

## 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相対論的ジェット形成

## 利用者氏名 :

○水田晃

## 所属 :

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

所属の戒崎研究室では宇宙線(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)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、謎とされる宇宙線の源となる加速天体の特定に迫れると期待される。また、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によくわかっていない。Ebisuzaki & Tajima (2014)は最高エネルギー宇宙線の加速源の候補天体である活動銀河核ジェット中で降着円盤から放出された大強度、大振幅のアルフヴェン波(磁場の擾乱が磁力線に沿って伝わる波)に起因する電磁波によって荷電粒子を航跡場加速機構から最高エネルギーにまで加速できるという新しいモデルを提唱した。活動銀河核ジェットは銀河中心にある太陽質量の数億倍から数百億倍もの大質量ブラックホールとそれに落ち込むガス円盤(降着円盤)のシステムから噴出する相対論的流速を持ったジェット状に収束したアウトフローのことである。しかし、このモデルでは降着円盤の時間変動は簡単な理論モデルに基づいており、シミュレーションによる理解が必須である。

ジェットは重力を及ぼす天体の周りを取り囲む降着円盤が降着と共に重力エネルギーを解放し、その一部を少ない物質に与え重力ポテンシャルを振り切らせ、アウトフローとなっていると考えられる。降着円盤内部、ブラックホール近傍での

ジェット形成において磁場が重要な役割を果たすと考えられる(Tajima et al. 1987, Shibata et al. 1990)。降着流中において、初期に非常に弱い磁場であっても円盤の回転速度が差動回転しているため、磁気回転不安定性と呼ばれる不安定性によって数回転する間に指数関数的に磁場が増幅する。この不安定性は線形解析によって成長率が波長依存性をもつことが知られ(Balbus & Hawley 1991)、本研究で見られる典型的な鉛直方向のアルフヴェン速度の値  $10^{-3}c$  に対して波長は  $0.01R_g$  ( $R_g=GM/c^2$  は重力半径,  $c$  は光速、 $G$  は重力定数、 $M$  はブラックホール質量)程度が最大成長率を与える。このモードを解像するには高解像度計算を要する。この波長の解像に肉薄する計算が行われつつあるが、現状ではこれよりもやや長い波長(やや長い時間スケールの成長)のものが解像できている段階である。この場合でも系の定性的理解は可能であるが、より精度のよい計算によって磁場増幅を捕らえることは重要であり、今後の課題である。また、単位質量あたりの角運動量輸送という降着の物理で重要な役割も担っている。各流体素片は粘性がなければ角運動量を保存し、内側に落ち込めないが、磁気回転不安定性による磁場成長に伴って単位質量あたりの角運動量の交換が行われ、効率のよいガス降着が実現される。そのため、磁気回転不安定性を精度よく解像することは降着円盤にとって重要な意味合いを持つ。

降着円盤内部では磁場が増幅され、磁気圧が熱圧と同程度まで磁気エネルギーが蓄積されるが、十分蓄積されると、磁気再結合などの散逸機構によって磁気エネルギーが解放され、熱圧が優勢となる。そして、次の磁場増幅が始まる。円盤内部では磁気エネルギーが蓄えられた状態と、解放後熱

圧が卓越する 2 つの状態が存在し、その両者の間の状態遷移が繰り返し起きる。磁場が解放される際には鉛直方向に強いアルフヴェン波が放出されジェット中を伝播してくと考えられる。このような動的振る舞いも数値シミュレーションで定量的に確認すべき物理である。

Ebisuzaki & Tajima (2014) では、ジェット中を伝播する相対論的大振幅のアルフヴェン波が伝搬につれ数密度が下がった点で電磁波モードとなり、航跡場加速機構が働くことを予言し、これによって超高エネルギー宇宙線加速が実現されるとした。我々は 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降着円盤の磁場増幅、解放に伴う動的性とジェットに放出されるアルフヴェン波、その時間変動の応用としてブレーザーと呼ばれる活動銀河核ジェットの一つで見られるガンマ線フレアの時間変動との比較を行った。

## 2. 具体的な利用内容、計算方法

中心に回転しているブラックホールを考え、計算継続中はブラックホール質量、スピンの時間進化は無視できるため、時間的に変化しないカー・メトリックを仮定する。円盤のガスの自己重力は無視できるとして考慮しない。GM=c=1 の単位系を用いる。ここで、G は重力定数、M は中心ブラックホールの質量、c は光速である。この単位系では単位長さ、単位時間は  $GM/c^2$ ,  $GM/c^3$  とかけ、中心ブラックホール質量に比例する。

座標系は極座標を用い、動径方向、極角、変位角それぞれの計算領域は  $[1.4 < r < 3000]$ ,  $[0 < \theta < \pi]$ ,  $[0 < \phi < 2\pi]$ 、変位角方向は周期境界条件、動径方向は自由境界条件を課した。動径方向の内側の境界はブラックホールの事象の地平線よりも内側にとられている。グリッド数は ( $N_r=124$ ,  $N_\theta=124$ ,  $N_\phi=28$ ) と高解像度版 ( $N_r=124$ ,  $N_\theta=252$ ,  $N_\phi=60$ ) の 2 通りで計算を行った。両者とも極角、変位角方向は等間隔グリッド、降着円盤の内部構造をとらえるため、動径方向は中心にグリッドが集中するように不等間隔にとった。この規模のグリッド数、解像度はこの分野で積極的に研究を行っている McKinney らのグループの最近の 3 次元計算の計算規模と同程度である。この報告では

後者の高解像度計算版をベースに行う。

初期条件としては回転するブラックホールの周りで流体力学的に静水圧平衡状態にある Fishbone-Moncrief 円盤解を用いた。これは中心のブラックホールによる重力と回転による遠心力、円盤内部のガス圧勾配が釣り合う平衡モデルである。幾何学的に厚い円盤解であり、円盤内縁付近は赤道上ではほぼケプラー回転している。今回は無次元ブラックホールの回転パラメータ  $a$  を  $a=0.9$  ととった。これは比較的ブラックホールが高速自転しているモデルである。この状態に弱い磁場を与えることで平衡状態を崩す。磁場は円盤内部で閉じており、ブラックホールの回転軸方向成分のみを持つ。更に熱的圧力にランダムな振幅(最大 5%)の擾乱を与えることによって軸対称性を破る。

## 3. 結果

円盤は差動回転しているため、まず方位角成分の磁場が作られ、磁気エネルギーは一気に増加する。図 1(a) は時刻 20000~28000 [ $GM/c^3$ ] での円盤内縁付近、赤道面で平均をとった磁場の鉛直成分と、方位角成分である。方位角成分の磁場が 1 桁ほど大きく、鉛直成分を卓越している。鉛直成分、方位角成分共に短時間スケールの時間変動が見られ、その時間スケールは典型的には 50 [ $GM/c^3$ ] である。図 1(b) は同時期のイベントホライズンでの質量降着率の時間進化を示している。円盤内縁付近の磁場の増幅、減少に伴って降着率の増減が見られる。磁場増幅と質量降着率の相関は磁場増幅が円盤内部で粘性として働き、それに伴って質量降着が実現していることを示している。

図 2 は直近 2 つの時刻での赤道面でのプラズマ  $\beta$  値の逆数の等高線である。図の上(時刻 27140 [ $GM/c^3$ ])では円盤内縁付近全体で磁場が増幅しプラズマ  $\beta$  値が 1 のオーダーとなっているのに対し、図の下(時刻 27360 [ $GM/c^3$ ])では半径 6 [ $M/c^2$ ] 付近で熱エネルギー卓越の状態(プラズマ  $\beta$  値  $>100$ )となっている。系がこの 2 つの時刻の間に磁場が増幅された時期から磁場を散逸し、熱圧優勢期に移行したことを示している。系は再び磁場増幅期に入り、これを繰り返す。

図 3 は中心付近のスナップショットであり、赤道面にプラズマベータ値の逆数、 $x-z$  面に質量密度、 $y-z$  面に磁気圧を示している。極軸に沿って低密度で磁気圧の高いポインティングフラックス優勢ジェットが形成されている。高質量密度の円盤とジェットの間には円盤風が見られる。円盤内部では磁気圧にフィラメンタルな構造が見られ、その厚みは  $0.1 [GM//c^2]$  である。先にあげた磁場増幅の時間スケール  $\sim 50 [GM//c^3]$  と合わせ、磁場が磁気回転不安定性によって成長とした時の成長率、波長とよい一致を示している。最大成長波長を解像するにはもう 1 桁程グリッドサイズを小さくした高解像度計算が必要であり、今後の課題である。

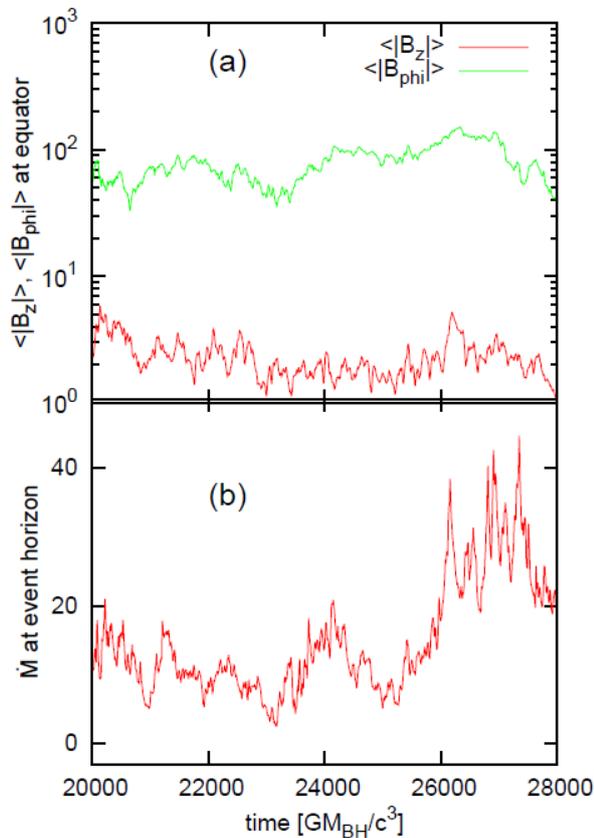


図 1.(a) 赤道面、円盤内縁付近 ( $2.32 < r < 10$ ) での磁場の大きさの平均値。鉛直方向成分と、回転方向を示す。(b) イベントホライズンでの質量降着率。磁場の大きさ、質量降着率ともに、短時間の時間変動が見られ、その増減がよい相関を示す。磁場増幅が降着円盤内部での粘性の役割を果たし質量降着を促している。

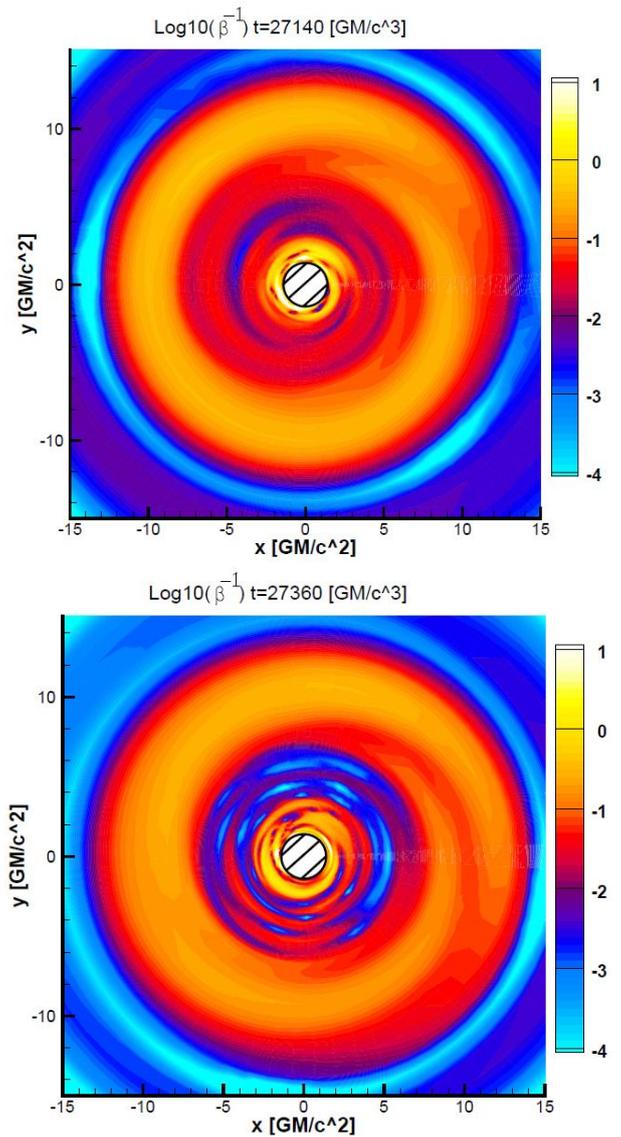


図 2. 赤道面上でのプラズマベータ値の逆数の等高線。直近する二つの時刻、 $27140 [GM/c^3]$  (上) と、 $27360 [GM/c^3]$  (下)。前者では円盤内縁付近全体的に磁気圧が熱圧に匹敵しているが、後者では半径  $6 [GM/c^2]$  付近で熱圧が優勢となっており、両者の間で磁場が蓄えられているフェーズから、磁場が解放されているフェーズへ状態遷移が起きている。ことがわかる。図中の中心での斜線部分がブラックホール内部。

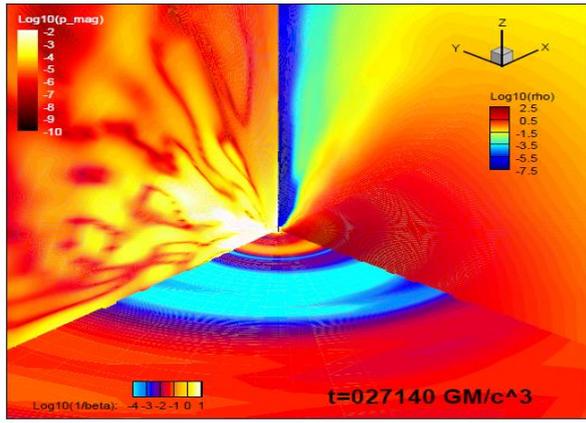


図.3 時刻 27140[GM/c<sup>3</sup>]でのスナップショット。赤道面にプラズマベータ値の逆数、x-z 面に質量密度、y-z 面に磁気圧を示している。

低質量密度、ポインティングフラックス優勢ジェットも円盤内部の磁場、イベントホライズンでの質量降着率と同様、時間変動を示す。図 4(b)は半径 15[GM/c<sup>2</sup>], 極軸から 20 度までで評価した、動径方向の電磁パワーの時間進化を示し、概ねジェット成分に相当する。大きなフレアが見られ、今回の計算では時刻 30000[GM/c<sup>3</sup>]までで数度このような大フレアフェーズが見られた。図 4(a)はジェット成分の電磁パワーを面積で割った平均フラックスと、円盤内縁付近で平均をとった鉛直方向の平均アルフヴェンフラックスの比較である。図 4(b)で示したフレアのピーク付近で両フラックスが同程度になっている。その他の時期では円盤でのアルフヴェンフラックスが卓越しており、このフラックスがジェットにうまく伝播した時にジェットの電磁パワーが上がっていることを示す。

図 4(c)ではジェットの電磁パワーの時間進化をより詳細に示したものである。増幅時間は円盤内部での磁場増幅の時間と同程度の 50[GM/c<sup>3</sup>], また、増幅から次の増幅までの時間間隔は 300[GM/c<sup>3</sup>]程度である。この 2 つの時間スケールは Ebisuzaki & Tajima (2014) の理論モデルと、磁場増幅が半径 6[GM/c<sup>2</sup>]で起きると補正するとよい一致を示す。

この電磁フレアは大振幅のアルフヴェン波となっており、上空に伝搬するにつれ質量密度が下がることによって、電磁波モードに変換される。大振幅電磁波では伝搬方向に強いポンデラモーティブ力によって荷電粒子が加速される。ポンデラモー

ティブ力は電荷の 2 乗に比例するため、電子、陽子共に加速される。陽子は 10<sup>20</sup>eV 以上にまで加速され、超高エネルギー宇宙線となる。加速された電子はシンクロトロン放射をし、更に、CMB 光子、あるいは、シンクロトロン放射された光子を種光子として電子と逆コンプトン散乱する。これをジェットの真正面から観測するとガンマ線帯域までの放射が観測され、ブレイザーと呼ぶ。観測ではガンマ線帯域でフレアが観測されており、フレアが増幅時間スケール、繰り返し時間スケールと、我々が観測した電磁フレアの増加時間や、繰り返し時間スケールに相関が見られるはずである。ブレイザー中心のブラックホール質量を考慮するのでは、ブレイザー 3C454.4 ではそれぞれ、31, 153[GM/c<sup>3</sup>] (Abdo et al. (2010))と、我々のシミュレーション結果の電磁フレアの増加時間スケールとよい一致を示し、ブレイザーのガンマ線フレアがよく説明できる。

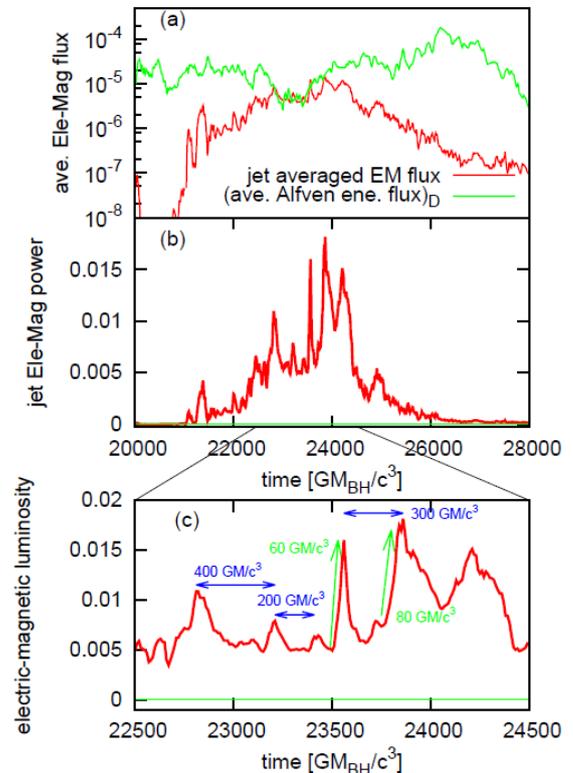


図 4.(a)半径 15 で評価した極軸付近 ( $\theta < 20$  度)での動径方向の電磁平均フラックスと、円盤内縁付近での赤道面での鉛直方向のアルフヴェンフラックス。(b)(a)のジェット成分を光度にしたもの。質量降着率などと同様に激しい時間変動を示す。(c)(b)の時間スケールを拡大し、増加、繰り返しを見やすくしたもの。

## 5. まとめと今後の計画

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回転するブラックホール周りの降着円盤とジェット形成に関するシミュレーションを行った。降着円盤内部では磁気回転不安定性と磁場の増幅によって磁気圧が熱圧に匹敵するフェーズと、磁気エネルギーの解放によって熱圧が卓越するフェーズが繰り返し見られる動的性が再現された。降着円盤内部では磁場の増幅によって質量降着が実現され、磁場増幅機構が粘性の役割を果たしていることを確認した。円盤の状態が磁気圧が増加した状態から、熱圧優勢状態に移る時に鉛直方向に強いアルフヴェン波が放出される。このアルフヴェン波がうまくジェットに伝わるフェーズがあり、ジェット中で電磁パワーが増加する。このフェーズでも降着円盤内部での磁場増幅と同じ時間変動が見られ、強いアルフヴェン波が伝播している。このアルフヴェン波は相対論的波であり、上空で質量密度が下がった後、電磁波モードに変換された後に、航跡場加速によって荷電粒子を加速できる。陽子は最高エネルギー宇宙線となり、加速された電子はレーザーで観測されるようなガンマ線放射源となる。レーザーで見られるようなガンマ線フレアの時間変動は今回のシミュレーションで見られたジェット中での電磁パワーの時間変動とよい一致をする。

現象の肝となる降着円盤中での磁気回転不安定性の最大成長波長を捕獲するには、あと一桁ほどよい解像度計算が必要であると見込まれる。磁場増幅は降着円盤内部の粘性の役割を果たし、質量降着の物理を決定するものであり、より大規模な高解像度計算によって検証すべき問題である。また、初期磁場形状や、ブラックホールスピンパラメータの依存性も重要な問題である。

## REFERENCES

- T. Ebisuzaki & T. Tajima, 2014, *Astroparticle Physics*, 56, 9
- T. Tajima & D. Gilden, 1987, *Astrophysical Journal*, 320, 741,
- K. Shibata, T. Tajima, R. Matsumoto, 1990, *Astrophysical Journal*, 350, 295,
- S. A. Balbus, J. F. Hawley, 1991, *Astrophysical Journal*, 376, 214,

A. A. Abdo et al., 2010, *Astrophysical Journal*, 710  
1271,

平成 28 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. A. Mizuta, “Astrophysical Jet from AGNs”, Particle Astrophysics and Cosmology Including Fundamental InteraCtions (PACIFIC) 2016, 2016.9.11 モーレア島、フランス領ポリネシア
2. A.Mizuta, “3D GRMHD simulations of relativistic jet launch and particle acceleration”, Particle Astrophysics and Cosmology Including Fundamental InteraCtions (PACIFIC) 2016, 2016.9.14 モーレア島、フランス領ポリネシア
3. 水田晃、S “3D GRMHD simulations of accretion flows and relativistic jets – for cosmic ray acceleration”, 第 6 回 DTA シンポジウム 「星形成を軸に俯瞰する磁場の役割とその観測的検証」, 2016.11.25, 東京、三鷹
4. A. Mizuta, “General Relativistic MHD simulation of a blackhole, accretion disk, and jets”, Plasma Astrophysics and Extreme High Energies, 2017.2.6, アーバイン、アメリカ合衆国