

課題名(タイトル):

### 3次元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円盤とジェット形成

利用者氏名:

○水田晃(1)

理研における所属研究室名:

(1)開拓研究本部長瀧天体ビッグバン研究室

1. 本課題の研究の背景、目的、関係するプロジェクトとの関係

銀河中心には太陽の  $10^7\text{-}10^9$  倍もの質量の超大質量ブラックホールが存在し、その引力で引き込まれた周りのガスが降着円盤を形成しブラックホールを取り囲んでいる。降着ガスが重力エネルギーを解放することによって電波で銀河中心が明るく輝くものを活動銀河核と呼ぶ。一部の活動銀河核では円盤の鉛直方向に細く絞られたジェットが吹き出している様子が観測されている。その流速はほぼ光速の相対論的流れであり、その伝播距離は母銀河内にとどまらず、銀河を突き抜け銀河間ガス中を伝播し伝播距離が 100kpc を越えるものもある(1pc は約  $3 \times 10^{18}$ cm)。

このような銀河スケールのジェットを持つ代表格である M87 銀河中心の超巨大ブラックホールの直接撮像が昨年 Event Horizon Telescope Collaboration(EHTC)チームから報告された。一般相対論的効果によって生じるとされていた「ブラックホールシャドウ」を世界で初めて観測したと報告されたが、その外側に広がっているであろう、ジェットまでは観測できていなかった。しかし、感度が改善される 2020 年春以降のキャンペーン観測では、ジェットがまさに誕生する根元も含めての観測が計画されており、偏光観測が成功すればブラックホール近傍の磁力線の配位などから宇宙物理学でも最大の謎とされているジェット駆動機構の解明に迫れると期待されている。

降着円盤の理解や、ジェット形成には磁場の理解が重要である。降着円盤内部ではガスの運動はほぼケプラー回転(回転周期  $\propto r^{1.5}$ )に従う差動回転系である。差動回転系でおきる磁気回転不安定性によって 1-2 回転で磁場が指数関数的に成長する。磁気圧が熱圧と同程度にまで増幅され飽和すると、磁気再結合による磁気散逸により磁気エネルギーは、熱エネルギーや、運動エネルギーに変換され、熱圧優勢な状態へ戻る。やがて残った磁場を種磁場にし、再び磁

気回転不安定性による磁場増幅期に入る。磁場の増幅、飽和、減衰、そして再び増幅という一連のサイクルが降着円盤内部では繰り返されるが、このサイクルはおおよそ 10 回転周期である。このように、円盤内部ではそれぞれの半径での回転周期に比例する時間スケールの時間変動が生じるが、回転周期が  $r^{-1.5}$  に比例するので最も短い時間スケールは円盤内縁付近での回転周期に起因するものとなる。

非相対論的な重力場では任意の半径で安定な周回軌道が存在する一方で、ブラックホール近傍のような一般相対論的効果が重要となる系では、ブラックホールスピンパラメータに依存する最内安定円軌道半径が存在し、それより内側では安定な円軌道がなくなる。最内安定円軌道半径を通過した降着流は一気にブラックホールへ落ち込むため、円盤は最内安定円軌道半径の外側でしか存在できない。磁気回転不安定性の成長にはガスが数回転する必要があるため、最内安定円軌道半径の外側に広がる降着円盤内部でしか磁場増幅はおきない。一般相対論によると、ブラックホールのスピンが速いほど、最内安定円軌道半径が小さくなる。そのため、系の時間変動のタイムスケールはより短いものが含まれると考えられる。しかし、ブラックホールスピンを観測で測定することは困難であるため、逆に系の観測から得られる系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する可能性を議論する。

ジェット形成にも磁場が重要であると考えられている。理論モデルには磁力線を通じてブラックホールの回転エネルギーを引き抜く Blandford-Znajek 機構や、磁気遠心力によりアウトフローを駆動する Blandford-Payne 機構などがあげられ、偏光観測によりブラックホール近傍の磁力線の配位を見ることができればジェット駆動メカニズムが区別できるのではないかとされている。

本課題ではブラックホールスピンをパラメータとし、ブラックホール降着流と系の時間スケール

について調べる。これまでの計算では降着円盤内部、赤道付近から鉛直方向へ抜けていく磁場の回転方向の向きが逆転する磁気反転が見られていない。また、磁気回転不安定性の短波長モードの捕獲のため赤道面付近にグリッドを優先したため、極軸付近のグリッドは十分ではなく、鉛直方向に抜けた磁場の一部がジェットにどのような影響を与えるかを定量的に議論できなかった。そこで、これまで行ってきたブラックホール降着流の計算を一段解像度を上げた計算で行っているため、初期段階にとどまっているがその結果を報告する。

## 2. 具体的な利用内容、計算方法

ブラックホール近傍の一般相対論的効果を取り入れ、磁気活動性による時間発展性を議論するためには、一般相対論的磁気流体シミュレーションを行う必要がある。ゴドノフタイプの数値流束を用いる有限体積法によってメトリック部分は時間進化しない一般相対論的磁気流体方程式を解く。回転するブラックホール周りの真空解であるカー時空、特にイベントホライズンでメトリックが発散しない Kerr-Schild メトリックを用いる。理想磁気流体を仮定し、磁気拡散は陰的に数値磁気拡散として取り込まれる。比熱比一定 ( $\gamma=4/3$ ) の理想気体の状態方程式を用いて連立偏微分方程式系を閉じさせる。メトリックを固定し、自己重力を無視した一般相対論的磁気流体方程式では、空間、時間が  $\text{GM}/c^2$ ,  $\text{GM}/c^3$  でスケールされ、 $\text{GM}=c=1$  の単位系をとる (ここで  $G$  は重力定数、 $M$  はブラックホール質量、 $c$  は光速の大きさ)。

極座標系を用い、各方向のメッシュ数  $[N_r, N_\theta, N_\phi] = [124, 252, 60]$  を用いる。赤道面付近では磁気回転不安定性を解像できるよう不等間隔のメッシュ幅により赤道面付近では高解像度 ( $r \Delta \theta \sim H/100$ ,  $H$  は円盤の厚み) を確保する。動径方向もブラックホール近傍が密になるようにとる。ブラックホールスピパラメータに関して 0.1 (低速回転), 0.3, 0.5, 0.7 の 4 つの場合それぞれ昨年度から継続した計算を行った。これらの計算では初期条件として  $100 \text{ GM}/c^2$  ほどの広がりを持つ静水圧平衡円盤をおき、円盤内部で閉じたポロイダル磁場を与えることで、非平衡とし時間発展をする

計算を継続して行い、解析を行った。更に極軸回りのポインティングジェットの構造を解像するために、ブラックホールスピパラメータ 0.9 に関しては、赤道面付近の高解像度を保ちながら、極軸回りにもメッシュを配置できるように計算グリッド数  $[N_r, N_\theta, N_\phi] = [252, 508, 60]$  という一段高解像度の計算に Mizuta et al. (2018) と同様の初期条件で取り組んだ。

## 3. 結果

最も低速ブラックホールスピを仮定したブラックホールスピ 0.1 の場合の結果が Mizuta et al. (2018) で示したブラックホールスピパラメータ 0.9 の場合との比較として分かりやすいので以下で示す。図 1 は時刻  $6000 \text{ GM}/c^3$  でのプラズマベータ値 (熱圧/磁気圧) の逆数 (赤道面)、密度 ( $xz$  面)、磁気圧 ( $yz$  面) である。各軸  $60 \text{ GM}/c^2$  までのスケールを示している。中心 (ブラックホール近傍) プラズマベータ値は 1 のオーダーとなり、円盤の最内縁付近で磁場がよく増幅されていることが分かる。また、いくつかのスパイラル構造が見え、非軸対象モードが発達している。円盤内部では磁気圧が層状化し、磁気回転不安定性の特徴の一つであるチャンネルフローが発達している。密度コンターで赤い円盤領域の外側には重力の束縛を逃れた円盤風が見られ、極軸回りには低密度の領域が現れている。

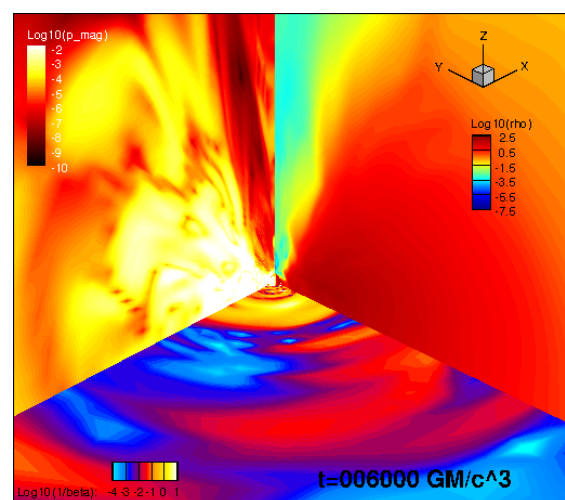


図 1. ブラックホールスピパラメータ 0.1 の場合の時刻  $6000 \text{ GM}/c^3$  のプラズマベータ値 (熱圧/磁気圧) の逆数 (赤道面)、密度 ( $xz$  面)、磁気圧 ( $yz$  面)。

図 2(a) はブラックホールスピパラメータ 0.1 の計算での円盤内縁付近、赤道面でトロイダル磁場とポロイダル磁場の平均値の時間進化を示している。図 2(b) は

イベントホライズンでの質量降着率である。どちらも激しい時間変動を示しているが、磁場増幅期の時間、あるいは、それに呼応して増加するイベントホライズンでの質量降着率の増加の時間スケールは Mizuta et al. (2018)で示したブラックホールスピンパラメータ 0.9 の場合よりも長くなっており、今回行った中間のスピンパラメータでもスピンパラメータが小さくなるほど磁場増幅に要する典型的な時間はより長くなっている。降着円盤内部の内縁付近での磁場増幅の時間スケールが  $\text{GM}/c^3$  と、最内安定軌道半径でのケプラー回転周期  $22 (\text{GM}/c^3)$  よりやや外側の回転周期  $30 (\text{GM}/c^3)$  であったのに対して、ブラックホールスピンパラメータ 0.1-0.7 までの計算ではより長い磁場増幅の時間スケールが見られた。スピンパラメータ 0.1 の場合では最内縁軌道半径でのケプラー回転周期は  $84.8 (\text{GM}/c^3)$  であるが、典型的な磁場増幅の時間スケールは  $80-90 (\text{GM}/c^3)$  である。一方で時刻  $8000 (\text{GM}/c^3)$  あたりから磁場の時間振動が激しくなり、次のパラグラフで見せる降着円盤内部での磁場の振る舞いも明らかに違った挙動を示して。系がなんらかの状態遷移を起こした可能性があるが、数値計算によるトラブルで可能性もあり、詳細解析を行っている。

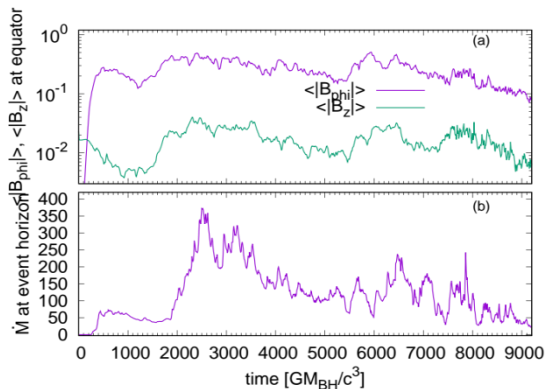


図 2. ブラックホールスピンパラメータ 0.1 を仮定したシミュレーションでの(a)磁場の時間変化と(b)イベントホライズンでの質量降着率の時間進化。磁場は円盤最内縁半径付近、赤道面で回転各方向に平均したものの。

図 3. は、円筒座標系の半径  $6\text{GM}/c^2$  でトロイダル磁場の回転方向の平均値の鉛直方向構造の時間進化を示した。赤道面からやや離れた位置から上(下)にトロイダル磁場が浮き上がって(下がって)行く様子が見られ、その構造から降着円盤のバタフライダイアグラムと呼ばれている。細い筋の1本、1本が磁場増幅に相当し、時

おり、強いトロイダル磁場成分が上(下)に抜け円盤表面からさらに外側に伝わっているのが見られている。磁場の向きが反転する磁気反転が 2 度見られた。しかし、先に述べたように時刻  $8000\text{GM}/c^2$  あたり以降磁場が小さくなっており、円盤が新しい状態に移行したか、なんらかの計算上のトラブルがおきている可能性がある。

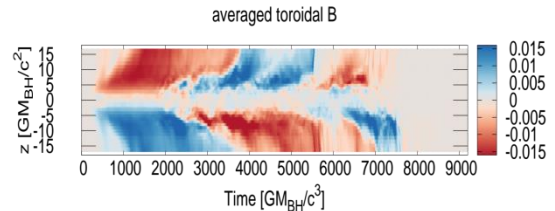


図 3. 円筒座標系の半径  $6\text{GM}/c^2$  でトロイダル磁場の回転方向の平均値の鉛直方向構造の時間進化(降着円盤でのバタフライダイアグラム)。

上記の基本的性質は、ブラックホールスピンパラメータ 0.9 の場合(Mizuta et al. 2018)でも見られていたが、磁場増幅や、磁場増幅から飽和、散逸を経て再び磁場増幅期に至るまでの繰り返し時間スケールが異なり、1 節で述べた一般相対論的效果により、降着円盤の内縁半径が回転周期の長い外側に移動することによる効果によるものと考えられる。他の 0.3-0.7 のスピンパラメータでも同様の結果であり、磁場増幅の時間スケールではそれぞれのスピンパラメータに対して、最内安定周回軌道半径でのケプラー周期程度であった。ジェットのパワーについてもスピンパラメータによる違いがみられてた。スピンパラメータ 0.9 では質量降着パワーに対し、する極軸回りのジェットの外向きのポインティングパワーはスピン 0.9 の場合に比べ 1-2 桁小さくなる傾向が見られた。パワフルなジェット形成には中心ブラックホールの高スピンが示唆される。

グリッド数、 $[\text{Nr}, \text{N}_\theta, \text{N}_\phi] = [252, 508, 60]$  という高解像度計算に関してブラックホールスピンパラメータ 0.9 の場合に関して行った。この計算では赤道面付近での  $r\Delta\theta$  が 1.3 倍程度よくなり、ジェットの構造を見るため極軸付近の  $\Delta\theta$  も改善されている。また、動経方向のグリッドも密になっている。初期条件等は Mizuta et al. (2018)と同様にとり、解像度を上げた計算となっている。図 4 はイベントホライズンでの質量降着率である。まだ、初期条件の記憶が色濃く残るフェーズまでの計算ではあるが、典型的な質量降着率の増加時間スケール

は  $20\text{--}30 \text{ GM}/c^3$  であり、これは Mizuta et al. (2018) の場合と同様である。

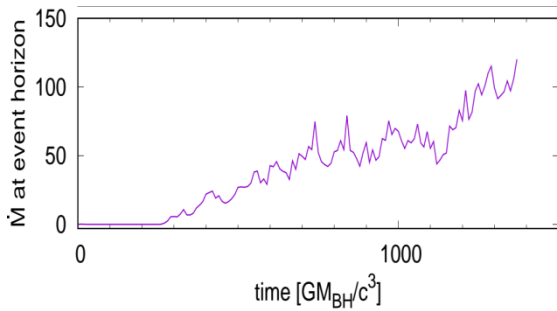


図4. ブラックホールスピンパラメータ 0.9 を仮定した高解像度計算でのイベントホライズンでの質量降着率の時間進化。

#### 4. まとめと今後の展望

ブラックホール降着円盤の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研究を行った。ブラックホールスピンをパラメータとするパラメータスタディ(0.1-0.7)では、一般相対論効果による最内安定円軌道のスピンパラメータ依存性に起因する円盤最内縁半径の違いから磁場増幅等の時間スケールによる違いが観測された。スピンパラメータが小さいほど最内縁半径が大きくなるため、より長い時間スケールの変動となったと理解できる。今回は単一の解像度による計算であったが、より高解像度計算でこれらの時間スケールのスピンパラメータ依存性が解像度によらず収束したものであることを確認する必要がある。

ブラックホールスピンパラメータ 0.9 の場合に高解像度計算に取り組んだ。磁場増幅などに起因する時間変動が見られ、収束性を見せている。しかし、負圧の発生など非物理的状況がブラックホール近傍のグリッドで発生し、長時間計算には至っていない。安定により長時間の計算を行うため、コードの全面的見直しを行い新たなコードでは数値流束関数、空間補間関数に様々なメソッドを取り入れることで数値計算のトラブル時に一時的に他の手法へ切り替えることで計算のトラブルを乗り切れるような手法が取り入れられた。

2019 年度 利用研究成果リスト

【口頭発表】

1. A. Mizuta, ``BH spin parameter dependence for episodic Alfvén pulse generation from BH accretion disks'', Workshop to bring together experts on High Energy Astrophysics from Japan and Israel, July 18 2019, RIKEN, Japan
2. 水田晃 ``相対論的ジェットの物理'', 京都大学数理解析研究所 共同研究(公開型) 「宇宙惑星ジェットの数理解析」, 7/29 2019, 京都大学(招待講演)
3. Akira Mizuta, ``Alfvén pulses from black hole accretion disk into jets via 3D global GRMHD simulations'', CHALLENGES AND INNOVATIONS IN COMPUTATIONAL ASTROPHYSICS, Sep. 17 2019, St. Petersburg, Russia

【ポスター発表】

4. A. Mizuta et al., ``3次元一般相対論的磁気流体シミュレーションによる相対論的ジェット形成の物理'', SKA Japan シンポジウム 2019, 9.2-5 2019, 国立天文台