

課題 (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 : *茨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

宇宙ジェットは星のスケールから銀河のスケールまで見られる天体現象である。中心天体の重力によって降着するガスが重力エネルギーを開放し、そのガスの一部がなんらかのメカニズムで重力ポテンシャルを振り切り、双極状で収束したジェットを形成している。特に中心天体がブラックホールや中性子星などのいわゆるコンパクト天体の場合、アウトフローの流速は光速近くまでになっているものがあり、相対論的ジェットと呼ばれている。

相対論的ジェットの形成メカニズムに関してはいくつかの理論モデルが提唱されている。中でも一般相対論的効果であるブラックホールの回転エネルギーを利用する Blandford-Znajek (BZ) プロセス (Blandford & Znajek 1977) モデルを考える。このモデルは回転するブラックホール周りに現れるエルゴ領域に注目する。この領域では負のエネルギー状態を取ることが可能であり、負のエネルギーをブラックホールに吸わせることで正のエネルギーを取り出す Penrose プロセスの一種である。BZ プロセスの場合、磁力線を介して回転エネルギーの引き抜きが行われ、ポインティングフラックスとしてエネルギーが取り出される。このプロセスはブラックホールの回転が速くなると共に高効率となると予測され、相対論的流速まで加速できるジェットのエンジンとして有力な候補過程である。

一方で降着円盤の物理では磁場が重要な役割を果たしていると考えられている。ブラックホールに落ち込むガスは円盤状をなし、ブラックホールの周りを回転している。ガスは角運動量を持っているため、そのままでは中心天体まで落ち込めない。そのため、ガスは周りのガスと角運動量のやり取りをして角運動量だけを外側に輸送することによって、ガス自身は徐々に落ち込んでいく。この角運動量輸送を担うのが磁気乱流粘性である。

降着円盤内部はブラックホールから大きく離れた場

所では磁場は非常に小さいと考えられる。しかし、差動回転する降着円盤内部では磁場が大きく増幅される機構(磁気回転不安定性)が Balbus&Hawley (1991) によって発見された。この機構で増幅された磁場は降着円盤の構造を決定するだけでなく、先にあげた BZ プロセスによるジェット形成のための磁場の供給にもつながるため磁場を正しく捉えることが重要である。

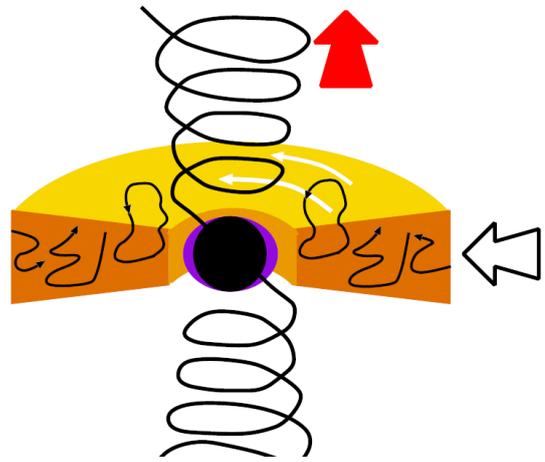


図 1: 模式的に現したブラックホール周りの降着円盤とジェット形成。中心ブラックホール(黒円)に円盤状にガスが降着する。降着流では磁場が増幅され、更に乱流的になる(円盤中の実線は磁力線)。ブラックホール周りのエルゴ領域(紫部分)に落ち込んだガスと磁力線はブラックホールと相互作用し、鉛直方向にジェットを噴出する。

以上のように降着円盤からのジェット形成問題では、降着円盤内部での磁場増幅、磁気乱流粘性による角運動量輸送の理解、ブラックホールに落ち込む際の一般相対論的効果(BZ プロセス)による回転するブラックホールの回転エネルギーの引き抜きを一貫して理解する必要がある。この系を支配するのは一般相対論的磁気流体方程式であるが、その非線形性から解析的理解には限界があり、数値シミュレーションによる解析が重要な役割を果たす。特に磁気回転不安定性を真に解像するには円盤鉛直方向に対して、円盤の厚みの

1/100-1/10 程度の解像が必要だと見積もられ、非常に高コストな計算となる。本課題では一般相対論的流体コードのテスト計算、粗いメッシュでの降着円盤のテスト計算を行った。

2. 具体的な利用内容、計算方法

一般相対論的磁気流体方程式を数値的に解く。ブラックホールが非常に重く、ブラックホールの重力場のみを考える。計算を行なっている間の質量降着によるブラックホールの質量の変化は無視できるとして、メトリックは固定する。コードは長瀧 (2009) が開発した一般相対論的磁気流体コードを用いる。

初期条件としてブラックホール周りの降着円盤の定常解の一つである Fishbone-Moncrief 円盤を考える。この解は流体力学解であり、これに弱い種磁場を与えることによって磁気回転不安定性を駆動させる。計算は極座標を用いる。一般相対論的磁気流体シミュレーションは方程式の複雑さ、非線形さから非常に困難であり、特にグリッド上で磁気エネルギーが熱や運動エネルギーよりも卓越するような場合、精度よく解くことが困難となる。そのため、大規模本計算の前のステップとして今年度は大規模計算の予備計算として計算を行った。

本年度は極座標 (r, theta, phi) で 256x256x32 メッシュを最大で取った。動径方向、極角方向は不等間隔メッシュをとり、ブラックホール近傍、赤道面付近で解像度が上がるようにとった。ブラックホールのスピンパラメータ (無回転の場合 0, 極限回転の場合絶対値が 1) は 0.9 及び、0.5 である。

3. 結果

ここでは最大グリッド数、スピンパラメータ 0.9 の場合に関して結果を示す。円盤内部のガスはケプラー回転をしながらゆるやかに中心へ降着していく。図 2 は中心付近の密度等高図である。密度の高い部分が降着円盤、極軸上に密度の低い部分が見られる。この部分がアウトフロー=ジェットである。

ジェット部分には密度にムラが見られ、アウトフロー生成が時間変動しながら起きているのが分かる。ジェットと円盤の間にはジェットよりは密度は高いが希薄な円盤風が見られる。同じ時刻のプラズマベータ値 (ガス圧と磁気圧の比) を示したのが図 3 である。ジ

ェット軸上で磁気エネルギーが卓越し、強いポインティングフラックスジェットが噴き出している。

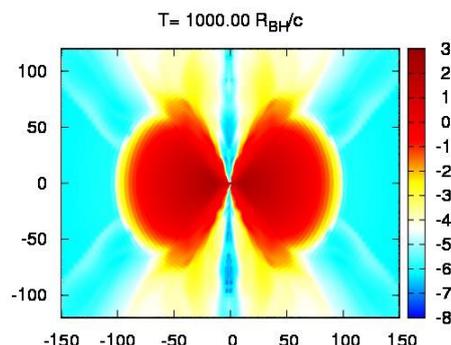


図 2. 極軸を含む面で切った密度等高図 (対数スケール)。密度の高い部分が降着円盤、極軸付近に低密度の部分が現れており、収束したアウトフロー、ジェットが生成されている。

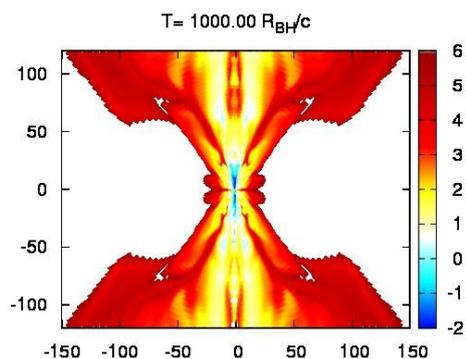


図 3. 図 2 と同じ時刻のプラズマベータ値 (=ガス圧と磁気圧の比、対数スケール)。ブラックホール近傍の円盤内部で徐々に磁場エネルギーが増加するのが見られる。ブラックホール近傍から極軸方向に強い磁場エネルギーが卓越したジェットが出ている。

4. まとめと今後の計画・展望

回転するブラックホール周りの降着円盤からジェット形成の一般相対論的磁気流体シミュレーションを行なっている。流体力学的に定常な円盤の解に弱磁場を初期条件として与え、ケプラー回転する円盤内部で磁場の増幅、乱流化、ブラックホール極近傍からは磁場優勢の収束したアウトフロー=ジェットの形成を見た。計算グリッドは円盤の物理に本質的な磁気回転不安定性を十分捕獲できる程十分でなく、数値粘性の影響も

平成 25 年度 RICC 利用報告書

大きく入っていると思われる。今後、より高解像度の計算が必要である。コードを最適化し、高解像度シミュレーションによって、円盤の質量降着率、磁場の増幅、形成されるジェットパワー、その時間変動などを議論する。

平成 25 年度 RICC 利用研究成果リスト

【論文、学会報告・雑誌などの論文発表】

研究スタート初年度であるため、出版、発表実績はまだない。

【国際会議などの予稿集、proceeding】

研究スタート初年度であるため、出版実績はまだない。

【国際会議、学会などでの口頭発表】

なし

【その他】

なし