

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で迫るブラックホール降着円盤—宇宙ジェット
の形成と加速の物理

利用者氏名:○水田晃

理研における所属研究室名:戎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

JEM-EUSO 等の宇宙線(地球外から地上に到達する陽子等の荷電粒子)観測計画が所属する研究室で推進されている。このプロジェクトでは宇宙線の到来方向と加速天体の位置の相関がよいと期待される 10^{20} eV という最高エネルギー宇宙線の飛来の検出をターゲットとしている。この実験が実現すれば宇宙物理学でも最大の未解決問題の一つである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、宇宙線を最高エネルギー($\sim 10^{20}$ 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。盛んに研究されている Fermi 加速モデル(Fermi 1954)は衝撃波面を挟んでの荷電粒子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)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の活動性で励起された相対論的大振幅のアルフヴェンバーストが降着円盤から放射され、その一部がジェット中を伝搬し、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るというモデルを提唱した。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相対論的エネルギーまでの加速が実験的にも観測されている(Leemans et al. 2006)。

降着円盤内部では磁気回転不安定性(Magneto-Rotational Instability: MRI)による磁場増幅と、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、降着円盤鉛直方向にアルフヴェンバーストが生じ、その一部がジェット中を伝播すると Ebisuzaki & Tajima (2014)ではされているが、理想的な定常1次元の降着円盤モデルに基づいており、時間変動性には

多くの仮定が含まれており数値実験によるダイナミクスの検証が重要である。

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ることが重要であり、Mizuta et al. (2018)では高速回転しているブラックホールスピンパラメータ 0.9 の場合について議論し、Ebisuzaki & Tajima (2014)でされた時間変動性の仮定の妥当性を評価した。本年度は特にブラックホールを特徴づけるパラメータの一つであるスピンパラメータ依存性に関して議論するためパラメータスタディを行ったので以下で詳細を報告する。

2. 具体的な利用内容、計算方法

ブラックホール降着流の時間発展を磁気流体方程式を解くことによって再現する。計算を行っている間、ブラックホールのスピン、質量の変化は無視できるとし、また、降着流の自己重力も無視できるとして、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。一般相対論的磁気流体方程式を空間をメッシュで分割し、流体スキームとしては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解く。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た。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 GM/c^2 , GM/c^3 でスケールされ、 $GM=c=1$ 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)。

降着円盤のような差動回転する系では、たとえ初期磁場が弱磁場(熱圧に比べ磁気圧が低い状態)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、磁気圧が熱圧に匹敵するまでに達する磁気回転不安定性が重要である。MRIの成長率には線形解

析から求められる分散関係式より、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モードをシミュレーションでは解像する必要がある。その波長は円盤の厚みの数十分の1程度であり、降着円盤内縁付近、特に赤道面付近鉛直方向で高解像度計算が必要である。そこで、空間非一様に分布する不等間隔メッシュを用い、ブラックホール近傍、赤道面付近にメッシュ間隔が小さくなるようなメッシュの張り方を採用した。極座標系 $[r, \theta, \phi]$ で、計算領域は r 方向は $[0.9r_H:30000]GM/c^2$ 、 θ 方向は $[0:\pi]$ 、 ϕ 方向は $[0:2\pi]$ とし、 $r=\exp(x_1)$ 、 $\theta=\pi x_2+0.4\sin(2\pi x_2)$ 、 $\phi=x_3$ 、と変換し、各方向のメッシュ数 $[N_1, N_2, N_3]=[124, 252, 60]$ を各 x_i では等間隔にとる。ここで $r_H=1+(1-a^2)^{1/2}$ は GM/c^2 で規格化したホライズン半径であり無次元カーブパラメータ a の関数である。スピンパラメータによって動径方向の内側の境界の位置を常にイベントホライズン近傍となるようにした。このグリッドを用いる事によって赤道面付近、ブラックホール近傍の鉛直方向の解像スケール($\sim r \Delta \theta GM/c^2$)はMRIの最大成長率を与える波長を 10 メッシュ弱で捕獲でき、最低限の解像度が確保された計算となる。しかし、極付近の $\Delta \theta$ は極角方向で同じメッシュ数を用いた等間隔 $\Delta \theta$ の場合に比べると荒くなっており、極軸に沿って噴出するジェットを 10 メッシュ程度でしか解像できない。極付近もより高解像度の計算が今後の課題である。

初期条件として回転するブラックホール周りの静水圧平衡解である Fishbone-Moncrief 解を用いる。この解はカーブパラメータ(a)、赤道面における円盤内縁半径(r_{edge})、角運動量(I^*)を与えると決定される。今回は円盤内縁半径を固定し、 a 変化させても幾何学的形状がほぼ同じような形状となるように角運動量(I^*)を与えた。このトーラス内部に弱い初期磁場をMRIの種として与える。ポロイダル成分のみで降着円盤の密度等高面に沿った磁力線を与え、磁気圧と熱圧の比が最も低い所で 100 となっている。更に、熱圧にランダムに最大 5%の擾乱を与え系の軸対象性を壊すことによって3次元的に時間発展をさせる。

ブラックホールスピンパラメータはブラックホールを特徴づける 3 つの物理量(質量、スピン、電荷)の一つである。ブラックホール質量は周りの天体の運動や、周りのガスから放射される輝線の幅などから比較

的よく求められる量である。計算では $GM=c=1$ 、の単位系を用いて解くべき方程式系が記述できるため、ブラックホールの質量は陽的に指定しない。また、電荷は長期的にみれば中性化されていると考えられるので、この系ではスピンパラメータがブラックホールに関する唯一のパラメータとなる、しかしスピンパラメータを観測的に決定することは困難であり、広いパラメータサーチがブラックホール降着流の理解では重要である。今年度はカーブパラメータ 0.7, 0.5, 0.3 および 0.1 の場合に関して長時間計算を行い、昨年度行ったカーブパラメータ 0.9 の場合と比較する。

3. 結果

赤道面付近の磁場の大きさの回転方向(トロイダル)成分と極軸を含む面の成分(ポロイダル)成分の時間進化を示したのが図 1、各(a)である。上から順に $a=0.7$, $a=0.5$, $a=0.3$, $a=0.1$ の場合を示す。全ての場合において、昨年度行ったブラックホールスピンパラメータ $a=0.9$ の場合と同様に磁場が急激に増幅されるフェーズと、ゆるやかに減少するフェーズが何度も繰り返している。降着円盤内縁付近の磁気圧は磁場増幅に伴い、熱圧程度に匹敵するが、磁場の減少期に磁気圧は大きく下がっており、先に議論した、MRI による磁場増幅と、磁気飽和後の磁気散逸に伴う磁場のゆるやかな減少が見られる。磁場増幅に要する時間スケールはブラックホールスピンパラメータが小さくなるにつれ徐々に長くなっている傾向が見られた。

磁場増幅の時間スケールはMRIの成長タイムスケールに相当すると考えられる。MRIの成長率はケプラー回転の時間スケール程度であるが、ケプラー回転周期は半径 R を用いて、 $R^{-3/2}[GM/c^3]$ であり、降着円盤の内側程回転周期は短くなる。降着円盤には一般相対論的效果により、最内縁半径が存在する。降着円盤内縁を通過した物質は十分な磁場増幅する時間も無く、ほぼ自由落下でブラックホールに落ち込むため、最内縁半径付近の半径での磁場増幅の時間スケールが特徴的な時間スケールとして現れると考えられる。円盤最内縁半径は一般相対論的效果より最内縁安定軌道(Innermost Stable Circular Orbit: ISCO)半径となるが、ISCO 半径はブラックホ

ールスピンパラメータに依存し、 $a=1$ (最大共回転)から $a=-1$ (最大反共回転) に変化するにつれ、 R_{ISCO} は単調に大きくなるため、 a が小さくなっていくと R_{ISCO} が外側に移動し、それに伴い磁場増幅の時間スケールで現れてくる ISCO 付近のケプラー周期($\sim R^{3/2}[\text{GM}/c^3]$)はブラックホールスピンが小さくなるにつれ長くなる。我々の計算で見られた磁場増幅の時間スケールのスピンパラメータ依存性はまさにこの効果を見ており、各ブラックホールスピンパラメータで見られた磁場増幅の時間スケールは各スピンパラメータでの ISCO 半径のやや外側でのケプラー周期程度となっている。

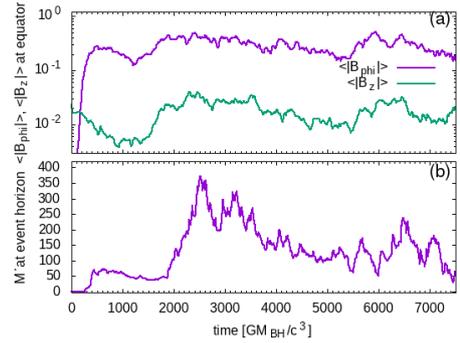
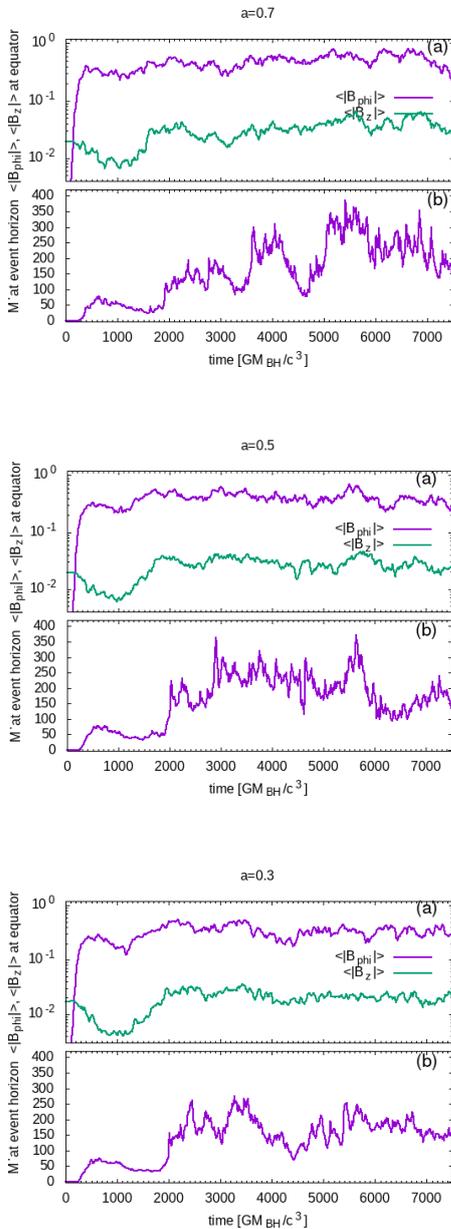


図 1 各図(a)赤道面付近の磁場のトロイダル成分(紫)と、ポロイダル成分(緑)(a), 各図(b)ブラックホール表面(イベントホライズンで評価した質量降着率)。上から順にブラックホールスピンパラメータ 0.7, 0.5, 0.3 0.1 の場合を示す。

MRI による磁場増幅は角運動量輸送を伴うため、角運動量を失った物質はより内側の半径へと質量降着していく。円盤最内縁付近の MRI によって、降着物質は円盤最内縁を通過し、自由落下でブラックホールへと落ち込むため、全段落であげた最内縁付近の磁場増幅の時間スケールが、ブラックホールへと落ち込むガスの時間変動としても見られる。図 1 各図の(b)はイベントホライズンで評価した質量降着率の時間変動であり、各パネル(a)で見られた磁場増幅の時と同様の時間変動の時間スケールが見られた。

図 2 はブラックホールスピンパラメータ $a=0.3$ の計算において、ジェットのポインティング光度の時間変化とバタフライ図である。ジェットのポインティングパワーは、ブラックホール上空 $R=15\text{GM}/c^2$ 、極軸から 20 度の範囲で評価した動径方向のポインティングパワー、バタフライ図は極軸から $6.315\text{GM}/c^2$ の距離において回転角方向で平均化したトロイダル方向の鉛直構造の時間進化を示している。赤道面($z=0$)から鉛直方向に細いフィラメンタル構造が見られ、降着円盤内部での磁場増幅と、磁気拡散による磁場の減衰の繰り返しを示す。強い磁場が鉛直方向に伝播した時にジェットのポインティング成分にフレアが見られ、降着円盤から浮上した磁場成分がジェット中を伝播していく様子が見られる。

降着円盤内縁付近で強いトロイダル磁場が鉛直方

向への上昇と呼応して、ポインティング光度にフレアが見られる。これらの結果は昨年度行ったスピンパラメータ 0.9 の場合と同じ傾向を示すが、典型的質量降着率に対する、ジェットのパインティング光度は非常に小さいものとなっており、低ブラックホールスピンの場合、質量降着エネルギーをアウトフローに転嫁する効率が落ちている。これはブラックホールスピンパラメータ 0.9 の場合、円盤内縁半径が $2.32GM/c^2$ に対し、 $a=0.1$ の場合で $5.67GM/c^2$ と外へ移行しているためだと考えられる。

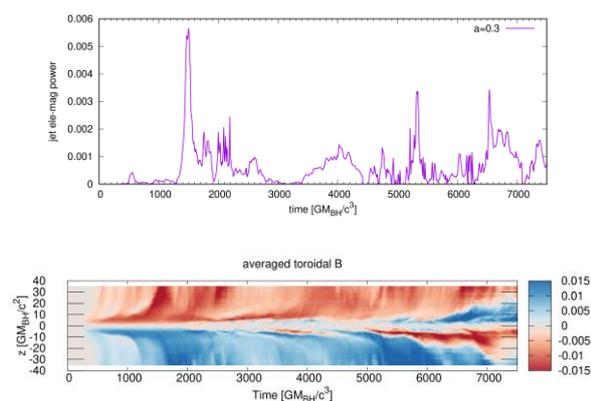


図 2. ブラックホールスピンパラメータ $a=0.3$ の場合の、(上) ジェットのポインティングパワーの時間進化(ブラックホール上空 $R=15GM/c^2$ 、極軸から 20 度の範囲で評価した動径方向のポインティングパワー)。(下)極軸から $6.315GM/c^2$ の距離において回転角方向で平均化したトロイダル方向の鉛直構造の時間進化。赤道面($z=0$)から鉛直方向に細いフィラメンタル構造が見られ、円盤内部での磁場増幅と、磁気拡散による磁場の減衰の繰り返しを示す。強い磁場が鉛直方向に伝播した時にジェットのポインティング成分にフレアが見られ、円盤から浮上した磁場成分がジェット中を伝播していく様子が見られる。

4. まとめ

回転する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行った。円盤内部で期待される一連の磁場の振る舞いである、MRI による磁場増幅、磁気圧が熱圧程度にまで達する磁気飽和、磁気拡散による磁気エネルギーの熱、運動エネルギーへの変換広いスピンパラメータで確認された。磁場増幅の時間スケールで短いものは円盤内縁半径である ISCO 半径で評価した MRI の成長時間(〜ケプラー回転周期)となった(実際には ISCO 半径を通過するまでに 1 周程度回転するた

めに ISCO 半径のやや外側の回転周期)。同様の時間変動がジェットのポインティング光度にも見られるが、その影響はスピンパラメータが小さくなるほど弱い。質量降着パワーに対するポインティング光度もスピンパラメータが小さくなるほど小さい。この傾向はスピンの小さくなるにつれ ISCO 半径が大きくなるため、磁場増幅が起きる半径がより外側になるためにブラックホール上空のジェットに影響を及ぼせなくなるためだと考えられる。

5. 今後の計画・展望

広いブラックホールスピンパラメータにおいて、降着円盤内部から鉛直方向に磁気浮上に伴うアルフヴェンパルスの伝播が観測された。しかし、極軸回りの低密度領域(ジェット)部分を強いポインティングパワーが伝播するには、大きなスピンパラメータの場合に限られる。電波観測では近傍の活動銀河核ジェットの断面構造においてジェットの縁の部分が明るくなる観測が多く見られている。我々のモデルでは円盤内部から鉛直方向へ伝播するアルフヴェン波がジェットの外部から侵入してくため、ジェットの芯である軸付近よりもジェットの外部のポインティング光度が大きくなっていると期待される。しかし、今回の計算では軸付近の解像度が低く、ジェットの内部構造はなまされておき、軸回りにも十分な解像度を持った計算を行っていききたい。

平成 30 年度 利用研究成果リスト

【雑誌に受理された論文】

1. Akira Mizuta, Toshikazu Ebisuzaki, Toshiki Tajima, and Shigehiro Nagataki,
"Production of intense episodic Alfvén pulses: GRMHD simulation of black hole accretion discs"
Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 479, Issue 2, pp.2534–2546

【口頭発表】

1. 水田晃, "ブラックホール磁気圏と相対論的ジェット", 研究会 X, 2018 年 3 月 1 日、広島大学、広島県
2. 水田晃, "3D GRMHD シミュレーションによるブラックホール降着円盤", ブラックホール磁気圏研究会、2018 年 3 月 3 日、熊本大学、熊本県
3. 水田晃, "ブラックホール降着円盤からの大振幅アルフヴェンバーストと粒子加速", 日本物理学会第 73 回年次大会、2018 年 3 月 23 日、東京理科大、千葉県
4. Akira Mizuta, "Relativistic Alfvén pulse emission from black hole accretion disk and particle acceleration via wake fields in relativistic jets" High Energy Density Laboratory Astrophysics (HEDLA), May 27, 2018, Kurashiki, Japan
5. 水田晃 "ブラックホール降着円盤から放出される大強度アルフヴェンパルスとジェット" 日本天文学会秋季年会 2018, 2018 年 9 月 19 日、兵庫県立大、兵庫県
6. 水田晃 "3 次元 GRMHD シミュレーションによるブラックホール降着円盤", BZ77 研究会 2018: 回転ブラックホールからのエネルギー引き抜き, 2018 年 10 月 21 日、名古屋大学、愛知県
7. 水田晃, "大質量ブラックホール降着円盤から放出される大強度アルフヴェンパルスとジェット", 宇宙線研究所共同利用小研究会「高エネルギー天体現象の多様性」、2018 年 11 月 20 日、東京大学宇宙線研究所、千葉県
8. 水田晃, "大質量ブラックホール降着円盤から放出される大強度アルフヴェンパルスとジェット", CFCA ユーザーズミーティング、2019 年 1 月 15 日、国立天文台、東京都

【ポスター発表】

1. 水田晃, "ブラックホール降着円盤から放出されるアルフヴェンパルスとジェット", 高エネルギー宇宙物理研究会, 2018 年 9 月 5-7 日、東京大、東京都
2. 水田晃, "大質量ブラックホール降着円盤から放出される大強度アルフヴェンパルスとジェット", 第 31 回理論懇シンポジウム, 2018 年 12 月 19-21 日、京都大学、京都府
3. Akira Mizuta, "Production of intense episodic Alfvén pulses: GRMHD simulation of black hole accretion discs", East-Asia AGN Workshop 2019, January 18-20, National Taiwan Univ., Taiwan