

コラプサーモデルによる一般相対論的磁気流体力学シミュレーション

水野陽介

〈NASA/Marshall Space Flight Center, National Space Science and Technology Center, 320 Sparkman Drive, XD12, Huntsville, AL 35805, U.S.A.〉

e-mail: yosuke.mizuno@nsstc.nasa.gov

ガンマ線バーストの中心エンジンとして、中心に回転ブラックホールを含むコラプサーモデルの一般相対論的磁気流体シミュレーションを行いました。その結果、円盤状の構造と中心付近から光速の30%程度の速度をもつジェット状の噴出が形成されることが示されました。形成されたジェットはガンマ線バーストのモデルとしては遅すぎますが、極超新星爆発 SN 2002ap で見つかったジェットをよく説明することができることが分かりました。

1. ガンマ線バーストとは？—分かり始めてきた中心エンジン—

ガンマ線バーストは数秒から数分間で爆発的にガンマ線を放出する突発現象です。もしこのガンマ線が等方的に放射されているとすると、その全エネルギーは 10^{54} erg (星が超新星爆発をしたときのエネルギーの100倍程度)にもなります。その爆発時の明るさからガンマ線バーストは宇宙の始まりを探る手がかりとしても注目をされています。しかしガンマ線バーストの発見から30年以上経ち、多くの観測があるにもかかわらず、何がガンマ線バーストを起こしているのか、まだよく分かっていません。ただ、ここ数年の観測および理論的研究によってようやく何がガンマ線バーストを起こしているのか分かり始めてきました。

今までの観測および理論的な研究から、ガンマ線バーストは、コンパクトな中心エンジンから放出される相対論的速度(ローレンツ因子にして100以上)まで加速されたジェットであると考えられています。ガンマ線バーストがジェットであるとする、そのエネルギーは 10^{51} erg 程度にな

り、超新星爆発のエネルギーをジェット状に集中させれば説明することができます。また近年、ガンマ線バーストと超新星爆発が同時に同じ方向から観測されガンマ線バーストの発生起源を探る上で重要な証拠として大きな話題となりました^{1),2)}。また、これ以外にも間接的にガンマ線バーストと超新星爆発の関連性を示す観測結果があり、現在では少なくともガンマ線バーストの一部は超新星爆発起源であると考えられています。

2. コラプサーとは？

超新星爆発は球対称な爆発です。しかし、超新星爆発からガンマ線バーストを作ろうとするならば、ジェット状の爆発を作らないといけません。そのようなジェット状の爆発を作る超新星爆発のモデルとして考えられているのが、Woosley (1993) によって提唱されたコラプサーモデルです³⁾。このモデルでは、重たい星(30太陽質量以上の大質量星)が十分速い速度で回転しているため、その星が重力崩壊を起こしたときに、中心には太陽質量程度のブラックホール、そしてその周りを回るガス円盤が形成されると考えられていま

す。ブラックホール-降着円盤構造は宇宙ジェット
の形成において普遍的な描像であり、コラプ
サーモデルにおいてもこの構造を通してジェット
を形成すると考えられています。

コラプサーモデルによる相対論的ジェットの形
成、加速機構にはニュートリノ対消滅によるエネ
ルギー注入と磁気流体力学的なプロセスによるも
のの二つの説が考えられています。今まで行われ
てきたコラプサーモデルのシミュレーションでは、
ニュートリノによるエネルギー注入を解析的
に求め、シミュレーションの境界より注入し、
ジェットの形成を示しました。そのため、このシ
ミュレーションではジェットの形成に関して自己
完結的に示していないのです^{4),5)}。そこで、筆者
らはニュートリノによるエネルギー注入の代わり
に磁気流体的なプロセスに主眼を置き、2次元の
一般相対論的磁気流体力学シミュレーションを行
いました。「コラプサーモデルにおいて磁気流体
力学のプロセスによって相対論的ジェットが形成
されるのか」を明らかにすることが本研究の目的

です。

3. 数値計算のモデル

数値計算の計算モデルとして大質量星が重力崩
壊して、中心にブラックホールができた状態を初
期条件として考えます。中心のブラックホールは
質量と角運動量をもつカーブラックホールを考え
ます（角運動量をもたないものはシュバルツシル
トブラックホールになります）。このとき、ブラッ
クホールの進化は無視します（時空の変化はなし）。
重力崩壊後の星の密度、圧力、放射方向の速度
分布は **Bruenn (1992)** によって行われた1次
元の重力崩壊のシミュレーションデータを用いま
す⁶⁾。そして、星の回転の効果として、剛体回転に
近い回転分布、そして磁場の効果として一様垂直
磁場 (**Wald 解**) を加えます (図 1a)。数値計算に
は球座標を用い、一般相対論的磁気流体力学方
程式は **Simplified TVD 法** と呼ばれる計算方法
を用いて、差分化して物理量の時間発展を追いま
した^{*1}。この計算では、状態方程式としてポリト

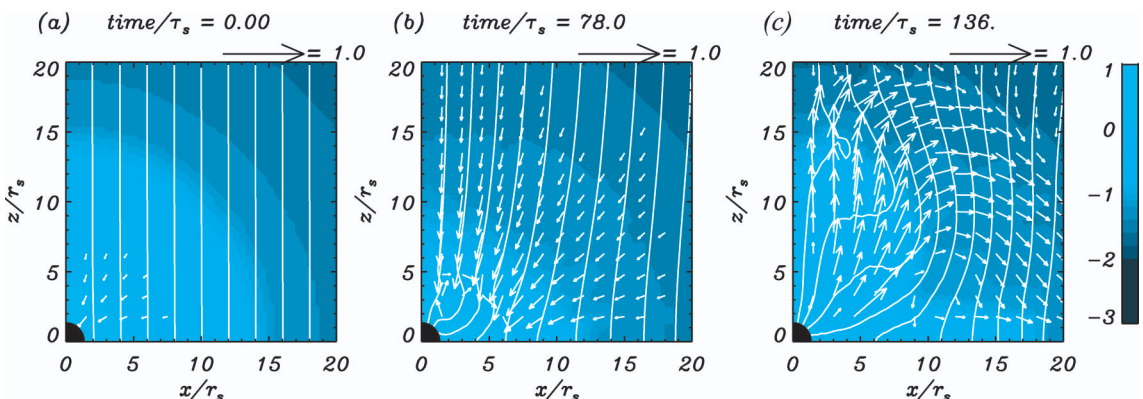


図1 シミュレーションの時間発展の様子を示しています。青い等値面は対数表示した密度分布です。(a) 初期密度分布と磁力線分布 (白線)、速度ベクトル (矢印) を示しています。(b), (c) はそれぞれ計算単位時間で $\tau_s = 78.0, 136.0$ の時刻でのシミュレーションの様子となります。中心付近よりジェット状の噴出が形成されていることが分かります。

*1 この計算では、ガス密度 ρ_0 、磁場強度 B_0 、シュバルツシルト半径 r_s 、光速 c (秒速 30 万 km) で規格化した物理量を用いています。中心のブラックホールの質量が 3 太陽質量であるとすると、 r_s は約 8×10^5 cm になります。さらに、ガス密度を $\rho_0 = 10^{10}$ g cm⁻³ と仮定すると、磁場強度は $B_0 = 3 \times 10^{14}$ G に相当します。また、計算単位時間はシュバルツシルト半径を光速で割った値 $\tau_s = r_s/c$ で規格化しています。

ロープを用いています ($\gamma=5/3$). また, ニュートリノ冷却などのマイクロ物理の効果は考慮していません⁷⁾.

4. 相対論的ジェット形成

図1はブラックホールの回転 ($a=0.999$) と星(プラズマガス)の回転が同じ向き(共回転)の場合

での時間発展の様子を表しています. ここで, a はブラックホールの回転パラメーターと呼ばれ, $a=0$ のとき, ブラックホールの回転はなく, $a=1$ のとき, ブラックホールは最大回転していることを示しています. 最初, プラズマガスはブラックホールの重力に引かれて回りながら落ち込んでいきます. そのとき, 磁場と回転の効果によって落ち込みに非対称性ができ, ブラックホールの周りに円盤状の構造を形成します. その後, 中心付近より衝撃波が, そしてその後面にはジェット状の噴出が作られ, 上方に伝播していく様子が見られます.

磁場はプラズマガスの運動に対して凍結している(プラズマガスと磁場は一緒に動く)ので, プラズマガスの回転によって, 引きずられ, ねじられていきます. また, ブラックホールの回転による時空のひきずり効果によってもねじられます. この二つの効果によって, 磁場は特に中心付近で強くねじられます. その後, 磁場のねじれは衝撃波やジェット状の噴出とともに上方へ伝播していきます(図2). また, この図から, ジェットの内側ではプラズマベータ(ガス圧と磁気圧の比)が低くなっていることがわかります. このことからこのシミュレーションで見られるジェット状の噴出は磁場によって作られ, 加速されていることがわかります.

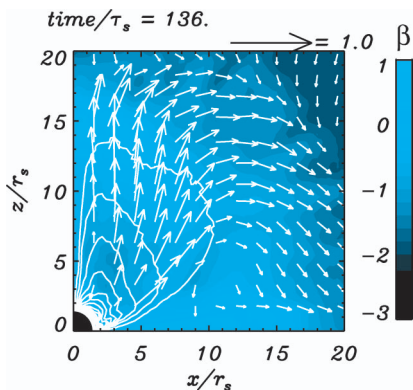


図2 カラーは計算単位時間で $\tau_s=136.0$ の時刻でのプラズマベータ(ガス圧と磁気圧の比)分布を示しています. 白線は磁場の回転角成分の等値面を表しています. 矢印は速度ベクトルです. グラフ外の右上に速度1.0(=光速)に対応するベクトルの長さを示しています. 磁場の回転角成分は磁場がねじられることによって作られます. そのねじれがジェットとともに上方に伝わっていることがわかります.

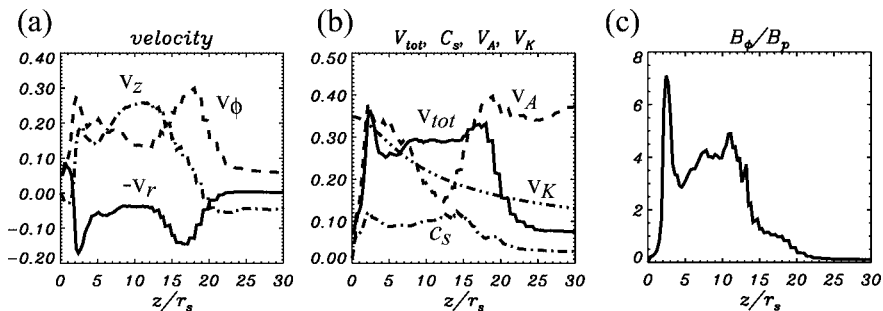


図3 計算単位時間で $\tau_s=136.0$ の時刻での回転軸に沿ったジェットの物理量 ($x/r_s=5$) のグラフです. (a) ジェットの速度の各空間成分のグラフです. (b) 速度の比較を表したグラフです. V_{tot} はジェットの速度, V_A はアルフヴェン速度, V_K はケプラー速度, C_s は音速です. (c) 磁場の回転角成分と鉛直成分の比を表しています. これは磁場がどれだけねじれているかを表しています.

ジェットがどのような構造になっているかを見るために回転軸に沿った物理量の分布を見てみます(図3)。まず、速度分布(図3a)からジェットの速度は光速の30%程度をもつ準相対論的な速度であり、鉛直方向の速度が卓越していることが分かります。また、図3bから、ジェットの速度は超音速であり、ケプラー速度(ここでは、カーブブラックホール周りを回る粒子の速度)よりも優位に大きいことが分かります。これは、ジェットがブラックホールの重力を振り切って、星の内部から飛び出していくだけの十分な速度をもっていることを意味しています。図3cでは、磁場のねじれ具合を表す指標としてポロイダル方向(鉛直方向)の磁場と回転角方向の磁場の比を使っています。この比からジェットの内部では磁場が強くなじられた構造をしていることが分かります。磁場のねじれが強いと磁気圧も高くなります。高い磁気圧は落ち込んでくるプラズマガスを磁場に沿って回転させるよりも、ジェットとして押し上げる力として働きます。そのため、ジェットの速度は鉛直成分が卓越しているのです。

5. ブラックホールの回転への依存性

次にブラックホールの回転によるジェットの速度への依存性を見てみましょう。図4ではブラックホールの回転速度の違いによるジェットの速度

とジェット中の磁場のねじれの依存性をグラフで表しています。このグラフからブラックホールの回転が速くなると、ジェットの鉛直方向の速度とジェット中の磁場のねじれは大きくなり、一方、ジェットの回転角方向の速度は小さくなっていくことが分かります。この結果は、ブラックホールの回転によって起こる時空の引きずり効果がどれくらい効いているのかという観点から理解することができます。ブラックホールの回転が速いと、磁場をねじることで貯められた磁気エネルギーはアルフヴェン波として伝播するよりもむしろ、ジェットの運動エネルギーとして直接変換されます。その結果、ジェットの鉛直方向の速度とジェット中の磁場のねじれは大きくなるのです。

また、ジェットのエネルギー流束という観点からもブラックホールの回転の効果を見ることができます。図5では回転のないブラックホールの場合($a=0.0$)と高速で回転しているブラックホールの場合($a=0.999$)それぞれでの、ジェットの運動エネルギー流束と磁気エネルギー流束(ポインティングフラックス)の時間発展をグラフで表しています。回転のないブラックホールの場合、磁気エネルギー流束が運動エネルギー流束より1桁程度大きい値になっています。これは磁場によって多くのエネルギーが運ばれていることを意味しています。一方、高速で回転しているブラッ

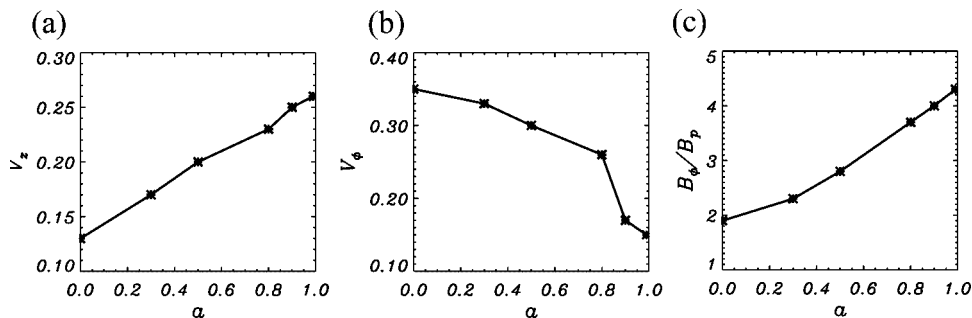


図4 ジェットのブラックホールの回転への依存性を示したグラフです。それぞれ、ブラックホールの回転に対する (a) ジェットの速度の鉛直成分, (b) ジェットの速度の回転角成分, (c) ジェット中の磁場のねじれ (B_ϕ/B_p) のグラフです。

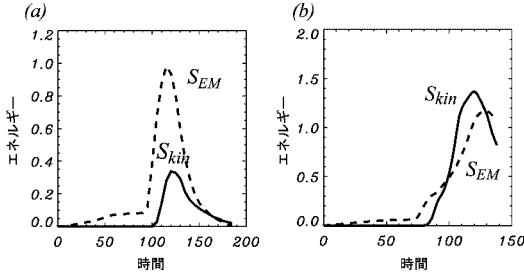


図5 (a) ブラックホールの回転がない場合 ($a=0.0$), (b) ブラックホールが高速で回転している場合 ($a=0.999$) での $z/r_S=12$ の断面を通り抜ける運動エネルギー流束 (S_{kin}) と磁気エネルギー流束 (S_{EM}) の時間発展のグラフです。

クホールの場合、運動エネルギー流束は磁気エネルギー流束と同程度の大きさであることが分かります。これは、回転しているブラックホールの時空の引きずり効果によって、磁場が強くねじられ、より多くのエネルギーがジェットに運動エネルギーとして転換されていることを意味しています。

6. ガンマ線バーストへの適用

ここまで、シミュレーションの結果について説明してきましたが、最後にガンマ線バーストのモデルとしての妥当性について議論したいと思います。本研究のシミュレーションでは規格化された物理量を用いているのですが、ジェットの密度を $10^{10} \text{ g cm}^{-3}$ 程度であると仮定すると、シミュレーションで発生したジェットの運動エネルギーは 10^{51} erg 程度となります。もちろん、若干大きく見積もったうえでの値ですが、ガンマ線バーストのもつ典型的なエネルギーとほぼ同程度のエネルギーをジェットが持っていることとなります。しかしながら、ジェットの速度はせいぜい光速の30%程度であり、ガンマ線バーストのジェットとしては遅すぎます。そのため、ガンマ線バーストのジェットを作るためには他の加速メカニズムを考える必要があると思います。

一方で、本研究で形成されたジェットはガンマ線バーストのモデルの一つであるバリオンリッチアウトフローとよく合っています⁸⁾。バリオンリッチアウトフローはバリオンを多く含むジェットのことで、速度が準相対論的速度までしか加速されず、ガンマ線バーストになり損ねたジェットのことで、このモデルは、ガンマ線バーストを良く説明できる「火の玉モデル⁹⁾」の派生として考えられているものなのですが、実際にその候補が観測されています。それは、2002年に発生した、極超新星爆発（ハイパーノバ）である SN 2002ap です。この極超新星爆発 2002ap は、ガンマ線バーストとは関連していなかったのですが、偏光観測からジェットではないかと思われています¹⁰⁾。しかも、そのジェットは $5 \times 10^{50} \text{ erg}$ 程度のエネルギーをもち、速度が光速の23%であると見積もられています¹¹⁾。この値は、本研究で形成されたジェットでうまく説明することができます。

7. 最後 に

本研究では残念ながらガンマ線バーストのジェットを説明するだけのものをシミュレーションによって再現することはできませんでした。しかし、磁場はジェット状の噴出を作ることにおいては非常に有効なものです。今後は、今まで無視してきた物理効果を取り入れ、より現実的なモデルを用いてガンマ線バーストジェット形成の可能性を調べていきたいと思っています。

HETE-II 衛星によって検出された GRB 030329 は超新星爆発 SN 2003dh に付随していることが発見され、ガンマ線バーストの中心エンジンへの理解が急速に発展しました。今までガンマ線バーストのために打ち上げられた衛星たちは常にわれわれにガンマ線バーストに対する新しい知見をもたらし、その理解を急激に進めてきました。昨年、新たに Swift 衛星が打ち上げられ、順調なスタートを切っています。果たして Swift 衛星はガンマ

線バーストの研究に対して何をもたらしてくれるのでしょうか？ガンマ線バーストの中心エンジンへの理解を進める新しい発見をもたらしてくれることを期待しています。

謝 辞

この研究は、筆者がまとめた博士論文の一部をもとに作成したものです。指導教官である柴田一成教授（京都大学）には多大なご指導をいただきました。また、小出眞路助教授（富山大学）、山田章一助教授（早稲田大学）、戸谷友則助教授（京都大学）をはじめ、京都大学宇宙物理学教室の方々ほか、多くの方々にご助力、ご助言をいただきました。この場を借りて御礼申し上げます。本研究を遂行するにあたり、京都大学21世紀COEプログラム「物理学の多様性と普遍性の探求拠点」から援助を受けています。また、本研究で行った数値計算は国立天文台データ解析センター共同利用VPP5000と京都大学基礎物理学研究所共同利用Alpha Server ES40で行っています。

参 考 文 献

- 1) 植村 誠, VSNET Collaboration チーム, 2004, 天文月報 97, 169
- 2) 川端弘治, すばる超新星ToO観測チーム, すばるGRB ToO観測チーム, 2004, 天文月報 97, 176
- 3) Woosley S. E., 1993, ApJ 405, 273
- 4) MacFadyen A. I., Woosley S. E., 1999, ApJ 524, 262
- 5) MacFadyen A. I., Woosley S. E., Heger A., 2001, ApJ 550, 410
- 6) Bruenn S. W., 1992, in Neuclear Physics in the Uni-

- verse, ed. Guidry M. W., Strayer M. R. (Philadelphia, Institute of Physics Pub.) p. 31
- 7) Mizuno Y., Yamada S., Koide S., Shibata K., 2004, ApJ 615, 389
- 8) Woosley S. E., Zhang W., Heger A., 2003, in From Twilight to Highlight, ed. Hillebrandt W., Leibundgut B. (New York, Springer) p. 87
- 9) 小林史歩, 2002, 天文月報 95, 84
- 10) Kawabata K. S., et al., 2002, ApJ 580, L39
- 11) Totani T., 2003, ApJ 598, 1151

Central engine of Gamma-Ray Bursts
—General Relativistic Magnetohydrodynamic Simulations of Collapsars—

Yosuke MIZUNO

NASA/Marshall Space Flight Center, National Space Science and Technology Center, 320 Sparkman Drive, XD12, Huntsville, AL 35805, U.S.A.

Abstract: We have performed general relativistic magnetohydrodynamic simulations of a collapsar including a rotating black hole as the central engine of gamma-ray bursts. The simulation results show the formation of a disk-like structure and the generation of a jet-like outflow with 30% of the light velocity. Although the jet-like outflow generated in simulations is too slow compared to the velocity inferred for the jet of gamma-ray bursts, it has comparable velocity and enough energy to explain the jet of SN 2002ap.