

平成 30 年 6 月 7 日現在

機関番号：82401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K17670

研究課題名(和文)一般相対論的磁気流体シミュレーションで探る相対論的ジェット形成の物理と宇宙線加速

研究課題名(英文) general relativistic magnetohydrodynamic simulations of relativistic jet formation and particle acceleration

研究代表者

水田 晃 (Mizuta, Akira)

国立研究開発法人理化学研究所・戒崎計算宇宙物理研究室・研究員

研究者番号：90402817

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：ブラックホール降着流のグローバル一般相対論的磁気流体シミュレーションを行った。降着円盤内部で磁気回転不安定性による線形成長理論同程度の成長時間の磁場増幅と磁気散逸による磁場減衰が繰り返し、それに伴い円盤鉛直方向にアルヴェン波が放出された。その一部は相対論的アルヴェン波としてジェット中を伝播し電磁波となりうる。この波によってEbisuzaki & Tajima(2014)で議論された最高エネルギー宇宙線加速やブレイザーでのガンマ放射の源となる比熱的高速電子の加速が可能であり、シミュレーションで見られたアルヴェン波のフレアの時間スケールは観測されたブレイザーのフレアの時間スケールを再現する。

研究成果の概要(英文)：We have performed global general relativistic magneto-hydrodynamic simulations of accretion flows onto a black hole. We observed magnetic field amplification via magnetorotational instabilities (MRIs) and dissipation of magnetic fields in the accretion disks. The magnetic field amplification and dissipation repeatedly occur. The timescale of magnetic field amplification via MRI is consistent with linear theory. Alfvén waves are emitted toward vertical direction from accretion disk to outside. Some of them propagate as relativistic alfvén waves in the jet and will be converted to electromagnetic waves. For these waves we can apply theoretical acceleration models proposed by Ebisuzaki & Tajima (2014) for ultra high energy cosmic rays and non-thermal electrons which contributes to the high energy gamma-ray emissions from blazars. Our timescale of alfvén waves are consistent with the observed timescales of gamma-ray flares of blazars.

研究分野：宇宙物理学

キーワード：ブラックホール 宇宙ジェット 降着円盤 磁気流体力学 一般相対性理論

1. 研究開始当初の背景

10の20乗eVにも及ぶ宇宙線の最高エネルギー領域の詳細なエネルギースペクトルがTA, Auger 実験のグループなどから発表されたが、加速天体の特定、加速の物理的理解には至っていない。宇宙線加速理論ではFermi加速モデルを基にした無衝突衝撃波面を挟んで磁場を介して粒子を往復度も往復させることによって加速させるモデルが盛んに研究をされてきたがいくつかの問題は未解決である。例えば、荷電粒子が衝撃波面を挟んで往復をするため、宇宙線の最高エネルギーに達するにはシンクロトロンロスが深刻であるなどである。これに対して、Ebisuzaki & Tajima (2014)は活動銀河核ジェット中を降着円盤から放出された相対論的アルフヴェン波が伝搬するにつれ電磁波モードに変換されポンデラモーティブ力による線形加速を荷電粒子が受け、最高エネルギー宇宙線の起源となるとするモデルを提唱した。

2. 研究の目的

Ebisuzaki & Tajima (2014)のモデルでは、降着円盤から放出された相対論的アルフヴェン波の生成やその強度、時間スケールを1次元解析によって得られた降着円盤モデルを元に議論しており、より現実的なMHDシミュレーションによって降着円盤の活動性や放出されるアルフヴェン波の時間変動性等を検証する必要がある。そこで、本研究では高解像度シミュレーションによって降着円盤の活動性の源となる磁場増幅、散逸を捕らえ、円盤から放出されるアルフヴェン波の特性を理解していき、活動銀河核ジェットが最高エネルギー宇宙線の加速天体となりうるかを検証していく。

3. 研究の方法

ブラックホール降着円盤の物理を考えるため、3次元一般相対論的磁気流体方程式を離散化したグリッドをはった空間で解くシミュレーションを行う。降着円盤の時間発展から磁場増幅、磁気散逸による磁気エネルギーの開放を確認し、その時間変動性、ジェットの時間変動性の相関を議論する。計算にはNagasaki (2009)で開発されたコードをベースとし、いくつかの改良を加え、よりよい精度で計算ができるようになっている。

4. 研究成果

3次元一般相対論的磁気流体シミュレーションでは、静水圧平衡にあるトーラスを回転するブラックホール周りに仮定し、これに弱磁場を与え、差動回転系でおきる磁気回転不安定性によって磁場を増幅させる。計算結果では、降着円盤中の磁場の平均値が時間と共に急激に増幅される時期と磁場がゆるやかに減少する時期が繰り返し起きていることが見られた(図1-a)。磁場の増幅は磁気回転不安定性に起因し、解像度をあげていくとよ

り短時間での成長が確認され、解像度をあげていくにつれ線形理論で見積もられる短波長の短時間成長のモードが捕らえられていることに相当する。最も解像度が高い計算では最大成長率を与える波長と同程度の構造が円盤内部で見られたことより、最低限必要なグリッドでの計算が実現されたといえる。以下では図1を含め、最も高解像度の計算結果を基に得られた物理的知見を述べていく。まず、同程度の時間スケールで変動する質量降着も実現され(図1-b)、降着円盤内部での磁場増幅が角運動量輸送にも働き、ブラックホールへの質量降着が実現されている。これは標準降着円盤で提唱されたアルファ粘性を磁場が担っていることに相当する。

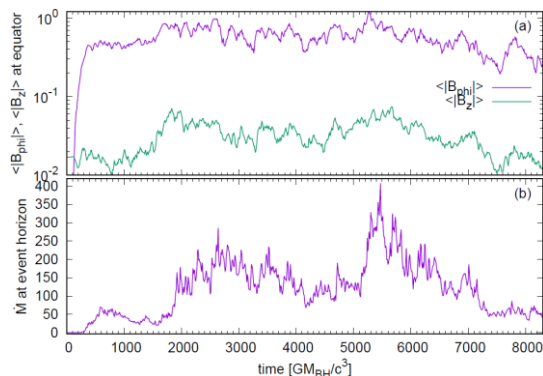


図1. (a)降着円盤内縁付近、赤道面で平均した磁場の方位角成分とポロイダル成分の時間発展。両成分ともに短時間の急成長と緩やかな減衰の繰り返しが見られる。(b)ブラックホール表面で評価した質量降着率の時間進化、(a)の磁場の平均値の時間変動と同様の時間変動が見られ、磁場の時間変動とほぼ同期している。

図2は赤道面でのプラズマベータ値(磁気圧/熱圧)の逆数を時刻7550GM/c³(Gは重力定数、Mは中心ブラックホール質量、cは光速)と直近する時刻7640GM/c³で比較したものである短時間のうちに半径6GM/c²付近の高プラズマベータ状態の領域が磁場増幅によりプラズマベータが1のオーダーの低プラズマベータ値になっている。

極軸方向には低密度、電磁場優勢の絞られたアウトフロー(ジェット)が見られた(図3)。このジェット中のポインティング光度の時間変化を示したのが図(4-b,c)である。降着円盤内部での磁場増幅、減衰と同程度の短時間変動が見られ、強度が大きく変化するフレアも数回みられた。ポインティング光度が増大するフレア期には降着円盤内部で見積もられたアルフヴェン波のフラックスも増大しており、ジェット中のポインティングフラックスも同程度にまで迫っている(図4-a)。円盤内部で生じたアルフヴェン波がジェットに伝搬していると考えられる。この様子より示したのが図5である。図5は降着円盤内縁付近で回転角方向の磁場の平均値の鉛直方向構造の時間進化を示したものである。赤道面近傍からいくつもの筋状の強い磁場

成分が上下に伝わっている。この伝搬速度はローカルなアルフヴェン波の速度となっている。強い磁場が上昇したのちに図 4(b)で示したジェット中のポインティング光度のフレアの増大が見られる。

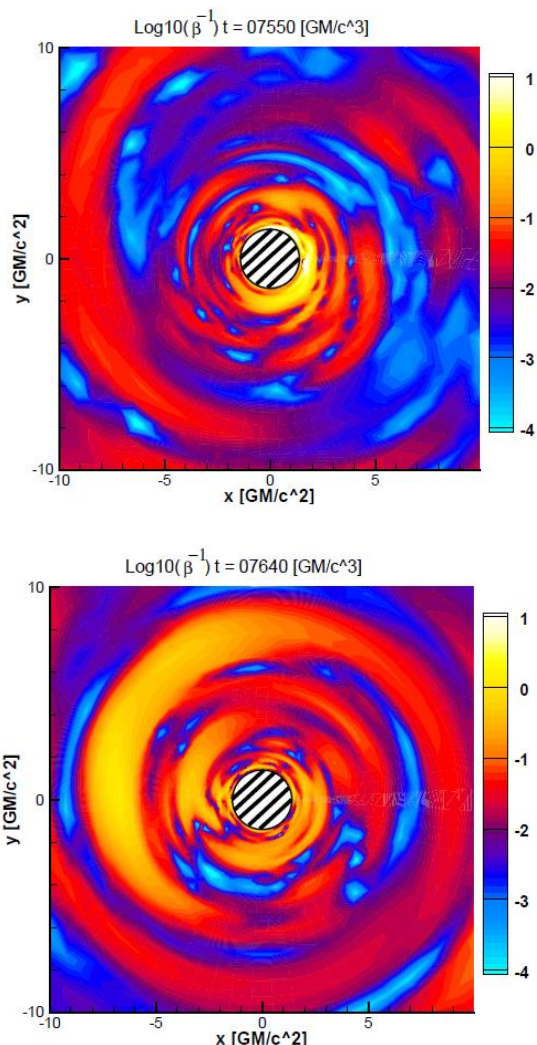


図 2. 直近する二つの時刻 7550(上), 7640(下)GM/c³ での赤道面におけるプラズマベータ値の逆数。高エネルギーベータ状態の領域が短時間で高プラズマベータ状態になっている。

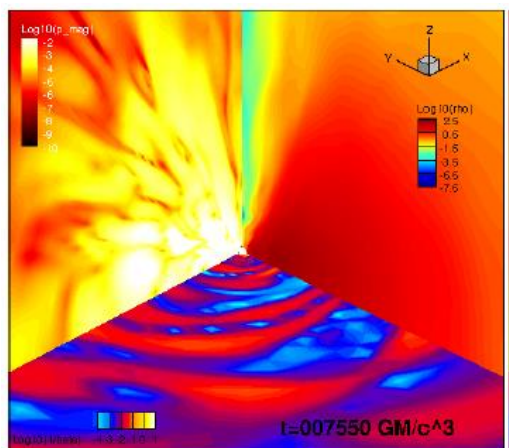


図 3. 時刻 7550GM/c³での質量密度(yz 面), 磁

気圧(xz 面), プラズマベータ値(磁気圧/熱圧)の逆数(G は重力定数, M は中心ブラックホール質量, c は光速)。降着円盤内部では磁気乱流が発達し、極軸方向には低密度、ポインティング光度優勢のジェットが見られる。ジェットと降着円盤の間には円盤風が見られる。

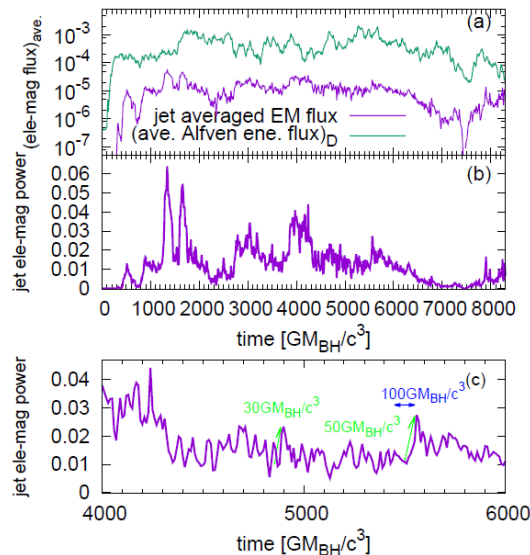


図 3. (a) ジェット中のポインティング流速と円盤内縁付近で評価したアルフヴェンフラックスの比較。(b) ジェット中のポインティング光度の時間発展。円盤内部での磁場増幅と同程度の短時間変動が見られ、光度が増大するフレアが何度か見られた。フレアの時期では、(a)で示した両フラックスが同程度となり円盤で生じたアルフヴェン波がジェット中を伝搬し、フレアの起源となっている。(c)は(b)のある時間を拡大したもの。典型的な増大の立ち上がり時間、繰り返し時間を示した。

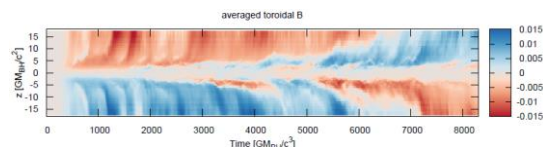


図 4. 軸から 3GM/c³の距離で評価したトロイダル磁場の回転角方向の平均値。いくつもの筋状に強い磁場が赤道面付近から上下へと伝わっているのがわかる。伝搬速度はローカルなアルフヴェン速度程度。特に強い磁場が+z 側に伝搬する際に図 3(b)で示したジェット中のポインティング光度が上昇し、円盤内部で生じたアルフヴェン波がジェット中に伝搬する様子が見られる。

ジェット中を伝搬するアルフヴェン波の波の強度 $a_0 = eE/m_e \omega c$ を見積もると、典型的な超巨大質量ブラックホール ($M=10^8$ 太陽質量)、10%エディントン質量降着率に対して、 $a_0=10^{11}$ と見積もられた。これは超高強度レーザーを用いた実験で実現される波の強度を優に超える超相対論的波であり、Ebisuzaki & Tajima (2014)で議論されたようにジェット共に伝搬し、ジェットの密度が下がっていく

ことによって電磁波へ変換され、高効率で荷電粒子をポンデラモーティブ力によって加速できる。加速された陽子は最高エネルギーにまで達し、加速された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出し、さらには逆コンプトン散乱によって比熱的高エネルギー放射をする。放射はジェット中に見られたポインティング光度のフレアと同程度の時間スケールで時間変動すると期待される。実際に Fermi 衛星で観測されたブレーザー天体(3C454. 3)のフレアの時間スケールと比較すると数値計算結果と同程度となった。

これらの結果は論文化され MNRAS 誌での掲載が決定している。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

①Akira Mizuta, Toshikazu Ebisuzaki, Toshiki Tajima, and Shigehiro Nagasaki, “Production of intense episodic Alfvén pulses: GRMHD simulation of black hole accretion disks” MNRAS (2018) 掲載決定 (査読有り)

②Y. Kuramitsu, A. Mizuta, Y. Sakawa, H. Tanji, T. Ide, T. Sano, M. Koenig, A. Ravasio, A. Pelka, H. Takabe, H. C. D. Gregory, C. D., N. Woolsey, T. Moritaka, S. Matsukiyo, Y. Matsumoto, N. Ohnishi “Time Evolution of Kelvin-Helmholtz Vortices Associated with Collisionless Shocks in Laser-produced Plasmas” The Astrophysical Journal (2016) Volume 828, Issue 2, article id. 93 (査読有り)

[学会発表] (計 16 件)

①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、2018

②Akira 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, 2018

③Akira Mizuta, “Characterization of the production of intense Alfvén pulses : GRMHD simulation of black hole accretion disks”, Theories of astrophysical Big Bangs, 2017

④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、2017

⑤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

⑥A. Mizuta, “General Relativistic MHD simulation of a blackhole, accretion disk, and jets”, Plasma Astrophysics and Extreme High Energies, 2017

⑦水田晃、“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

⑧A. Mizuta, “3D GRMHD simulations of relativistic jet launch and particle acceleration”, Particle Astrophysics and Cosmology Including Fundamental Interactions (PACIFIC) 2016, 2016

⑨水田晃、“GRMHD simulations of black hole and accretion disk” 高エネルギーガンマ線でみる極限宇宙 2015、2016

⑩A. Mizuta, “3D GRMHD simulations of jets from black hole and accretion disk”, Symposium on Quarks to Universe in Computational Science (QUCS 2015), 2015

⑪Akira Mizuta, “3D GRMHD simulations of jet launch from BH and accretion disk”, HEAP2015, 2015

⑫水田晃、“3D GRMHD 数値実験によるブラックホール降着円盤とジェット形成”、日本天文学会 2015 年秋季年会, 2015

⑬Akira Mizuta, “3D GRMHD simulations of jet formation from accretion disk”, 降着円盤大研究会 2015, 2015

6. 研究組織

(1) 研究代表者

水田 晃 (Mizuta Akira)

国立研究開発法人理化学研究所・戎崎計算宇宙物理研究室・研究員

研究者番号：90402817