

課題名(タイトル):

Numerical Study of Relativistic jet launch and propagation

利用者氏名:

○水田 晃(1)

理研における所属研究室名:

(1)開拓研究本部長瀧天体ビッグバン研究室

1. 本課題の研究の背景、目的、関係する課題との関係
ガンマ線バースト(GRB)は、数秒から数十秒間にわたり、主に数百 keV のエネルギー帯域で全天でも最も明るく輝く突発的な天体現象である。観測より、ほぼ光速に近いジェット状のアウトフロー(相対論的ジェット)からの放射であると解釈されている。その後、X 線から電波にわたる多波長で残光が観測される場合があり、1 年以上にわたるものも存在する。特に、長波長帯の高い角度分解能での残光観測によって、母銀河が特定されることがあり、高赤方偏移($z \sim 6-8$)のものも確認されている(例:Kawai+2006)。これにより、GRB は宇宙論や初期宇宙の探求において重要な役割を果たしている。

バーストの継続時間が約 2 秒以上のものは長い GRB (LGRB)に分類され、コラプサーモデルに基づき、大質量星が進化の最終段階で特異な超新星爆発を起こすことで発生すると考えられている。一方、継続時間が約 2 秒未満のものは短い GRB (SGRB)に分類され、中性子星連星の合体などのコンパクト連星の合体に由来すると考えられている。LGRB については、超新星爆発を伴う GRB が観測されており(例:GRB030329/SN2003dh, Stanek+2003)。一方、SGRB に関しても、重力波 GW170817 の検出と同時に GRB170817A が観測され、中性子星連星合体が起源であることが示唆された(Abbott+2017)。

GRB の相対論的ジェットを駆動する中心エンジンの詳細な機構は未解明な部分が多いが、いずれの場合も、一時的に形成される降着円盤と中心のコンパクト星との相互作用によって相対論的ジェットが発生すると考えられている。LGRB の場合、ジェットは親星の高密度外層を貫通し、SGRB の場合は合体時に放出されたダイナミカルエジェクタ中を伝搬し、ジェットが「ブレイク」した後にガンマ線放射が生じると考えられている。ジェットはその後、希薄なガス中を拡がりながら伝搬する。密度が低下すると、ジェット内部の光は光学的に薄くなり、相対論的ブーストを受け観測者へ届く。

親星外層中のジェット伝搬では、外層の高密度の影響でバウ(先行)衝撃波が形成され、ジェットは逆行衝撃波でエネルギーを散逸する。このような環境下では、衝撃波によって圧縮されたジェットガスが横方向へ回り込み、高圧のコクーンを形成し、ジェットの収束を維持する。ジェットの伝播は強い多次元性を持ち、時間進化が重要となるため、数値流体シミュレーションによる解析が有効である。

これまで、軸対称性を仮定した 2 次元の相対論的流体シミュレーションが用いられ、GRB ジェットの伝搬に関する研究が進められてきた(Mizuta et al. 2006, 2009, 2010, 2011, 2013)。高密度媒質中でのジェットの伝搬では、コクーンによる閉じ込め効果が作用し、ジェットはわずかに横方向に膨張・収縮を繰り返す。さらに、ジェット界面が横方向に振

動することで実効的な加速度が発生し、レイリー・テイラー不安定性などの流体不安定性が成長する(Matsumoto+2013, 2019)。この不安定性の非線形成長により、ジェットの一部は先端に到達する前にコクーンに取り込まれ、結果としてジェットの伝搬効率が低下する。

本研究では、コラプサーモデルに基づき、大質量星の中心が崩壊後に熱的優勢な GRB ジェットを生成したと仮定し、その伝搬過程を 3 次元相対論的流体シミュレーションを用いて解析する。特に、親星外層を通過する際にインプリントされた構造がジェットのその後の伝搬にどのような影響を与えるかを、多様なジェットパラメータを用いて調べ、観測と比較していくことは未解明のエンジン機構の理解にもつながると期待される。

2. 具的な利用内容、計算方法

長い GRB ジェットの伝搬を考慮し、大質量星の中心コアが崩壊した後にブラックホールまたは原始中性子星と、それを取り巻く降着円盤が形成されることを、仮定し、このシステムから放出される相対論的ジェットが親星外層を貫通し、表面を突破して低密度の星周物質空間へ伝搬するまでの時間進化を数値シミュレーションによって追う。

使用する親星の密度および圧力の半径方向プロファイルは、Woosley & Heger (2006) によるモデル 16TI に基づく。このモデルの超新星爆発前の質量は約 14 太陽質量、半径は約 $4.e10\text{cm}$ である。

特殊相対論的流体力学の時間発展方程式を空間 3 次元で数値的に解く。流体力学方程式を閉じるために、比熱比を一定 ($\gamma=4/3$) とする理想気体状態方程式を用いた。さらに、シミュレーションでは Ito+2019 と同様に、球座標系を採用し、ジェット軸を赤道面にとる。計算領域を動径方向 $[R_{in}:R_{out}]$ 、極角 $\theta [\pi/4 : 3\pi/4]$ 、方位角 $\Phi [-\pi/4 : \pi/4]$ ととる。極角、方位角に関しては等間隔メッシュとする ($N_\theta = N_\Phi = 360$, $\Delta\theta = \Delta\Phi = 0.25$ 度)。動径方向は、本報告のモデルでは $R_{in}=1.e10\text{cm}$ と星の半径の約 $1/4$ とするが、より深い $1.e9\text{cm}$ からのモデルも別途計算することとする。 $R_{out}=2.e13\text{cm}$ までの伝搬の追尾を目指す。ジェットのダイナミカルレンジは動径方向に非常に長く $\Delta r \sim r \Delta\Phi$ となるようにとる。ジェット軸を赤道面上にとるため、ジェット軸回りは任意の r において、ほぼ立方体になるようにとれる。このグリッドのとり方は Ito +2019 より 1.4 倍ほど高解像度計算に相当する。ジェットの注入はガンマ線バーストの典型的な継続時間である数十秒に合わせて 40 秒とする、そのためジェットの伝搬方向の差し渡し長さは最長で $40\text{s} \times \text{光速} (3.e10 \text{ cm/s}) = 1.2.e12\text{cm}$ であり、これが時時刻刻外側に動いてく問題である。そこで、本課題では多段構造メッシュをとり、1 段目 $[R_{in}:1.6.e12\text{cm}]$ ととり、ジェット先端が 1 段目の外側境界近くまで達すると、1 段目の一部をオーバーラップ

した 2 段目にシフトし、オーバーラップした部分の物理量を remapping することで外側へと計算領域をシフトさせていく、目標の R_{out} には 3 段目の計算格子で到達する。

ジェット条件は Ito +2019 にない、計算領域にジェット注入をする $r=R_{in}$ で運動光度 ($L_0=5.0 \times 10^5$ erg/s, 初期のローレンツ因子 ($\Gamma_0=5$), ベルヌーイ定数 ($h_0 \Gamma_0=500$), 開き角 5 度のジェットを与える。速度ベクトルは各メッシュで極座標の動径方向に並行とする。

数値計算は相対論的流体方程式を有限体積法によって輻射を考慮しない 3 次元相対論的流体方程式を解くものである。計算コードには我々が開発した 3 次元相対論的流体コードを用いる。計算手法は我々が開発した 2 次元相対論的流体コード(Mizuta et al. 2006)で用いた手法をベースにしている。具体的にはゴドノフタイプの近似リーマン解法による数値流束(Marquina's flux formula / HLLC 法/ HLL 法)を採用し、高次関数(MUSCL 法)による補間で空間 2 or 3 次精度、TVD-Runge-Kutta 法によって時間積分に関しても 2 or 3 次精度化されている。どのスキーム、どの精度のバージョンを用いるかは、コード内のスイッチングパラメータでコントロールされ、今回の計算例では数値流束として HLLC 法、空間補間法は MUSCL 法 2 次精度、時間積分は 2 次精度のものを用いた。HLLC 法により今回注目したいジェットとコクーン界面の捕獲に強い計算をすることができる(Mizuta et al. in prep.)。

3. 結果

前節でも述べたが、本報告では計算が進んでいる $R_{in}=1.0 \times 10^{10}$ cm, グリッドは [$R_{in}: 1.6 \times 10^{12}$ cm] の 1 段目のグリッドの外側境界まで伝搬したところまでの結果を紹介する。

図 1 は親星中を伝搬中ジェットを赤道面(ジェット軸)を含む面でスライスしたもので、左側が質量密度、右側は相対論的ベルヌーイ保存量を示す。質量密度で右側に色がついている端が親星表面に相当する。その外側は希薄が星周辺物質をおいている。ジェットは概ねジェット軸上に沿って進んでいる様子が、質量密度、 $h\Gamma$ の図からわかる。

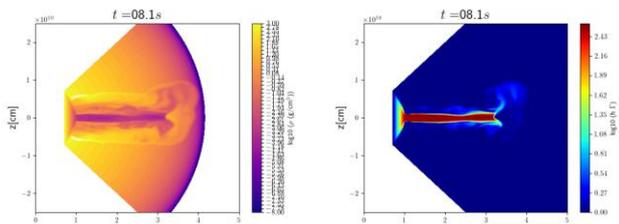


図 1. 親星表面($R=4.0 \times 10^9$ cm)を突き破る直前の時刻(8.1s)での質量密度(左)と、ベルヌーイ定数($h\Gamma$, 右)の等高図。

親星表面近くではジェットが枝分かれしえいるのが見られる。これは 2 次元軸対称の計算のときにもみられたキャップ構造で、ジェット先端付近で衝撃波圧縮されたガスが横方向に逃げるのを、ジェット末端で斜め衝撃波を通過し、弱い散逸しか受けなかったガスによってブロックされるために雪だるまのように成長している(Mizuta +2010)。ジェット末端の斜め衝撃波弱い散逸をうけ斜めに伸びるジェット成分は軸対称性が失われているのがわかる。

ジェット伝搬に伴う軸対称性が失われるのは、ジェットとコクーン界面でおきる流体不安定性の成長による。図 2 は図 1 と同じ時刻の r 一定面でのベルヌーイ保存量($h\Gamma$)を $\theta-\Phi$ 面で見ただけのものである。動径が大きくなるほどジェットとコクーンの界面(ジェットは赤い色の部分)が円からずれていくのがわかる。先端付近ではベルヌーイ保存量が高い部分が 4 つに分裂しているのがわかる。これは先程ふれたジェット先端付近の斜め衝撃で弱い散逸をうけて斜めに伸びている成分を捉えたものになっている。2 次元軸対称計算ではこの先端付近の構造がジェット軸からみるとドーナツ状になっていすが、3 次元計算ではそれらが分裂するように見える。

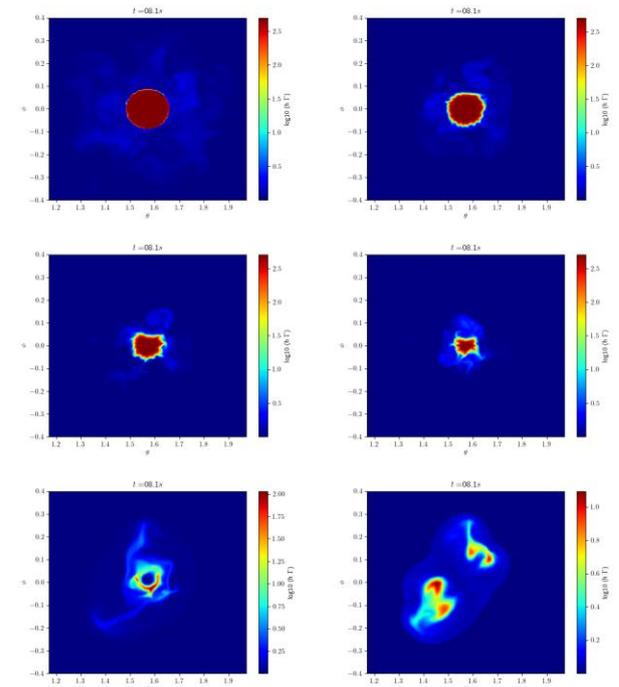


図 2 $r=1.04 \times 10^{10}$ cm (上段左), $r=1.50 \times 10^{10}$ cm (上段右), $r=1.9 \times 10^{10}$ cm (中段左), $r=2.38 \times 10^{10}$ cm (中段右), $r=3.36 \times 10^{10}$ cm (下段左), $r=3.67 \times 10^{10}$ cm (下段右) 一定面でのベルヌーイ定数の等高図を極座標の $\theta-\Phi$ 面でプロットした。外側にいくにつれジェットとコクーン界面に流体不安定が成長しているのが見られる。親星表面近く(下段の 2 枚)では、図 1 でみたようにジェット先端付近で斜め衝撃波によって弱いエネルギー散逸をうけた成分が 4 つに枝分かれているのが見える。

図 3 は第一段階目のグリッドにおいてジェット先端が計算領域の外側付近に達した時刻(53 秒)での赤道面(ジェット軸)を含む面でスライスしたもので、左側が質量密度、右側は相対論的ベルヌーイ保存量を示す。

ジェット注入は時刻 40 秒から徐々に弱められ 41 秒で打ち切られる。計算の都合状、それ以降も非常に低速の非相対論的ガスが内側境界から注入されている。

親星表面をブレイクする直前にみられたキャップ構造に伴う斜めに伸びる成分の構造はより顕著になっている。時刻 40 秒におけるジェット打ちきりによる構造もきれいにでてい

る。

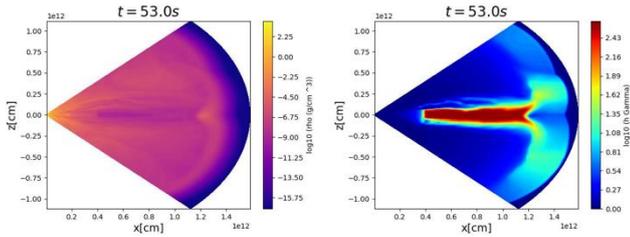


図 3. ジェットが 1 段目のグリッドの外側境界近くに達した時刻(53s)での質量密度(左)と、バルヌーイ定数($h\Gamma$, 右)の等高図。

4. まとめ

3次元相対論的流体コードを用いて、特異な超新星爆発を起源(コラプサーモデル)とするガンマ線バーストジェットの親星中の伝搬を含め、親星表面ブレイク後希薄な星周物質空間の流体シミュレーションに応用した。特に、数値流束に接触不連続面の捕獲に強い HLLC スキームの導入をしたことにより、ジェットの伝搬に対し横方向の振動によるジェット界面での流体不安定性の成長が捕獲されている。ジェットの質量密度に対し高密度となる親星外層の伝搬中では、レーリーテラー不安定性成長が観られ、非軸対称の非線形発展が見られた。

ジェットは親星表面ブレイク直前に先端付近にキャップ構造が見られた。この構造は2次元計算で顕著に見られたが、3次元ではこのキャップを避けて斜め衝撃波によって弱くエネルギー散逸を受けた成分が見られるが、大きく軸対称性が崩れている。

5. 今後の計画・展望

本報告書で紹介したモデルは、2 段目、3 段目のグリッドと外側の領域へ進め目標の $2.e13\text{cm}$ までの伝搬を行う。ジェット注入半径依存性を見るため $R_{in}=1.e9\text{cm}$ のモデルを計算する。この計算は、CFL 条件が最も厳しくなる注入口のメッシュ幅が実質 1/10 となるため計算コストの高い計算となる。ジェットの運動光度、初期のローレンツ因子に関しても変えた計算を行い、ジェット伝搬に対する依存性を議論していく。

2024 年度 利用研究成果リスト

【口頭発表】

- A. Mizuta “3D relativistic GRB jet propagation in collapsars”, Theories of Astrophysical Big Bangs 2025, Feb. 18, 2025, Saitama, Japan