

## 課題名(タイトル): 相対論的ジェットの形成機構と伝播

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

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 前後のガンマ線のエネルギー帯において全天で最も明るく輝く突発天体現象であり、宇宙最大規模の爆発現象に起因すると考えられている。ガンマ線バーストに続き、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り、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、その明るさから高赤方偏移のバーストが可能で実際に遠方銀河 ( $z \sim 6-8$  にも及ぶ) からのガンマ線バーストが観測されている。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で宇宙論への応用、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、その爆発機構、ガンマ線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。

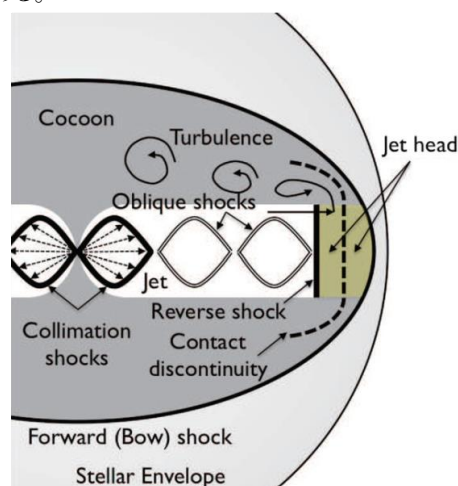


図 1. コラプサーモデルにおけるジェット伝播とそれに伴う構造の模式図(Mizuta & Ioka (2013)より抜粋)。親星中心で形成されたジェットは親星外層(stellar envelope)を中心付近から穴をほっていき、星の表面に達し、やがてショックブレイクアウトしてく。ジェットと外層との相互作用によって先行衝撃波(forward shock)、ジェット終端には逆行衝撃(reverse shock)が生じる。衝撃波圧縮したジェットは横方向に回り込み高圧のコクーンを形成する。コクーンとの相互作用によってジェット内部には複数の斜め衝撃波(oblique shock)が発生する。

爆発を起こす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秒より長いものは大質量星が進化の最期に起こす特異な超新星爆発を起源とするコラプサーモデルが考えられ、バーストの継続時間が2-3秒より短いものは、中性子星連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、中性子連星合体からの重力波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。両者のジェットに共通な物理として、ジェットがジェットの密度に対して高密度媒質中の伝播を経験する点あげられる。コラプサーの場合、親星外層、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播し、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播しながらガンマ線が放射される。中心エンジンにおいてジェット形成を仮定しジェットが高密度媒質中を伝播する間は高密度媒質との相互作用によって、外層中に先行衝撃波が形成され、ジェット終端には逆行衝撃波が形成される。衝撃波圧縮されたジェットは横方向に回り込み高圧のコクーンを形成し、ジェットを取り囲みジェットの収束を保つ働きをする。ジェットとコクーンの相互作用によってジェット内部には斜め衝撃波が形成される。コクーン内部は渦の発生に伴う乱流状態となる(図1の模式図)。このような系は多次元性が重要であり解析的理解が困難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。2000年頃から軸対称2次元の相対論的流体シミュレーションが我々のグループ(Mizuta et al. 2006, 2009, 2010, 2011, 2013)を含めて盛んに行われてきており、ジェットと高密度媒質との相互作用によって生じるコクーンの内部構造、ジェット内部に生じる斜め衝撃波、ショックブレイクアウトに要する時間、ショックブレイクアウト後の広がり方や、放射特性など様々な物理が調べられてきた。コラプサーの場合、親星や中心エンジンによるジェット形成の不定性から親星構造依存性、ジェットパラメータ依存性に関して調べられている。

近年、ジェットに対して高密度媒質中を伝播する時にジェットとコクーン界面に流体不安定性が成長し、非線形段階まで成長するとジェットが分裂化等することが指摘された。この効果は軸対称2次元では見られず、3次元効果が本質的なものである。この不安定性により活動銀河核ジェットで見られる、FR II, FR I (前者は先端まで収束したジェットが伸び、ホットスポットが形成される。後者はジェット構造が途中で失われ、大きく広がった構造が見られる)という2種類のタイプのジェットを説明できるのではないかと議論されている。この不安定性は高密度媒質中を伝播するガンマ線バーストでも成長すると考えられ、Matsumoto et al. (2013, 2019)において相対論的流体シミュレーションを行い報告している。流体不安定性の成長は波長が短いほど成長の早いレーリー-テラー不安定性である場合、シミュレーションの解像度依存性が重要となる。また、コクーン界面ではシア一流でケルビンヘルムホルツ不安定性が成長するため、コクーン内部のミキシングの影響は重要であり、これも高解像度が要求される物理である。ジェットの不安定性の影響や、コクーンのミキシングによるバリオン汚染はショックブレイクアウトした後、星周物質空間への広がり方を決定付けるため、ガンマ線バーストの理解では本質的な問題である。このため、高

密度媒質中を伝搬するジェット伝搬の高解像度計算が重要となってくる。そこで、3次元高解像度計算を行った。本年度は他に相対論的ジェット形成に向けたブラックホール降着流の計算のための一般相対論的磁気流体コードの開発も行ったが本報告ではジェット伝搬のシミュレーションに関して以下でその詳細を報告する。

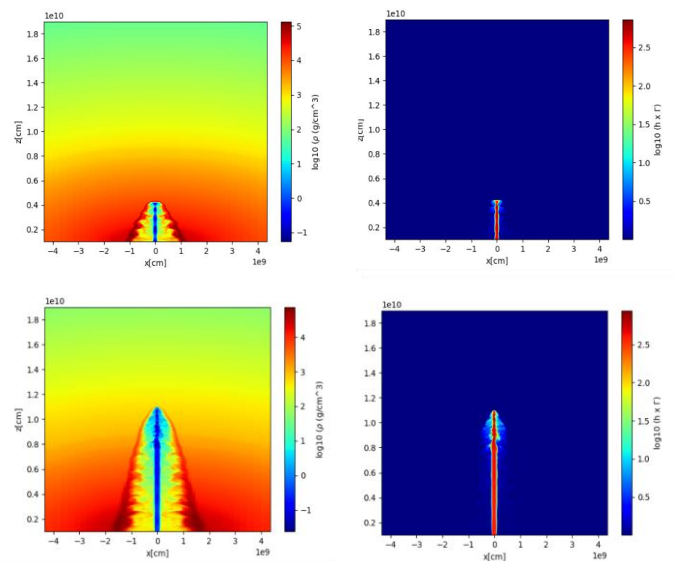
## 2. 具体的な利用内容、計算方法

本課題のため、我々は新たに3次元相対論的流体コードの開発に取り組んだ。Mizuta et al. (2004,2006)で採用された手法をベースにしたものである。空間をセルで分割し、時間積分の間に隣接セル間を通過する数値流束を近似リーマン解法によって求めることによって、時間ステップを重ねていく有限体積法の手法である。コードの肝となるのは数値流束、及び、セル表面でのリーマン解を求める時の初期条件となるセル表面での物理量の再構成のスキームである。数値流束に関しては、HLL法、HLLC法、Marquina's flux formulaの3種を実装しており、セル表面での物理量を求めるスキームではMUSCL補間法を採用した。MUSCL補間法により空間は2-3次精度となる。セル内部を一定値とみなしてセル表面の物理量ともできこれは1次精度を与える。また、セル内部で補間した時に極値等となる場合、数値的振動をひきおこすためこれを避けるために、minmod limiter, superbee limiter をとり入れている。時間積分に関してもTVD-Runge-Kutta法により1-3次精度となっている。実際の計算ではこれらの手法を組み合わせて用いる。コードは基本的な衝撃波管問題等のテスト計算をクリアしている。本年度はこのコードをコラプサー中を伝搬する相対論的ジェットの3次元計算に応用した。軸対称を仮定した2次元計算との比較も行うため、Mizuta & Ioka (2013)の計算条件を用い、これを3次元に拡張した計算空間で行うことにした。従来の系の軸対称性を仮定した2次元計算では円筒座標系(r-z)を用いていたが、本計算ではカーチアン座標系(x-y-z)を用いる。これは3次元円筒座標系を用いると軸を周回する $\phi$ 方向のグリッド幅が $r\Delta\phi$ となりメッシュ幅の小ささがクーラン条件により時間ステップ幅の小ささになり計算時間が長くなってしまふのを避けるためである。計算資源の制約から高解像度が要求されるジェット軸(z軸にとる)周りを高解像度となるようなメッシュをとる。具体的には $|x|, |y| < 5.e8\text{cm}$  及び、 $z_{\text{min}} < z < 1.e11\text{cm}$  においては、 $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 1.e7\text{cm}$  ととる。座標系は異なるが Mizuta & Ioka (2013)においても基本計算の解像度は $\Delta r = \Delta z = 1.e7\text{cm}$  である。 $|x|, |y|$ は $4.e9\text{cm}$ までとり、高解像度部分からログスケールで線形になるようにとられている。このグリッドのとり方はグリッド幅やジェット条件などが異なるが最近のGottlieb et al.(2019,2020)で採用されているグリッドの張り方と同様である。親星モデルでは、ガンマ線バーストの親星を意識した大質量星の進化計算(Woosley & Heger (2003))の最終状態の中から、コアのスピンの早いものの一つであるモデル16TIを用いる。鉄コア崩壊後に一時的に降着円盤が形成され、ジェット形成の必要条件が達成されると期待されるモデルである。我々は親星中心付近( $\sim 1.e7\text{cm}$ )のスケールでジェット形成がおきたとして、ジェットが徐々に親星外層で穴を掘り進め $z_{\text{min}} = 1.e9\text{cm}$ に達したところからジェットを注入しジェット伝搬を調べる。ジェット条件はジェットパワーを $5.e50\text{erg/s}$ (一定)とし、計算中は注入しつづける。ジェットは熱的優勢な状態を仮定し、このガスが断熱膨張し全ての

熱エネルギーが運動エネルギーに変換された時に観測者系でローレンツ因子538という超相対論的流速達成でき(相対論的ベルヌーイの定理より $h\Gamma$ (定数)とあわらされる。 $h$ は単位質量あたりのエンタルピー、 $\Gamma$ はローレンツ因子)、ガンマ線バーストジェットの観測から見積もられるローレンツ因子と同等にまで加速される。 $z = z_{\text{min}}$ でのジェット半径を $8.e7\text{cm}$ とした。今回はMizuta & Ioka(2013)と同様に $\Gamma_0 = 5$ 及び $\Gamma_0 = 10$ の2つの場合に関して計算した。

## 3. 結果

図2は $\Gamma_0 = 5$ のケースの密度(左列)とベルヌーイ定数の保存量(右列)の時間発展(xz平面のスライス)を示す。ジェットは $z = 1.e9\text{cm}$ からz軸に平行なビーム流として注入され続けている。 $t = 0.8\text{s}$ (図2,1段目)では、ジェットはよい収束、軸対称性を保ちながら伝搬していている(低密度:青,高ベルヌーイ定数:赤の部分)がほぼジェットに対応する)。ジェットが膨張、収縮を繰り返しながら、伝搬していく。ジェットが外層と相互作用することによって、先行衝撃波によって外層が衝撃波圧縮され、それを囲むように先端で衝撃波圧縮されたガスが横方向に行き、コクーン構造が形成される。コクーン内部には渦構造も見られ複雑になっている。図2,2段目 $t = 1.5\text{s}$ あたりからジェット先端付近で流体不安定性の成長に伴うと思われる非軸対称モードの成長が見られる。それに伴い、ジェットは蛇行を始めている。図3,3段目、 $t = 2.2\text{s}$ では先端付近の非軸対称モードはより成長し、ジェットとバリオン汚染を受けたコクーンが混じり合い、ベルヌーイ定数が保存しなくなり、大きく低下している。このような成分はブレイク後断熱膨張で達成される最大ローレンツ因子は下がる。蛇行をしながらも、ジェットは親星表面に達する(図2,4段目)。ジェット先端付近の非軸対称モードはより大きく成長している。一方で、ジェット中程には幾重もの斜め衝撃波が発生しているのが見られる。 $\Gamma_0 = 10$ の場合に関しても、伝搬途中で流体不安定性の成長が見られ、ジェットが蛇行をしながらもショックブレイクする様子が見られた。



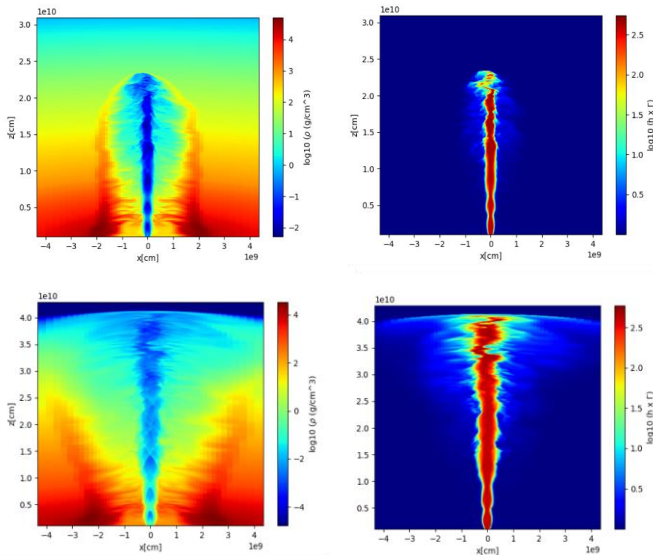


図 2.  $\Gamma_0=5$  の場合のジェット密度(左列)とバリュイ保存量( $h\Gamma$ , 右列)、上から  $t=0.8, 1.5, 2.2, 2.9$  s の  $xz$  面のスライス。縦横比はスケールしていない、図中の目盛り参照。 $t=0.8$  s では収束性、軸対称性を保ちながらジェットが徐々に親星外層を伝搬していつている。 $t=1.5$  s  $t=2.9$  あたりで、ジェット伝搬によって生じた先行衝撃波が親星表面  $z=4.e10$  cm に達している。

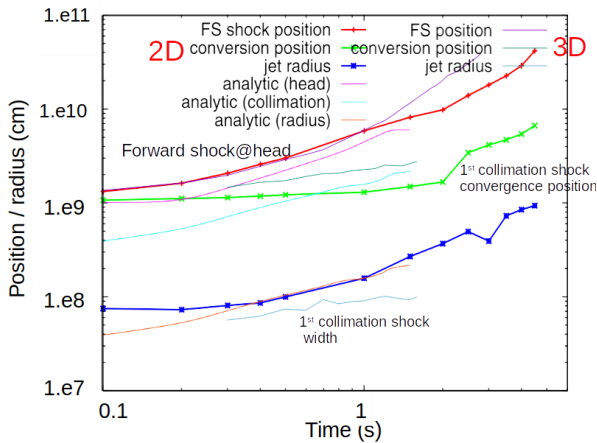


図 3. ジェット先端の先行衝撃波の位置、1つ目の再収束衝撃波の最大幅と収束位置の時間発展を 2次元計算、3次元計算、及び理論解析(Mizuta & Ioka (2013))と比較したもの。

続いて、3次元計算の結果と2次元軸対称計算の結果(Mizuta & Ioka (2013))を比較する。先に述べたように3次元計算はカーテシアン座標系、2次元計算は円筒座標系と異なった座標系で行われており、両計算で用いられた数値スキームも完全に一致していないために参考程度となるが、以下に述べるように流体不安定性が成長が顕著にするまでは3次元計算も軸対称2次元計算の結果をなぞるような傾向があり、3次元性が現れた後の効果を議論する上では重要だと考えられる。軸対称2次元の計算ではジェット伝搬で見られる3つの量の時間発展を単純な解析モデルと比較した。一つは先端の先行衝撃波の位置である。他の2つはジェットが伝搬する時に見られる、コクーンとのわずかな圧力バランス差によってジェットでみられる膨張、収縮に関

するものである。膨張した時の最大の横幅、膨張収縮に要するサイクル長でありその1つ目(ジェット注入直後)のものである。図3はこれら3つの位置、長さの時間発展を示したものである。軸対称2次元計算では親星表面近くまで解析的モデルとよい一致を示している。親星表面では動径方向の密度の変化が激しく、解析モデルは適応できなくなる。3次元計算の結果も軸対称2次元計算と少しずれるものもあるが、先行衝撃波の位置は途中までよい一致を示した。 $t=1$  s あたりで大きくずれたのは、流体不安定性の成長に伴い、3次元効果が見られる時期に一致する。軸対称2次元計算では先端に大きなキャップ状構造が見られ、ジェットが親星外層に穴を掘るのに大きな抵抗力となるが、3次元計算ではジェット先端が蛇行することによってそれを避け、結果として効率よく親星外層を突き破る傾向が見られている。

#### 4. まとめ

ガンマ線バーストジェットの高密度媒質中を伝搬する相対論的ジェットの流体シミュレーションを行うために、3次元相対論的流体コードを開発した。コードはセルに分割された計算空間上の各セルで近似リーマン解による数値流束を用いて、数値積分を行うことによって時間積分をし、系の時間発展をみるものである。時間、空間ともに1-3次精度を選択できる。コードは典型的なテスト計算をパスしている。このコードをガンマ線の継続時間の長いタイプの起源と考えられているコラプサーモデル(特異なタイプの大質量星が進化の最期におこす超新星爆発)で親星中心でジェットが形成されたとして、その親星外層中の伝搬のシミュレーションを行った。計算条件としては2次元軸対称での計算との比較のため、Mizuta&Ioka(2013)で採用された親星モデル、ジェットパラメータを用いた。高解像度が必要なジェット軸周りにグリッドを集中させ、ジェット伝搬を計算したところ、外層の密度がやや下がってきたところでジェットとコクーン界面上でのレーリーテラー不安定性の成長によるジェットの収束の悪化が見られ、不安定性の非線形成長によってジェットがフラグメント化の様子が見られた。不安定性の成長に伴いジェット先端は直進せず、蛇行するため2次元計算で見られた先端でのキャップ構造の成長は見られず、結果として早くショックブレイクアウトする傾向が見られた。

#### 5. 今後の計画・展望

これまでよりもややよい解像度計算に成功した。我々は更に2-4倍よい解像度計算を行うことによって、結果が解像度に依存するのか、収束しているのか、解像度に依存しない物理は何かといった問題を明らかにしていく。また、同様の計算を高密度物質が膨張してくような短い継続時間のガンマ線バーストにも応用していく。

2020年度 利用研究成果リスト

**【口頭発表】**

Akira Mizuta, “Astrophysical plasma jet”, Workshop on Laboratory Astrophysics: Novel Development in Nonlinear Plasma Physics with Lasers, Sep. 2020, Osaka Univ. + online

**【ポスター発表】**

水田晃、“一般相対論的磁気流体コードの開発と応用”、高エネルギー宇宙物理学研究会 2020、Dec. 2020, Online

水田晃、“一般相対論的磁気流体コードの開発とブラックホール降着流への応用”、第33回 理論懇シンポジウム「理論天文学・宇宙物理学のブレイクスルー」, 2020 Dec., Online

Akira Mizuta, “Numerical simulations of relativistic GRB jet propagation in 3D”’, 4th annual symposium for the Innovative Area “Gravitational wave physics and astronomy: Genesis”, 2021 Feb., Online