

三次元一般相対論的磁気流体シミュレーションによる

ガンマ線バースト中心エンジンの研究

長滝 重博 (京都大学基礎物理学研究所)

利用カテゴリ XT4A・SX9A

近年の観測によりガンマ線バーストの一部は超新星起源であることが報告されており、しかもその超新星は通常の超新星爆発理論では説明できない、爆発エネルギーが 10^{52} erg にも達する特異な超新星 (極超新星) である場合が多いことが明らかになっている。そこで新しいエンジンが必要となる訳だが、MacFadyen and Woosley (1999) はコラプサーモデルを提唱し、回転しながらブラックホールに落ち込む降着円盤から放射されるニュートリノが回転軸付近で効率良く対消滅することによってガンマ線バースト並びに極超新星が実現されると指摘した。しかしながら、彼らは Weak Interactions を数値計算の中に取りこんでいる訳ではなく、実際には内部エネルギーを計算領域の中心部分に注入してジェットを形成させている。また、それとは独立に、回転する親星が磁場を持っていたとすると、磁場の効果によりジェットが形成されるという指摘もある。

そこで私は一般相対論的磁気流体コードの開発を開始し、より現実的なコラプサーモデルの数値シミュレーションを行った。マイクロ物理を殆んど入れない形ではあるものの、現実的な親星モデルを初期条件としたコラプサーダイナミクスを数値シミュレートした。その結果、親星の中心部分でジェットが形成され、しかもジェット中の磁気エネルギーは静止質量エネルギーを十分に超えていることが確認された。この結果は、このジェットが伝搬していくと、ガンマ線バーストで要求されているところの、バルクローレンツ因子の非常に大きなジェットとなる可能性があることを意味している。又、ジェットの動力として、ブラックホールの回転エネルギーを引き抜く Blandford-Znajek 効果が一助となっていることを確認することが出来た (S. Nagataki ApJ 2009)。

2010年度に於いては特にコラプサーモデルのシミュレーションを、異なる回転速度を持つブラックホール、すなわち $a=0, 0.5, 0.9, 0.95$ について行った。ブラックホールの回転速度以外は全く同じ条件で計算を行ったのだが、シミュレーションの結果は全く異なっていた。ブラックホールが回転していない場合 ($a=0$) ではジェットが形成されないのに対して、回転速度を上げていくにつれてより強力なジェットが形成されることが示さ

れた。これはブラックホールの回転がジェット形成にとって本質的であることを明確にしめしている(図1)。また形成されたジェットのエネルギーは、解析解として求められるBlandford-Znajek解でよく説明されることが示された。この成果は論文としてまとめられ、現在Publications of Astronomical Society of Japanに投稿中である (S. Nagataki PASJ 2010)。

またコードの3次元化、MPI化、およびチューニングを2010年度に行い、並列化率90%を超える3次元一般相対論的磁気流体コードを完成した。テスト計算なども行い、クラブサー計算に適用可能なコードに仕上がっていることも確認した(図2)。

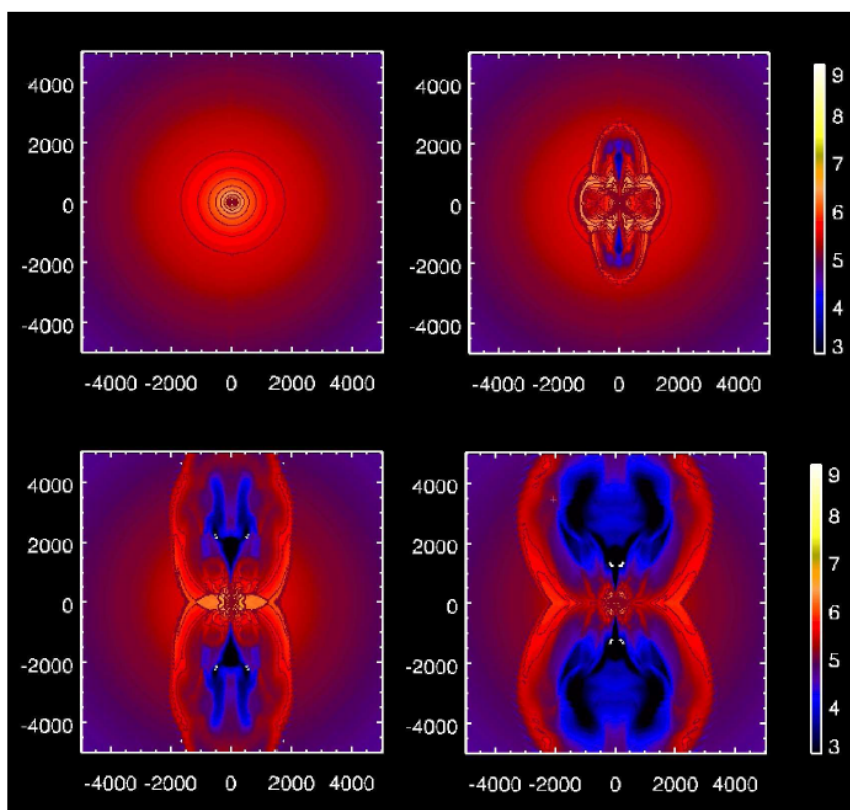


図1 異なるカーパラメータに対するクラブサーシミュレーション例。左上が無回転ブラックホール例。右上、左下、右下がカーパラメータ0.5, 0.9, 0.95に対応する。ブラックホールの回転速度を上げれば上げる程、強いジェットがドライブされていることが見てとれる。特に無回転ブラックホールではジェットがドライブされていない。このことからこれらのジェットが回転しているブラックホールによってドライブされていることが明らかにされた (S.Nagataki PASJ, submitted 2010)。カラーは密度(g/cc)をログスケールで表している。

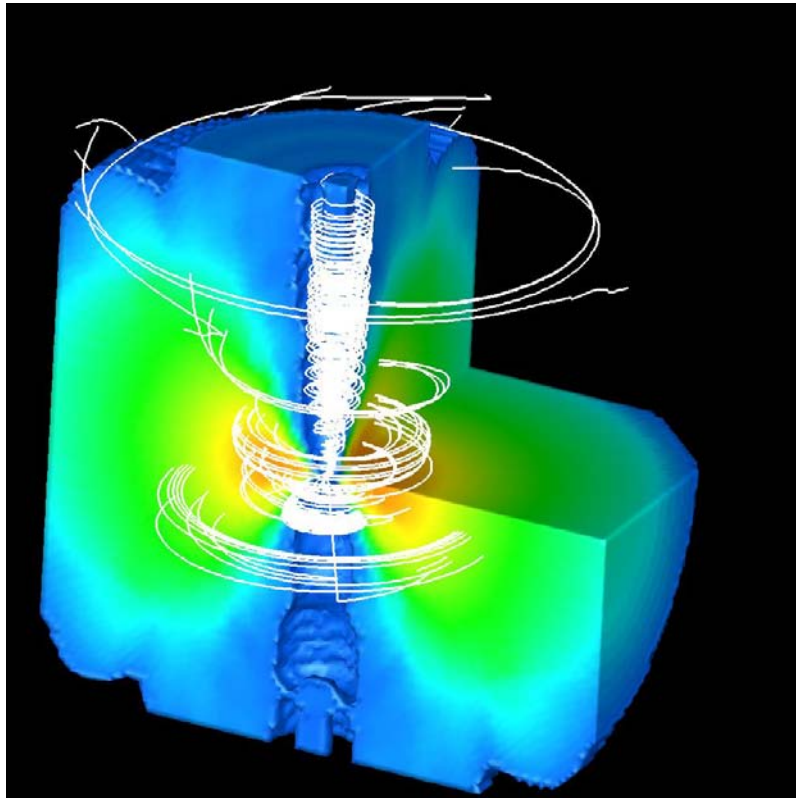


図2 3次元一般相対論的磁気流体計算の例。回転しているブラックホールの周囲にFishbone-Moncrief解で記述されるトーラスを置いている。この解は磁場がなければ定常かつ安定な解であるが、初期に弱い磁場を置き、その時間発展とともにトーラス中の角運動量が外部に輸送され、質量降着が起こると共にBlandford-Znajek効果によってジェットがドライブされている。カラーは密度分布、白線は磁力線を示す。

参考文献

S. Nagataki *Astrophysical Journal*, 704 (2009) 937-950.

S. Nagataki *Publications of the Astronomical Society of Japan*, submitted (arXiv:1010.4964).