く．さらに，自己相互作用が効く場合には，モード結合によって性質の異なる二種類の雲成分が共存し，それぞれが潮汐場に応答し，別々に散逸する．この研究では，無限遠への放射とブラックホールへの吸収に加えて，共鳴・非共鳴の遷移を介した間接的な放射過程も二次摂動として取り入れた．その結果，自己相互作用の有無は連星重力波の位相補正として刻まれることが分かった．さらに，インスパイラル中に自己相互作用によって動的不安定性が起こり得ることも確認した．これらは，連星インスパイラル波形からアクシオン自己相互作用を読み出す可能性を与える結果である．

さらに，ブラックホール超放射を量子場理論の観点から定式化する研究も進めた[4]．従来，超放射雲の形成は古典場の不安定性として記述されることが多い．しかし，初期条件として量子ゆらぎに相当するものを手で仮定する場合が多い．雲進化を生成から観測まで，一貫して取り扱うために，量子論的な取り扱いを行った．特に，曲がった時空上の量子場として回転ブラックホール周囲の有質量スカラー場を正準量子化し，粒子数，エネルギー，角運動量の時間発展を統一的に導いた．これにより，雲の成長が初期状態の選択に依存しないこと，ホーキング放射，ブラックホールスピンへの断熱的反作用，および自己相互作用下の準位遷移の向きが同一の量子論的枠組みで理解できることを確認した．この成果は，古典的な雲進化計算を量子論的に位置づける基盤を与えるものであり，自己相互作用や反作用を含む進化の初期条件を検討するうえで重要な出発点となる．

数値計算面では，多数の準束縛モードを含む結合方程式を長時間にわたって安定に追跡するため，既存コードの整理とパラメータスキャンの効率化も進めた．特に，アクシオン質量，自己相互作用の強さ，連星軌道周波数を系統的に変え，どの領域で遷移重力波，潮汐蒸発，動的不安定性などの効果が支配的になるかを比較した．この作業により，観測シグナルを単一の代表例ではなく，相図的に把握する準備が整った．

これらと並行して，関連する観測チャンネルの拡張として，極端質量比インスパイラルが銀河中心巨大ブラックホール周囲のダークマター分布に与える共鳴的な潮汐散乱の効果，およびパルサー観測を用いた偏極した超軽量ベクトル暗黒物質やパリティを破る確率的重力波背景の検証についても研究を行った．これらはアクシオン雲そのものではないが，ブラックホール近傍の超軽量場や暗黒物質分布を重力

波・パルサー観測で調べるという本課題の大きな目標と密接に関係している．これらの研究を通じて，新粒子や暗黒物質の情報が観測量へどのように刻まれるかを計算する技術を蓄積した．

考察

本期間の成果により，申請段階で掲げた「自己相互作用，潮汐力，反作用を含むアクシオン雲の観測シグナルの定量化」という目標は大きく前進した．特に，自己相互作用が高次モードを励起し，従来よりも多様なモード間遷移による重力波を生むことを示した点，および連星系中で自己相互作用と潮汐力を同時に取り入れた時間発展を具体的に解いた点が重要である．また，超放射雲の生成と成長を量子場理論の枠組みで捉え直したことで，古典場としての雲進化計算の初期条件と反作用をより基礎的な立場から検討する準備が整った．

本研究の成果は，従来のブラックホールスピン制限やアクシオン対消滅重力波とは異なる観測可能量を提示する．自己相互作用によって励起される高次モード間遷移は，恒星質量ブラックホールの場合にデシヘルツ帯の重力波を生み得るため，将来の多周波数重力波観測における探索戦略を広げる．また，連星中の雲に対する解析では，潮汐相互作用が雲を単純に破壊するだけでなく，自己相互作用と組み合わさって連星重力波の位相補正や動的不安定性を生むことが分かった．これは，雲の存続条件や検出可能性を評価するうえで，非線形性と環境効果を同時に扱う必要があることを示している．

一方で，残された課題も明確になった．第一に，ブラックホールへの完全な反作用を含む長時間共進化については，まだ理想化が残っている．本研究では計算資源の制約から，時間発展に含める準束縛モードの数を制限していた．一方，後続の独立研究では，より高次の準束縛状態を含めることがブラックホールのスピンダウン評価に重要となり得ることが示されている[5]．したがって，観測制限へ接続するためには，高次モードの収束性を調べ，雲の成長・散逸・遷移とブラックホール質量・スピンの変化を保存則に基づいて同時に追跡する必要がある．

第二に，連星系の軌道進化についても，円軌道，スピン整列，摂動的な潮汐相互作用といった仮定を緩めた場合に，得られた位相補正や不安定性がどの程度頑健に残るかを調べる必要がある．第三に，自己相互作用が強い領域では動的不安定性や多モード混合が現れるため，断熱近似が破綻する領域を判定し，必要に応じて断熱近似を用いない直接時間発展計算と接続することが求められる．第四に，量子的なゆらぎから始まった雲が，どの時点で古典場として扱えるようになるかを明らかにする必要がある．粒子数が十分大きい極限では古典場近似が成立すると期待されるが，量子場特有のゆらぎが観測量に残るかどうかは，今後の検討課題である．

以上を踏まえると，本研究の意義は，アクシオン雲を単独の準束縛モードや線形摂動として見る描像から，非線形相互作用，環境摂動，量子論的生成過程を含めて扱う方向へ進めた点にある．今後は，これまで得たモード結合，潮汐遷移，量子論的基礎の理解を統合し，観測データと直接比較できるブラックホールスピン分布制限，連続重力波，および連星重力波波形の予言へ落とし込む．これにより，ブラックホール観測を用いた超弦理論由来アクシオン探査の理論的信頼性を高めることができる．特に，デシヘルツ帯，地上検出器帯，宇宙重力波検出器帯をつなぐ理論予測を整備すれば，単独の観測では縮退し得るアクシオン質量と自己相互作用の情報を相補的に制限できると期待される．

参考文献

1. A. Arvanitaki, S. Dimopoulos, S. Dubovsky, N. Kaloper and J. March-Russell, ``String Axiverse,'' Phys. Rev. D 81 (2010), 123530
2. 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)
3. T. Takahashi, H. Omiya and T. Tanaka, “Self-interacting axion clouds around rotating black holes in binary systems,” Phys. Rev. D 110, 104038 (2024).
4. L. Fu, H. Omiya, T. Tanaka, X. Tong, Y. Wang and H.-Y. Zhu, “Quantum Treatment of Black Hole Superradiance,” arXiv:2512.06790 (2025).
5. S. J. Witte and A. Mummery, ``Stepping up superradiance constraints on axions,'' Phys. Rev. D 111 083044 (2025)

研究の発表

口頭発表

1. Hidetoshi Omiya , “Deci-Hz gravitational waves from the self-interacting axion cloud,” New Physics from Gravitational Waves (Kyoto University, 8/6/2025)
2. 大宮英俊, “Hellings-Downs curve deformed by ultralight vector dark matter,”一般公演，第 79 回日本物理学会秋季大会（北海道大学，2024 年 9 月 17 日）
3. Hidetoshi Omiya , “Deci-Hz gravitational waves from the self-interacting axion cloud,” KEK Theory seminar, (KEK, 12/17/2025)
4. 大宮英俊, “On the interacting field near black holes,”GR 西日本（香川，2025 年 3 月 5 日）
5. Hidetoshi Omiya, “Interacting Hawking radiation,” Mini Workshop on gravity and cosmology (Kyoto University,3/28/2025)
6. Hidetoshi Omiya, “Deci-Hz gravitational waves from the self-interacting axion cloud,” APTCP-GW (ASIAA, 4/23/2025)
7. Hidetoshi Omiya,“Gravitational Wave Background and Pulsar Polarization Array,” New Physics from Gravitational Waves 2025 (Hiroshima University, 9/20/2025)
8. 大宮英俊， “Quantum treatment of black hole superradiance,”数理物理セミナー（オンライン，2026 年 2 月 9 日）

ポスター発表

1. Hidetoshi Omiya , “Deci-Hz gravitational waves from the self-interacting axion cloud,” COSMO 2024, (Kyoto University, 12/17/2025) (ポスター発表)
2. Hidetoshi Omiya , “Deci-Hz gravitational waves from the self-interacting axion cloud,” GR-Amaldi, (Glasgow, 12/17/2025) (ポスター発表)

誌上発表

1. 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).
2. T. Takahashi, H. Omiya and T. Tanaka, “Self-interacting axion clouds around rotating black holes in binary systems,” Phys. Rev. D 110, 104038 (2024).
3. T. Miyachi, R. Namba, H. Omiya and N. Oshita, ``Path to an exact WKB analysis of black hole quasinormal modes," Phys. Rev. D 111, 124045 (2025)
4. T. Suzuguchi, H. Omiya and H. Takeda, “Possibility of multi-messenger observations of quasi-periodic eruptions with X-rays and gravitational waves,” Publ. Astron. Soc. Japan 78, 185--198 (2026).
5. T. Kakehi, H. Omiya, T. Takahashi and T. Tanaka, “Resonant DM scattering in the Galactic Center under the influence of extreme mass ratio inspirals,” Phys. Rev. D 112, 104061 (2025).
6. K. Nomura, H. Omiya and T. Tanaka, “Signature of polarized ultralight vector dark matter in pulsar timing arrays,” Phys. Rev. D 112, 123524 (2025).
7. Q. Liang, K. Nomura and H. Omiya, “Detecting parity-violating gravitational wave backgrounds with pulsar polarization arrays,” Phys. Rev. D 113, 064003 (2026).
8. L. Fu, H. Omiya, T. Tanaka, X. Tong, Y. Wang and H.-Y. Zhu, “Quantum Treatment of Black Hole Superradiance,” arXiv:2512.06790 (2025)
9. T. Miyachi, R. Namba, H. Omiya and N. Oshita, “Instability of parametrized black hole quasinormal modes in the high-overtone limit via the exact WKB analysis,” arXiv:2512.18631 [gr-qc] (2025).