

3次元一般相対論的磁気流体シミュレーションによる降着円盤の磁気活動性とジェット

水田晃 (理化学研究所)

利用カテゴリ 利用カテゴリ XC-B

活動銀河核ジェットは活動銀河中心の超巨大質量ブラックホール (およそ太陽質量の 10^8 – 10^9 倍) とそれを囲む降着円盤の系から噴出し、相対論的バルク速度にまで加速される収束の良いアウトフローである。ジェットは降着流によって解放される重力エネルギーの一部を利用し形成されると考えられるが、その機構はよくわかっていない。降着流によって形成される降着円盤内部では磁気回転不安定性 (Magnetorotational Instability: MRI) による磁場増幅と、磁気圧が熱圧程度の飽和磁場レベルに達した後、磁気拡散による磁気エネルギーの解放が繰り返されており、磁気拡散によって磁気エネルギーが熱や運動エネルギーに変換される時に、強い磁場が赤道面付近から円盤外側へと鉛直方向に放出され、その一部が極軸回りの低密度領域に侵入し、ジェットのポインティング成分を活性化することを、3次元一般相対論的磁気流体シミュレーションによって高速回転するブラックホール (スピンパラメータ 0.9) の場合に関して示した (Mizuta et al. 2018)。ここで見られる特徴的なものは、MRI による磁場増幅の時間スケールと、磁場が増幅されはじめてから減衰し、次の磁場増幅を迎えるまでの 1 サイクル時間であるが、前者は MRI の線形成長解析より磁場増幅がおきる場所でのケプラー回転周期程度、後者は、近年のローカルボックスでの高解像度シミュレーションより 10 ケプラー回転周期程度といわれており、我々のブラックホールスピン 0.9 を仮定したグローバル 3 次元計算でも最内安定軌道半径のやや外側の半径でのケプラー周期に相当する時間スケールでの磁場増幅と、8-10 倍のケプラー周期での磁気活動の繰り返しが特徴的に見られた。ケプラー周期は大きい半径にいくほど長くなるため、最内安定軌道半径のやや外側のケプラー周期が最も短い時間スケールとして系の時間変動に現れるためである。

最内安定軌道半径はブラックホールのスピンパラメータに依存し、高速順回転の場合イベントホライズンに近づき、ブラックホールスピンが遅くなるにつれ、外側に移行し無回転ブラックホールでは重力半径の 6 倍、逆回転になると更に最内安定軌道半径は外側へ移行し、最大で重力半径の 9 倍へ漸近する。そのため、降着円盤内部の磁気活動に起因する、系の時間変動のタイムスケールはブラックホールスピンパラメータが小さい程、最内安定軌道半径は外側へ移行する。ケプラー周期は半径が大きいほど長くなり、系に現れる磁気活動に起因する時間スケールとして最も短いものは、スピンパラメータが小さい程長くなっていくと考えられる。一方で、ブラックホールのスピンパラメータを観測で推定するのが困難であり、ブラックホール近傍の明るさの時間変動の時間スケールからブラックホールスピンを推定できる可能性がある。また、降着円盤での特徴的な時間変動性がジェットに伝播するののかという問題も興味深い。そこで、いくつかのブラックホールのスピンパラメータに関して、ブラックホール降着流のグローバル磁気流体シミュレーションを行い、系の時間変動性とブラックホールスピンの相関に関して調べた。

ブラックホールスピンパラメータを 0.1, 0.3, 0.5, 0.7 と仮定し、それぞれのスピンパラメータに対して、一般相対論的磁気流体シミュレーションによる、ブラックホール降着流の時間発展を考えた。スピンパラメータ 0.9 を仮定した Mizuta et al. (2018) と同様に、初

期条件として $100 GM/c^2$ (G は重力定数、 M はブラックホール質量、 c は光速) ほどの広がりを持つ幾何学的に厚い静水圧平衡円盤をおき、円盤内部で閉じた弱いポロイダル磁場を与えることで、非平衡とし時間発展を考えた。全ての場合において、磁場が増幅され、その後、増幅、減衰を繰り返す激しい時間変動性を示した。増幅の時間スケールは各ブラックホールスピンパラメータにおける最内安定軌道半径のやや外側のケプラー周期程度であり、MRI の最大成長率のモードを捉えられていることができていると考えられる。磁場増幅、減衰に呼応して、質量降着率の増大、減少も見られた。MRI が角運動量輸送をにない、MRI の成長と共に効率の良い質量降着が実現されている。

トロイダル磁場の回転方向の平均の鉛直構造の時間発展を見ると、降着円盤内部での磁場の増幅、減衰の1サイクルに呼応して、強い磁場が赤道面のやや上から降着円盤の外側に上昇していくのが見られた。磁場の増幅、減衰は何度も繰り返されるため、同じパターンが何度も見られ、下方(南極)側にも同様に生じるため、トロイダル磁場の鉛直構造の時間発展を示すと降着円盤でのバタフライダイアグラムが描かれる。赤道面付近でのダイナモ効果によってトロイダル磁場からポロイダル磁場が生じ、磁気パーカー不安定性によって磁場が更に浮上し、円盤の外側へ抜けていっている。

極軸付近には外側に伝播するポインティングジェットが見られた。ポインティングパワーは降着円盤内部と同様の時間スケールで激しい時間変動を示し、降着円盤内部の時間変動性がジェットにも伝わっている。しかし、質量降着率に対するポインティングパワーはブラックホールスピンの0.9の場合に比べ、ブラックホールスピンの0.1の場合では1桁以上低く、ブラックホールスピンの小さいとジェットのパワーが落ちる傾向が見られた。ブラックホールスピンの小さくなったことで最内安定軌道半径がより外側に移行したため、円盤から上空に抜ける磁場成分が極軸付近の低密度ファンネルにうまく伝わっていないためではないかと推察されるが、更なる解析が必要である。

ブラックホールスピンパラメータ0.9の場合に関しては Mizuta et al. (2018) よりさらに高解像度の計算を行ったが、計算の不具合が多発し、長時間計算には至らずコードの改良を試みている。コードの抜本的改定として、数値流束、空間補間関数の見直し等を行った。