

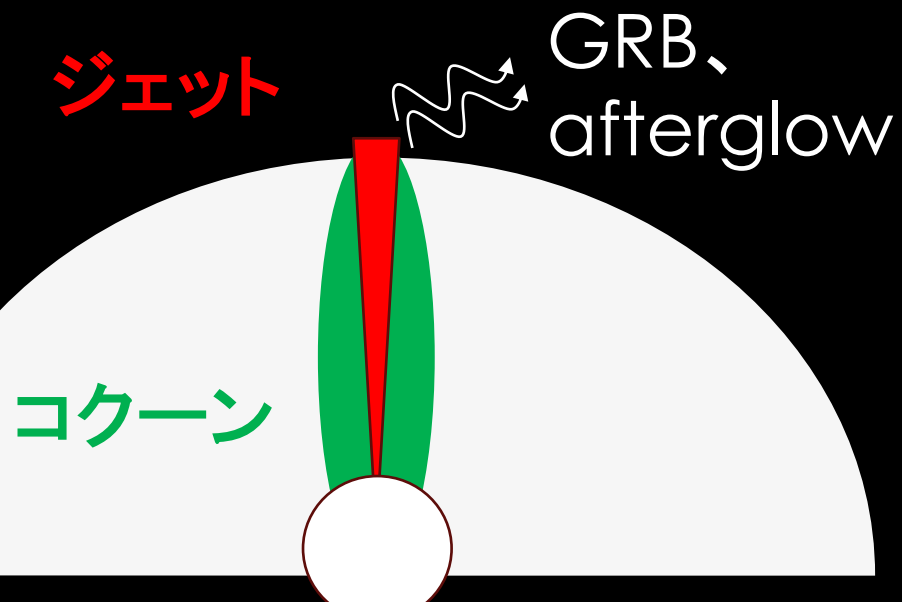
コンパクト天体の合体におけるジェットの 伝播とジェット先端における不安定性

東京大学理学系研究科物理学専攻M1 木戸大三郎

Supervisor: 仏坂健太

ジェットとGRB

- 非常に細く絞られた高速(ローレンツファクター $\Gamma \sim 100$)に加速されたプラズマガス
- エネルギー、速度によって形状が3種類に分類される
- NS合体によって放出されたエジェクタ内をジェットが伝播し、ブレイクアウトするとGRBとして観測される

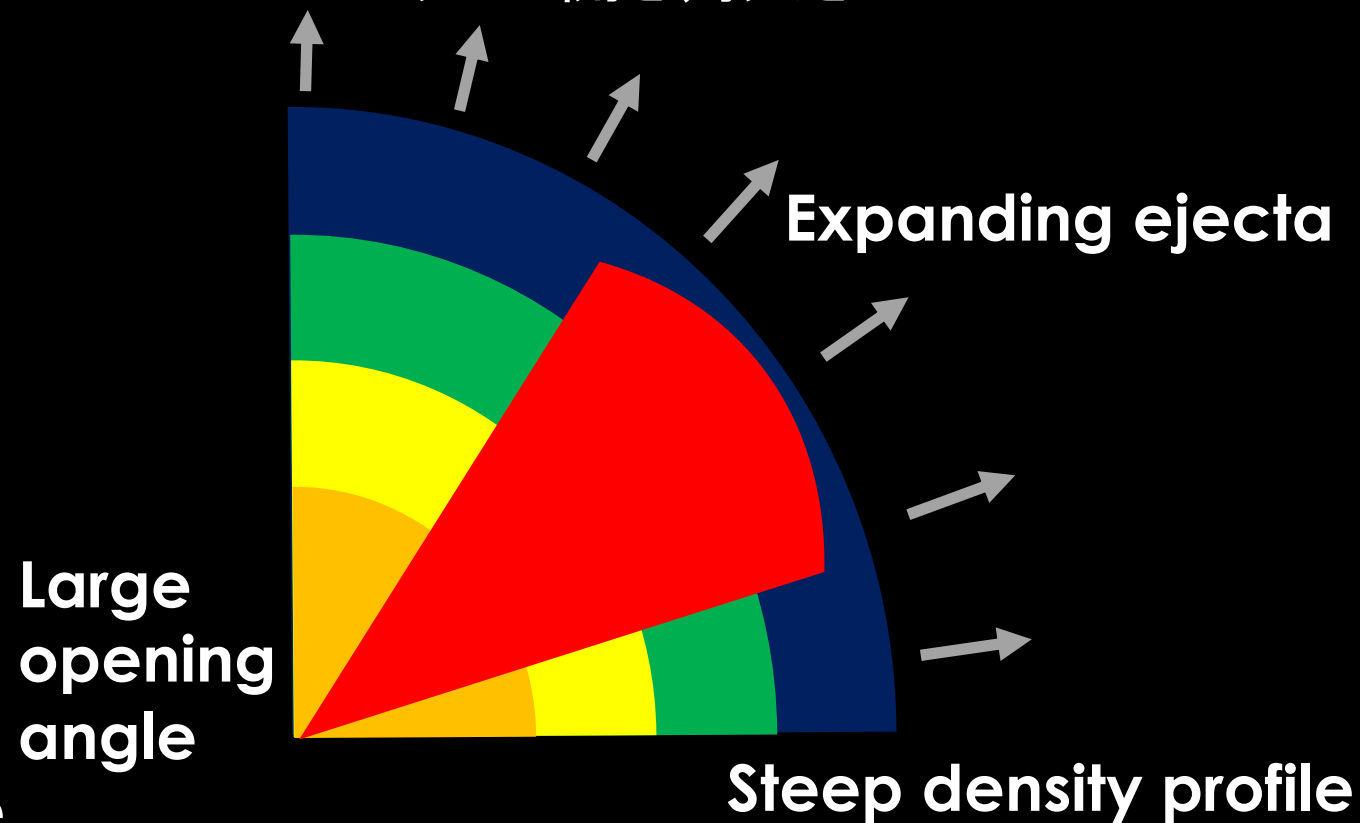
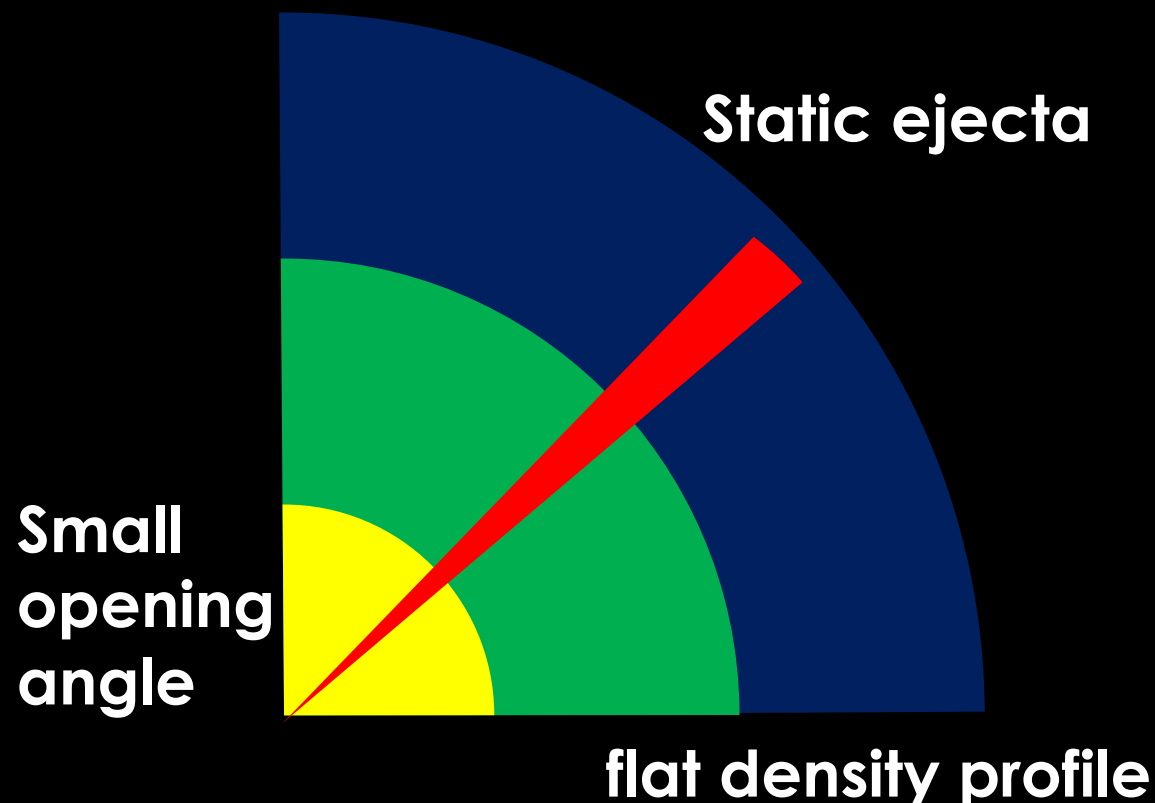


モチベーション:
NS-NS合体の数値相対論エジェクタ
内でのジェットの伝播を調べたい!
一様プロファイルとの比較、ブレイク
アウト条件、観測情報の差

他の種類のガンマ線バーストとの違い

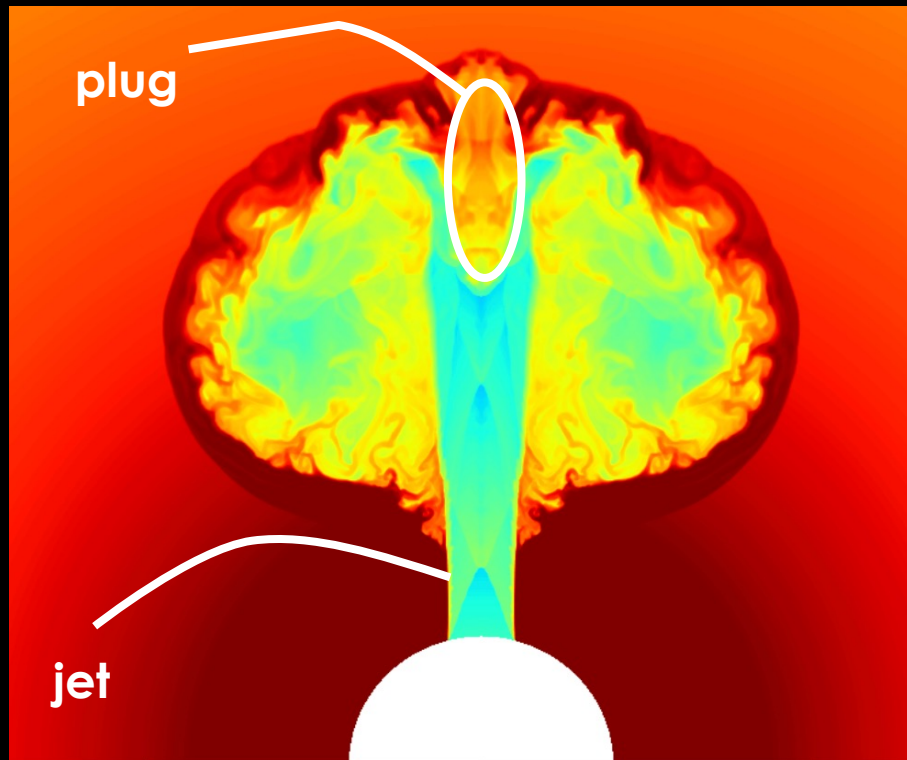
コラプサー: 大質量星の重力崩壊由来
 密度分布 $\rho \propto r^{-2\sim 3}$
 媒質がほとんど静止している
 ジェットの開き角小さい

マージャー: コンパクト天体の合体由来
 密度分布 $\rho \propto r^{-3\sim 5}$
 媒質が相対論的速度で膨張($\sim 0.8c$)
 ジェットの開き角大きい



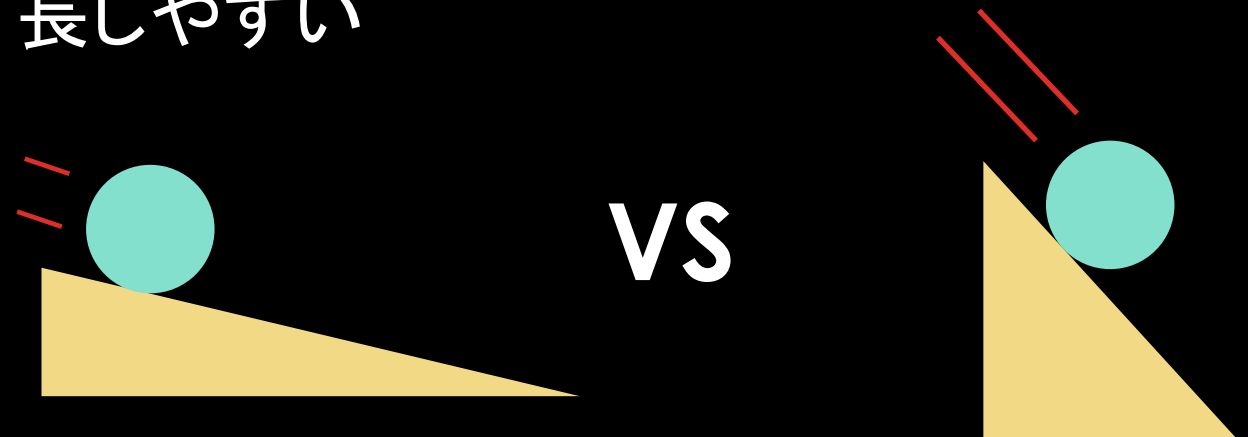
プラグとは何か？

- ジェットの進行方向に高密度の領域が生まれ減速
- 一般に3次元軸対称シミュレーション特有の数値的効果とされる



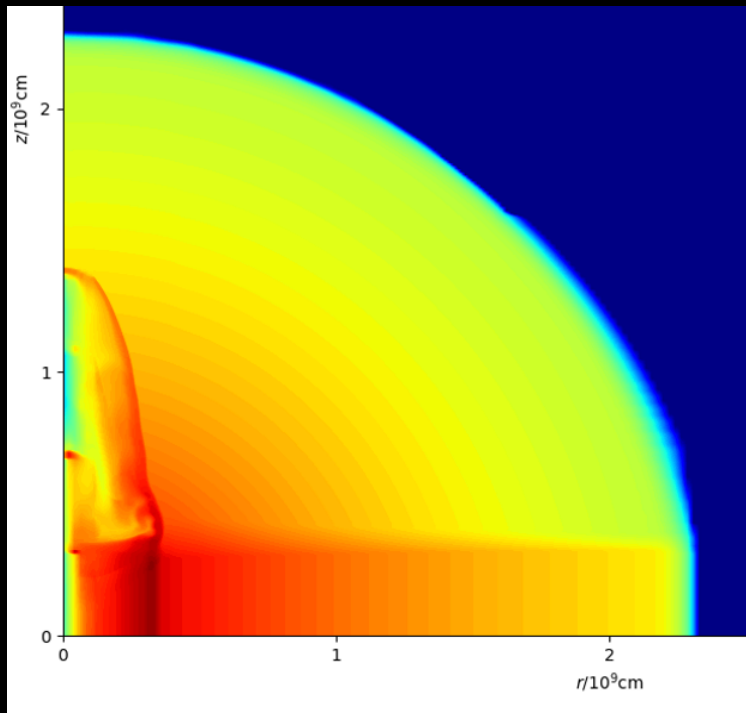
マージャーで起きやすい理由

- 大きな開き角→エネルギーが分散
- 密度プロファイルが急で不安定が成長しやすい

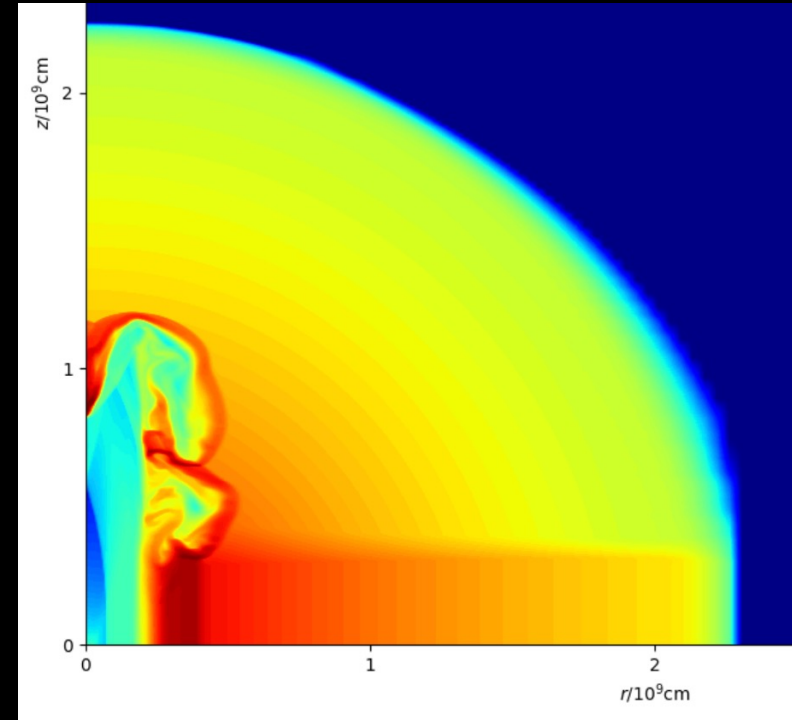


格子の空間精度依存性と波数モード

- プラグは計算格子が細かいほど出やすい⇒粗い格子では高波数モードの不安定性を解像できない
- 従来プラグが出ないとされてきた3次元デカルト座標でも空間解像度を上げると出現⇒過度な対称性によるものではない!

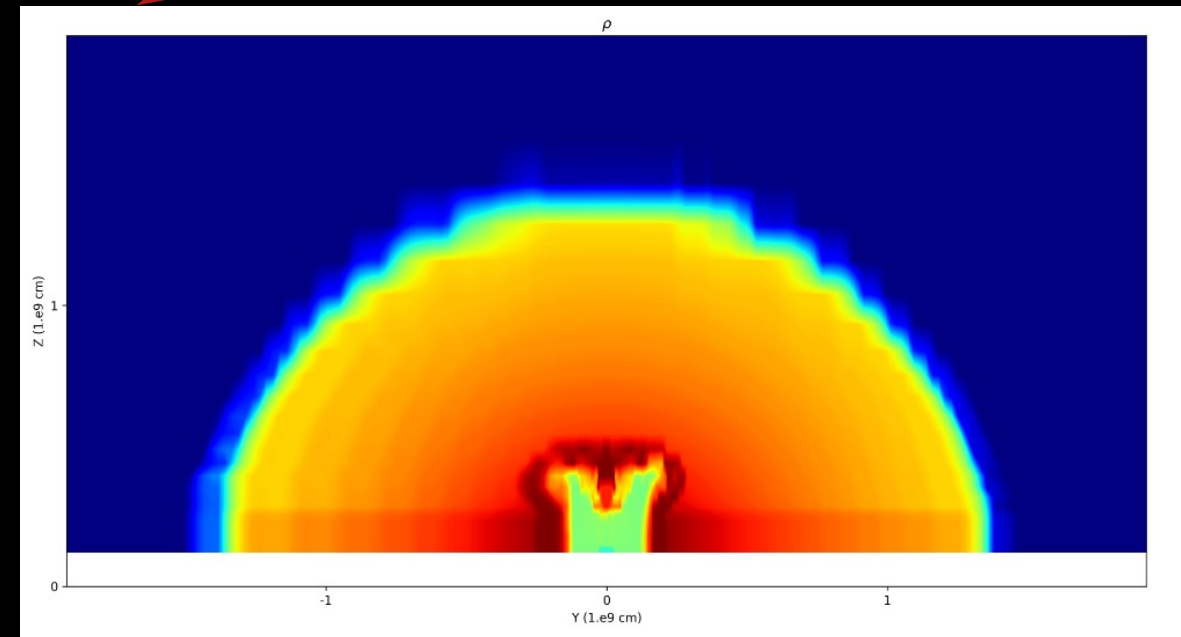
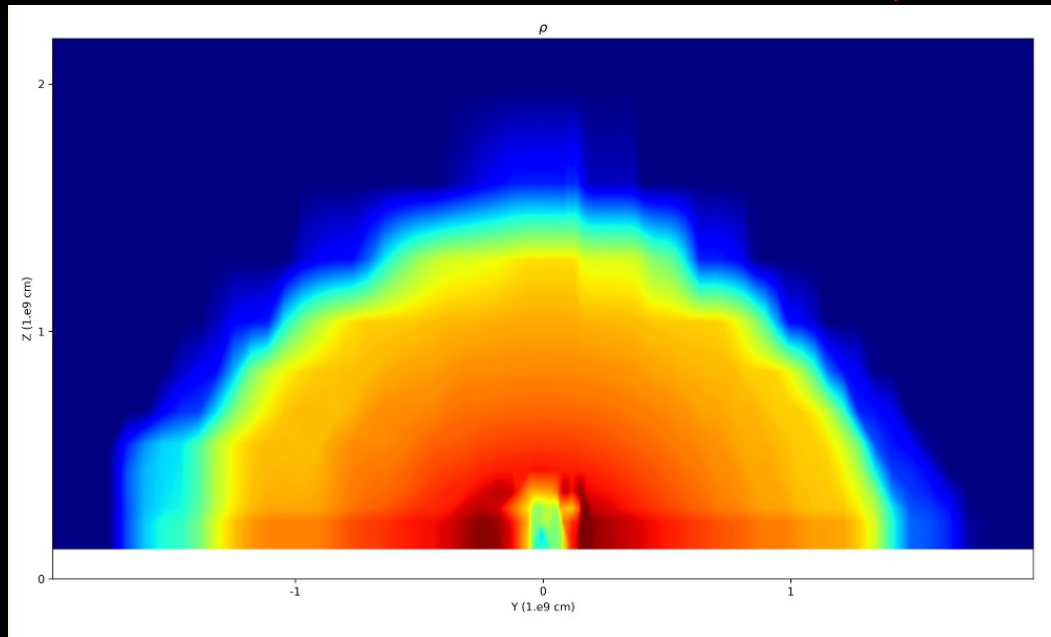


空間解像度2倍
プラグ出現



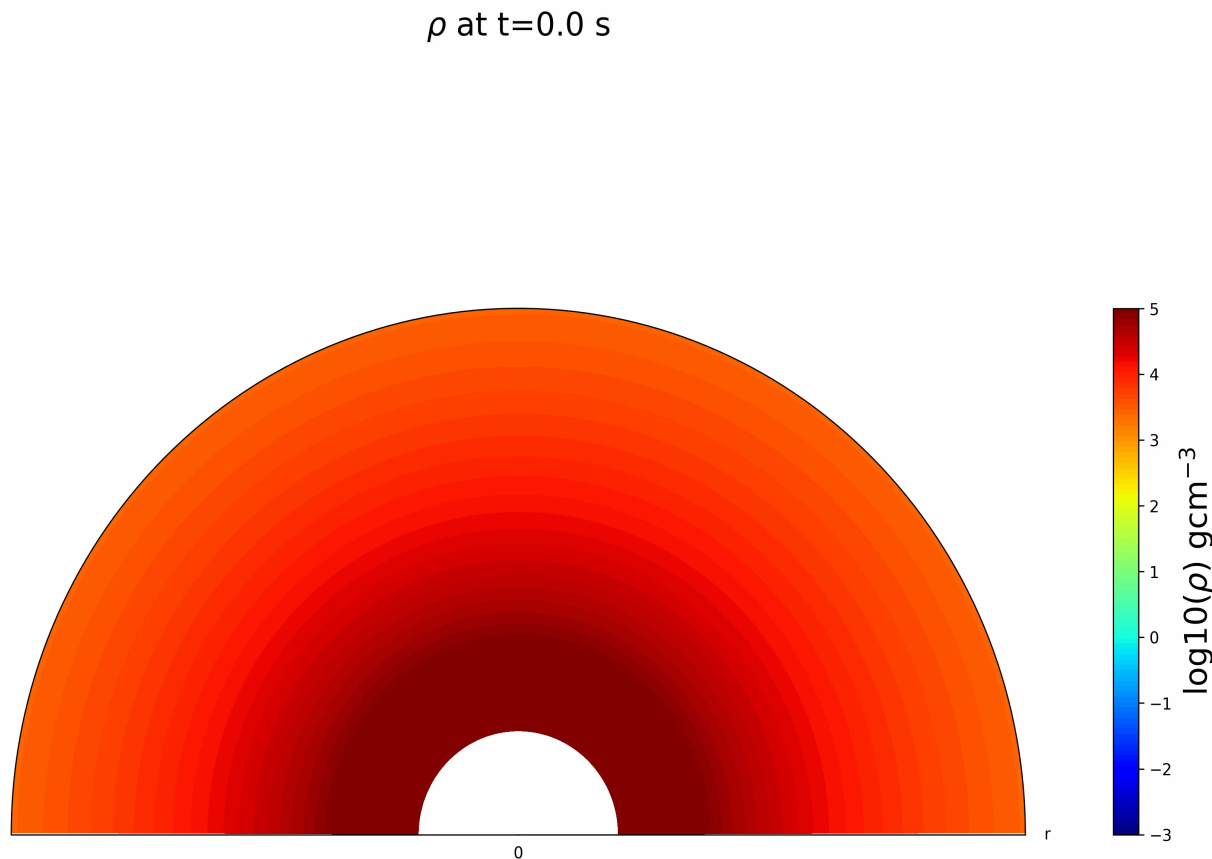
3次元シミュレーションの解像度比較

ジェット注入部の解像度5倍 3次元デカルト座標でも出る！



ジェット外縁における擾乱の発生と伝播

ジェットの開き角を非常に大きくし、プラグの形成を追跡



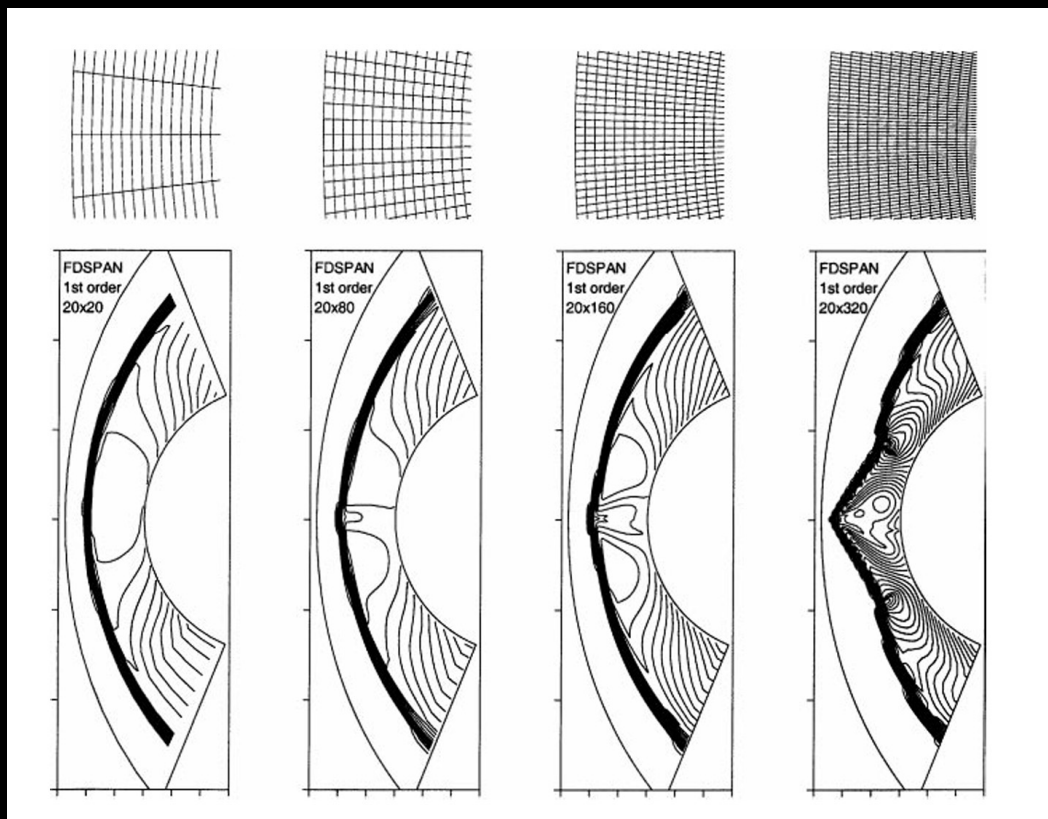
ジェットを0 ~ 85°までの
角度の間一定に注入

1. ジェット端の衝撃波とエ
ジェクタとの間の擾乱に
よって相互作用する
2. 音速スケールで軸周りに伝
播
3. 軸上で不安定性が成長する

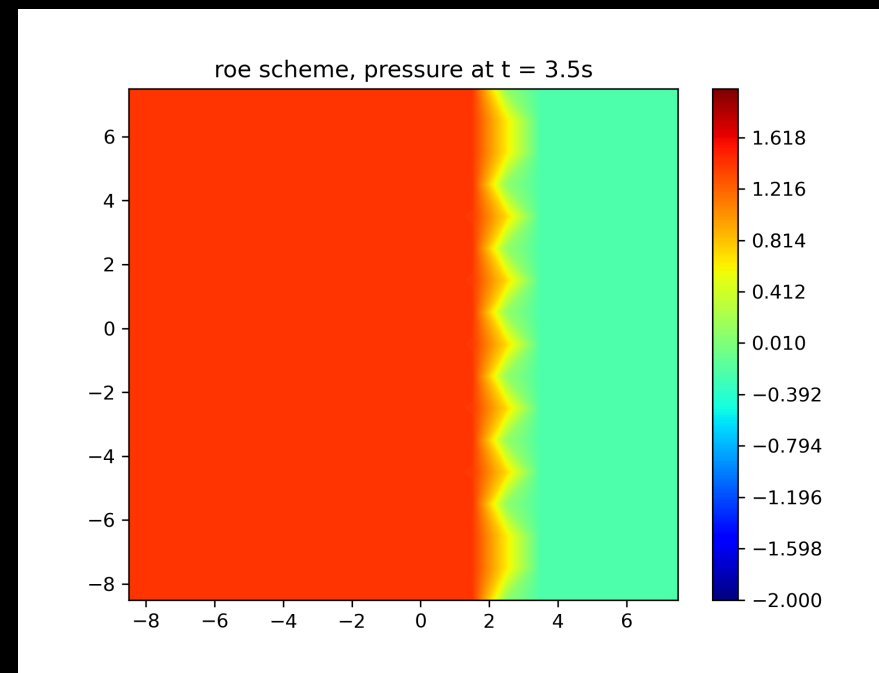
Physical or Numerical?

カーバンクル不安定性

衝撃波捕獲の正確なスキーム(hllcなど)では解像度を上げると衝撃波面が本来予期される形状より尖ってしまう現象
人工的な効果であることが実験で確かめられている



Pandolfi & D'Ambrosio (2001)



カーバンクル現象の行列安定性解析

Dumbser + 2004で行われた解析を相対論的、他の次元、座標系に拡張した安定性解析

相対論的流体力学方程式の保存系は2次元cartesianでは

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x} + \frac{\partial G}{\partial y} = 0, \quad U = \begin{pmatrix} \rho\gamma \\ \rho h\gamma^2 u \\ \rho h\gamma^2 v \\ \rho h\gamma^2 - p \end{pmatrix}, \quad F = \begin{pmatrix} \rho\gamma u \\ \rho h\gamma^2 u^2 + p \\ \rho h\gamma^2 uv \\ \rho h\gamma^2 u \end{pmatrix}, \quad G = \begin{pmatrix} \rho\gamma v \\ \rho h\gamma^2 uv \\ \rho h\gamma^2 v^2 + p \\ \rho h\gamma^2 v \end{pmatrix}$$

について各セルにおける状態ベクトル U_i について変分をとって $\frac{\partial \delta U_i}{\partial t} = S_{ij} \delta U_j$ ($\delta U_i(t) \propto e^{S_{ij}t} \delta U_j(t=0)$)

の形にすると擾乱が成長しない条件は S_{ij} の固有値 λ_n の実部の最大値

$$\max(\text{Re}(\lambda_n)) \leq 0$$

が必要条件。数値流速の微分は数値微分を採用

2次元でセルの数 \times 4成分の行列があるので計算量多い、30 \times 30セルだともう解けない

ある行列とその部分行列の $\max(\text{Re}(\lambda_n))$ に条件がつけられれば嬉しいが一般には成立せず

行列安定性解析と数値実験の比較

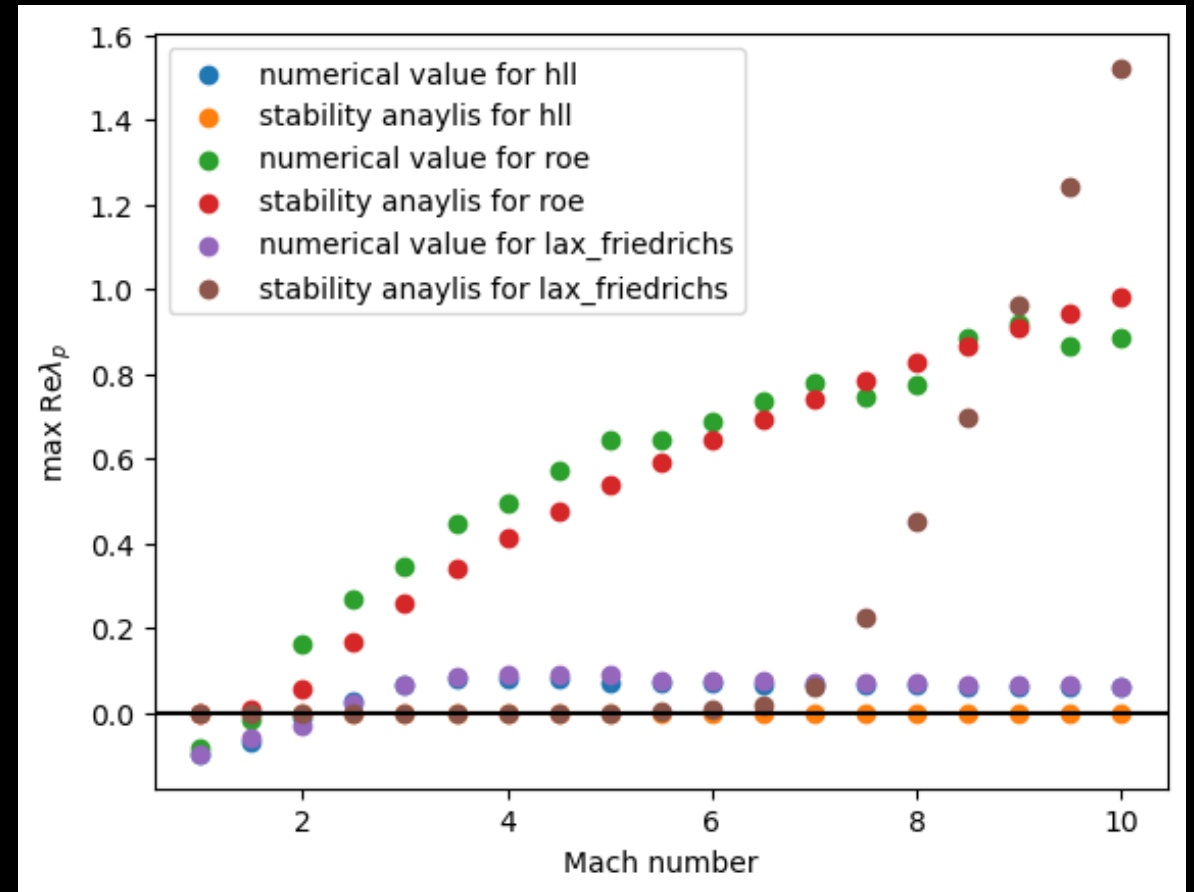
非相対論的なshock tubeで衝撃波静止系

Mach numberを決めると定常な系がジャンプ条件から決まる

数値実験では1次元のshock tubeに垂直な向きに速度擾乱を加えて成長率と比較

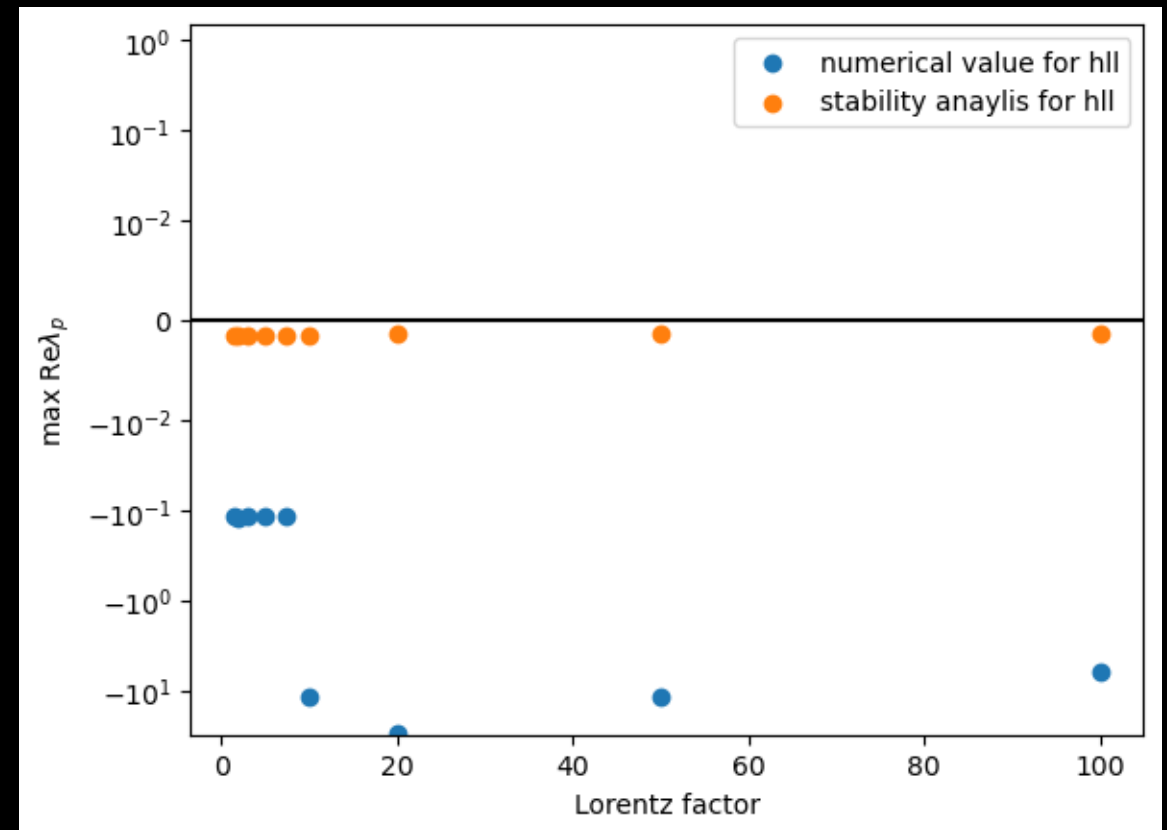
安定/不安定を決めるゼロ点は実験と一致

Dissipativeなものが堅牢なスキーム



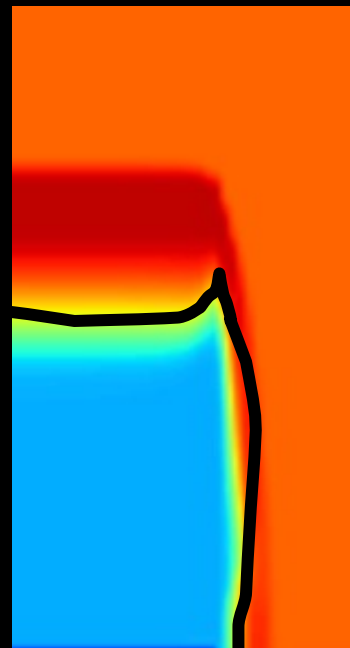
相対論的な場合

- 相対論的な場合のstrong shock tube
- 非相対論的な場合に安定だったhllについては安定
- Strong shockでない場合、セルが大きくなった場合など
この解析を完全には鵜呑みにできない
←AMRでプラグ出るのはおそらくカーバンクル

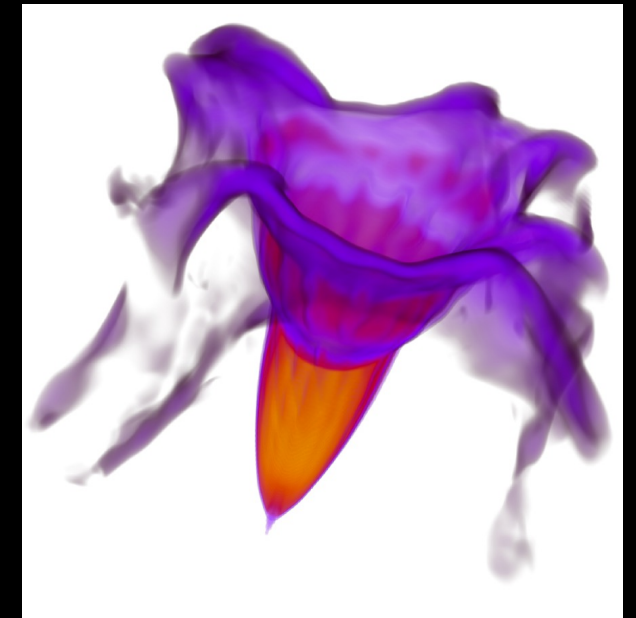


ジェットの再考

ジェットのエッジでは2種類の不連続面あり
→2つの条件をconsistentに解けているか疑問 primitive recoveryなど問題あるかも



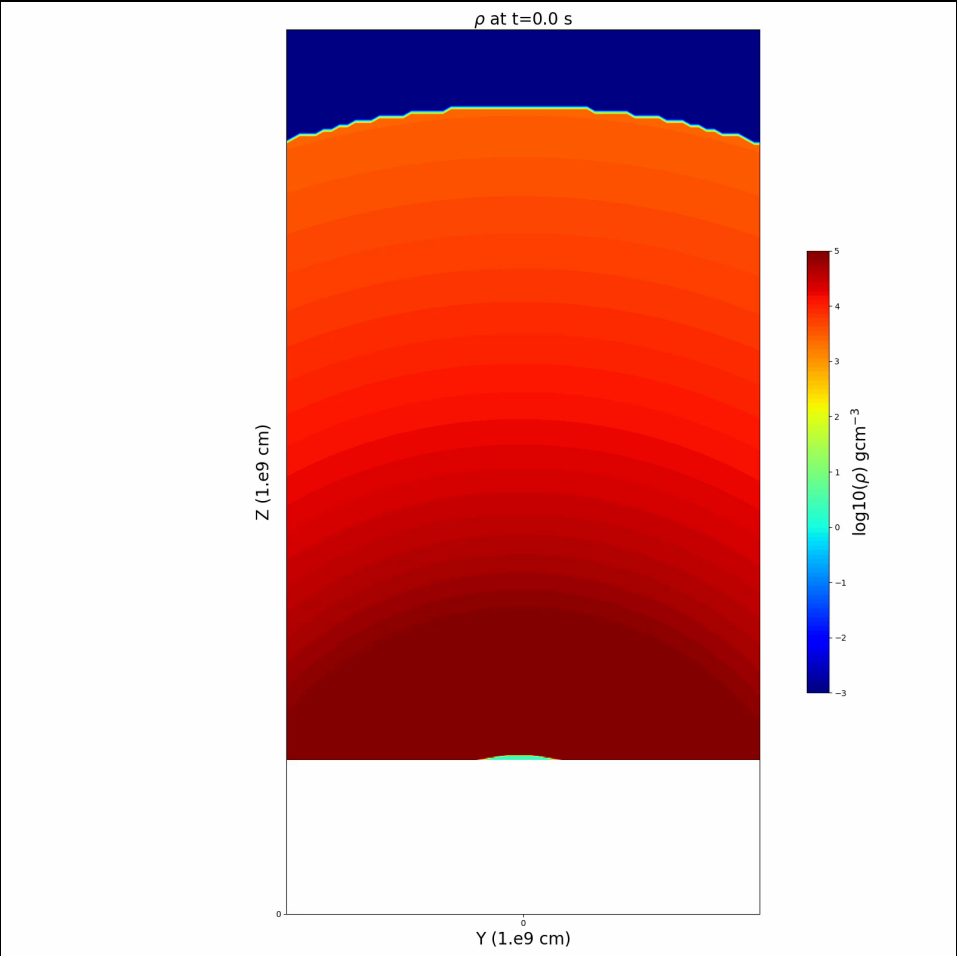
端が飛び出た構造
速度の早いエッジに取り囲まれる形



Mattia+2024

まとめと展望

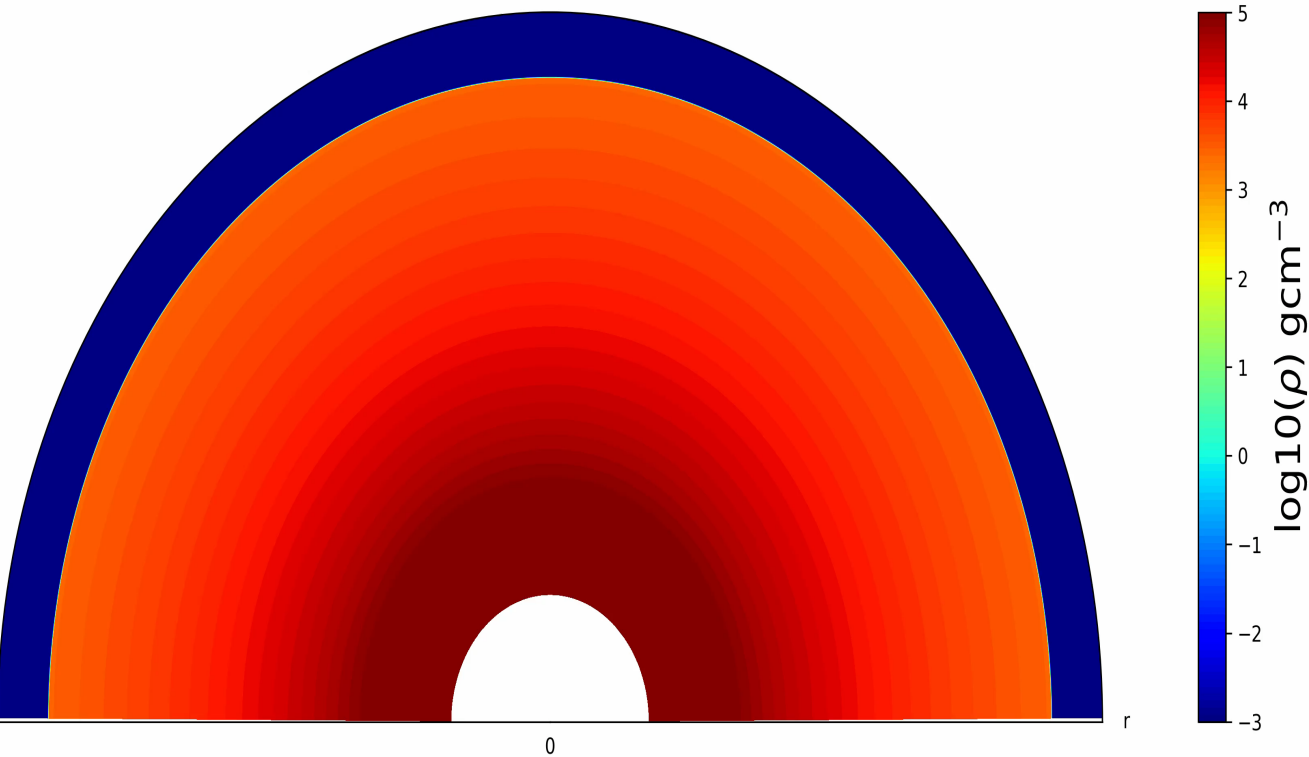
- 数値シミュレーションで生まれるジェットプラグという現象は対称性ゆえの人工的効果だとみなされてきたが3次元、非一様な系でも出現する
- 物理的、数値的かどちらであってもシミュレーションが変わるのではっきりさせたい
- AMR+carbuncle freeなソルバーでやってみる
- $\rho \propto r^{-\alpha}$ において不安定になるべきを解析的に解いてみる



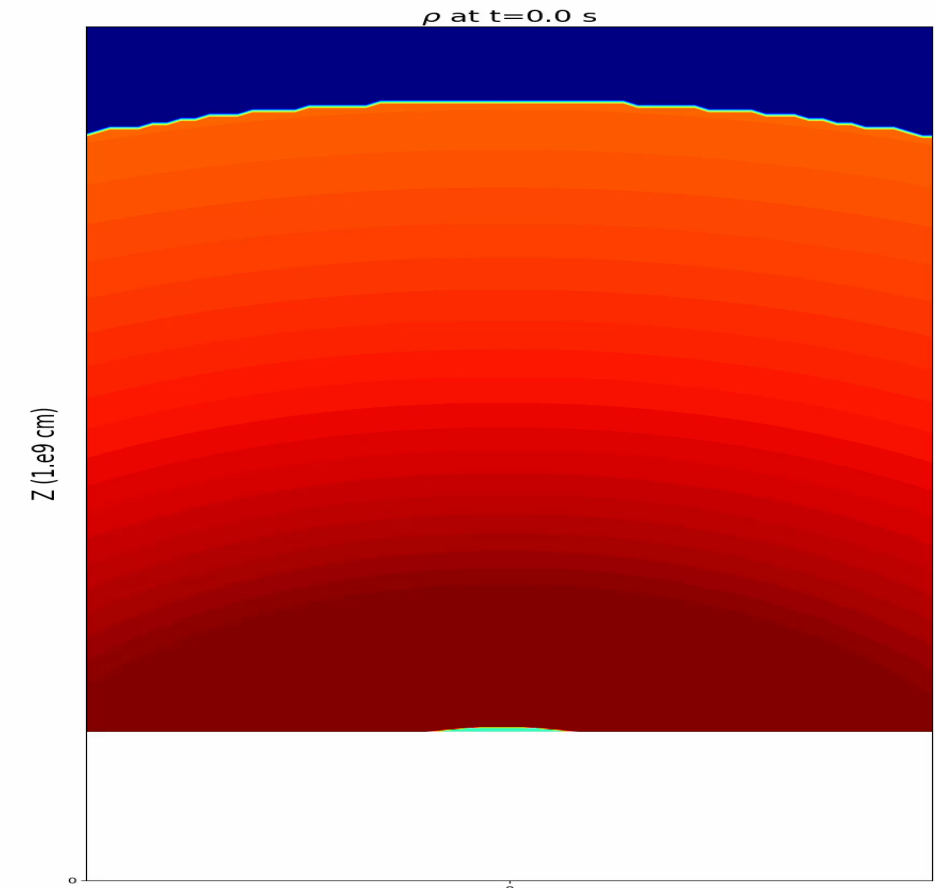
2次元と3次元の違い

座標系は違うがブレイクアウトタイムに大きな差⇒違う問題？

2D



3D



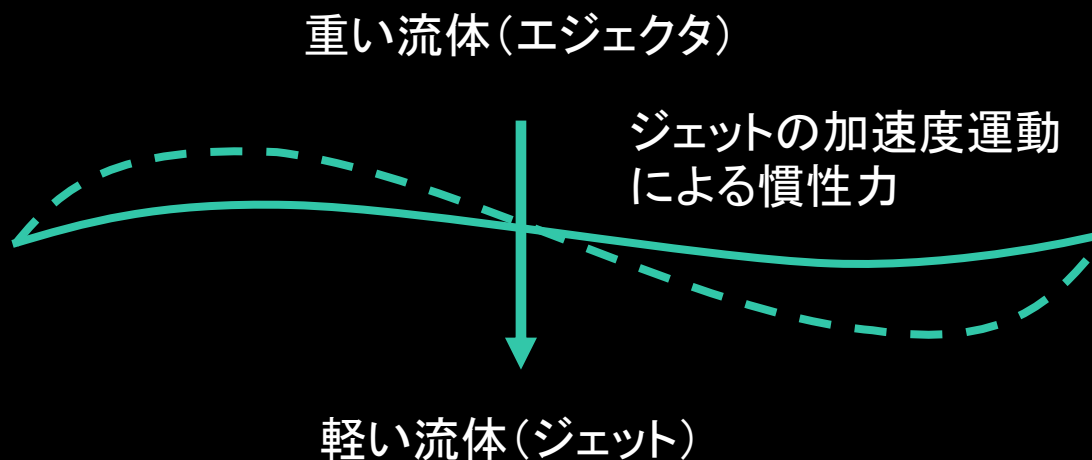
不安定の成長

・ Rayleigh-Taylor不安定

軽いものの上に重いものがあるときに不安定が成長

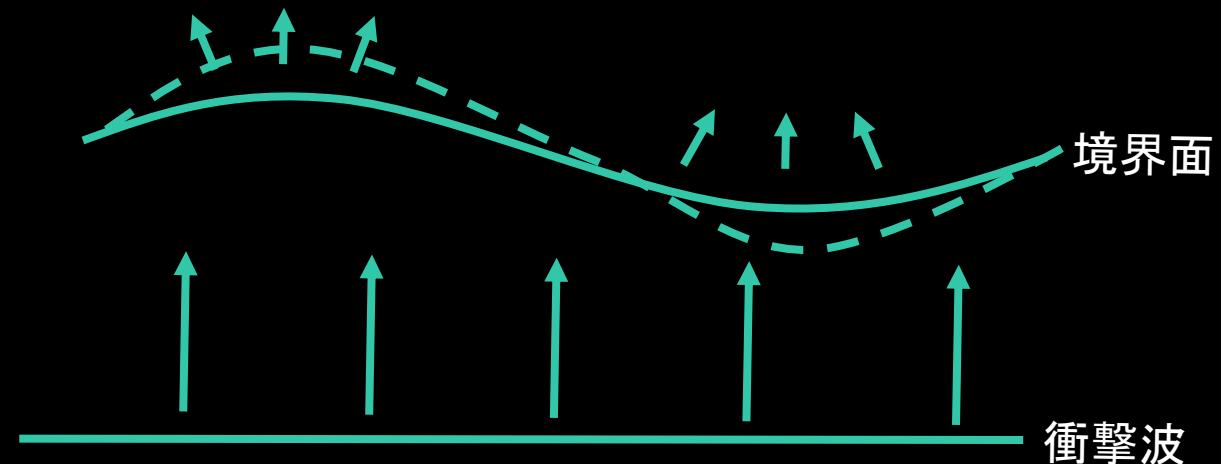
ジェットがエジェクタ中に入る際の加速、減速による加速度が重力としてみなせる

← 加速度小さい時は成長遅い？



・ Richtmyer-Meshkov不安定

平面ではない境界面に衝撃波が当たる際に境界面の歪みが大きくなって不安定が成長



観測パラメータへの影響

- Yalinewich & Beniamini 2022ではプラグを高密度なシェルと考
えて mildly relativistic な物質によって GRB の afterglow におけ
る X線フレアが説明できることを示唆
 - プラグで開き角変わって lightcurve の break の位置もずれる
 - ジェット先端での baryon mixing が多くなる
- ← これらが実際にどれくらい変わるかシミュレーションを通して
定量的に評価したい

コンパクト天体の合体

- 中性子星(NS)同士、あるいはブラックホール(BH)との合体によって重力波とキロノバが放射される
- 重力波、電磁波で強重力天体についての手がかりを得られる

