

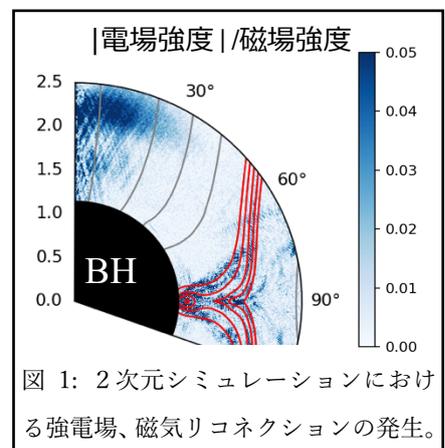
一般相対論的プラズマ粒子シミュレーションで迫るブラックホール磁気圏動的進化と放射特性

理学研究科 天文学専攻 金 滉基

ブラックホール (BH) は周囲のあらゆる物質を吸い込む天体と思われがちであるが、しばしば細く絞られたプラズマ流が噴出する様子 (ジェット) が観測されている。現状の理論的解釈では、プラズマの降着に伴いBH近傍に形成される磁場優勢領域 (磁気圏) において、回転するBHと磁場の相互作用がジェットを形成すると考えられている[1]。しかし、未だ観測的検証は行われていない。これはBH磁気圏の動的進化、付随する電磁波放射の理論が確立しておらず、観測戦略を立てにくいためである。私は、この磁気圏由来電磁波放射理論の構築を目指し、一般相対論的プラズマ粒子シミュレーションの手法を用いた解析を行ってきた。

まず、磁気圏内部の局所的領域に注目した1次元シミュレーションを遂行した[2]。その結果、磁気圏内部における局所的なプラズマ空乏が周期的な強電場の発生を引き起こし、そこでの強烈な粒子加速により、最大でジェットの総噴出エネルギーの約10%にも達する高強度のガンマ線放射が生じることを示した。また、多数のパラメータについて強電場の動的進化・放射効率を調べた結果、磁気圏周囲の降着流に由来する放射の強度が強電場領域の活動を制御することを明らかにし、解析的モデルによりシミュレーション結果を再現することにも成功した。これにより、広範なBH質量・プラズマ降着率について、BH磁気圏由来放射特性を議論することが可能となった。そこで次に、銀河系内に単独で浮遊する恒星質量BH (孤立BH) 周囲の降着円盤・磁気圏系を考慮し、多波長放射スペクトルを予測するモデルを構築した[3]。その結果、銀河面付近の高密ガス中に孤立BHが存在する場合に、可視・X線・ガンマ線帯域で観測可能な強度の放射が見られる可能性があることを明らかにした。銀河系重力場中の孤立BHの運動を考慮した空間分布の議論から、高感度X線・ガンマ線望遠鏡において最大数100天体の検出が期待される。こうして、現時点で1天体しか発見されていない孤立BHの新たな検出可能性を提案するとともに、磁気圏由来放射の直接観測が可能な天体としてのポテンシャルを示した。

BH磁気圏に起源を持つ放射現象の他の候補として、活動銀河核由来の高エネルギーガンマ線増光現象 (フレア) が挙げられる。フレア発生機構を詳細に理解することを目的とし、私はさらに、磁気圏全体の動的進化を追跡する2次元シミュレーションを遂行した。その結果、強電場は主にBH回転軸方向に卓越する一方、赤道面付近では磁場構造の対称性を保つために電流シートが生じ、そこでは断続的に磁気リコネクションが発生する様子が見られた。また強電場領域、磁気リコネクション領域いずれにおいても粒子加速が起き、フレアの時間スケールと対応する短時間変動が生じた。一方で、平均的な粒子の運動方向と磁場ベクトルのなす角については、加速過程の相違によりそれぞれ磁場平行、直交成分が優勢となり、それによって逆コンプトン散乱、シンクロトロン放射という異なる放射過程が卓越した。これを踏まえて、強電場領域ではより高エネルギーの粒子が生成され、それらに由来する逆コンプトン散乱が観測されているフレアのピーク周波数帯域と対応することを解析的に示した。



これら一連の研究成果により、BH磁気圏由来電磁波放射の検出可能性が明らかとなった。将来的には、観測との比較によりBH磁気圏天体の同定が期待でき、ジェット駆動機構の観測的検証につながるものである。

<参考文献>

[1] Blandford, R. D., & Znajek, R. L. 1977, MNRAS, 179, 433; [2] Kin, K., Kisaka, S., Toma, K., Kimura, S. S., & Levinson, A., 2024, ApJ, 964, 78; [3] Kin, K., Kuze, R., & Kimura, S. S., 2025, ApJ, 985, 251