

J09c

# Scaling of the Anomalous Boost in Relativistic Jet Boundary Layer

(相対論ジェット境界層の異常加速のスケールリング)

銭谷 誠司

Michael Hesse, Alex Klimas

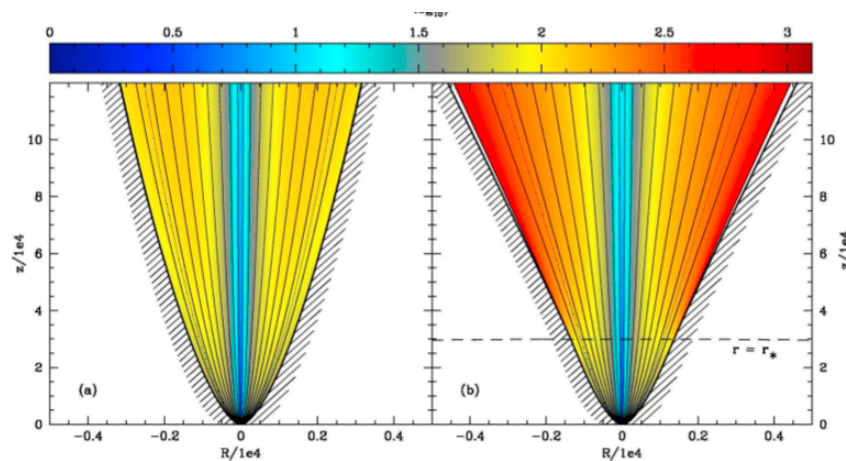
NASA Goddard Space Flight Center

# 相対論ジェット (1/2)

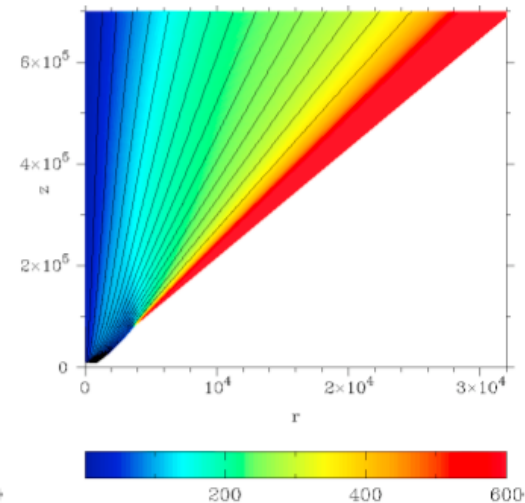
- 活動銀河核、マイクロクエーサー、ガンマ線バースト etc.
- ローレンツ因子  $\gamma \sim 10-10^{2.5}$  の超高速流
- さまざまな未解決問題
  - ジェットの立ち上げ
  - コリメーション
  - 安定性
  - ジェットの終端
- ジェットの境界層素過程
  - KH 不安定、CD Kink 不安定 etc.
  - 系全体の物理を議論するための基礎

## 相対論ジェット (2/2)

- 2000年代半ばから、ローレンツ因子 $\gamma \sim 10^2-10^3$ に達するジェットの相対論磁気流体 (RMHD) シミュレーションが進展
- 同時に不思議な現象が顕在化
- 例：GRBエンジンのコラプサーモデル
  - 中心星から解放されたジェット縁辺部で、 $\gamma$ が急上昇する

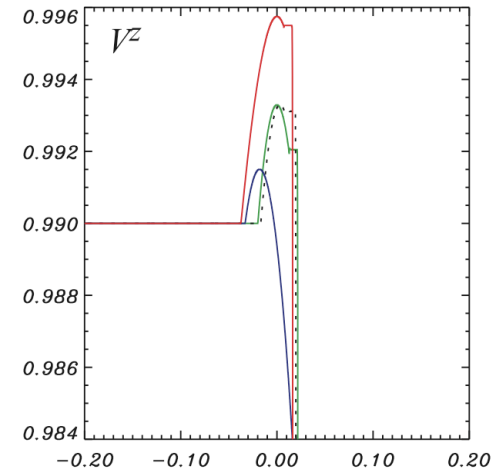
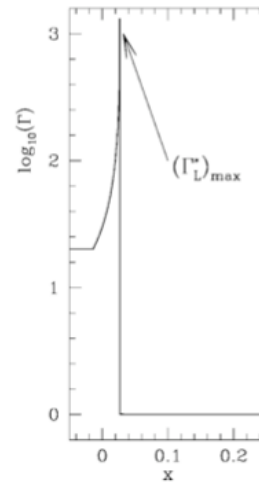
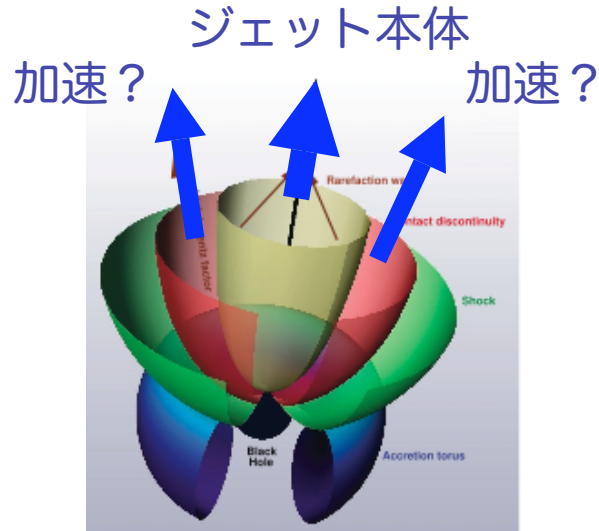


Tchekhovskoy+ 2010 New Astronomy



Komissarov+ 2009 arXiv

# 相対論ジェット境界層の異常加速問題



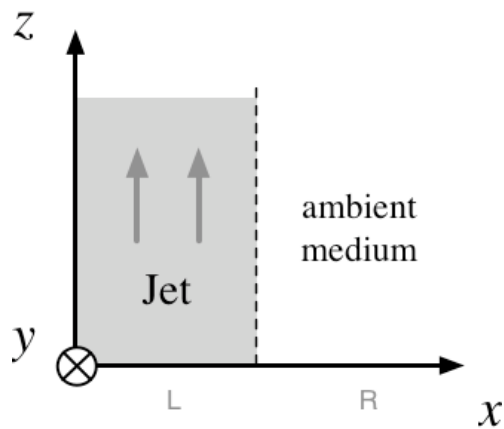
Aloy & Rezzolla 2006 ApJ

Mizuno+ 2008 ApJ

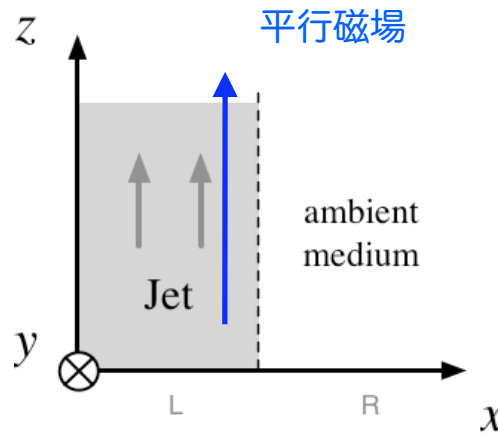
- Aloy & Rezzolla 2006
  - 問題を相対論流体 (RHD) の1次元問題 (後述) として抽出
  - Rarefaction wave に伴って、境界層内側で異常加速 ( $\gamma$  の上昇) が起きる
- Mizuno+ 2008
  - RMHD で異常加速を確認。磁場の向きも影響
- Zenitani+ 2010 **本研究**
  - この問題を理論的に検証。

# 問題設定

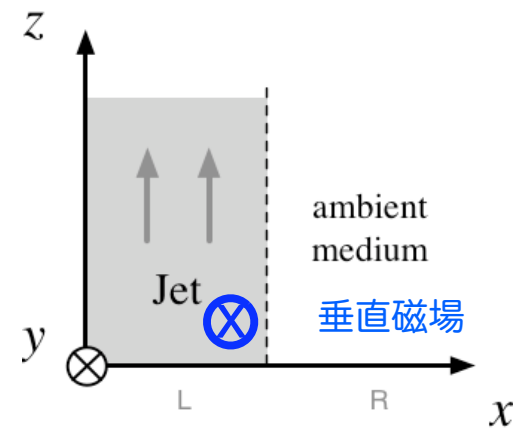
- 高圧高速ジェットと周辺ガスの境界層の1次元発展 (x方向)
- 磁場あり/なしの3モデルを想定
- シミュレーションと理論の両面から検証



H1モデル (RHD)



M1 (RMHD)



M2 (RMHD)

Table 1  
List of Simulation Models

Model	Left										Right								
	$\rho_L$	$p_{g,L}$	$v_{x,L}$	$v_{y,L}$	$v_{z,L}$	$\gamma_{jet}$	$B_{x,L}$	$B_{y,L}$	$B_{z,L}$	$p_{t,L}$	$\rho_R$	$p_{g,R}$	$v_{x,R}$	$v_{y,R}$	$v_{z,R}$	$B_{x,R}$	$B_{y,R}$	$B_{z,R}$	$p_{t,R}$
H1 (RHD)	0.1	10	0	0	0.99	7	0	0	0	10	1	1	0	0	0	0	0	0	1
M1 (RMHD)	0.1	2	0	0	0.99	7	0	0	4	10	1	1	0	0	0	0	0	0	1
M2 (RMHD)	0.1	2	0	0	0.99	7	0	28	0	10	1	1	0	0	0	0	0	0	1

# RMHD コード (1/2)

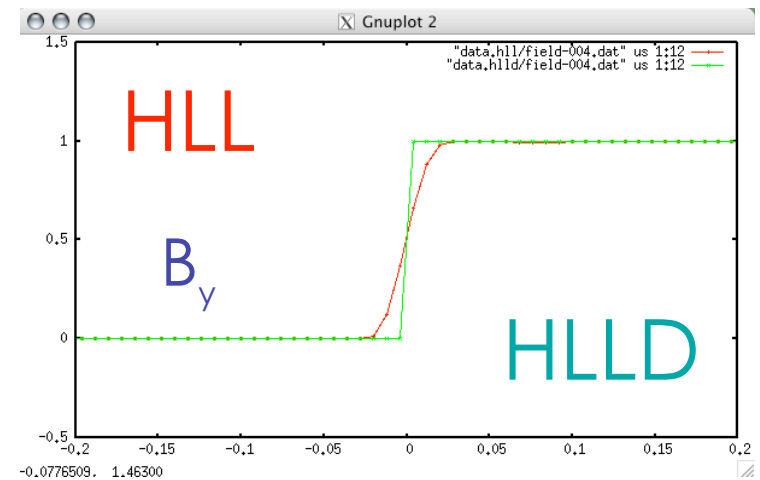
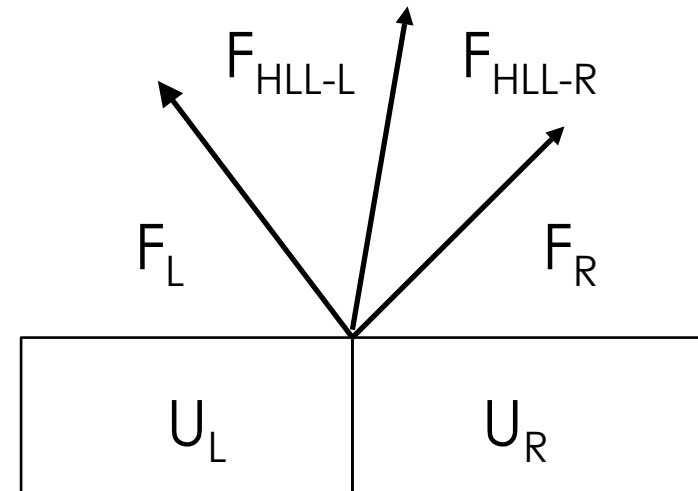
- ・ 相対論理想磁気流体 (RMHD) 方程式 (Anile 1989)

連続	$\partial_t(\gamma\rho) + \nabla \cdot (\gamma\rho\mathbf{v}) = 0$	$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{m} = \gamma^2 w_t \mathbf{v} - b_0 \mathbf{b} = \gamma^2 \rho h \mathbf{v} + (\mathbf{E} \times \mathbf{B}) \\ \mathcal{E} = \gamma^2 w_t - b_0 b_0 - p_t \\ \mathbf{b} = (\mathbf{B}/\gamma) + \gamma(\mathbf{v} \cdot \mathbf{B})\mathbf{v} \\ b_0 = \gamma(\mathbf{v} \cdot \mathbf{B}) \\ w_t = \rho h + b^2 = \rho + \Gamma p_g / (\Gamma - 1) + b^2 \\ p_t = p_g + \frac{1}{2} b^2 \\ p_g = \rho T \end{array} \right. \quad b^\alpha = (b_0, \mathbf{b})$
モーメント	$\partial_t \mathbf{m} + \nabla \cdot (\gamma^2 w_t \mathbf{v} \mathbf{v} - \mathbf{b} \mathbf{b} + p_t \mathbf{I}) = 0$	
エネルギー	$\partial_t \mathcal{E} + \nabla \cdot \mathbf{m} = 0$	
磁場	$\partial_t \mathbf{B} + \nabla \cdot (\mathbf{v} \mathbf{B} - \mathbf{B} \mathbf{v}) = 0$	

- ・ 時間発展：2次 TVD Runge-Kutta 法
- ・ 空間補完：MC limiter
- ・ 数値流束：HLLD法 (後述)
- ・ 基本量変換：Mignone & McKinney 2007 の iteration スキーム
- ・ ソースコード：<http://homepage.mac.com/zenitani/research-j.html>

# RMHD コード (2/2) : 近似リーマン解法

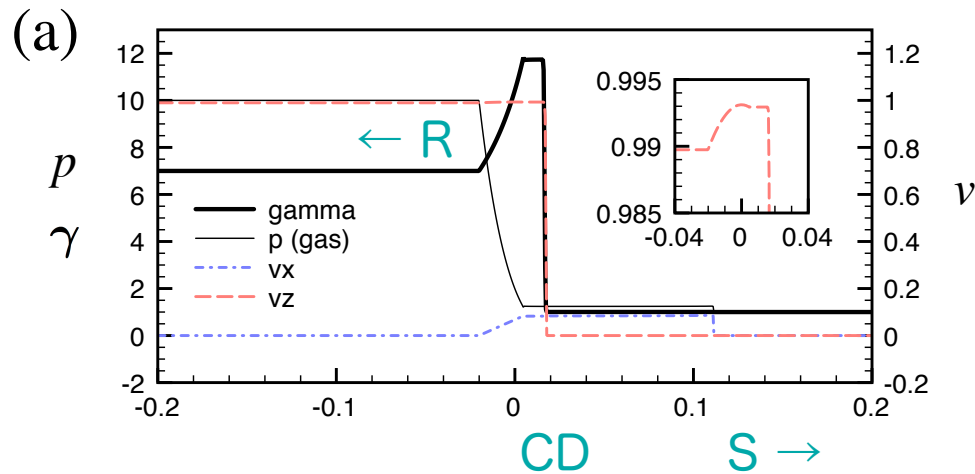
- Tangential Discon. を解くために HLLD 法を採用
- HLLD法
  - Miyoshi & Kusano 05
    - MHD スキーム研究の金字塔
    - Riemann fan 内に複数の状態を想定し、さまざまな不連続面に対応
  - Mignone+ 2009 + errata
    - RMHD に応用
    - 本研究では  $B_x=0$  を仮定し 3つの波を考慮



# シミュレーション結果

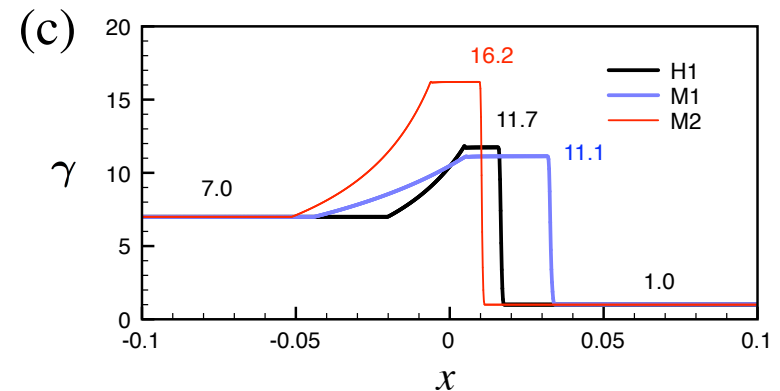
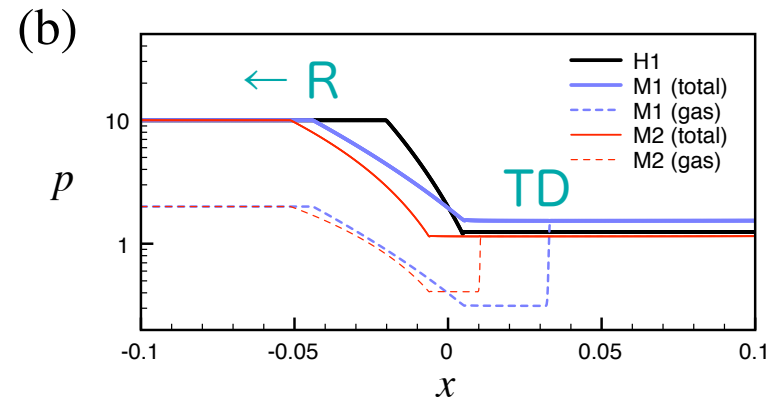
H1 vs M1 vs M2

H1モデル (RHD)



- 縦方向の加速が起きている (Aloy & Rezzolla 2006)

R Rarefaction wave  
 CD Contact Discon.  
 TD Tangential Discon.  
 S Shock



- RMHD モデル (M1, M2) でも TD の Rarefaction 側で  $\gamma$  が上昇
- M2 モデルで顕著 (Mizuno+ 2008)



# 加速源は？

- モーメント&エネルギー式

$$\begin{aligned}\partial_t(\gamma^2 \rho h \mathbf{v}) + \mathbf{v}(\nabla \cdot (\gamma^2 \rho h \mathbf{v})) + \gamma^2 \rho h (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} + \nabla p_g &= 0 \\ \mathbf{v} \partial_t(\gamma^2 \rho h) - \mathbf{v} \partial_t p_g + \mathbf{v}(\nabla \cdot (\gamma^2 \rho h \mathbf{v})) &= 0\end{aligned}$$

$$\longrightarrow \gamma^2 \rho h \frac{D\mathbf{v}}{Dt} = -\nabla p_g - \mathbf{v} \frac{\partial p_g}{\partial t}$$

- z 方向への加速源は  $-\partial_t p$  項
- 内部エネルギー (p) からバルク ( $\gamma$ ) へのエネルギー輸送
- 直感的でないが、相対論流体方程式を閉じるために必要

# 最大ローレンツ因子 ( $\gamma$ ) の見積もり

## • H1 モデル

- 単位質量あたりのモーメント保存則
- $v_z \sim c$  の極限
- Polytropic law と組み合わせて
- 圧力バランスからスケール則を導出

$$\gamma \rho \frac{D}{Dt} (\gamma h v_z) = 0$$

$$\gamma T = \gamma (p_g / \rho) \sim \text{const.} \quad \times$$

$$\gamma p_g^{(\Gamma-1)/\Gamma} \sim \text{const.}$$

$$\gamma_{\text{BL}} \sim \gamma_{\text{jet}} \left( \frac{p_{g,L}}{p_{g,D}} \right)^{(\Gamma-1)/\Gamma} \lesssim \gamma_{\text{jet}} \left( \frac{p_{g,L}}{p_{g,R}} \right)^{1/4}.$$

## • M1 モデル

- フラックス保存
- 圧力バランス
- 同じスケール則 (一般化バージョン)

$$\frac{B_z}{\gamma \rho} = \text{const.} \quad \gamma B_z^{(\Gamma-1)/(2-\Gamma)} \sim \text{const.}$$

$$p_{g,L} \left( \frac{\gamma_{\text{jet}}}{\gamma_{\text{BL}}} \right)^{\Gamma-1} + \frac{B_{z,L}^2}{2} \left( \frac{\gamma_{\text{jet}}}{\gamma_{\text{BL}}} \right)^{\frac{2(2-\Gamma)}{\Gamma-1}} \sim p_{t,D} \gtrsim p_{t,R}.$$

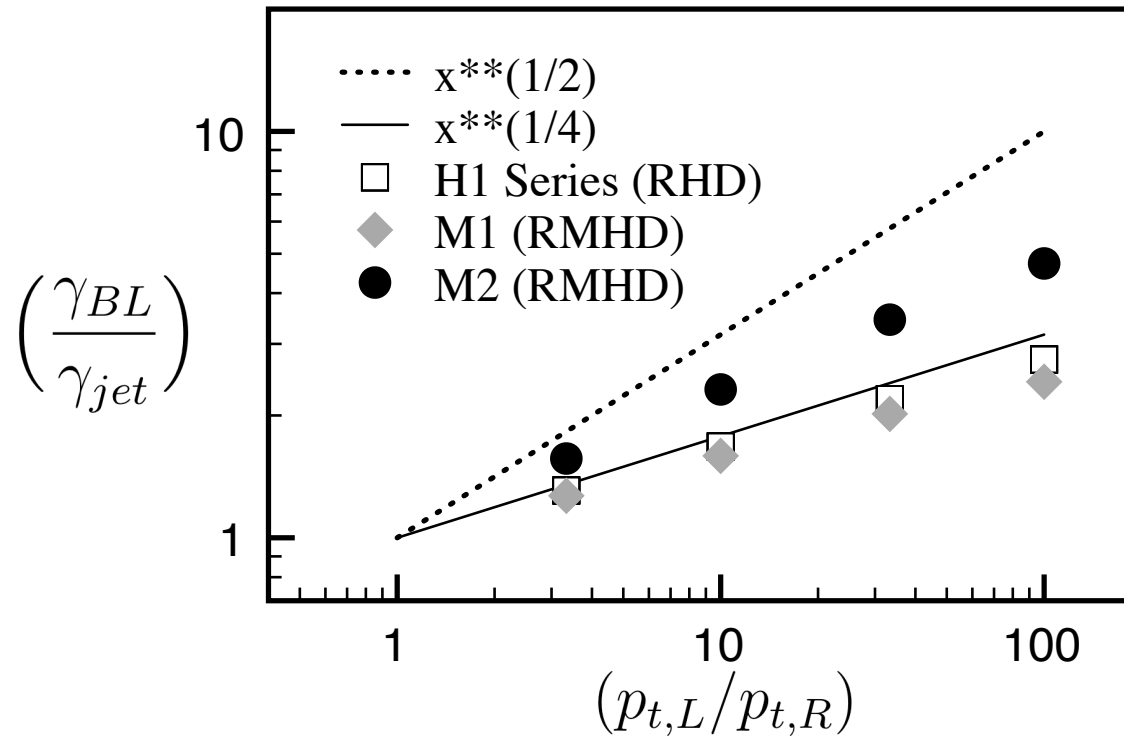
$$\gamma_{\text{BL}} \lesssim \gamma_{\text{jet}} \left( \frac{p_{t,L}}{p_{t,R}} \right)^{1/4}$$

## • M2 モデル

- (中略) 強磁場の極限で

$$\gamma_{\text{BL}} \lesssim \gamma_{\text{jet}} \left( \frac{p_{t,L}}{p_{t,R}} \right)^{1/2}$$

# シミュレーション vs スケール則



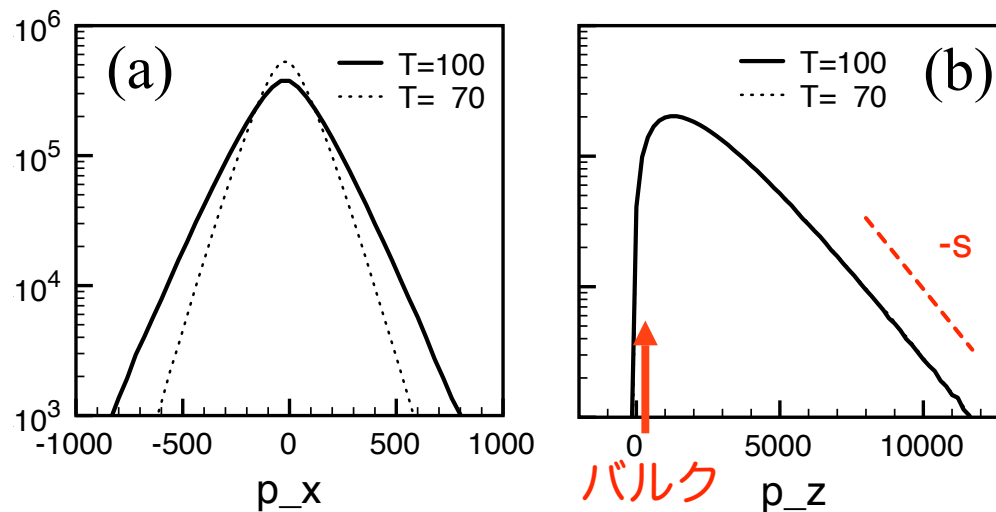
- M2モデルも、強磁場の極限で理論値に近づく（ただし計算は不安定）

# 運動論的考察

- 同じ条件下の相対論 Maxwell 分布を作ってみる

$$f(\mathbf{p})d\mathbf{p} \propto \exp\left[-\frac{\gamma(p_0 - \beta p_z)}{T}\right]d\mathbf{p},$$

- $T=100, \gamma=7$  vs  $T=70, \gamma=10$

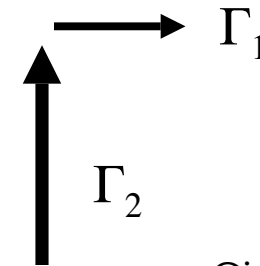


$$s \sim -\frac{1}{2\gamma T} \sim \text{const.} \quad \times$$

- 異常加速の条件は  $\gamma > 1, T \gg 1$
- このとき、バルク速度は高温熱分布の広がりより遥かに小さい
  - エネルギー・モーメント密度を保ちつつ、(無理矢理) 等方分布を作る条件が  $\times$
  - 慣性 ( $\sim 4p$ ) と速度が違うガスが混じると、Heat flow が現れる。  $\Leftrightarrow$  等方近似

# Discussion

- なぜ rarefaction wave が必要なのか？ (Aloy & Rezzolla 2006)
  - 構造がフラットなショック近傍では  $-\partial_{tp}$  項が現れない
- 見かけ効果？
  - 横方向の拡散 ( $\Gamma_1$ ) + 系全体の移動 ( $\Gamma_2$ )  
→ ローレンツ因子は  $\Gamma_3 = \Gamma_1 \Gamma_2$
  - $-\partial_{tp}$  項による異常拡散が現れる → 異常加速として投影
  - ジェット側を同時にリリースするわけではないので  
厳密には違う問題 (同時刻の相対性)
- 多次元不安定
  - 構造を鈍らせる方向
  - 多くのシミュレーションで 1 次元の構造 + 異常加速が見える
- 全ての議論の前提は相対論理想流体
  - 局所局所で等方分布を想定
  - Heat flow · 圧力テンソルの対角項などを無視
  - $-\partial_{tp}$  項 = 理想流体近似の副作用の可能性も



e.g., Giannios+ 2009  
Komissarov+ 2009

# まとめ

- Aloy & Rezzolla (2006), Mizuno+ (2008) の異常加速問題を理論・シミュレーションの両面で検証
- 加速源は相対論特有の  $\partial_t p$  項
- 最大ローレンツ因子のスケール則は

$$\gamma_{\text{BL}} \lesssim \gamma_{\text{jet}} \left( \frac{p_{t,L}}{p_{t,R}} \right)^s \begin{cases} s = 1/4 & \text{RHD, RMHD (平行磁場)} \\ s = 1/2 & \text{RMHD (垂直磁場)} \end{cases}$$

- Question : 理想流体近似にどこまで頼ってよいか？