

プロジェクト名(タイトル): 相対論的ジェットの形成と伝搬

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. 本プロジェクトの研究の背景、目的

ガンマ線バーストは天空で数秒程度から長いもので数千秒に渡り、主に数百 keV のガンマ線のエネルギー帯で光り、光度では全天で最も明るく輝く突発天体現象である。ガンマ線バースト(即時放射)に続き、X線から電波にわたる多波長で残光が観測されるものもある。残光は徐々に暗くなりながら数ヶ月から1年以上観測が可能な場合もある。角度分解能の高い、長波長での残光観測によって母銀河の特定が可能な場合があり、それによって遠方銀河(赤方偏移 $z \sim 6-8$ にも及ぶ)からのガンマ線バーストであったことが分かるものもある。ガンマ線バーストは観測が難しい高赤方偏移の宇宙の状態を調べることを可能とし、宇宙論への応用、初期宇宙を探る上でも重要な現象である。しかし、どのような天体がガンマ線バーストを起こすのか、その発生機構、即時放射の放射機構等の基礎的なことですら完全な理解には至っていないのが現状である。

ガンマ線バーストの起源天体に関してはいくつかの観測からヒントが得られている。バーストの継続時間が2-3秒より長い、ロングバーストに分類されるものの少なくとも一部は大質量星が進化の最期に起こす超新星爆発の中でも特異な爆発を起源とするコラプサーモデルを起源とすることが考えられ、バーストの継続時間が2-3秒より短いショートバーストに分類されるものの少なくとも一部は、連星中性子星の合体のようなコンパクト連星の合体に起因すると考えられている。前者は超新星爆発を伴うガンマ線バーストが観測され(例えば GRB030329/SN2003dh Stanek et al. (2003))、後者も長らく観測例が無かったが、連星中性子星の合体からの重力波 GW170817 において GRB170817A(Abbott et al. 2018 ApJ)が観測された。依然として爆発機構はよくわかっていないが、両者とも一時的に形成された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形成されていると考えられている。コラプサーモデルの場合、中心コアが崩壊してブラックホールあるいは原始中性子星が生まれ超新星爆発がおきようとする時に崩壊前の親星中心付近が高速回転していると角運動量保存により、一時的に降着円盤が形成可能だとされ、コンパクト連星の合体の場合にも、同様に合体により中心にブラックホールや原始中性子星が形成され、残りのガスが一時的に降着円盤を形

成することが一般相対論的流体シミュレーションからも示されている。このような状況は活動銀河核ジェットの形成で考えられる超巨大質量ブラックホールと降着円盤の系と似ており、スケールは大きく異なるが降着円盤に対して鉛直方向に相対論的ジェットが可能であると考えられる。

ガンマ線バーストをおこすジェットに共通な物理として、ジェットがガンマ線を放射するフェーズの前にジェットの密度に対して高密度媒質中の伝搬を経験する点があげられる。コラプサーの場合親星外層、コンパクト連星合体の場合、合体時に撒き散らされたダイナミカルエジェクタが高密度媒質に相当する。これらの媒質中をジェットが伝搬し、端に達するとショックブレイクアウトをし、希薄な星周物質中を伝搬しながらガンマ線が放射される。親星外層などジェット自身の密度よりも周りのガスの密度が高いような場合、ジェット伝搬に伴い、バウ(先行)衝撃波が形成され、ジェットは逆光衝撃波でエネルギーを散逸する。逆光衝撃波で衝撃波圧縮されたジェットガスは横方向に流れるが、バウ衝撃波によって圧縮されたガスに囲まれるため、すぐにジェット伝搬に対して後方へ回り込み、高圧のコクーンを形成する。この圧力閉じ込めによってジェットの収束は維持される。ジェットに対して高密度媒質中のジェット伝播は多次元性、時間進化が重要であるため、数値流体シミュレーションによる解析が威力を発揮する問題である。数値解法の進展により2000年頃からガンマ線バーストの観測で見積もられるローレンツ因子100を越える相対論的流れの多次元計算を安定に実行することが可能となり、軸対称を仮定した2次元の相対論的流体シミュレーションによるガンマ線バーストジェット伝搬の研究が申請者(Mizuta et al. 2006, 2009, 2010, 2011, 2013)をはじめいくつかのグループで行われてきた。ダイナミックだけでなく、ジェットからの放射などに対するジェットパラメータ(ジェットのパワーや初期のローレンツ因子など)依存性が調べられている。

しかし、高密度媒質中を伝搬するジェットが伝播中に高圧コクーンとのバランスで僅かに横方向に膨張、収縮を繰り返すジェット界面の横方向への振動によって界面が実効的加速度を感じることによって、レーリーテラー不安定性等の流体不安定性の成長が指摘され(Matsumoto et al. 2013, 2019)、親星中を伝播するガンマ線バーストジェットに対して

も流体不安定性が伝播するにつれ非線形段階にまで成長し、ダイナミクス自身に影響すると指摘されている(例えば Gottlieb et al. (2019))。更に、不安定性の非線形成長によって生じる小さいパッチ状の構造はガンマ線バーストの観測で見られるミリ秒のオーダーの短時間変動の説明となる可能性があり、3次元でのジェット伝搬のダイナミクスを考えるのは重要となってきた。しかし、空間3次元で少なくともジェット軸付近に十分なグリッドを確保した高解像度計算は計算コストが高く、十分なパラメータサーチや、解像度の影響が調べられていないのが現状である。本課題ではガンマ線バーストジェット伝搬を高解像度、広いパラメータスペースでシミュレーションを行うことで不安定性の成長が衝撃波ブレイクした後のエネルギー角度分布や、開き角がどのように影響するのかを解像度による影響にも注意しながら明らかにしていくことを目的とする。

本報告では新しい計算手法の導入によって得られたコラプサー中を伝搬するガンマ線バーストジェットの3次元相対論的流体シミュレーションの結果について紹介する。

2. 具体的な利用内容、計算方法

本課題では大質量星が進化の最期に特異な超新星爆発を起こし、崩壊した中心コア付近から相対論的ジェットが形成されたとして、その親星中の伝搬を3次元相対論的流体シミュレーションを行い、ダイナミクスを調べる。特に、流体不安定性の影響を調べるため解像度を変えた計算を行いその影響をみていく。計算モデルは我々が以前に2次元軸対称を仮定し行った Mizuta & Ioka (2013) のモデルパラメータを用いる。この計算ではガンマ線バーストの親星に主眼をおいた Woosley & Heger (2006) の親星進化モデルによって得られた中でも終状態(爆発寸前)で中心コアが高速回転しているモデル(16Ti)の動径密度構造を用いる。半径 4.0×10^{10} cm、太陽質量の約14倍の大質量星の中心の鉄コアが崩壊しブラックホールあるいは原始中性子星になり、その周りに一時的に生じた降着円盤の系から相対論的ジェットが形成されたとして、その伝搬を考える。具体的にはジェット伝搬方向を z 軸にとり、計算ボックスの内側の境界を親星中心から $z_0 = 1.0 \times 10^9$ cm の距離とし、そこに半径 8.0×10^7 cm、運動光度 5.0×10^{50} erg/s、ローレンツ因子 5 のジェットを定常的に与える。 $z = z_0$ の計算境界ではジェットの速度ベクトルは z 軸に平行であるとする。ジェットは計算境界では熱エネルギーが卓越し、相対論的ベルヌーイ保存量($h\Gamma$ 、 h は単位質量あたりの相対論的エンタルピー、 Γ はローレン

ツ因子)が $h_0 \Gamma_0 = 538$ とする。これは、ジェットがやがてショックブレイクアウトをし、自由膨張をすることによって熱エネルギーの全てが運動エネルギーに変換されたとすると($h \rightarrow 1$, $\Gamma \Rightarrow h_0 \Gamma_0$)、バリオン汚染をうけなかったジェット成分はバルク速度のローレンツ因子がガンマ線バーストの観測で見積もられるローレンツ因子 100 を超える超相対論的ジェットにまで加速できるポテンシャルをもったジェットであることを意味する。これらの条件によって計算境界から注入するジェットの条件はユニークに定義される。

計算はカーテシアングリッドを用い、空間を固定メッシュで分割し、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 / HLL)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る。今回報告する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ており、計算トラブル無く安定にジェット伝搬の計算ができている。昨年度までは数値流束にHLLCより数値拡散の影響が大きいHLL法を採用していた。そのため、数値拡散によってジェット界面の流体不安定性の成長が抑制されていた(後述)。また、1次元、多次元のテスト計算により他のグループの結果とも同程度であることも確認できている(Mizuta et al. in prep.)。

本課題の主眼の一つである流体不安定性の成長は数値計算法だけでなく、解像度の影響を大きく受ける。レリーテラー不安定性の成長は短波長モードの方が成長が早く、より高解像度の計算ではより細かいモードの成長が卓越して成長すると予想されるからである。そこで、本課題ではジェット軸(z 軸)周りに $|x|, |y| < 5. \times 10^8$ cm の狭域ではグリッド幅一定とし、そこでの解像度を $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 1. \times 10^7$ cm, $5. \times 10^6$ cm, 2.5×10^6 cm と3つの解像度に関して同じジェットパラメータのジェットを伝搬させ、解像度の影響を調べた。 $|x|, |y| > 5. \times 10^8$ cm ではログスケールでリニアな不等間隔メッシュとしている。このようなグリッドでは、 $|x| = |y|$ のような対角線付近で、グリッドが荒く、

いびつな形となるが、最も重要なジェット軸付近を等間隔にとったことで、ジェットブレイクアウトまではジェットが等間隔のメッシュゾーンに収まるようになってきている。z 軸方向は、 $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 1.0 \times 10^7 \text{cm}$, $5.0 \times 10^6 \text{cm}$ の両者に対して星の半径の約 2 倍程度までとり、最高の解像度モデルでは、計算時間の関係から親星の半径の 1/2 程度と、他の解像度での計算と初期の伝搬の様子の違いを比較する。以下では軸周りを $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 1.0 \times 10^7 \text{cm}$ としたモデルを fiducial モデル、 $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 5.0 \times 10^6 \text{cm}$ としたモデルを 2 倍解像度モデル、 $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 2.5 \times 10^6 \text{cm}$ としたモデルを 4 倍解像度モデルと呼ぶことにする。

3. 結果

まずは、fiducial モデルに関してそのダイナミクスをみていく、図 1 は時刻 $t=1.2\text{s}$ (上), 2.6s (下) のログスケールでの質量密度(左)、 $h\Gamma$ (右) の xz 平面でのスライス図である(注:図の縦横比はスケールせず、ジェット内部構造をよくみせるために横に引き伸ばしたようになっている)。図 1 左上に示した密度のように、ジェット(主に青い領域)は先端近くまで達し、ジェット伝搬によって親星外層が衝撃波圧縮を受けている(主に赤い部分)、ジェットと衝撃波圧縮された親星外層の間に、ジェット先端の逆行衝撃波によってエネルギー散逸されたジェット成分が横方向、そして後方に回り込んでコクーン(主に黄緑から水色)を形成している。ジェットは内部に斜め衝撃波を生じさせながら伝搬を始める。図 1(上)ではジェット先端が曲がりはじめている。3 次元的には蛇行を始めている。ベルヌーイ保存量である物理量 $h\Gamma$ はジェット先端までほぼ一定であるが、コクーンに回り込むと一気に保存が崩れ、その値を下げるのが分かる。バウ衝撃波で圧縮を受けた親星外層成分と混じり合うことでバリオン汚染されたためである。図 1(上)で見られた蛇行はその後成長し、ショックブレイクアウト時には xz 面でのスライスでは層状に見える。ジェットが蛇行したことによってジェットが軸上から何度もはずれてしまうため、 xz 面を横切る時にしかこのスライスではジェットが見えないためである。図 2 は昨年度報告した計算例である。計算パラメータは親星構造、ジェット条件ともほぼ同じであるが、計算スキームの中で数値流束に HLLC スキームでなく、HLL スキームを用いていた。HLLC スキームは HLL スキームに比べ接触不連続面の捕獲に優れており、また、陰的に入る数値拡散の量も少ない。そのため、不連続面がシャ

ープに捕らえられ、同じ解像度での計算でも物理的に生じる細かい構造がなまらずに再現できており、今回のような計算では HLLC スキームあるいは、それよりも数値拡散の影響が少ないスキームを採用すべきである。

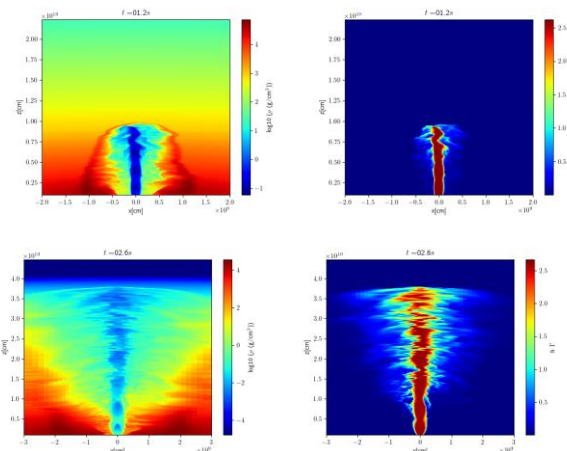


図 1. Fiducial モデルの xz 平面のスライス。上から $t=1.2\text{s}$, 2.6s , 左側がログスケールでの質量密度、右側が ログスケールでの $h\Gamma$ である。ジェット内部の構造を強調するため、縦横比はスケールしておらず、横に引き伸ばしたような図となっている。

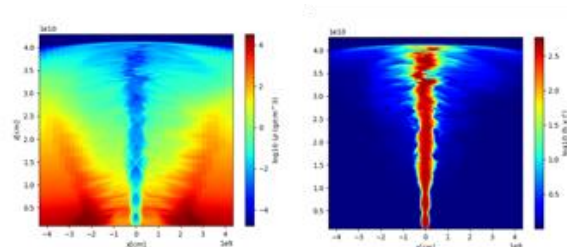


図 2. ほぼ同じジェットパラメータにおいて数値流束を HLL flux を用いて評価した計算例。図 1(下)と同様、ジェットが親星表面にまで達した時 HLL スキームは今年度用いた HLLC 流束に比べ、接触不連続面の捕獲が苦手であり、陰的に入る数値拡散も大きいいため流体不安定性の成長が抑制され、構造がなまっている。

ジェットブレイクアウト時のスライス図に見られる層状構造の原因であるジェット蛇行の理由を考える上で重要になってくるのが伝搬に伴う流体不安定性の成長である。ジェットは図 1(上)に示したようにほぼ円筒状である。これはコクーン圧による閉じ込めのためであるが、伝搬しながらわずかに収縮、そして、その跳ね返りで膨張をしている。そして、また収縮し膨張をする。これが先端まで繰り返される。そのため、超音速流であるジェット内部には斜め衝撃波が生じている。ジェットとコクーンの界面も横

方向の振動を繰り返す。この時、ジェット界面は加速度運動をする。このような時にジェット界面は実効的加速度がかかり、流体不安定性の一つであるレーリーテラー不安定性の成長する。xy 平面に平行なジェット断面のスライス図 3 では、 $t=2.6s$ での $z=2.e9-7.e9$ cm での $h\Gamma$ を示している。ジェットはコクーン圧によって絞られ、その反発として横方向に膨らむ。図 3 下段ではジェット界面の一部が角のようになり全体でヒトデのような形状になっている。これはレーリーテラー不安定性に特徴的なもので、角の幅程度のモードが卓越して成長している。角は非線形成長していくと長く伸び時にはちぎれてしまう。非線形成長により、ジェットはある一つの方向に大きく流れ、ジェットの軸対称性は大きくずれる(図 4, 図 3 と同じ時刻の $z=2.8e10, 3.1e0cm$ での $h\Gamma$ のスライス図では赤いジェットが z 軸からずれている、2 枚のスライスでは違う方向にずれている)。結果として、ジェットの軌跡は蛇行しているようになる。図 1 のジェット先端付近で既にジェットの蛇行が始まっている。

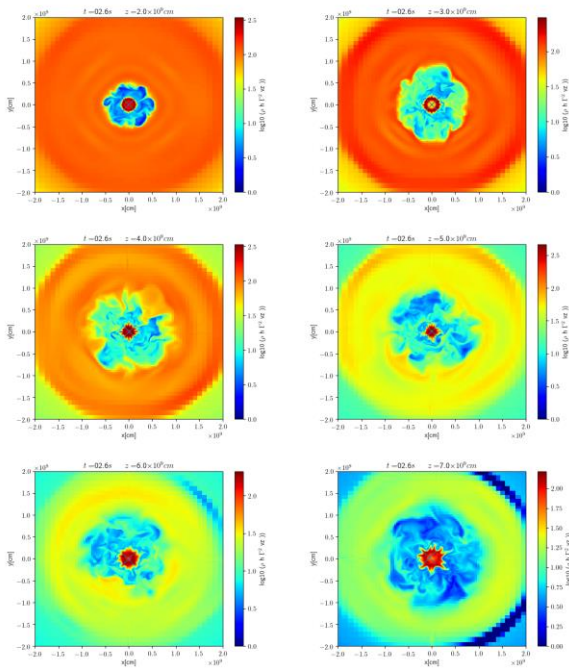


図 3. ジェット先端が親星表面に達する時刻($t=2.6s$)での $z=2.e9$ (上左), $3.e9$ (上右), $4.e9$ (真ん中左), $5.e9$ (真ん中右), $6.e9$ cm (下左), $7.e9$ cm (下右) での ($h\Gamma$)のスライス図。中心付近の赤い領域がジェットに相当する。ジェットは伝搬するにつれ、コクーン圧によって絞られ、同心円上に収縮していき(上左-真ん中右)、その反挑として膨張している(真ん中右-下右)。膨張するにつれ、ジェット界面にヒトデのような角が成長している。

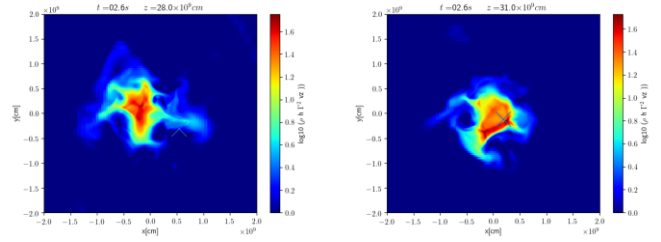


図 4. 図 3 と同じ時刻、 $z=2.8e10, 3.1e10cm$ での $h\Gamma$ のスライス図。レーリーテラー不安定性が非線形成長し、ジェットがある方向に偏ることで、ジェットの軌跡が蛇行する。ジェット(濃い赤の部分)がジェット軸上($x=y=0$)から大きくずれている。

レーリーテラー不安定性は短波長モードの方が成長が早く、そのため解像度を上げるとより角の幅が狭いモードが卓越して成長することが予想される。図 5、図 6 は 2 倍解像度、4 倍解像度モデルの結果である。ジェット先端が $z=1.e10cm, z=4.e10cm$ (図 4 のみ、親星の表面)まで達した時のログスケールでの密度(左)、と $h\Gamma$ の xz 平面上でのスライス図である。fiducial モデルで 2 倍高解像度モデルの xy 平面に平行なスライスを見ると、fiducial モデルよりも短波長のモードが成長しているのが分かる(図 7)。4 倍解像度モデルでは更に短波長のモードが卓越して成長し、 xz 平面でみられるジェット蛇行による層状構造がより顕著になっている。不安定性の成長と共にジェットの一部分が横方向に広がり、コクーンに染み出すためジェット伝搬効率は落ち、ショックブレイクアウトにかかる時間は fiducial モデルでは 2.6 秒程度であったが、2 倍解像度モデルでは 3.2 秒となっている。4 倍解像度ではさらに伝搬効率は落ち、 $z=1.e10$ cm にジェット先端が到達するのに要する時間は fiducial モデルで 1.2 秒、2 倍解像度モデルで 1.4 秒に対して 4 倍解像度モデルでは 1.6 秒を要しており、計算コストの関係でこのモデルは計算ボックスサイズを小さくしたが親星表面までとれば、2 倍解像度モデルの 3.2 秒よりも更にかかることが予想される。しかし、ジェットの伝搬効率は落ちていますが、いわゆる穴掘りは進んでおり、エンジンが活動しつづければジェットが親星表面に達するまで広義の意味でのジェットであり続けられると予想される。

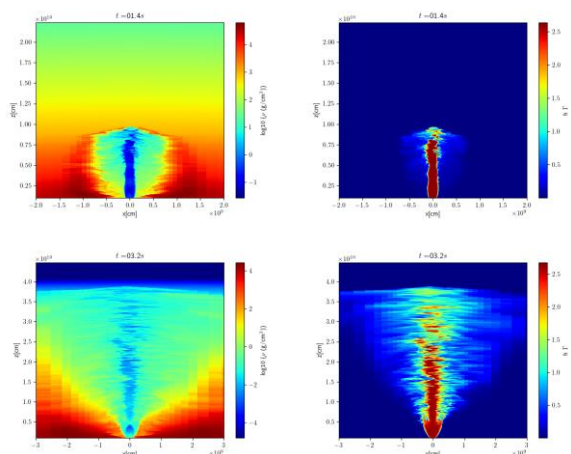


図 5. 2 倍解像度モデルにおける、 $t=1.4s, 3.2 s$ でのログスケールでの密度と $h\Gamma$ の xz 平面でのスライス図。

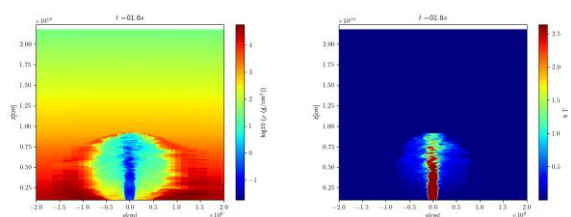


図 6. 4 倍解像度モデルにおける、 $t=1.6 s$ でのログスケールでの密度と $h\Gamma$ の xz 平面でのスライス図。

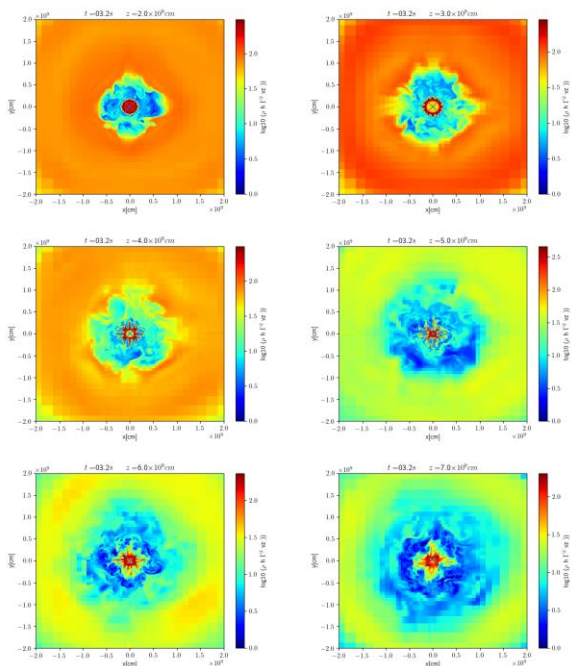


図 7. 図 3 と同じだが、2 倍解像度モデルにおける $t=3.2s$ での ログスケールの $h\Gamma$ 、 $z=2.0e9-7.0e9$ cm でのスライス図。fiducial モデルに比べより短波長モードが成長していている。成長が早いためヒトデのような腕が長くなっている。

4. まとめ

3 次元相対論的流体コードを開発し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
の伝搬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 スキームの導入に
より、他のグループでも報告されている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
長が捕らえられた。今回は世界最高の解像度計算を含む
結果を報告した。高解像度計算でより短波長モードの成長
が支配的になる傾向が確認された。これは、この不安定性
がレーリー-テラー不安定性に起因するという物理的解釈
をサポートするものであり、今後より詳細な解析を進めてい
く。

5. 今後の計画・展望

本研究のベースとなる 2 次元軸対称を仮定したジェット伝
搬の研究(Mizuta & Ioka (2013)では、ベルヌーイ定数($h\Gamma$)
を固定しながら、初期のローレンツ因子が 2.5, 10 の場合
に関して調べている。ジェットは計算内側の境界では z 軸
に平行に注入されるが、ローレンツ因子の逆数程度の開き
角で広がり、コクーンと圧力バランスするところで、収縮をし、
その後、ショックブレイクアウトまで膨張、収縮を繰り返す。
そのため、初期のローレンツ因子はジェット半径を決め、遅
いジェットの場合、ジェットが太くなり伝搬効率は落ちる。逆
に速いジェットは伝搬効率が良いという傾向が 2 次元軸対
称の計算では得られている。3 次元計算で今回のような流
体不安定性の影響が起きる場合、2 次元軸対称の計算結
果がどのように変わるのかを調べていきたい。

2021年度 利用研究成果リスト

【ポスター発表】

- 1.水田晃ら、「コラプサーからの相対論的ガンマ線バーストジェット伝搬の3次元流体シミュレーション」
高エネルギー宇宙物理学研究会2021、2021.11.24-26 (Online)
- 2.水田晃ら、「コラプサーからの相対論的ガンマ線バーストジェット伝搬の3次元流体シミュレーション」
第34回理論懇シンポジウム、2021.12.22 - 24(Online)
- 3.水田晃ら、「コラプサーからの相対論的ガンマ線バーストジェット伝搬の3次元流体シミュレーション」
国立天文台天文シミュレーションプロジェクトユーザーズミーティング、2022.1.18-19 (Online)