

ブラックホール磁気圏からの粒子供給機構

木坂将大 (東北大学)

利用カテゴリ 利用カテゴリ XC-B

本研究では、相対論的ジェットへの物質供給機構の解明を目指した。ブラックホールから相対論的ジェットの放出現象が観測されている。これは、ジェットの根元に当たるブラックホールのホライズン近傍の磁気圏と呼ばれる電磁場エネルギーが支配的な領域に、物質が連続的に注入・加速されていることを示している。しかし、この磁気圏への物質の供給過程は未解明である。電磁流体シミュレーションでは磁気圏領域へ物質注入が十分でないため真空に近い状態となり、現状では計算を続けるための人為的な物質注入が導入されている。そのため、観測データとの比較においてその妥当性が疑われる。実際、イベントホライズン望遠鏡の観測により M87 のブラックホール近傍の直接撮像が成功したものの、撮像データと数値シミュレーション結果の比較から放射領域を解釈する際、ジェット領域からの放射の寄与が排除されている。また、活動銀河核からホライズン近傍起源と考えられるガンマ線フレアの検出が報告されたものの、ガンマ線観測データから放射領域のサイズ以外にあまり情報が引き出せていない。

有力な物質供給機構の一つは、ブラックホールのホライズン近傍での電磁カスケード現象である。この機構では、磁気圏での強い電場で誘起で荷電粒子が加速される。加速された粒子は高エネルギーのガンマ線を放出し、このガンマ線を起点とした電子陽電子の雪崩的な生成で多くの物質が供給される。このような過程は電磁流体シミュレーションでは一般には扱えない。電磁カスケードの過程でガンマ線放射を伴うことから、実際に非常に短い時間で光度が変動するガンマ線帯域のフレアは電磁カスケード現象起源が有力である。

ブラックホール磁気圏での電磁カスケード現象の理論的な解明のため、本研究ではプラズマ粒子シミュレーションを行った。ほとんどの先行研究では、定常のもとの解析的な評価が行われてきた。しかし、電場による粒子加速や電場の遮蔽は非定常な現象であり、時間発展を考慮することで結果が大きく異なる可能性がある。そこで、プラズマ粒子シミュレーションとして Particle-in-Cell (PIC) 法を利用した。電磁カスケードに伴う粒子生成に対しては、粒子からのガンマ線放射と光子衝突による粒子生成機構を適切に考慮したモンテカルロ法を組み合わせた。また、ブラックホールのホライズン近傍 (ホライズン半径の $\sim 1 - 5$ 倍程度) で起こる現象を扱うため、一般相対論的效果を適切に取り入れた。本研究では、Levinson & Cerutti (2018) で用いられた数値計算コードを発展させて研究を進めた。

本年度の研究の結果、先行研究で報告されていた準定常的な粒子加速と粒子生成と異なり、効率の高い粒子加速と生成がある決まった領域で準周期的に起こることがわかった (図 1)。さらに広範囲のモデルパラメータのもとで調査を行った結果、ブラックホール近傍から放出される粒子のエネルギーや個数、逆コンプトン散乱起源のガンマ線の光度を定量的に評価することを可能にした。また、本研究では現実的な範囲のパラメータを採用した結果として、曲率放射が結果に与える効果、具体的には曲率放射のガンマ線起源の粒子生成が電磁場構造に支配的な影響を与える条件、ガンマ線観測で検出されうる条件を明らかにした。特に、実際に検出されている電波銀河からの数 100 GeV の激しい時間変動を見せたフレアが曲率放射起源である可能性を初めて示した。このほか、数値シミュレーションでのセルあたりの粒子数を変えて計算を行い、得られた結果に対する収束を確認したところ、先行

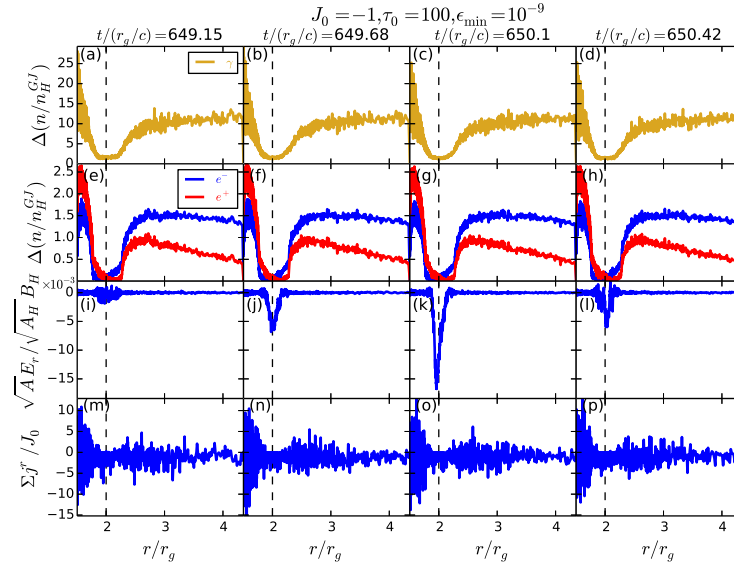


図 1: ブラックホール近傍での準周期的に起こる電磁カスケードの1サイクルのスナップショット。パネル (a)-(d) が光子数密度, パネル (e)-(h) が電子 (青) と陽電子 (赤) の個数密度, パネル (i)-(l) が電場, パネル (m)-(p) が電流密度の分布を表す. $r = 2r_g$ の領域 (破線) で電磁カスケードが发展している. 生成した粒子により電場が遮蔽されるが, 粒子供給も止まるため再び電場が发展するサイクルを繰り返す.

研究のセットアップ (セルあたり 5 個) では計算領域内の物理量としての粒子数密度が現実より 10 倍程度過剰になることがわかった (図 2). 我々の調査の結果, 採用すべき最小の粒子数を明らかにした. この結果は今後の空間 2 次元シミュレーションへ拡張を行う上でも重要な指標になると期待できる. これらの結果は学術論文として投稿準備中である.

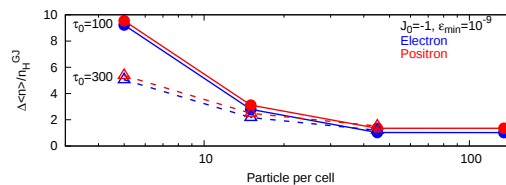


図 2: シミュレーションにおけるセルあたりの粒子数の関数としての. 計算領域内の電場を遮蔽するのに最低限必要な粒子数密度で規格化した計算領域内の粒子数密度の平均値.