

プロジェクト名(タイトル): 相対論的ジェット形成機構と伝播

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. 本プロジェクトの研究の背景、目的、関係するプロジェクトとの関係

ガンマ線バーストは数秒から数十秒間、主に数百 keV のエネルギーにおいて全天で最も明るく輝く突発天体現象であり、それに続き X 線から電波まで多波長で残光が長いもので 1 年以上観測されるものもある。角度分解能の高い長波長バンドの残光観測によって母銀河が決定されるバーストもあり、中には高赤方偏移($z \sim 6-8$)のものもあることから(例えば Kawai+2006)、宇宙論、初期宇宙を探る上でもガンマ線バーストは重要な現象である。バーストの継続時間が約 2 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約 2 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+(2003))、昨年には観測史上最も明るい近傍の GRB221009A が Ic 型超新星爆発と共に観測されている。後者も中性子星連星合体からの重力波 GW170817 において GRB170817A (Abbott+2017) が観測された。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、コラプサーの場合は親星外層、連星合体の場合は合体時に上空へ撒き散らされたダイナミカルエジェクタ中を相対論的ジェットが伝搬し、ブレイクした後にガンマ線が放射されていると考えられている。

どちらのタイプのガンマ線バーストジェットも、ジェットに対して密度の高い親星外層などを穴を掘り、自ら通り道を作りながら伝搬し、突き破る必要がある。ジェット伝搬に伴い、パウ(先行)衝撃波を形成し、ジェットは逆行衝撃波でエネルギーを散逸する。衝撃波圧縮されたジェットガスは横方向に流れ、後方に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。これまで軸対称を仮定した 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我々をはじめ(Mizuta et al. 2006, 2009, 2010, 2011, 2013)、いく

つかのグループで行われてきた。

高密度媒質中をジェットが伝播すると、高圧のコクーンによってジェットは閉じ込められながら僅かに横方向に膨張、収縮を繰り返す。ジェット界面が横方向に振動運動することによって生じる実効的加速度によってレーリーテラー不安定性等の流体不安定性が成長する(Matsumoto +2013, 2019)。流体不安定性の非線形成長によりジェットの一部分が先端に達する前にコクーンになってしまうため、穴掘りの効率が落ちるなどの影響が生じる。

不安定性の成長は解像度依存性が強く、短波長モードは早く成長することが線形解析から知られている。そこで、軸対称 2 次元で行った Mizuta et al.(2013)のジェットパラメータの中でも特に初期のローレンツ因子が 5 の場合に対して、コードの開発、改良を経て、3 次元に拡張した計算を行ってきている。流体不安定性の問題は解像度依存性が強い問題であり、流体不安定性の成長、及びそれが及ぼすジェット伝搬の物理の解像度依存性に調べている。

2. 具体的な利用内容、計算方法

今年度は昨年度報告したモデルのうち、最高解像度のモデルに対してのみ計算時間の都合から他のモデルよりも小さい親星の半径の 1/2 を計算ボックスにとっていたが、論文化にあたり、より詳しい解析が必要になったため、計算領域を倍にし親星表面までの伝搬を追えるようにした計算を行った。ここでは昨年度報告したモデルも含めて計算手法、計算条件を述べる。ガンマ線バーストのコラプサーモデルに基づき、大質量星のコアが進化の最期に崩壊した時に、コアが速い回転をしていると、中心にブラックホールと、中心付近で崩壊するガスが降着した時に降着円盤を形成する。この系はブラックホールと降着円盤の相互作用によって、一部のガスが極軸方向に絞られたアウトフロー、ジェットを形成する。

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、その親星中のジェットの伝搬を 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を行っている。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。親星の動径密度構造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)を採用している。この星は、半径 $R=4.0e10\text{cm}$ 、太陽質量の約 14 倍の重たさであり、計算開始直前に中心の鉄コアが崩壊することによって、ブラックホールが形成され、その周りに一時的に生じる降着円盤の降着ガスの一部が、ブラックホールとの相互作用によって相対論的ジェットになったと仮定し、そのジェットが計算ボックスの一端($z_0=1.e9\text{cm}$)にきた瞬間から計算が開始される。ジェット伝搬方向を z 軸にとり、親星中心から $z_0=1.0e9\text{cm}$ の距離にとった計算ボックスの一端に半径 $8.0e7\text{cm}$ 、運動光度 $5.0e50 \text{ erg/s}$ 、ローレンツ因子 5 のジェットを定常的に境界条件として与える。 $z=z_0$ での計算境界ではジェット velocity ベクトルは z 軸に平行であるとする。親星の構造、ジェットに関しては 2 次元軸対象と同じであるが、座標系をカーテシアン座標にとるため、ジェットの界面はギザギザの境界となる。また、数値計算の中でおきる数値ノイズを種として、伝搬中に流体不安定性が成長する。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。これらのパラメータでジェットをユニークに定義することができ、計算の座標系が Mizuta & Ioka (2013) の円筒座標系から、カーテシアン座標系になり 3 次元計算となったところが大きな変更点である。ジェットが親星をショックブレイクアウトするとジェットは自由膨張し、最大ローレンツ因子 $\Gamma = h_0\Gamma_0$ まで加速されるため、このジェットパラメータはガンマ線バーストの観測から要求されるローレンツ因子 100 を超えるバルク速度を持ちうるケースを考えていることになる。

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、どの精度のヴァ

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.)。

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 $|x|, |y| < 5.e8\text{cm}$ の領域ではグリッド幅一定とし、そこでの解像度を $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 1.e7\text{cm}, 5.e6\text{cm}, 2.5e6\text{cm}$ 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てきた。 x, y 方向だけでなく、ジェット伝搬方向に同じ解像度をとるような計算の試みははじめてであり、 x, y 方向においてもこれらの解像度は 2 番目、3 番目にいい解像度モデルで世界最高の解像度計算となっている。本報告では一番解像度の高い、 $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 2.5e6\text{cm}$ に関して計算領域を広げた新しい計算を行ったので、昨年度までの結果と比較しながら報告をしていく。また、 $|x|, |y| > 5.e8\text{cm}$ 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いる。 z 軸周りを $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 1.e7\text{cm}$ としたモデルを fiducial モデル、 $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 5.e6\text{cm}$ としたモデルを 2 倍解像度モデル、 $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 2.5e6\text{cm}$ としたモデルを 4 倍解像度モデルと呼ぶことにする。

3.

今回は 4 倍解像度モデルを親星表面まで計算ボックスを広げたので、ショックブレイクアウト直後の時刻の xz 平面での密度と $h\Gamma$ をそれぞれの解像度に関して比較したのが図 1 である。上段がログスケールでの質量密度、下段がログスケールでの $h\Gamma$ を示し、それぞれ右側から fiducial モデル($t=2.7\text{s}$)、2 倍解像度モデル(3.3s)、4 倍解像度モデル(3.6s)に対応する。ジェットは下から上に伝搬していった親星の表面($R=4.e10\text{cm}$)に達する直前

のスナップショットである。高解像度になるにつれ、ショックブレイクアウトに要する時間はかかるようになるが、全てのモデルで現実的な時刻でブレイクをし、ブレイク時でも自由膨張により高ローレンツ因子にまで加速可能な $h\Gamma$ が 100 を超える成分(下段、図中のオレンジから赤の成分)がジェット軸付近に残されている。全てのモデルで伝搬方向に対して横方向に縞上の構造が見られるが、これはジェットを注入してすぐに横方向の膨張収縮によるジェット界面が実行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が成長するためである。高解像度の方がより成長の早い短波長モードを解像することが可能なため、解像度をあげるたびに非常に細かい構造が見られるようになっていく。流体不安定性が非線形段階にまで成長すると、ジェットの一部は先端での逆行衝撃波によるエネルギー散逸を経てコクーンに回り込む成分だけでなく、直接コクーンへ回り込む成分が生じる。このため、先端にまで達し、穴掘りに貢献できる成分が減るため、流体不安定性の非線形効果がより見えてくる高解像度計算では伝搬効率が落ちていく。しかし、3 つの計算ではブレイクに要する時間は収束していないが、解像度をあげた時に増加するブレイクに要する時間は +0.6s (fiducial => 2 倍解像度), +0.3s (2 倍解像度 => 4 倍解像度) と漸近的傾向をみせてきている。

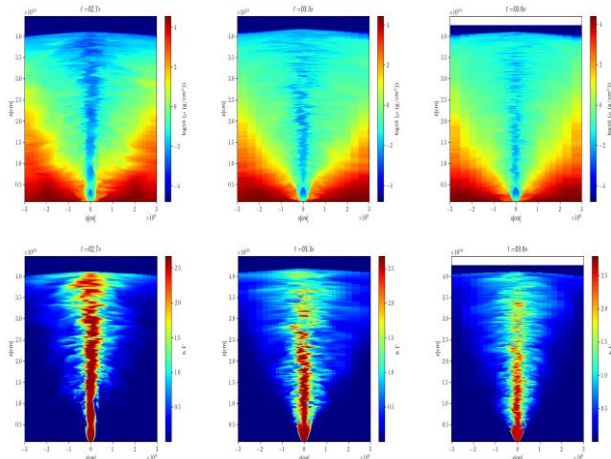


図 1. 計算領域に下の境界($z=1.e9\text{cm}$)から注入したジェットが、親星中を伝搬し、その先端が親星表面に達した時のログスケールでの質量密度(上段)、ログスケールでの $h\Gamma$ (下段)の xz 面スライス(z 軸がジェット伝搬方向)。全てのモデルでショックブレイクアウトに成功し、 $h\Gamma$ が 100 を超す、自由膨張を経てローレンツ因子が 100 を超える成分が z 軸上に残っている。高解像度モデルほど早く不安定性が成長するためより細かい構造が形成されている。

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親星中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、これまで用いてきた数値拡散の影響の強い HLL スキームの計算結果から劇的に改善した。今回は親星表面に達するまでではあるが、3 つの解像度において、親星表面でショックブレイクアウトする時点までの計算に成功した。高解像度計算は世界最高の解像度であり、これらの計算ではレーリーテラー不安定性の理論モデルが予言するように、成長の早い短波長モードが非線形段階にまで成長する様子が高解像度計算で顕著に見られた。流体不安定性の成長によりジェットの一部はジェット先端において衝撃波によるエネルギー散逸をうけずに、コクーンに回り込むため、ジェットの伝搬効率を落とすため、解像度を上げるとショックブレイクアウトに要する時間は増加していった。しかし、ショックブレイクアウト時でもジェット軸周りには $h\Gamma$ の高い、自由膨張によってローレンツ因子 100 を超える成分となりうるガス成分は残っており、2 次元計算モデルのブレイク後の振る舞いと同じような自由膨張が期待できる結果となった。

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、ジェット流入点となる z_0 での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。ジェットのローレンツ因子は親星を穴掘り中のジェットのノズルの横幅に影響し、大きいほど細くなる傾向が 2 次元計算では見られている。3 次元計算ではジェットの界面でのレーリーテラー不安定性の成長にもジェットのノズルのサイズが不安定性の成長に影響する実行的加速度を変え、不安定性の成長の様子が変わってくると期待される。このような効果を含めて、初期のローレンツ因子の依存性を明らかにしていく。

2022 年度 利用研究成果リスト

【口頭発表】

1. Akira Mizuta, “Three-dimensional relativistic hydrodynamic simulation of gamma-ray burst jet propagation”, Symposium on Gravitational wave physics and astronomy: Genesis, April 27 2022, Kyoto(Japan)/Online
2. Akira Mizuta, “Gamma-ray burst jet propagation in collapsars in 3D”, The 9th East Asian Numerical Astrophysics Meeting, Sep. 27 2022, Okinawa (Japan)/ Online
3. 水田晃、`親星外層中を伝搬するガンマ線バーストジェット of 3次元相対論的流体シミュレーション、解像度の影響”, 日本天文学会 2023 春季年会, March 2023, 立教大学

【ポスター発表】

1. 水田晃、” 3D Gamma-ray burst jet propagation in collapsars”, 高エネルギー宇宙物理学研究会 2022, Nov. 8-10 2022, 広島大学/Online
2. 水田晃、” コラプサー中を伝搬するガンマ線バーストジェット of 3次元相対論的流体シミュレーション”, Dec. 21-23 2022, 第35回 理論懇シンポジウム、コラッセふくしま/Online