

課題名 (タイトル) :

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の動的性と宇宙線加速

利用者氏名 :

○水田晃

理研での所属研究室名 :

戒崎計算宇宙物理研究室

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

所属研究室では宇宙線(地球外から地上に到達する陽子等の荷電粒子)の起源の謎に迫るため、 10^{20} eV にも及ぶ高エネルギー帯の宇宙線の観測計画(JEM-EUSO 等)が推進されている。高エネルギー宇宙線は銀河中、あるいは銀河間の磁場に影響されにくく、宇宙線が加速された場所からほぼ直線的にやってくるため、観測される到来方向と加速候補天体の相関がよく、最高エネルギー宇宙線の加速天体の特定に迫れると期待される。

一方、最高エネルギー($\sim 10^{20}$ eV)にまで粒子を加速させる物理機構も未だよくわかっていない。Fermi 加速モデル(Fermi 1954)は衝撃波面を挟みでの散乱による加速メカニズムであるが、相対論的衝撃波の場合加速効率が悪いなど最高エネルギー宇宙線加速を自然に説明するには至っていない。Ebisuzaki & Tajima (2014)では、銀河中心の超巨大質量ブラックホールを取り囲む降着円盤内部での磁場の増幅、磁気拡散の繰り返しに伴う、円盤鉛直方向への相対論的大振幅のアルフヴェンバーストの放射がジェット中を伝播することによって、電磁波モードへの変換を経て、ポンデラモーティブ力による加速によって粒子が加速され、銀河中心の超巨大質量ブラックホールと降着円盤の系からのジェットでは陽子の場合、宇宙線の最高エネルギーにまで至ることが指摘された。ポンデラモーティブ力は、振幅が大きく変化する電磁波の伝搬方向に働く力であり、実験室では超短パルスレーザーとプラズマの相互作用で荷電粒子の加速が観測されている(Leemans et al. 2006)。

しかし、Ebisuzaki & Tajima (2014)では、降着円盤のモデルとして動径方向 1 次元の単純な定常解析モデルを用いており、磁場増幅の半径などい

くつかの仮定もされており、数値シミュレーションによる解析から、内部での磁場増幅、磁場の飽和による磁気エネルギーのエネルギー散逸、円盤鉛直方向に放出されるアルフヴェン波の強度などを定量的に見積もり、Ebisuzaki & Tajima (2014)でされた仮定の妥当性を評価する必要がある。

差動回転する降着流では、たとえ弱磁場であっても 1 回転する間に指数関数的に磁場が増幅される磁気回転不安定性(Magneto-Rotational Instability: MRI)が重要である。MRI の成長率には波長依存性があり、最も早く成長する最大成長率を与える波長をシミュレーションでは解像する必要があるが、その波長は円盤の厚みの数十分の 1 程度であり、高解像度計算が必要である。

解像度が MRI の最大成長率を捕獲するに至らなくても、長い波長のモードをとらえることができれば、磁場は成長し、定性的な理解は可能である。昨年度の計算では、回転するブラックホール周りの静水圧平衡円盤解に、弱いポロイダル磁場を種磁場として与えたところ、磁場の増幅、磁場の飽和による磁気散逸が見られた。円盤内縁付近での磁場増幅に伴い角運動量輸送が促され、ブラックホールへの質量降着を確認した。また、円盤鉛直方向にトロイダル磁場の浮上、ジェット中のポインティング光度の増幅期に相関が見られ、円盤内部の赤道面付近で生じたアルフヴェンバーストがジェットに伝わり、ジェット中フレアとなっていることを確認した。しかし、円盤内部での磁場増幅の時間スケールから見積もられる MRI のモードの波長は降着円盤内部でのアルフヴェン波の速さから見積もった最大成長率を与えるものよりもやや長く、定量的解析にはより解像度を上げた計算で成長の速い短波長モードを捕獲する必要があった。そこで、本課題では、昨年度に引き続きブラックホール周りの降着流の 3 次元一般相対論的磁

気流体シミュレーションをより高解像度で行い、MRI 最大成長率のモードを捕獲した計算で降着円盤の磁場増幅などの時間スケールや、円盤鉛直方向へ放出されるアルフヴェンバーストの強度や、ジェット中のポインティング光度、その時間変動などの解析を行った。

2. 具体的な利用内容、計算方法

昨年度の計算設定と同じであるが、赤道面付近を高解像とした計算を行った。先に述べたように、中心に回転するブラックホールを考え、その周りで静水圧平衡となるトーラスを初期条件として考える。無次元ブラックホールスピンパラメータ (1 が最大) を 0.9 とし、その真空解であるカー時空での計算となる。時空の地平面で数学的特異点がない Kerr-Schild メトリックを用い、極座標 (r, θ, ϕ) を用いる。このメトリックのもとで、一般相対論的磁気流体方程式を数値的に解く。計算手法は有限差分法を用い、数値流束としてゴドノフタイプの近似リーマン解の一つである HLL ソルバーを用いる。空間方向は線形補間をし、時間積分は TVD-Runge-Kutta 法によって空間、時間共に 2 次精度の計算である (Nagataki 2009)。

グリッド数は前の計算と同じである。動径方向は中心が密となる不等間隔メッシュで $N_r=124$ 、回転方向は等間隔の 60 メッシュ、極角も昨年度と同じ 252 メッシュであるが、等間隔メッシュから赤道面に集中させることにより、赤道面付近での鉛直方向のメッシュ幅 $\sim r \Delta\theta$ を約 5 倍あげた計算となる (結果的に極軸付近の解像度はやや悪くなり、極軸付近も高解像度とした計算は次年度以降の課題である)。 $GM_{\text{BH}}=c=1$ の単位系を用い、空間、時間は GM_{BH}/c^2 , GM_{BH}/c^3 である。ここで、 G は重力定数、 M_{BH} は中心ブラックホール質量、 c は光速である。

理想磁気流体を仮定し、数値的磁気拡散によって磁気散逸が導入される。また、状態方程式としては、比熱比一定の理想気体を仮定し、比熱比は $4/3$ とした。

初期条件として回転するブラックホール周りで静水圧平衡となる Fishbone-Moncrief 円盤を考える。この平衡状態に円盤内部で閉じたループ磁場を与え、非平衡状態とする。磁場の向きは回

転軸を含む面 (ポロイダル面) で閉じており、磁場の強さは磁気圧と熱圧との比が最小で 100 となるようにとり、初期には弱磁場となるようにした。

3. 結果

初期に与えられた磁場は差動回転によって捻られ、回転方向の磁場 (トロイダル磁場) が発生し、運動エネルギーから磁気エネルギーへの変換によって磁気エネルギーが増加する。やがて、磁気回転不安定性が成長していく。図 1 (a) は、赤道面でのトロイダル磁場と、ポロイダル磁場の強度を円盤内縁付近で平均したものの時間進化である。回転系であるため、トロイダル成分が、ポロイダル成分より一桁ほど大きい。両成分とも激しい時間変動をしており、典型的な増加にかかる時間は $20 \sim 30 GM_{\text{BH}}/c^3$ である。この時間スケールは円盤内縁付近 MRI の最大成長率を与える時間スケールと同程度である。また、円盤内部に磁気圧の高いフィラメント状構造が赤道面に平行に複数現れ、その厚みは MRI の最大成長率を与える波長程度となっている。増幅した磁場は磁気再結合などで、磁気エネルギーの一部を熱エネルギーや運動エネルギーに変換し、円盤内部では熱圧優勢となる。しばらくすると再び磁場の成長期となり、円盤内部では磁場の増幅と散逸がくり返し起きている。

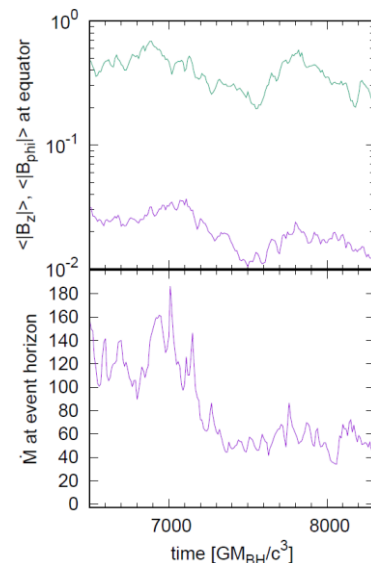


図 1. (a) 円盤内縁付近、赤道面で平均したトロイダル磁場 (B_{phi}) とポロイダル磁場 (B_{z}) の強さの時間進化。(b) イベントホライズンでの質量降着率。

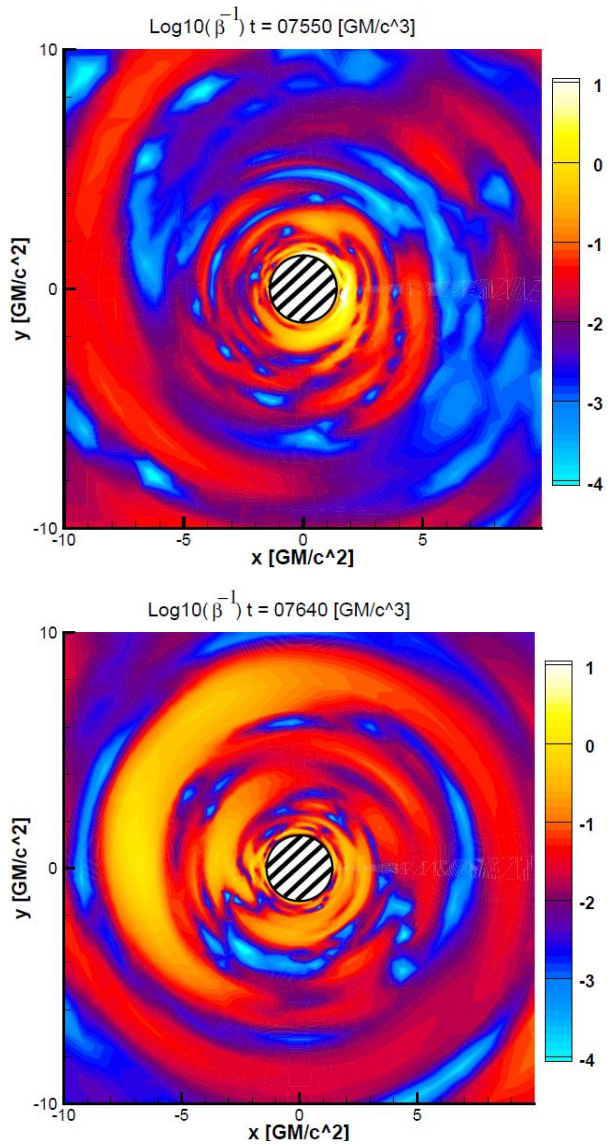


図 2. 赤道面上でのプラズマベータ値(磁気圧/熱圧)の逆数。t=7550GM_{BH}/c³では、半径6程度の部分では熱圧優勢となっているが、t=7640GM_{BH}/c³では、磁場が増幅され磁気圧が熱圧と同程度までに達している。

図 2 は直近する二つの時間における赤道面上のプラズマベータ値(磁気圧と熱圧の比)の逆数のマップである。半径6の周辺で磁場が弱く熱圧が卓越した上図から短時間で磁場が熱圧に匹敵する下図に移行している。円盤内部では磁場の弱い状態と磁場が増幅し磁気エネルギーが熱エネルギー程度まで達する状態という二つの状態があり、両者はMRIによる磁場増幅と、磁気散逸による磁気エネルギーの解放によって行き来する。

図 3 は赤道面に先ほどと同じ、プラズマベータ値の逆数、xz 面に質量密度、yz 面に磁気圧を示

したものである。z 軸周辺に質量密度の低く磁気圧の高い領域が現れている(ポインティングフラックス優勢ジェット)。ジェットと密度の高い円盤の間には、円盤風が見られる。ブラックホール近傍では、磁気圧が熱圧近くまで達する領域が見られ、円盤鉛直方向には磁気圧に縞状向上が見られ、円盤内部で乱流構造が発達している。

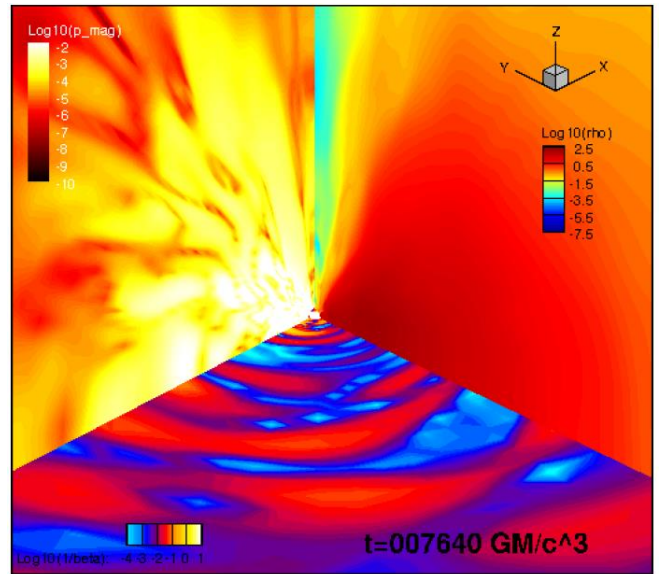


図 3. t=7640GM_{BH}/c³におけるプラズマベータ値の逆数(赤道面)、質量密度(xz 面)、磁気圧(yz 面)。

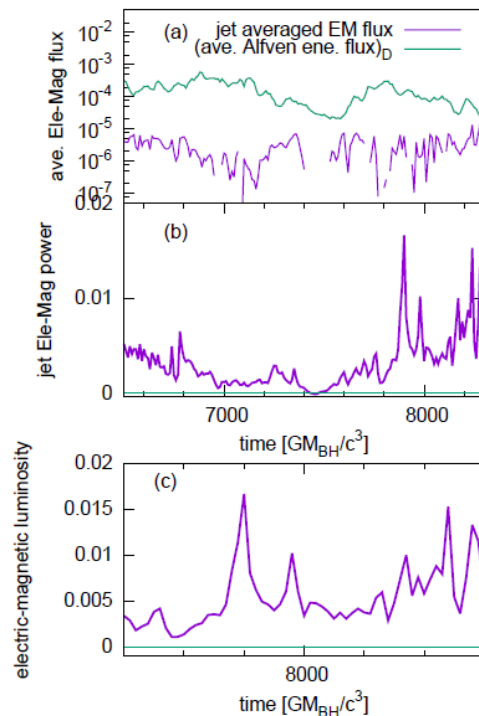


図 4. (a)ジェット中のポインティングフラックスと、円盤内縁付近、赤道面で評価平均したアルフヴェンフラックスの時間進化の比較。(b)ジェット中のポインティング光度の時間進化と、増高するフェーズで拡大したもの(c)。

図 4. (b) はジェット内部のポインティング光度の時間進化である。円盤内部での磁場増幅や、質量降着率にみられるのと同様に激しい時間変動がみられる。図 4(c) は時間軸を拡大したもので、その増加時間スケールは円盤内部の磁場増幅と同様 $20\text{--}30GM_{\text{BH}}/c^3$ 、繰り返し時間スケールは $100GM_{\text{BH}}/c^3$ である。磁場の増加時間スケールは先の低解像度の計算では $50\text{--}60 GM_{\text{BH}}/c^3$ 程度であり、今回の計算で短波長の速く成長するモードが捕えられている。図 4(a) はジェット中のポインティングフラックスと、円盤内縁付近赤道面で評価した鉛直方向のアルフヴェン流速(磁気エネルギー密度にアルフヴェン速度を乗じて、積分面積で割ったもの)である。ジェット中のポインティング光度が激しくフレアとなるフェーズでは円盤内部のアルフヴェンフラックスに近づき、数倍から 10 倍程度となっており、円盤から発生したアルフヴェン波がジェット中に伝搬した時にジェットのポインティング光度が激しくなっていることがわかる。

ジェット中に激しいアルフヴェン波の時間変動がみられ、この波の強度を示す、strength parameter を見積もる。中心ブラックホールの質量を活動銀河核ジェットで典型的な 10^8 太陽質量、ブラックホールへの平均的な質量降着率がエデンイトン質量降着率の 10% の質量降着率とすると strength parameter は、 $eE/m_e \omega_A c \sim 10^{10}$ と強い波の指標である 1 を優に超え、非常に大きい値となる。このような波がジェットを伝搬するにつれて質量密度が下がると電磁波モードへ変換され、ポンデラモーティブ力による荷電粒子の加速が起きる。Ebisuzaki & Tajima (2014) で見積もられたように、陽子は最高エネルギー宇宙線を説明できる 10^{20}eV 以上となる。同じ機構で電子も加速され、これらの電子は磁場との相互作用によってシンクロトロン放射をし、これを種光子として逆コンプトン放射によってガンマ線放射が起きる。活動銀河核ジェットを真正面近くから見るとブレイザーと呼ばれるガンマ線天体がある。ブレイザーは近年の衛星観測によって、数時間から数週間の時間スケールで激しい時間変動を持つガンマ線フレアをすることが知られており、我々が

シミュレーションで見たポインティング光度の立ち上がり時間や、繰り返し時間スケールはブレイザーで観測されている時間スケールとよい一致を示している。ポインティング光度がフレア的时间変動する時に波の先端に加速電子が現れるという Ebisuzaki & Tajima (2014) のモデルとも合致する。

赤道面付近で θ 成分の解像度をあげることによっていくつかの点が改善された。まず、MRI の成長の速い短波長モードが捕えられ、概ね、最大成長率を与えるモードが見られた。そのため、円盤内部での磁場の成長が早くなり、円盤内部の時間変動はより激しくなった。それに伴い、ブラックホールへの質量降着や、ジェット中のポインティング光度の時間変動も速くなった。円盤内部での磁場増幅が円盤外縁付近にまで及んだ。これは赤道面付近での鉛直方向のグリッドサイズ $\sim r\Delta\theta$ が半径の大きい部分でも MRI の不安定モードの条件を満たすようになったためである。

4. まとめ

回転するブラックホール周りの降着円盤の 3 次元一般相対論的磁気流体シミュレーションコードを改良し、円盤赤道面付近で鉛直方向が高解像度となる計算を行った。これにより、MRI の最大成長率のモードを円盤内縁付近で捕獲することができ、系全体でこれまでの計算よりもより短時間の時間変動が観測された。MRI の振る舞いは円盤内部での磁場増幅や、質量降着率を決定付けるため、この問題での高解像度計算の重要性が確認された。

赤道面付近から鉛直方向に生じるアルフヴェンバーストがジェット中に達すると、ジェット中にポインティング光度のフレアが見られ、波の強さを示す strength parameter は 10^{10} と非常に大きな値をとり、アルフヴェン波がジェット中に伝搬し、電磁波モードとなった時に荷電粒子をポンデラモーティブ力による高効率の線形加速しうる。陽子は超高エネルギー宇宙線のエネルギーにまで達し、加速された電子は磁場などの相互作用により、最終的にガンマ線を放射し、我々は活動銀河核ジェットの一つであるブレイザーとし

平成 29 年度 利用報告書

て観測可能である。高速電子はフレアの立ち上がり部分で生じるため、この放射もフレア的である。観測されるブレーザーのガンマ線フレアの時間スケールと、我々がシミュレーションで観測したフレアの時間スケールはよい一致を示した。

平成 29 年度 利用研究成果リスト

【国際会議、学会などでの口頭発表】

1. 水田晃 “ブラックホール降着円盤の時間変動と相対論的ジェットの活動性” 高エネルギー宇宙物理研究会 2017, 2017 年 9 月 5 日、於：京都大学
2. 水田晃 ” ブラックホール降着円盤からのアルフヴェンバーストによる宇宙線加速とブレーザー活動性” 日本物理学会秋季年会, 2017 年 9 月 13 日、於：宇都宮大学
3. Akira Mizuta “Characterization of the production of intense Alfvén pulses : GRMHD simulation of black hole accretion disks” Theories of astrophysical Big Bangs, Nov. 8 2017, Wako Riken
4. Akira Mizuta “Characterization of the production of intense Alfvén pulses : GRMHD simulation of black hole accretion disks” Dawn of a new era for black hole jets in active galaxies, Jan. 26 2018, 於：東北大学