

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: *戎崎計算宇宙物理研究室

1. 研究の背景、目的

宇宙ジェットは様々なスケールで見られる天体現象である。細く絞られたプラズマ流が収束を保ちつつ長距離を伝搬していく様子が観測されている。宇宙ジェットは重力を及ぼす中心天体に落ち込む降着流の一部が外向きの流れ、アウトフローに転じ駆動されている。周辺ガスが中心天体へ降着することによって開放される重力エネルギーをいかに一部の物質に与えアウトフローを形成するかというエンジンの問題が重要な未解決問題として残されている。特に、銀河中心のブラックホールのような強重力場を周辺に及ぼす天体のシステムから噴出するジェットはアウトフローを形成するだけでなく、流速がほぼ光速の相対論的速度にまで加速されており、どのように加速するのかという問題も未解決である。

相対論的ジェット形成問題には様々な理論モデルが提唱されているが、本課題では降着円盤内部で増幅された磁場と回転するブラックホールの相互作用によって相対論的アウトフローを形成するという、Blandford-Znajek (BZ) プロセス (Blandford & Znajek 1977) に注目する。BZ プロセスは回転するブラックホール周りに現れるエルゴ領域で磁力線に沿ってブラックホールの回転エネルギーを引き抜くプロセスである。このプロセスはブラックホールスピンの大きければ大きい程アウトフローのパワーが増加すると期待されるが、解析的に議論できるのは無限小回転の場合に限られ、数値シミュレーションによる解析が必要となる。

本課題では高解像度 3 次元一般相対論的磁気流体計算によってジェット形成をシミュレーションし、ジェット形成の物理、形成されるアウトフローの構造等の諸性質を明らかにする。一般相対論的効果だけでなく、磁場も重要となる。特に磁場はアウトフロー形成に関わるだけでなく、降着円盤内での角運動量輸送の観点からも重要な役割を果たすため、精度よく捕らえる必要がある。本研究では初期条件では弱磁場を与え、差動回転の系で指数関数的に成長する磁気回転不安定性

によって磁場を増幅させることによって、現実的な降着流を再現し、ジェット形成の鍵となるエルゴ領域に入り込む磁場を求め、極方向に生成される磁気優勢アウトフローのパワーの時間変動、内部構造等を調べる。

また、活動銀河核からのジェットは宇宙線加速の候補天体である。特にそのサイズの大きさ、パワーの大きさから最高エネルギー宇宙線 ($\sim 10^{20}$ eV) にまで粒子を加速する有力な候補天体の一つである。加速機構に関しても様々なモデルが提唱されている。降着円盤内部で増幅された磁場はジェットに運ばれる。非常に強いアルフヴェン波がジェット中を伝播していると考えられる。このような高強度のアルフヴェン波が相対論的速度で伝搬するとポンデラモーティブ力が働き荷電粒子を効率的に加速できる (Ebisuzaki & Tajima (2014))。これは、高強度短パルスレーザーをプラズマ中に照射した時に見られる航跡場加速機構として提唱されたもの (Tajima & Dawson (1979)) と同じ機構であり、電磁波と同じくアルフヴェン波が強磁場中で相対論的速度で伝搬し、横波であることによる。解析ではこの加速機構によって最高エネルギー宇宙線のエネルギーまで加速が可能であると見積もられている。我々のシミュレーション結果から定量的な解析を行い、新しい宇宙線の加速機構モデルの構築にも寄与することを目指す。

2. 具体的な利用内容、計算方法

先に述べたように一般相対論的磁気流体シミュレーションを空間 3 次元で解き、系の時間発展を考える。理想磁気流体を仮定するが、数値的磁気散逸が入り、磁気エネルギーの一部は熱的、運動エネルギーへと変換される。これは反平行の磁力線がつなぎ変わることによって磁気エネルギーを解放する磁気再結合が起きていることに対応する。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として時間的に変化しないカー・メトリックを仮定し、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 $[1.4 \leq r \leq 3000]$, $[0 \leq \theta \leq \pi]$, $[0 \leq \phi \leq 2\pi]$ 、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 ($N_r=124$, $N_\theta=124$, $N_\phi=28$) と取り、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とった。それぞれのグリッド数はこの解像度はこの分野で積極的に研究を行なっている 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。

初期条件としてはブラックホール周りで流体力学的に平衡状態にある Fishbone-Moncrief 円盤解を用いた。これは中心のブラックホールの重力と回転による遠心力、ガス圧勾配が釣り合う静水圧平衡モデルであり、円盤内縁付近は赤道上ではほぼケプラー回転している。今回はブラックホールの回転パラメータを 0.9 ととった。これは高速自転しているモデルであり、高効率の BZ 効果によって強いジェットが期待できる。Fishbone-Moncrief 平衡解に弱い磁場を与える。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の成分を持たない。この磁場によって系は非平衡状態となり、系は新しい平衡状態へ向かって時間発展し、準平衡状態になるまで計算する。

3. 結果

円盤は回転速度が極軸からの距離に依存する差動回転をしているため、初期に円盤内部に与えられた磁場は回転方向に引き伸ばされ、初期になかった回転方向の磁場が生じる。磁場のエネルギー密度の空間積分をしたものの時間発展を示したものが図 1, 2 である。空間の積分範囲は全球、赤道面を含む極角 ± 10 度、 20 度と円盤の領域付近のみの場合を示した。

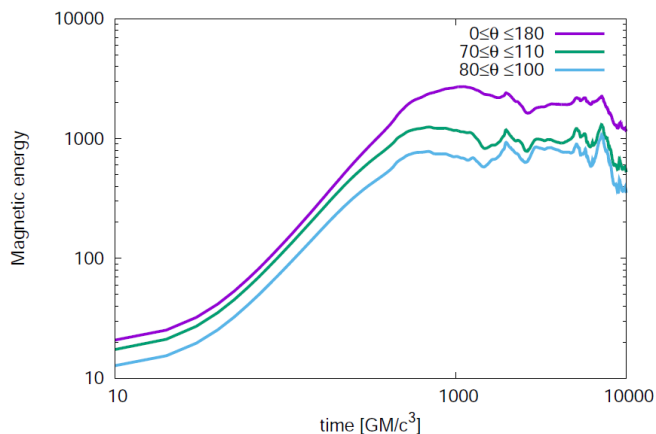


図 1. 初期の磁気エネルギーの時間進化。各時刻で磁気エネルギー密度の空間積分をとった。極角のみ積分範囲を全体 $[0 \leq \theta \leq 180$ 度], 赤道から $\pm 20, 10$ 度 $[70$ 度 $\leq \theta \leq 110$ 度], $[80$ 度 $\leq \theta \leq 100$ 度] とした。赤道付近のみ積分値は円盤成分を見ていることに相当する。磁場は $t \sim 100$ 程度まで指数関数的に増幅し、その後はべき的に増幅し、飽和している。

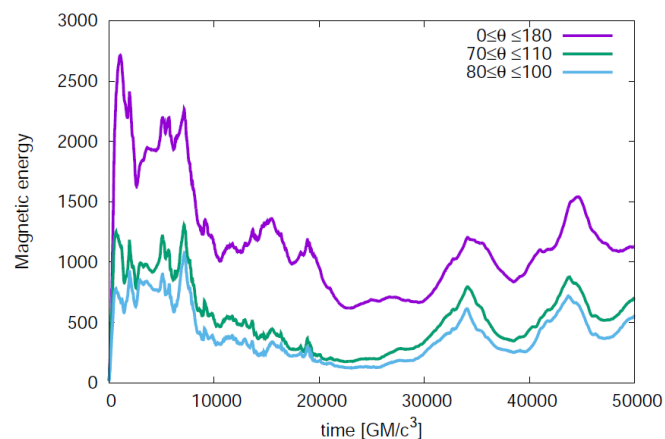


図 2. 図 1 と同じ。ただし、準周期的変動を見せる、長時間までを示した。 $t \sim 10000$ 辺りまで増幅された磁場は散逸によって磁気エネルギーを開放、あるいはブラックホールに落ち込む。その後は磁場エネルギーは増幅、飽和、散逸を周期数千で準周期的に繰り返す。

図 1 では初期 ($t \sim 10000$) の磁場増幅を示しており、特に $t \sim 100$ まで指数関数的増幅をしているのが見られる。磁気回転不安定性による磁場増幅においても線形成長の段階では指数関数的増幅をすることが知られており、我々の計算でもその成長を見ている可能性が高い。磁場の成長は $\propto \exp(i\omega t)$ とかけ、 ω を成長率といい、 ω は線形成長の段階では擾乱の波長、回転振動数の関数で解析的にかける。今回得られた成長率を線形成長理論と比較すると、最大成長率を与える波長に対して、

$r \sim 15$ 程度での回転振動数での成長率とよく一致する。この半径は初期磁場を与えた領域であり、実際に磁場増幅が見られる領域でもある。線形成長率は波長にもよるが、これを解像するグリッド数が現状ではようやく確保されている程度の解像度であるため高解像度計算による収束性の確認が必要である。今回は線形成長段階のみ、極角、変位角方向のグリッド数をほぼ 2 倍にした計算も行なってみた。2 つの解像度に関して、磁気エネルギーの時間発展を示したのが図 3 である。線形成長の段階でよい収束性を見せており、今後更に高解像度の計算で収束性を確認していく。

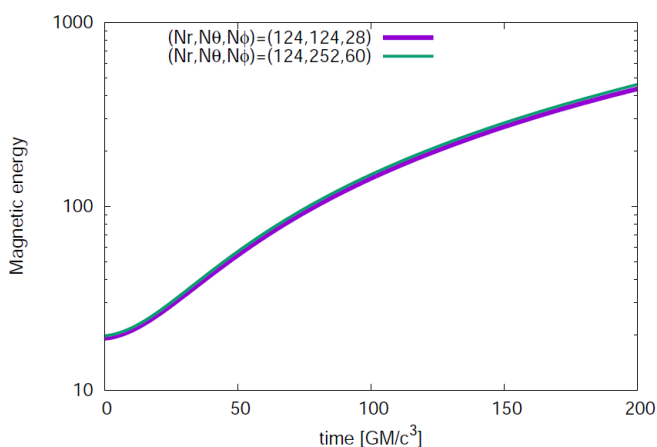


図 3. 線形成長段階での磁気エネルギーの時間進化の解像度依存性。極角、変位角方向のグリッド数をほぼ 2 倍にした計算でも解像度が低い場合と同じ時間進化をし、よい収束性が得られている。

磁場が指数関数的増幅を見せた後も増幅され、 $t \sim 1000$ 程度で飽和し、減衰、その後も増幅、飽和、減衰を繰り返し、準周期的な振る舞いを見せた。磁場の飽和値は数値的拡散によるため、今後高解像度モデルをより長時間計算し、比較する必要がある。

図 4. は赤道面でのプラズマベータ値と呼ばれる磁気圧力と熱的圧力の比の分布を示したものである。円盤内縁付近でプラズマベータ値は 1 のオーダーまで増幅され、内部エネルギーと同程度にまでなっていることが分かる。この増幅された磁場は、再内縁安定軌道からブラックホール表面までガスとともに落ち込んでいく。また、プラズマベータ値の強弱による層構造が見られる。

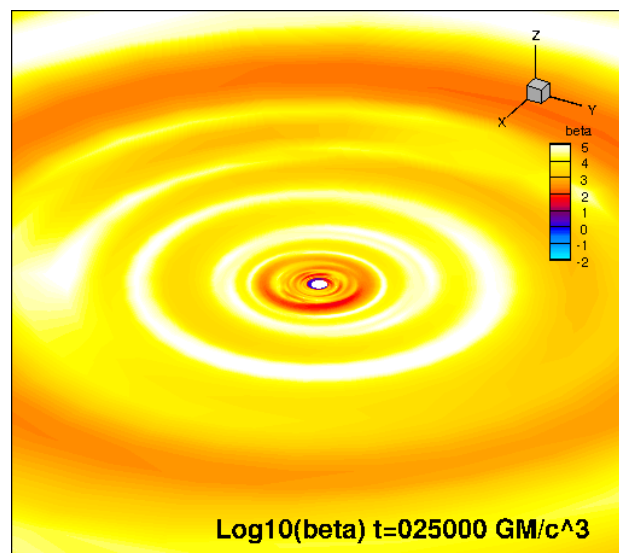


図 4. 赤道面でのプラズマベータ値(磁気圧と熱的圧力の比). $r \sim 60$ の範囲を示した。円盤内縁付近では磁場が増幅されプラズマベータ値は 1 のオーダーにまで到達し、磁気エネルギーと内部エネルギーが同程度にまでなっているのがわかる。また、プラズマベータ値が層状となっている。

極軸に強い磁場優勢のアウトフローが生じているのを示したのが図 5 である。赤道面は図 4 と同じくプラズマベータ値、yz 平面に密度、xz 平面に磁気圧の等高図をそれぞれ示した。円盤内部は複雑なチャンネルフローと呼ばれる縞状の構造が見られ、磁場の強弱ができていく。円盤表面に沿ってガスが巻き上がっており、円盤風と呼ばれる構造が見られる。

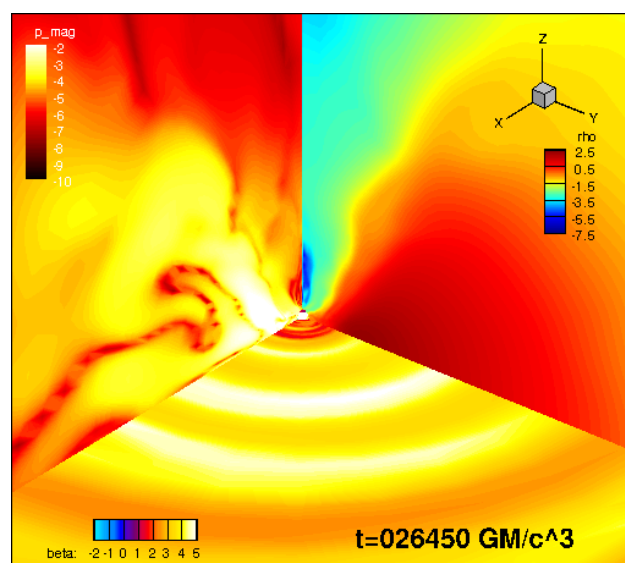


図 5. プラズマベータ値(赤道面), 密度(yz 平面), 磁気圧(xz 平面)。円盤内部に磁気圧の強弱が縞状に現れている。円盤表面から円盤風吹き出し、極方向に低密度、磁場優勢のアウトフローが見られる。

一方、極軸付近は非常に低密度、強磁場となっている。これは磁場優勢のアウトフローである。このアウトフローは間欠的に生じており、先に上げた磁気エネルギーの増幅、飽和、減衰のサイクルと大きく関連性がある。現段階の解析ではこの磁氣的アウトフローが BZ 効果によるものだという結論には至っておらず更なる解析が必要である。磁気アウトフロー中には更に短い時間変動が見られる。特にポンティング流束にはフレア中に短時間の時間変動が見られ、このフレア中に含まれるアルフヴェン波がどの程度の宇宙線加速ができるかも今後解析していく。

平成 26 年度 RICC 利用研究成果リスト

【国際会議、学会などでの口頭発表】

水田晃、” 相対論的ジェットに付随するコクーンの内部構造” 日本天文学会 2014 秋季年会、2014 年 9 月 13 日、山形大学

水田晃、” 3D GRMHD simulation of accretion flows onto BH and relativistic jet formation” , High-Energy Astrophysics & Astroparticle Physics 2014、2014 年 10 月 14 日、高エネルギー加速器研究機構

水田晃、” Relativistic jets ” 理論天文学研究会 2014、2014 年 11 月 12 日、休暇村館山

水田晃、” 3D GRMHD simulation of accretion flows onto BH and relativistic jet formation” 高エネルギー宇宙物理学研究会、2014 年 11 月 24 日、九州大学