

課題名 (タイトル) :

3次元一般相対論的磁気流体計算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

宇宙ジェットは生まれかけの原始星や、銀河中心の超巨大ブラックホールなど様々なスケールの天体から噴出しているのが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重力エネルギーが解放されその一部が外向きの流れ、すなわちアウトフローの運動エネルギ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、銀河中心の超巨大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、どのように相対論的速度まで加速するのかという問題も未解決である。

一方、相対論的ジェットはブレイザーに見られるようなガンマ線を放射する高エネルギー天体現象でもあり、更には最高エネルギー宇宙線 ($E \sim 10^{20} \text{eV}$) の加速候補天体でもある (Ebisuzaki & Tajima (2014))。ジェットのエンジンの活動性を調べることによってこれらの現象にも迫れると考えられる。

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。特に回転するブラックホールとイベントホライズンを付き刺す磁場の相互作用によって磁力線に沿って外向きに伝搬する電磁波が生じるという Blandford-Znajek (BZ) プロセス (Blandford & Znajek 1977) がある。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が、解析的に議論できるのは定常、軸対称、ブラックホールスピンの無限小回転と限られた場合に限られる。

降着円盤は時間的に準周期的状態であると考えられ、一般に非定常であり、それに伴うブラックホールへの

降着流も非定常であるため、数値シミュレーションによる解析が必要となる。降着円盤が非定常である理由の一つに、磁場の増幅、飽和、エネルギー解放があげられる。回転速度が半径に依存するような差動回転系である降着円盤内部では、降着円盤の回転によって縦方向の磁場を回転方向への引き伸ばすことによって磁場が増大する。また、差動回転系での磁気回転性不安定性によっても磁場が増幅する。増幅される磁場はある程度の値になると飽和し、散逸によって磁気エネルギーは再び熱や運動エネルギーへと変換される。降着円盤内部ではこの繰り返し起きるため非定常である。散逸プロセスは磁気再結合などが考えられるがその物理はよく分かっておらず、確保できるグリッドサイズよりも数桁以上小さい領域で起きている現象と考えられ、シミュレーションでは基礎式としては理想磁気流体方程式を解き、数値粘性によって散逸をさせるのが現状である。数値散逸は解像度依存性があるため、解像度による結果の依存性を調べるという課題は残る。円盤内部で増幅された磁場の一部は降着流と共にブラックホール近傍に達し、先にあげた BZ プロセスが働くと考えられる。

相対論的ジェット形成には降着円盤内部での磁場増幅、降着率とブラックホール近傍の一般相対論的效果による部分の両者を統一的に扱うことが重要であり、グローバルな一般相対論的磁気流体シミュレーションという手法が重要な役割を果たすチャレンジングなテーマである。本課題では 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調べるものである。特に今年度は系が軸対称性を保つような場合、及びより現実的である軸対称性を保たない 3 次元的な振る舞いをする場合に関して結果の比較を行った。

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方程式を空間 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と考えられる。

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 $[1.4 < r < 3000]$, $[0 < \theta < \pi]$, $[0 < \phi < 2\pi]$ 、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 (図 1)。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。幾何学的に熱い円盤解であり、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 ($|a| < 1$)。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り、高効率の BZ 効果によって強いジェットが期待できる。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。この磁場によって系は非平衡状態となり、系は新しい状態へ向かって時間発展する。カー時空はブラックホールスピン軸に対して回転対称であるため、このままでは系は軸対称を保ったまま時間発展をする。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。本研究では前者を軸対称モデル。熱圧に擾乱を与える後者を非軸対称モデルと呼ぶことにし、両者を比較することによって非軸対称モードが与える影響を調べる。

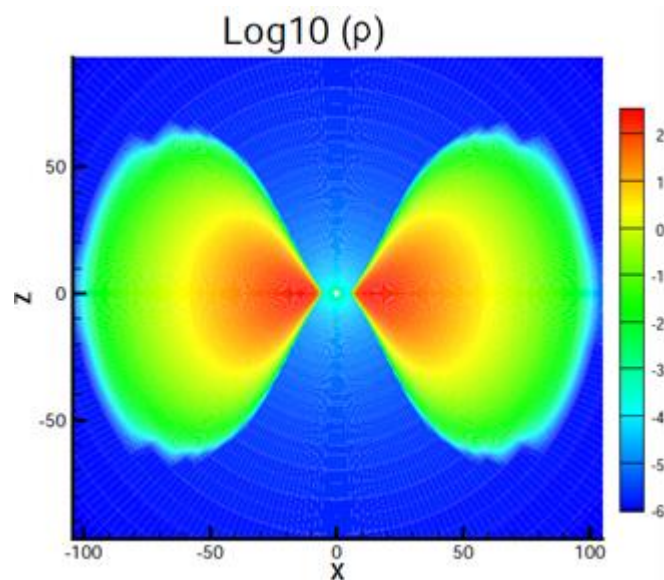


図 1 初期条件の極軸を含む面での密度分布図

3. 結果

降着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。電磁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 2 である。軸対称モデル、非軸対称モデル共に初期に電磁場が同じように成長し、極大を迎える。

電磁エネルギーはそのゆるやかに下がるが再び早い増幅をする。極大での電磁エネルギーの値は変動するが早い増幅、ゆるやかな減衰を繰り返す。t ~ 20000 程度までは初期条件から新しい状態への過渡期と考えられ、激しい時間変動を見せるが、その後も電磁エネルギーの増幅、飽和、散逸による熱エネルギー、運動エネルギーへの変換が繰り返しおこっているのが分かる。電磁場のエネルギーは両モデルともオーダーで同程度となっている。

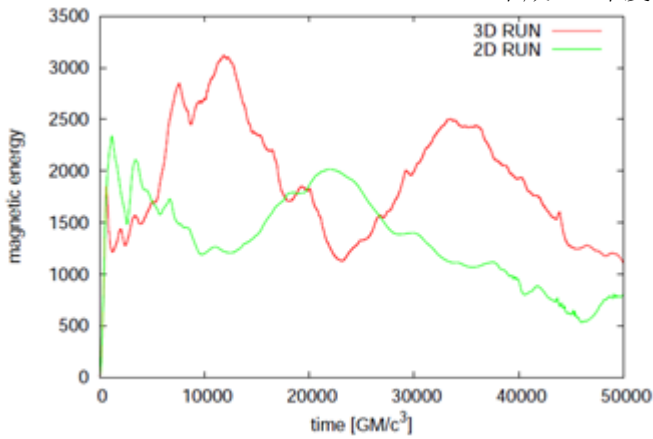


図 2 電磁エネルギー密度の空間積分の時間進化。初期($t \leq 1000$)には降着円盤の差動回転によって回転方向の磁場が生成され、飽和し、散逸によって減少する。再び、磁場の増幅が効き、飽和、散逸による減少を繰り返す。

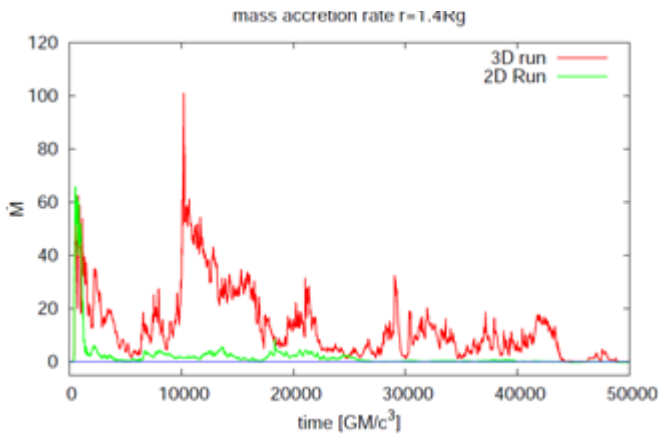


図 3 イベントホライズンでの質量降着率。急激な上昇と、ゆるやかな減少を繰り返す。電磁エネルギーの増減と呼応するが、より短時間の時間変動を示す。状態が落ち着いた後半の時刻では軸対称モデルでは質量降着率が非軸対称モデルに比べ 1/10-1/100 程度となる。

初期条件ではケプラー回転に近い運動をしておりこのままでは降着がおきない。円盤のガス同士で角運動量をやりとりし、角運動量を失ったものがより内側へと落ち込んでいける。磁場の増幅は降着円盤内部での降着に必要な角運動量輸送などを引き起こす。差動回転によるポロイダル磁場を回転方向に引き伸ばすことよっての磁場増幅では回転の運動エネルギーが電磁エネルギーに変換される。また、磁気回転性不安定性でも角運動量輸送が起き、質量降着がおきる。図 3 はイベントホライズンでの質量降着率の時間発展を示したものである。質量降着率は初期に大きく増加し、磁気

エネルギーの時間進化と同様、最大値を迎えた後ゆるやかに減少する。最大を迎える時間は先にあげた電磁エネルギーの増幅とよく一致する。磁場の増幅に伴って、降着円盤内部で高効率の質量降着が実現されている。しかし、電磁エネルギーの増幅と異なり軸対称モデルは $t=20000$ 以降、質量降着率が数桁減少した状態が続き、オーダーで両モデルとも同程度であった電磁エネルギーとは大きく異なる。

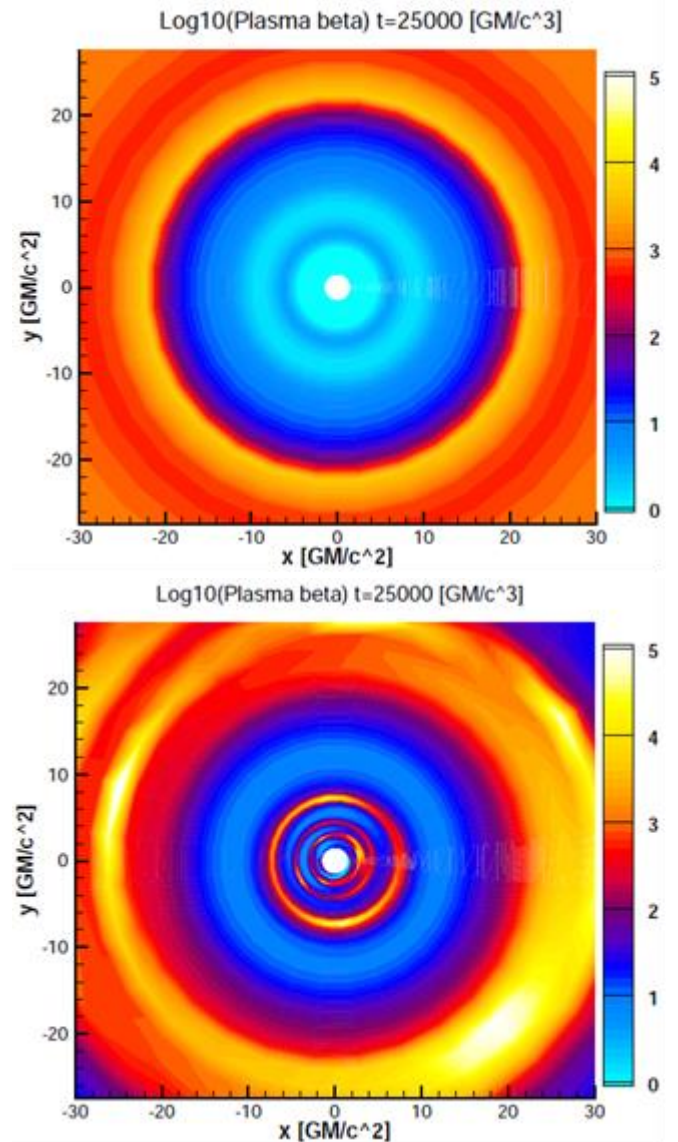


図 4 赤道面上でのプラズマベータ値(熱圧/磁気圧)。軸対称モデル(上)、非軸対称モデル(下)。共に $t=25000$ 。プラズマベータ値はブラックホール近傍で 1 のオーダーにまでなる。非軸対称モデルではバーモードが現れ、非軸対称性が発達しているのが見られる。

図 4 は赤道面でのプラズマベータ値(熱圧/磁気圧)を各モデルで示したものである ($t=25000$)。磁気エネルギーの増幅に伴い、中心付近では磁気エネルギーが熱エネルギーと同程度までとなりプラズマベータ値が 1 のオーダーとなっている。非軸対称モデルでは中心付近

でバーモードが現れ、非軸対称モードが励起されているのが見える。極軸を含む面でのプラズマベータ値、磁気圧を示した図 5 では非軸対称モデルでは降着円盤内部に層状の構造が見られ、降着円盤内部ではダイナモの起因する乱流的な状態になっている。一方軸対称モデルではそれが弱まっており、非軸対称モデルと同程度の磁場増幅が見られるが、質量降着が励起されていない原因となっている。系が非軸対称となるのはより自然であり 3 次元計算がこの問題をより現実的に考える上で重要であることを示している。

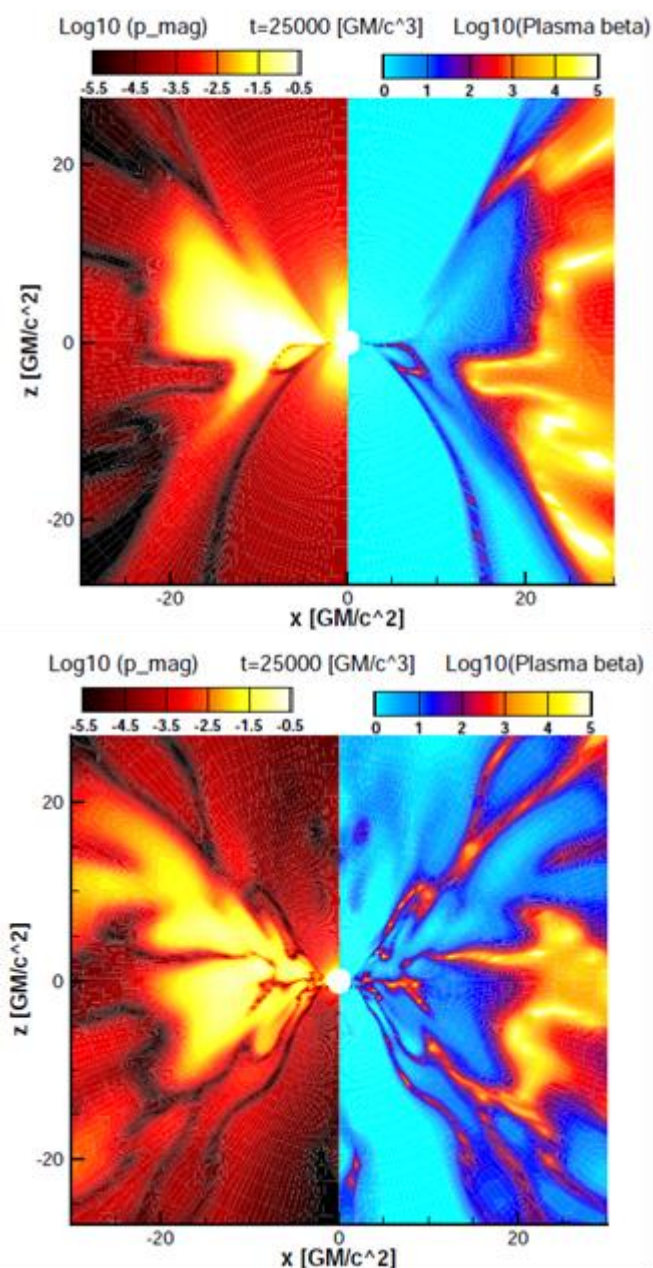


図 5 極軸を含む面でのプラズマベータ値(右)、磁気圧(左)。軸対称モデル(上)では降着円盤内部は構造があまりないが、非軸対称モデル(下)では乱流的な構造を示す。

図 6 はイベントホライズンで評価した電磁エネルギーパワーの時間進化である。両モデルともに外向きの電磁エネルギー流束が生じる時間があり、BZ 機構と同様のメカニズムと考えられる。軸対称モデルでは準周期的な時間変動が見られ、その周期は最内縁安定軌道に対する回転軌道程度である。最内縁安定軌道はブラックホールの周りで安定軌道を与える半径の最小値であり、降着円盤の内側の半径に相当する。

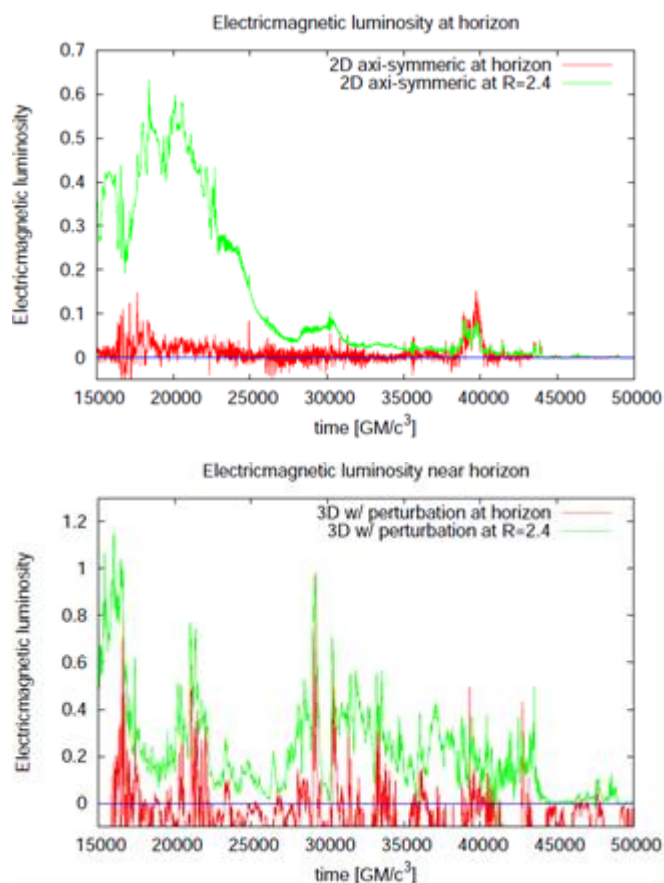


図 6 イベントホライズン付近での半径一定面で面積分した電磁エネルギーパワー軸対称モデル(上)、非軸対称モデル(下)。

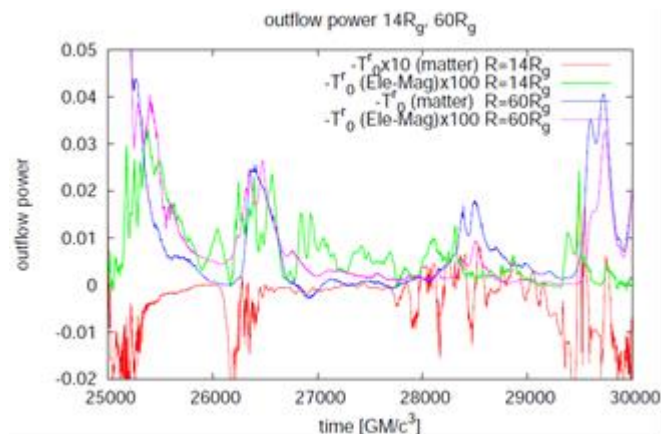


図 7 半径一定面の極付近($0 < \theta < 10$)の物質と電磁エネルギーパワーの時間進化。

一方で非軸対称モデルではその時間変動はややならされる傾向にある一方で激しいフレアのような時間変動を示す。これは中心付近で降着円盤に見られる非軸対称モードに起因するものである。このような大振幅の時間変動はブレーザーに見られるようなガンマ線フレアの起源になり得る。また、このフレアは極軸周りに見られるジェット状のアウトフローにも伝播する。図 7 は半径一定面の極付近($0 < \theta < 10$)の物質と電磁エネルギーパワーの時間進化を示したものである。BZ 機構で駆動された電磁エネルギーの時間変動に呼応した成分も見られ、大振幅のアルフヴェン波モードによる粒子加速理論へ応用できる可能性がある。

4. まとめと今後の課題

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と降着円盤からの系から収束したアウトフロー形成の物理を調べた。降着円盤内部では初期に与えた磁場が回転による巻き込みなどで増幅し、その後飽和、散逸の過程を繰り返し、非定常な状態が実現された。それに呼応するようにブラックホールへの質量降着が起きる。軸対称モデルでは円盤内部の乱流の成長が抑制され、質量降着率は弱まるが非軸対称モデルでは高効率の質量膠着が起きる。BZ プロセスで予言されたような外向きの電磁流束がイベントホライズンでは見られ、アウトフロー中にも伝わっているのが見られた。

今回の計算ではブラックホールのスピンの 0.9 の場合のみを比較したが、スピンパラメータ依存性を調べることは重要である。また、降着円盤内部での磁場の増幅、散逸などは解像度に大きく影響すると考えられるため、より高解像度計算による解像度依存性の研究も重要である。

平成 27 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】

“3D GRMHD simulations of jet formation from accretion disk”, 降着円盤大研究会 2015, 京都大学、2015. 6. 21

“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, 甲南大学、2015. 9. 10

“3D GRMHD simulations of jet launch from BH and accretion disk”, HEAP2015, 高エネルギー加速器研究機構、2015. 10. 6

“3D GRMHD simulations of jets from black hole and accretion disk”, Symposium on Quarks to Universe in Computational Science (QUCS 2015), 奈良春日野国際フォーラム、2015, 11. 5

“3D-GRMHD シミュレーションによるブラックホール降着円盤からのジェット形成 “高エネルギー宇宙物理学研究会 2015、高エネルギー宇宙物理学研究会 2015、西伊豆・戸田温泉 味わいの宿 ときわや、2015. 11. 26

“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、東京大学宇宙線研 2016. 1. 14