

相対論的ジェットがガンマ線バースト 残光放射に及ぼす影響の数値的及び解析的研究



くさふか

よう

草深

陽

宇宙線研究所 博士3年

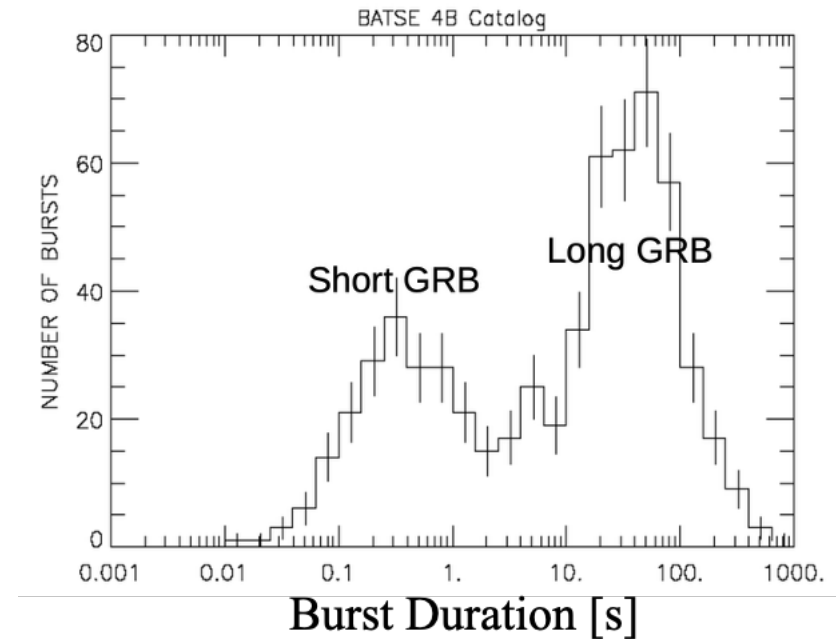
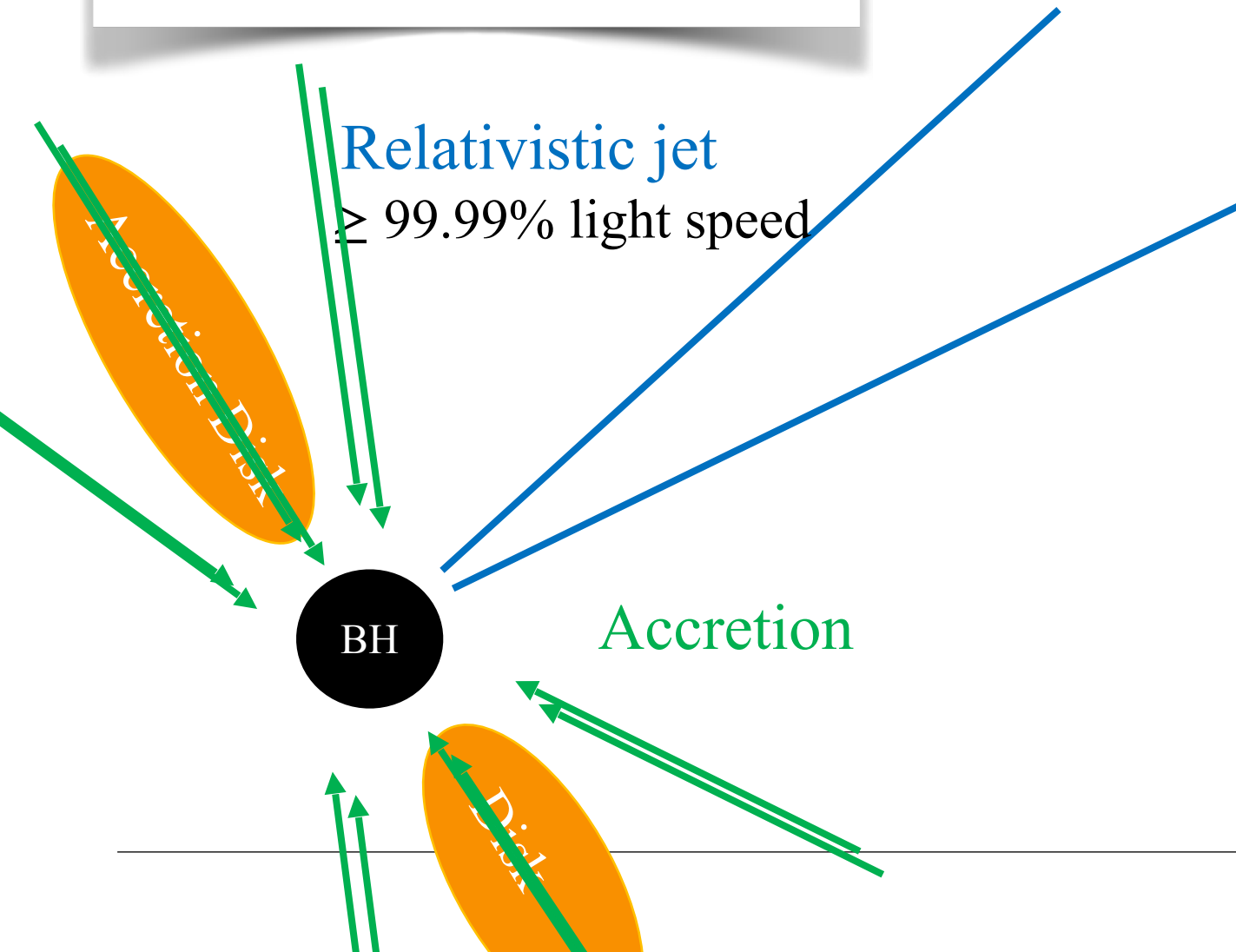
共同研究者：浅野勝晃 (宇宙線研究所)

ガンマ線バースト

相対論的ジェットの中でエネルギー散逸



GRB 即時放射



GRB残光放射

相対論的ジェット
 $\geq$ 光速の99.99%

Accretion Disk

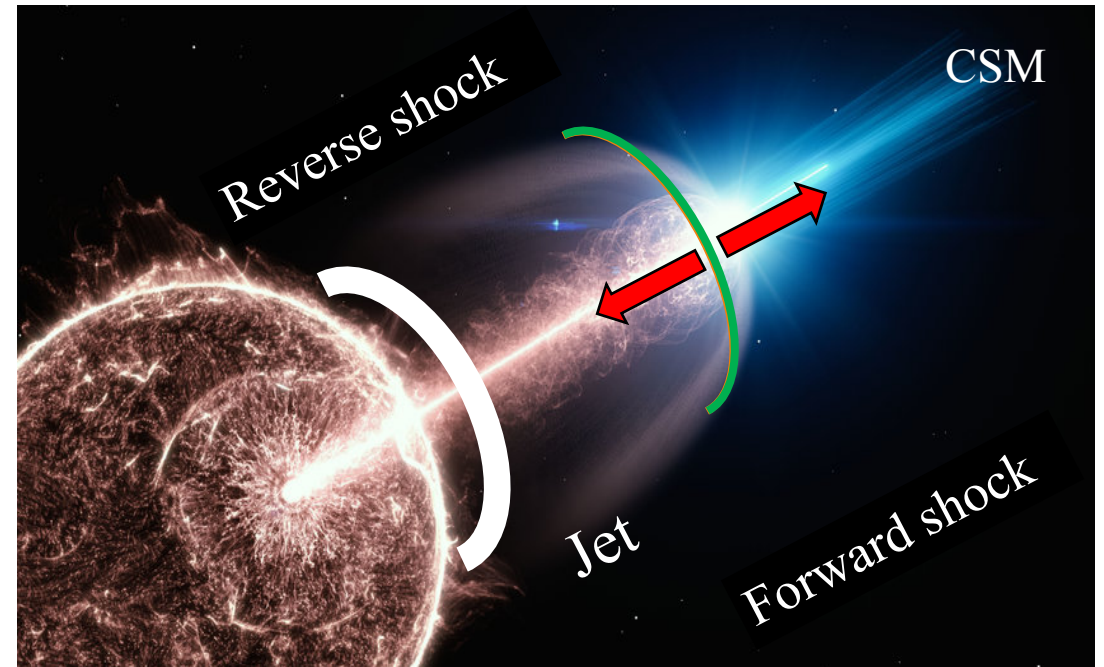
BH

Disk

相対論的ジェットと星周物質(CSM)との衝突

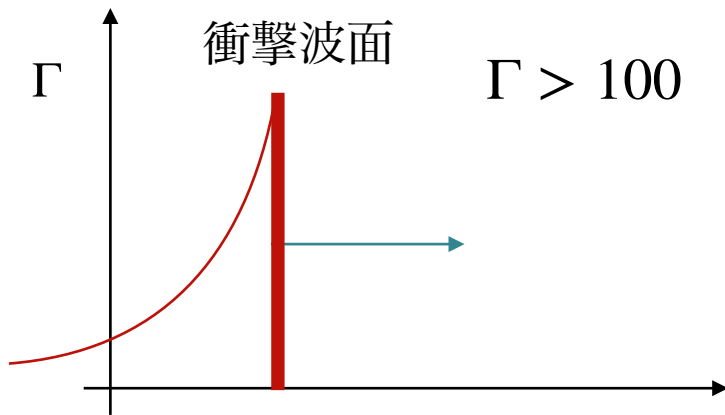


GRB 残光放射

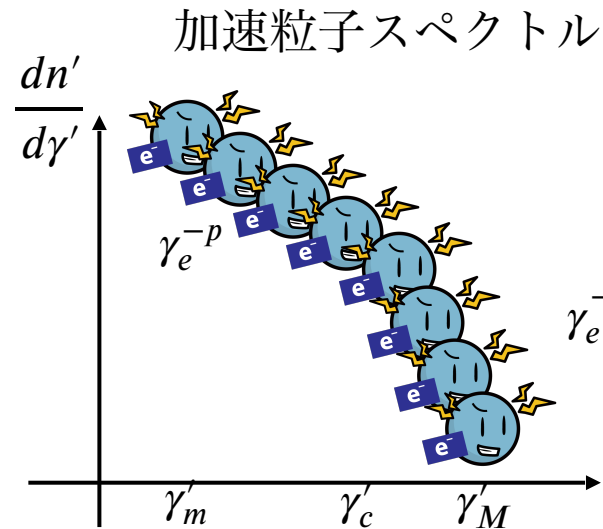


"Thin-Shell" 近似による残光の計算

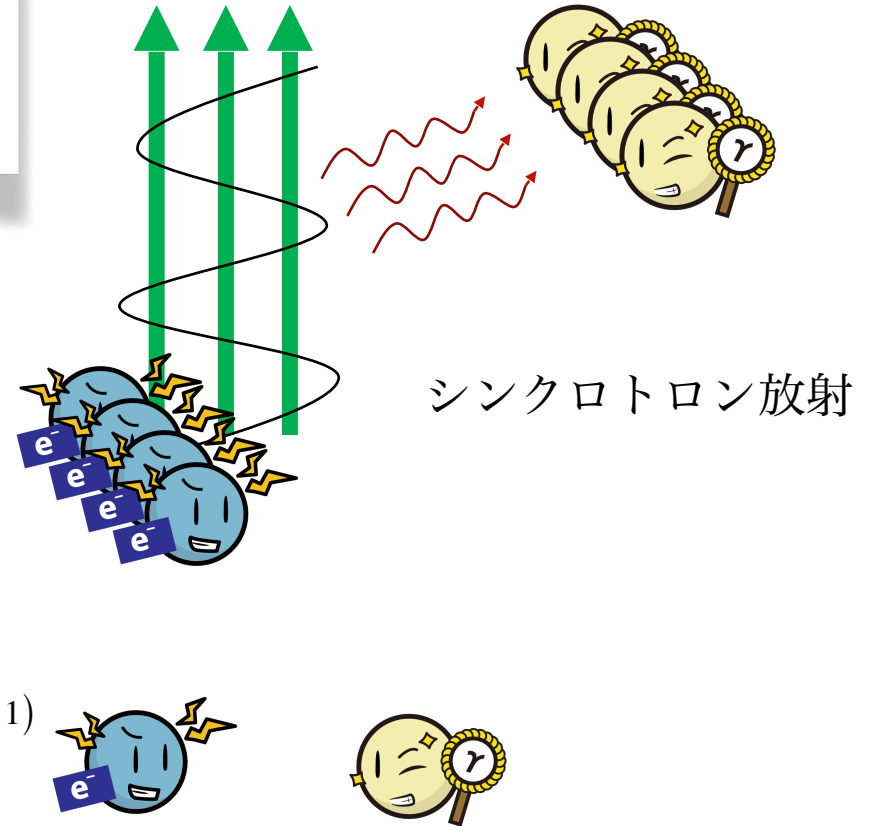
放射率は衝撃波直下が一番高い



$$\text{衝撃波の厚み} \sim \frac{R}{12\Gamma^2}$$



加速粒子分布は定常かつ一様を仮定

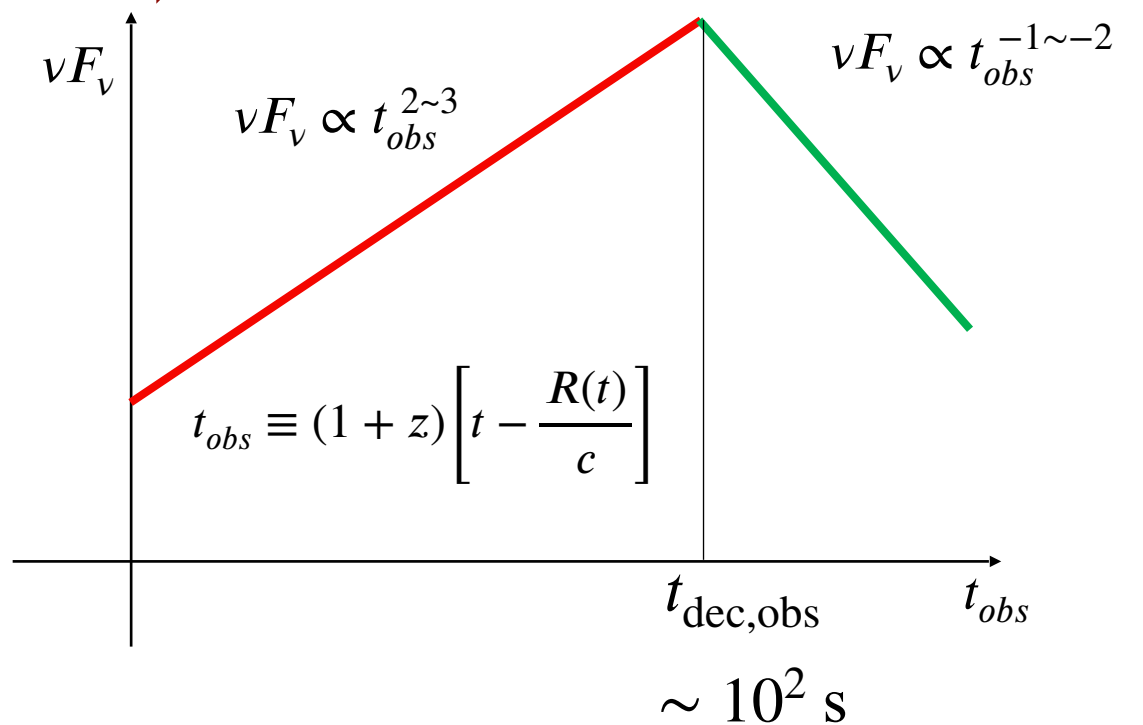
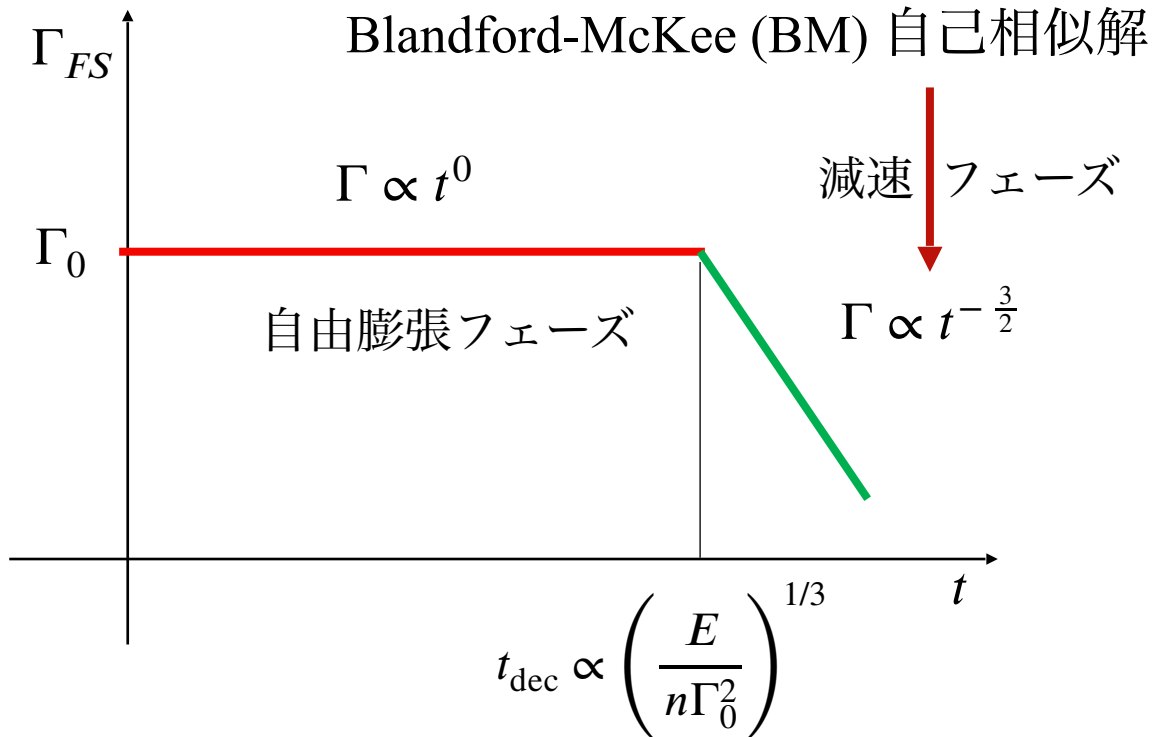


逆コンプトン散乱

GRB残光 標準モデル (20世紀～現在)

衝撃波面の時間進化

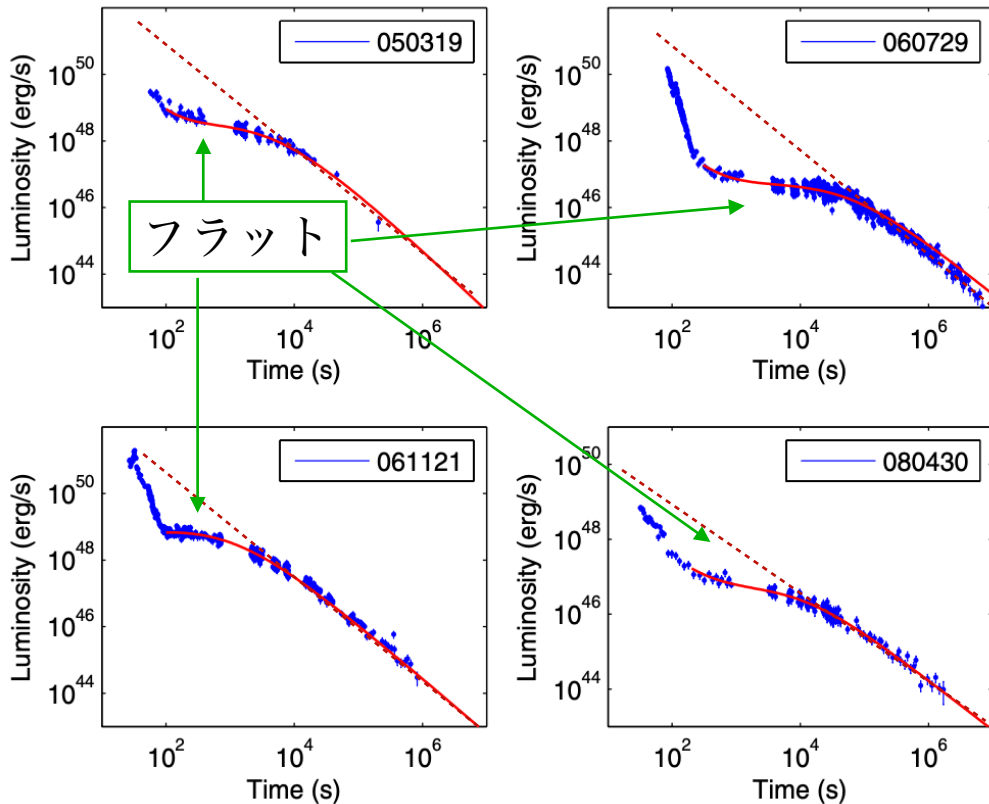
スペクトルの時間進化



減光していく後期残光はよく再現できたねやったね！ おや？どうしたSwiftくん？

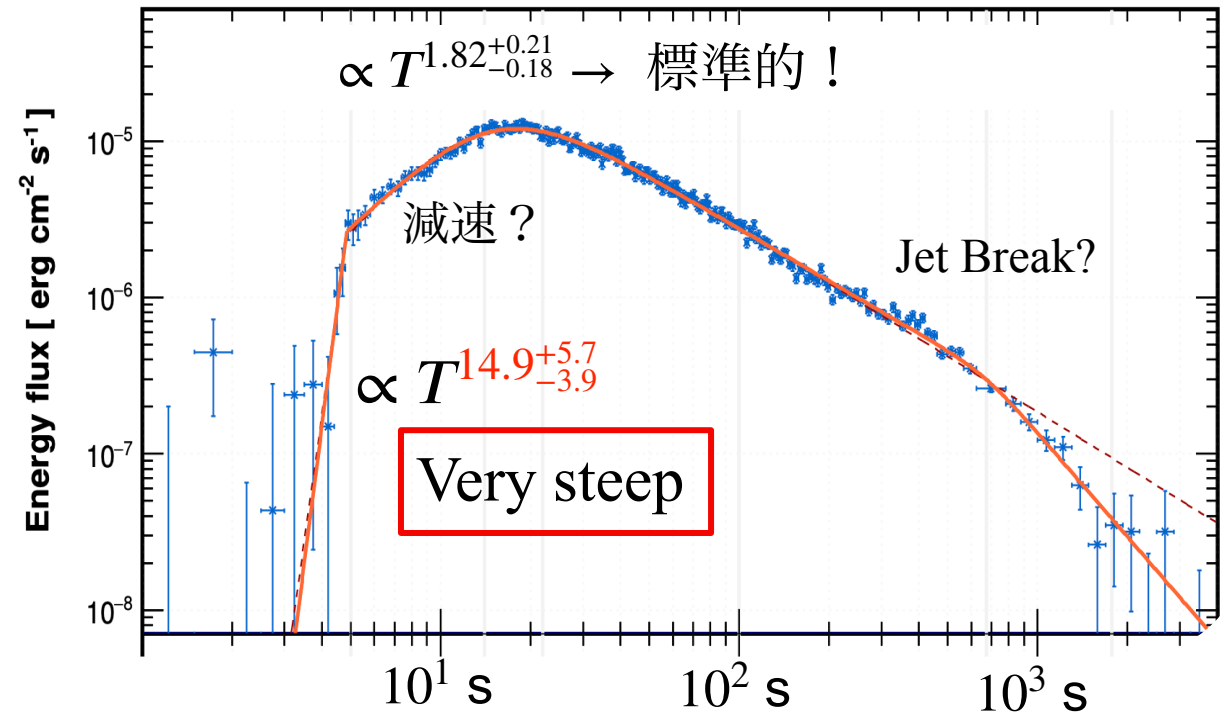
標準モデルから逸脱してます！

大半のX線の初期残光はフラット！



(Dass'Osso et al. 2011)

残光開始直後にTeVガンマ線が急激に増光



LHAASO collaboration (2023)

1次元の流体運動を考慮

Kusafuka & Asano (2025a,b)
Kusafuka et al. (2025a)

Magglow

Kusafuka & Asano (in prep)

1D Rad

"Thin-shell"
近似

衝撃波下流の
構造まで考慮

後期残光の振る舞いをよく再現

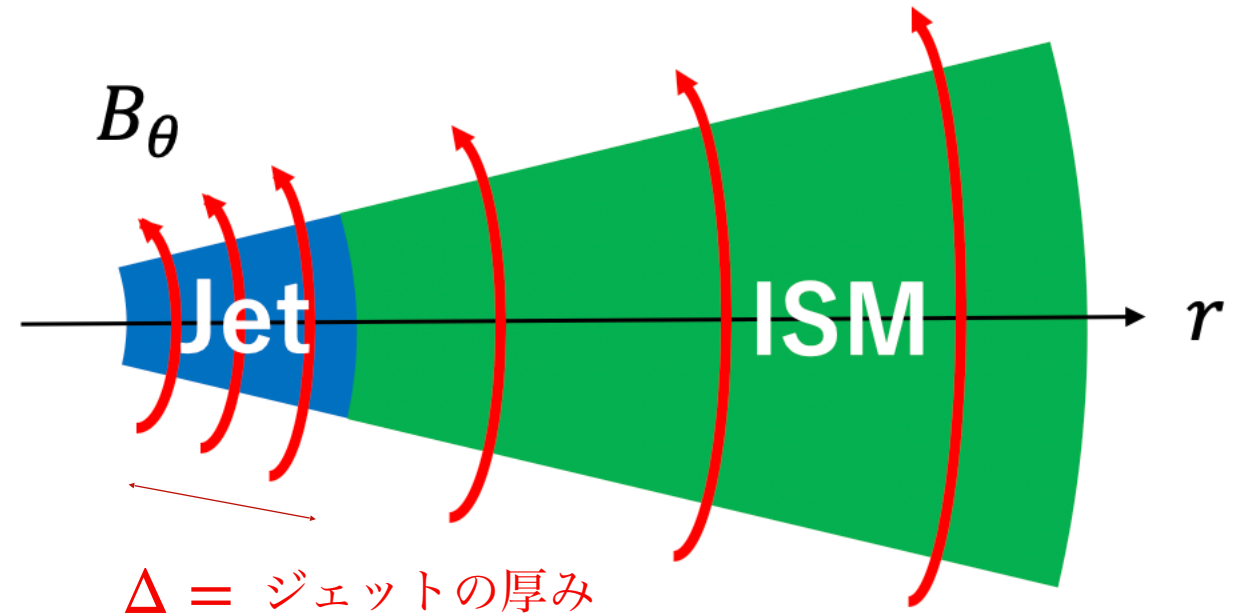
衝撃波面だけ考慮

1D 相対論的磁気流体

1D 相対論的磁気流体方程式

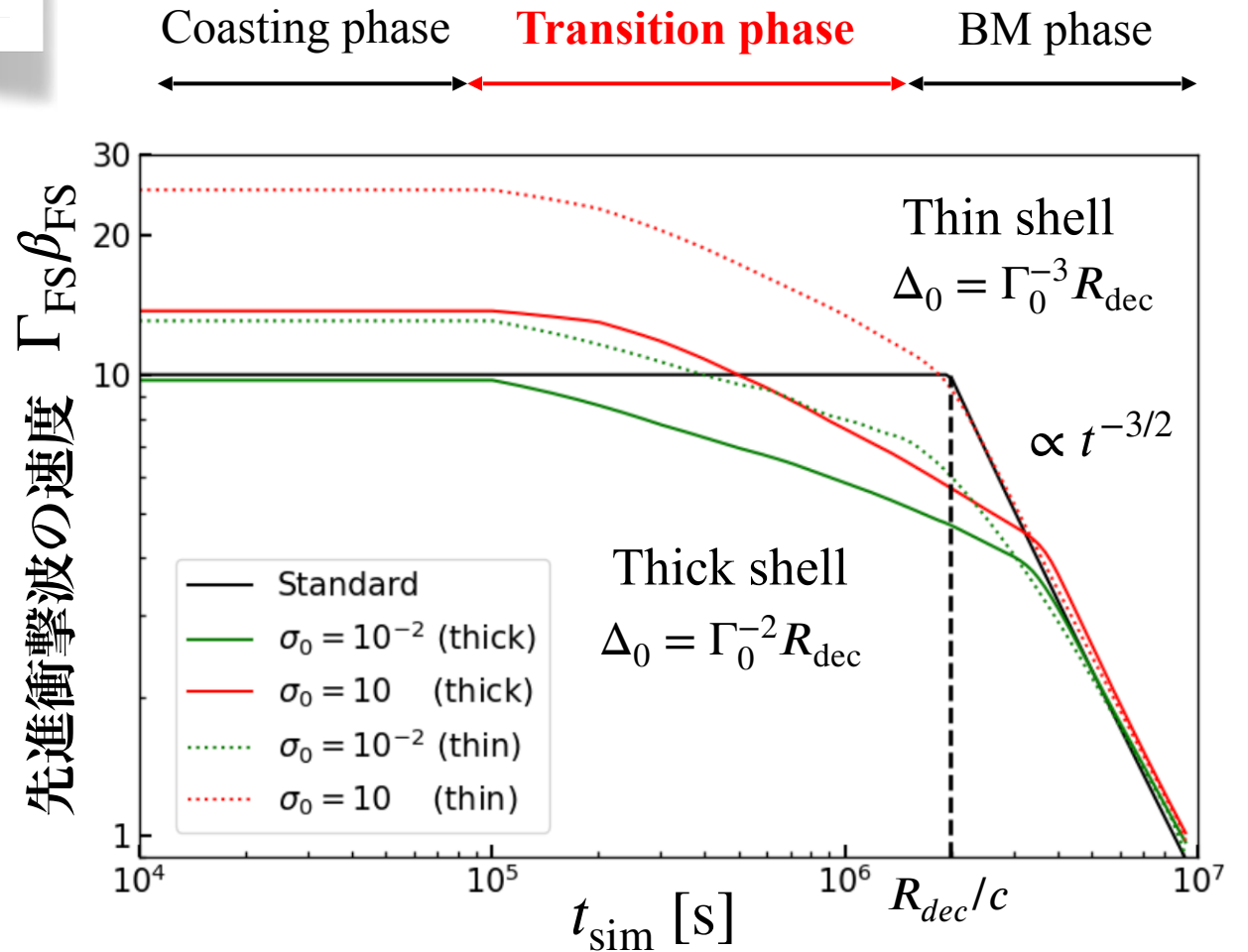
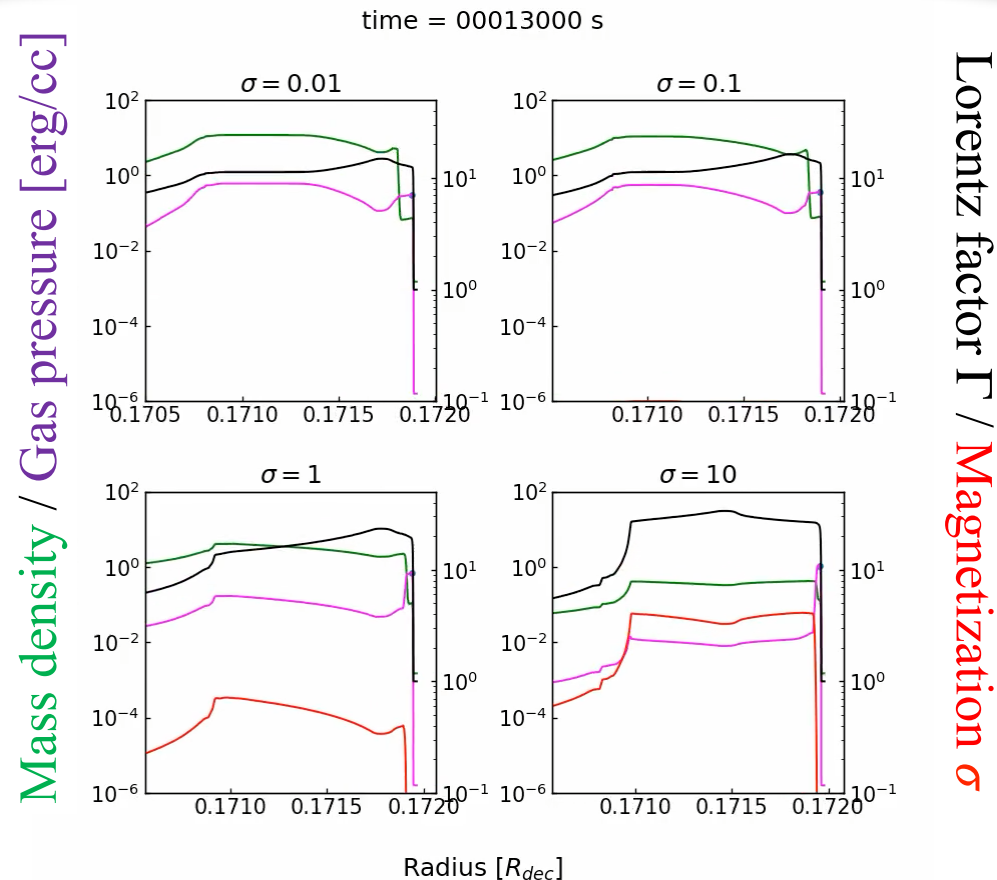
$$\begin{aligned}
 & \cdot \frac{\partial \rho \Gamma}{\partial t} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} r^2 (\rho \Gamma v_r) = 0 && : \text{質量保存} \\
 & \cdot \frac{\partial \tau}{\partial t} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} r^2 (w \Gamma^2 v_r - \rho \Gamma v_r) = 0 && : \text{エネルギー保存} \\
 & \cdot \frac{\partial S}{\partial t} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} r^2 (w \Gamma^2 v_r^2 + p) = \frac{2p}{r} && : \text{運動量保存} \\
 & \cdot \frac{\partial B_\theta}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r (B_\theta v_r) = 0 && : \text{Maxwell方程式} \\
 & \cdot p_g = (\hat{\gamma} - 1)(\epsilon - \rho) && : \text{状態方程式}
 \end{aligned}$$

$$\sigma = \frac{B^2}{4\pi(\epsilon + p_g)\Gamma^2} = \frac{\text{磁場のエネルギー}}{\text{粒子のエネルギー}}$$



衝撃波の運動が変わる

σ, Δ によって減速前の時間進化に多様性

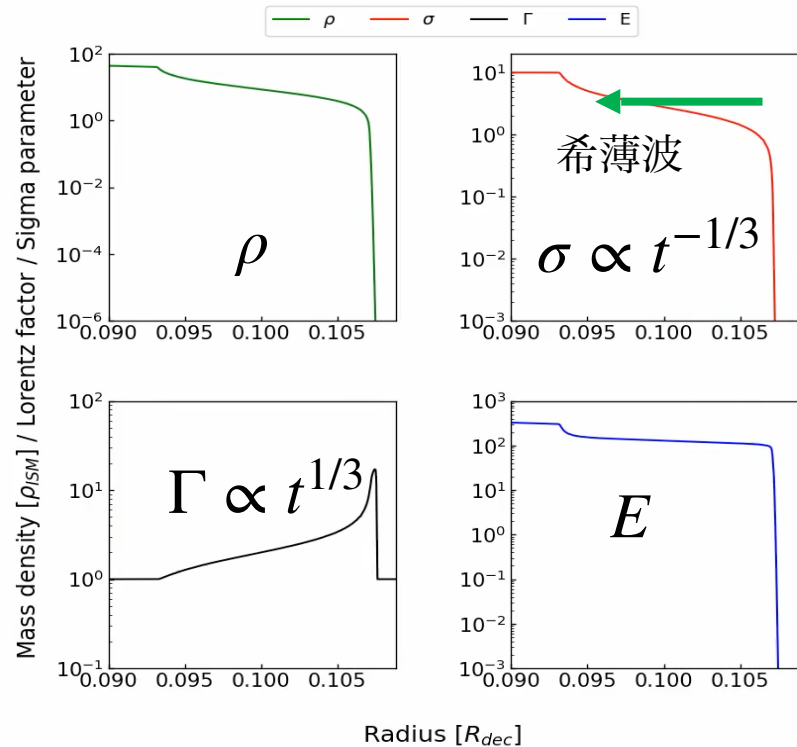


希薄波ってすごい！

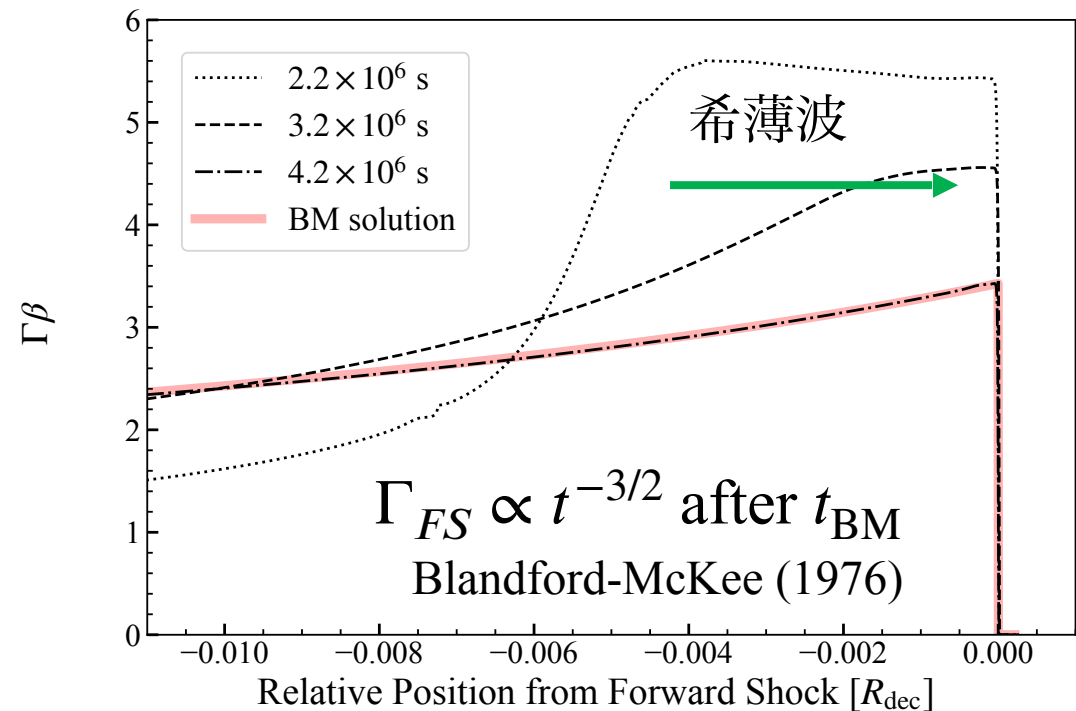
希薄波こそがGRB残光のダイナミクスを決める！

加速を引き起こす

time = 00012900 s

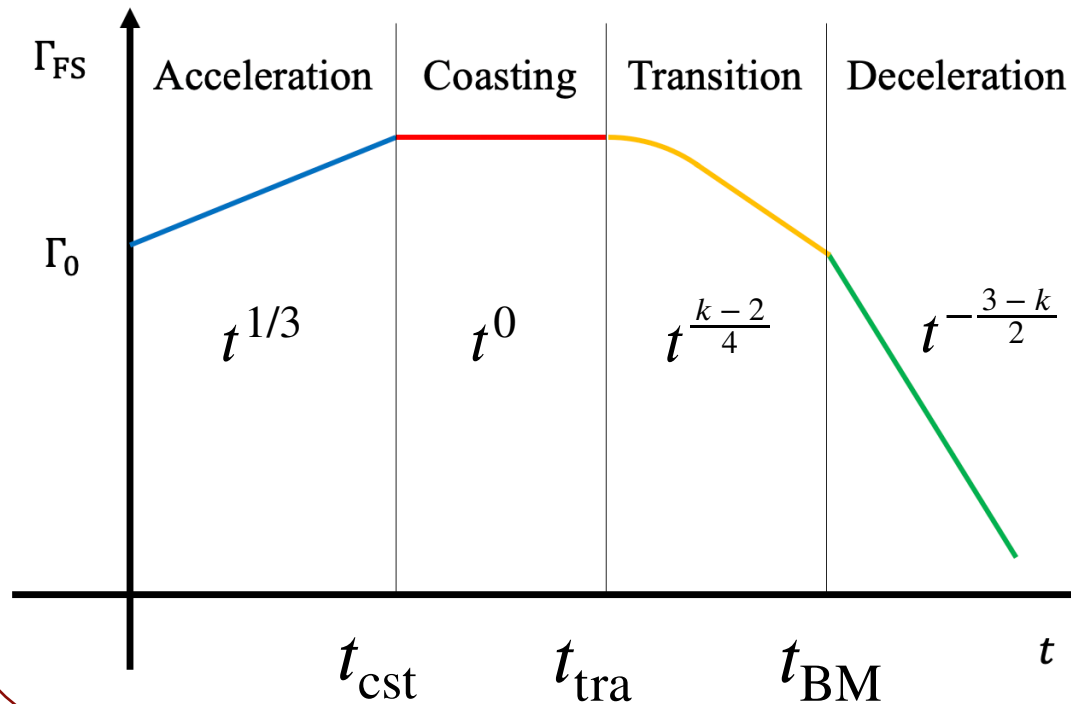


減速を引き起こす



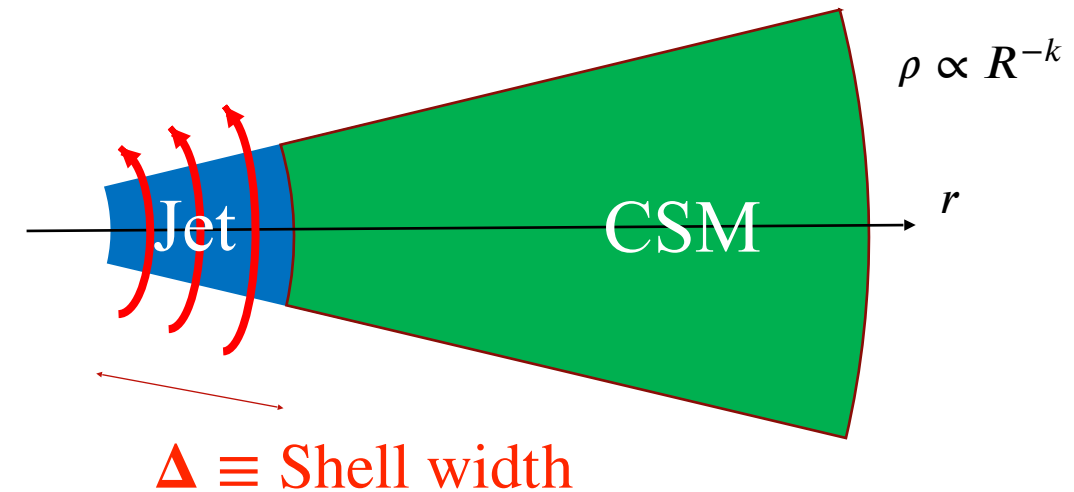
希薄波の効果を解析的にモデリング

Magnetic Bullet



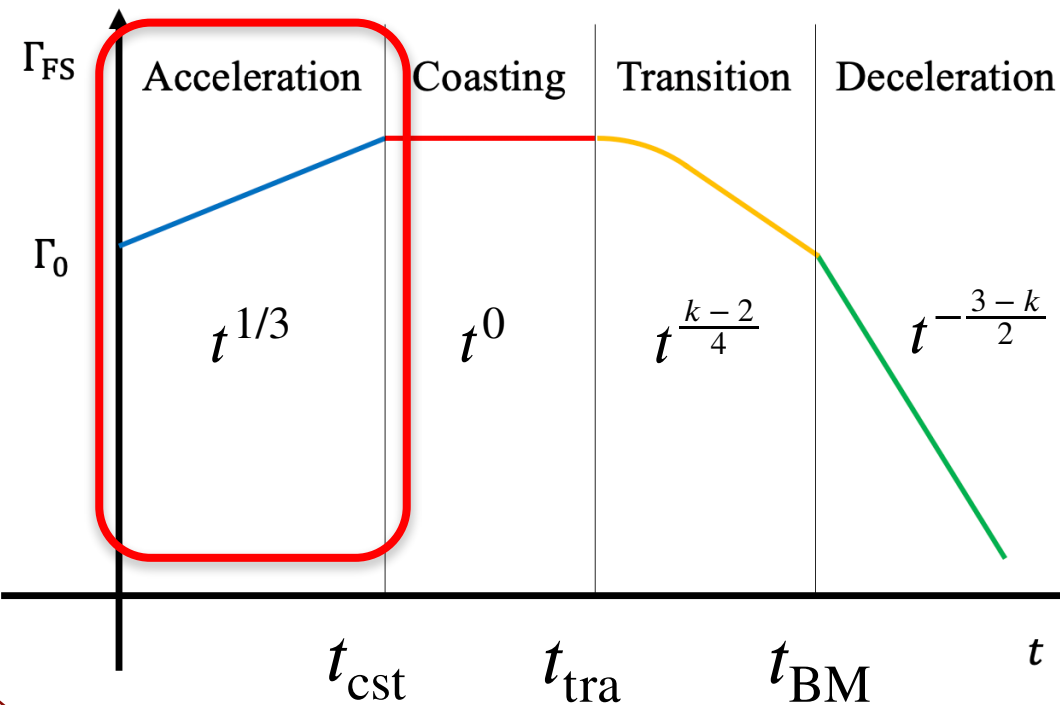
標準モデルに2つのパラメータを追加

$$\sigma \equiv \frac{\text{Poynting flux}}{\text{Matter flux}} = \frac{B^2}{4\pi\rho c^2}$$



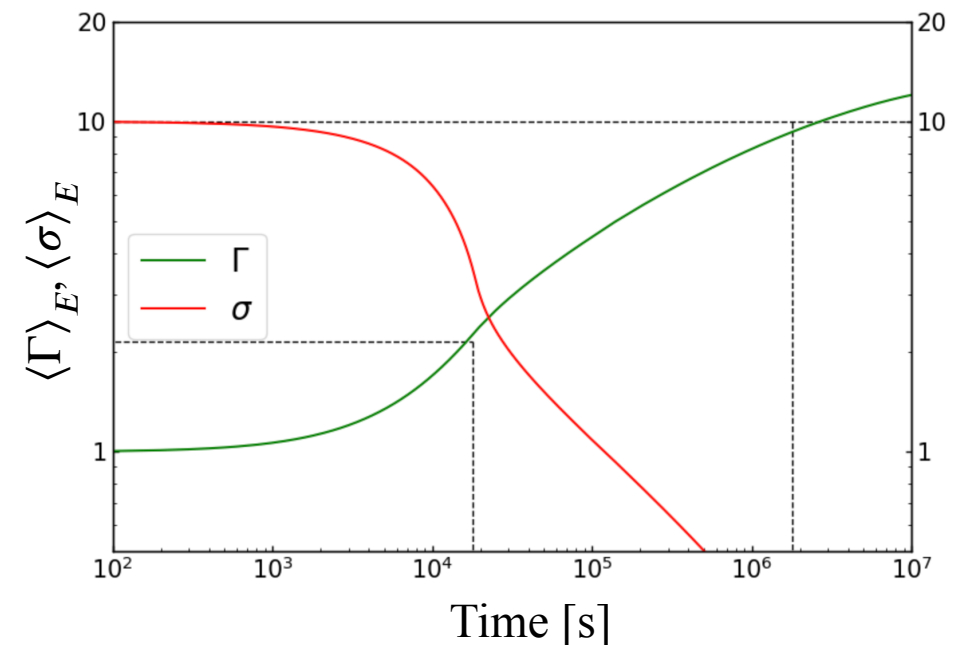
磁気圧加速フェーズ

Magnetic Bullet



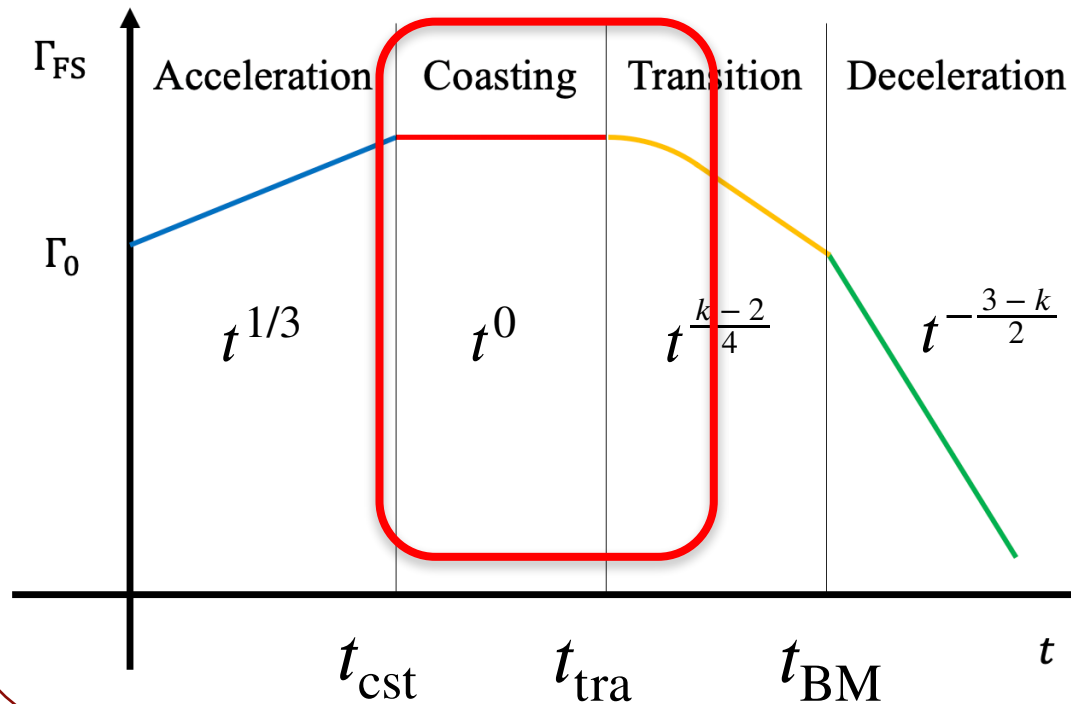
磁気圧加速理論 : Granot et al. (2011)

磁気圧加速率 : $\langle \Gamma \rangle_E = \left(\frac{\sigma_0 c t}{\Delta_0} \right)^{1/3}$



逆行衝撃波の生成と通過

Magnetic Bullet



RS 生成条件 (圧力バランス)

$$\frac{B'^2_{ej}}{8\pi} = \frac{4}{3} \Gamma_{FS}^2 n_0 m_p c^2$$

Zhang & Kobayashi (2005)

RSの生成によって加速は終了する

RS 通過時間

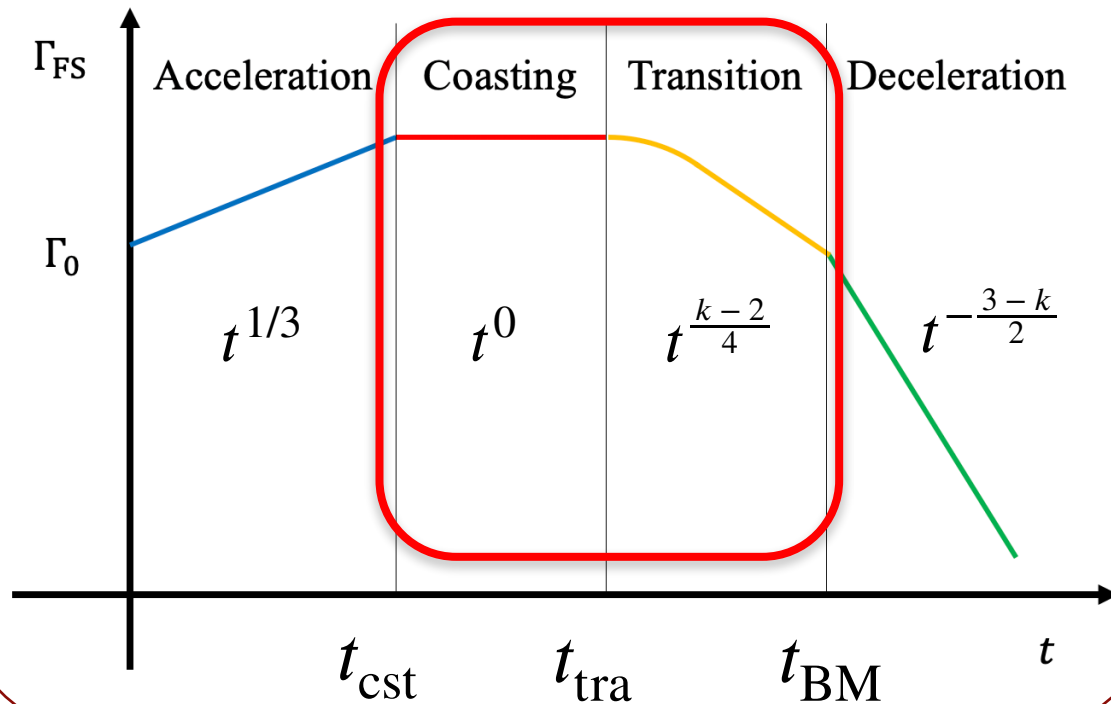
$$t_{\Delta}(\sigma_0) = \Gamma_0^{1/2} R_{dec}^{3/4} \Delta_0^{1/4} (1 + \sigma_0)^{-1/2}$$

Giannios, Mimica & Aloy (2008)

RSの通過以降、希薄波が走り始める

Transition phaseのダイナミクス

Magnetic Bullet



接触不連続面での圧力バランス

$$(1 + \sigma_{RS})(4\Gamma_{rel} + 3)(\Gamma_{rel} - 1)n_{ej} = 4\Gamma_{FS}^2 n_{CSM}$$

$$\Gamma_{FS} = \Gamma_{RS} \simeq \frac{\Gamma_{cst}}{\left[1 + 2\Gamma_{cst} \sqrt{\frac{n_{CSM}}{n_{ej}(1 + \sigma_{RS})}} \right]^{1/2}}$$

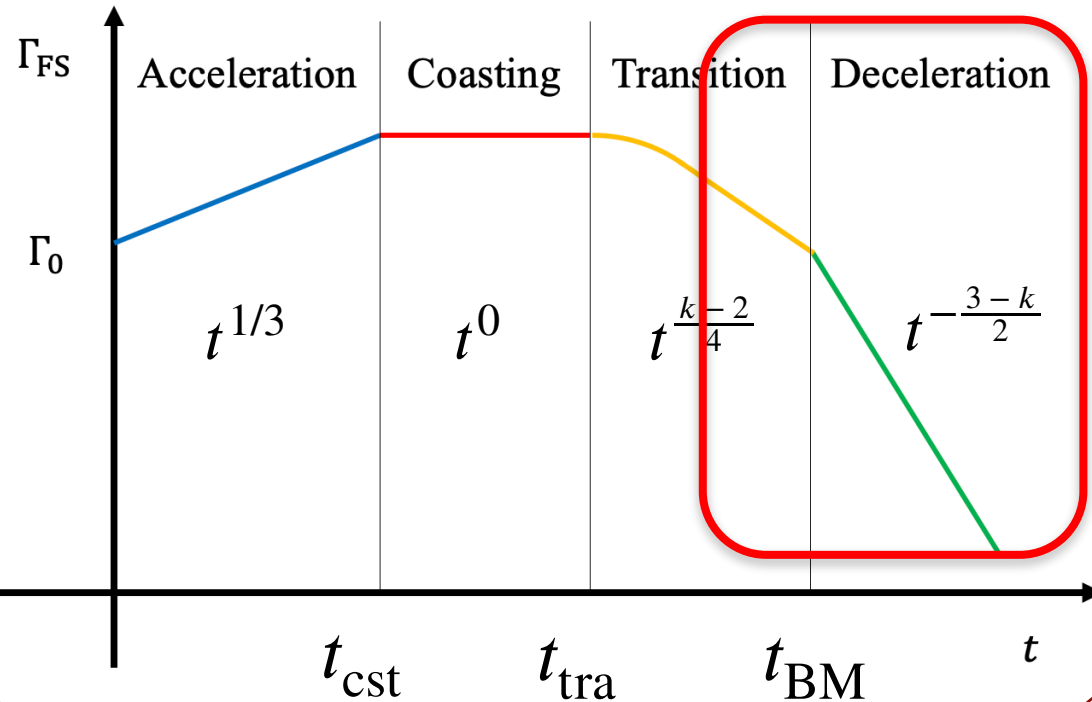
Panaiteescu & Kumar (2004)
Murase (2007) (for $\sigma_{RS} = 0$ case)

Coasting Phase: $\Gamma = \Gamma_{cst}$

➡ Transition Phase: $\Gamma \propto t^{\frac{k-2}{4}}$

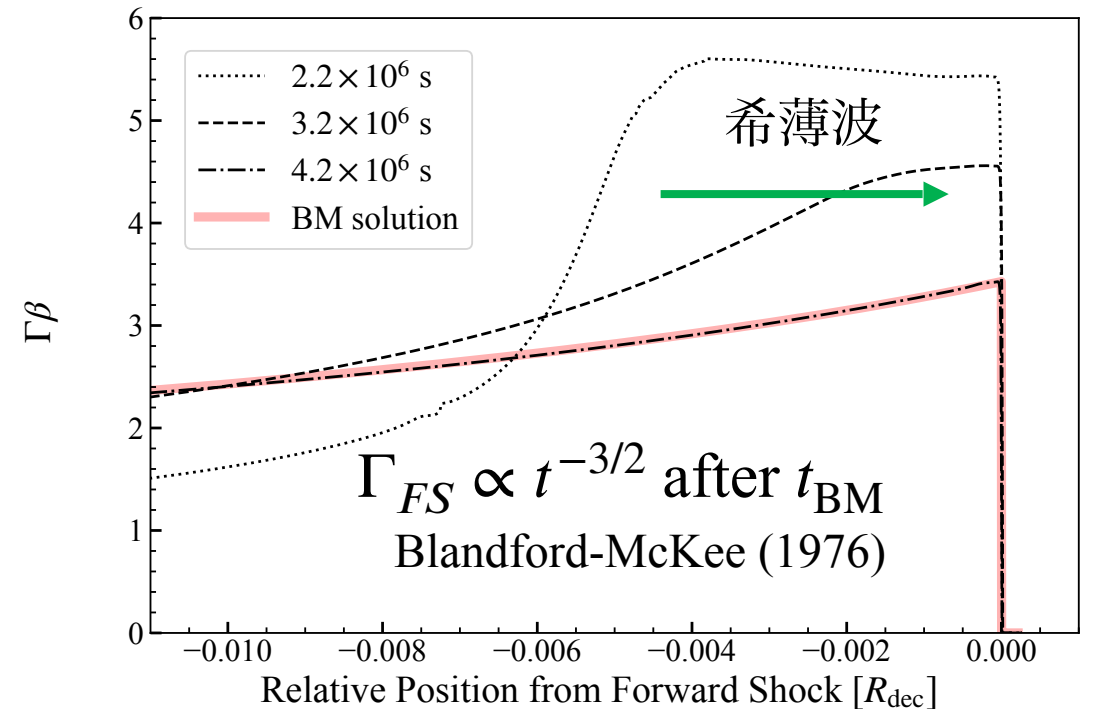
希薄波がFSに到着する時間

Magnetic Bullet



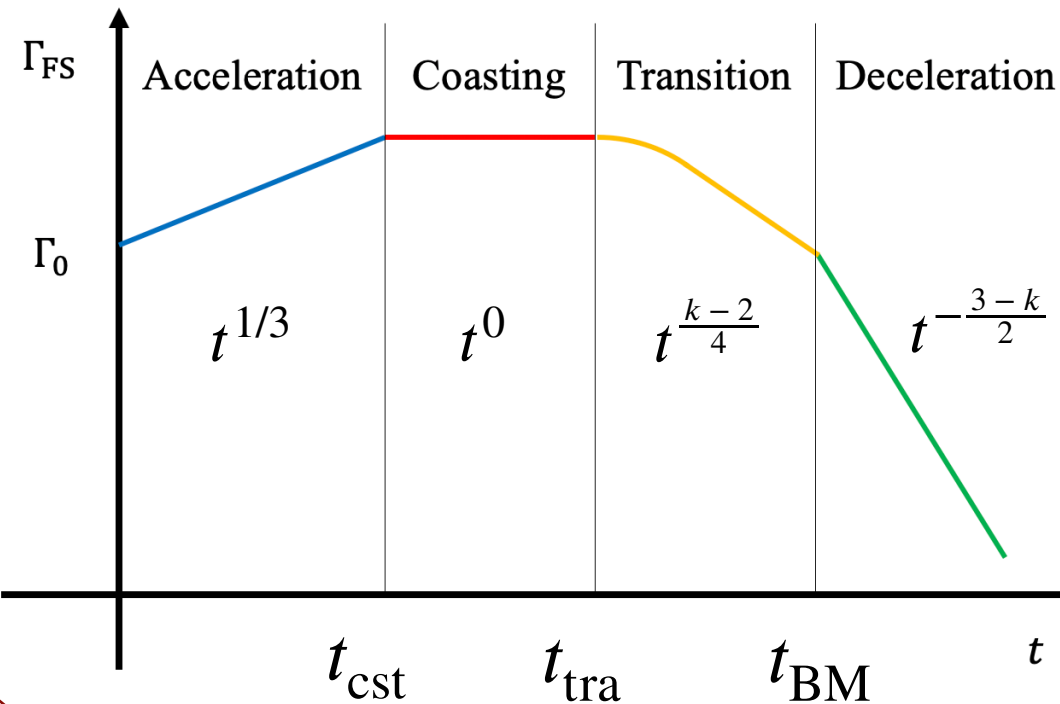
希薄波が到達する時間が真の t_{BM}

$$\Delta = \int_{t_{\Delta}}^{t_{BM}} (c - v_{FS, front}) dt \simeq \int_{t_{\Delta}}^{t_{BM}} \frac{cdt}{4\Gamma_{FS}^2(t)}$$



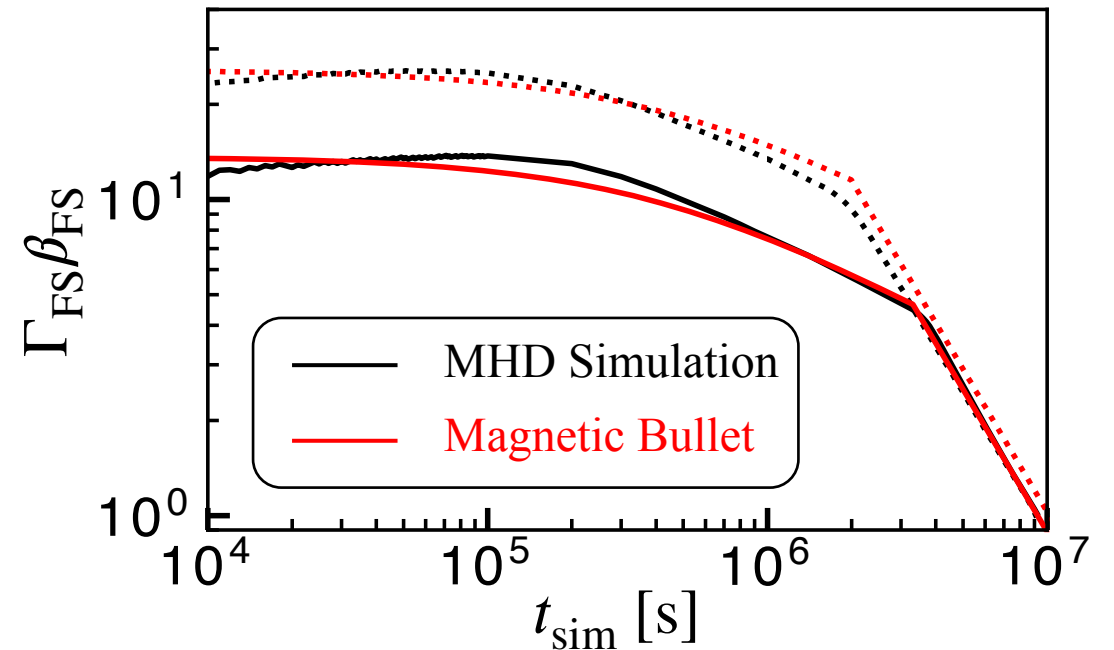
Magnetic Bulletという新しい残光モデル

Magnetic Bullet



数値実験をもとに理論を再構築

$$E_0 = 10^{50}, \Gamma_0 = 10, \sigma_0 = 10, \Delta_0 = R_{\text{dec}}/\Gamma_0^{2\sim 3}$$



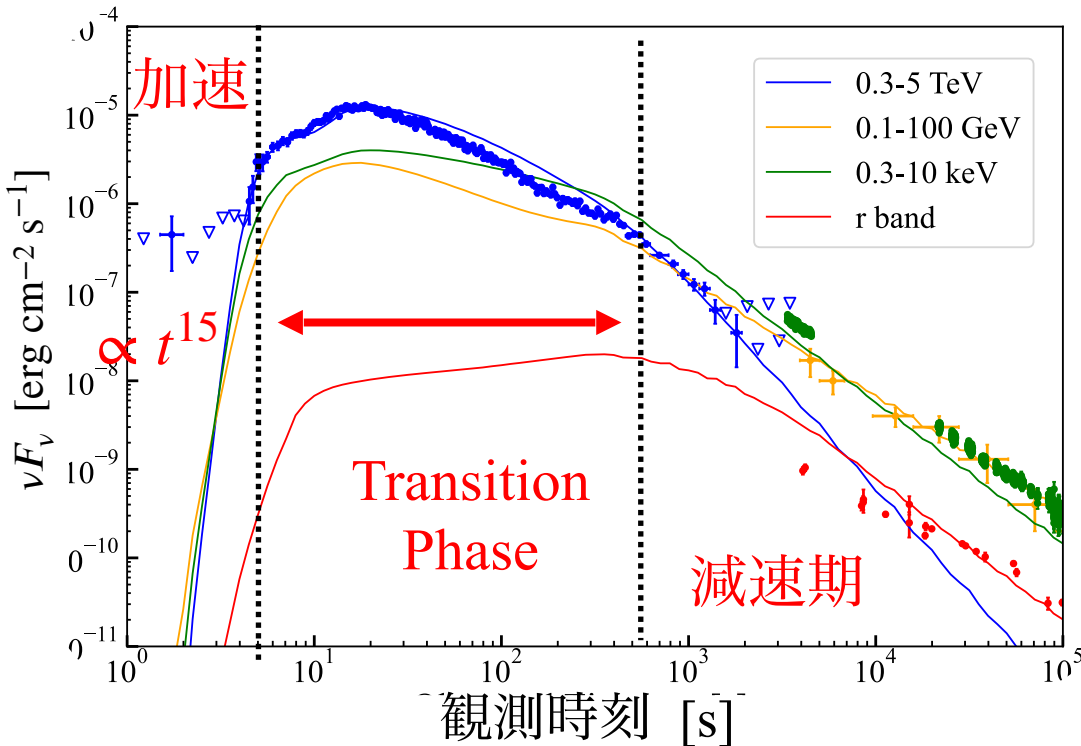
Magglow - GRB残光の公開 Julia Package を作ってみた

Kusafuka et al. (2025)

Magglow だけが希薄波を考慮しているのです！

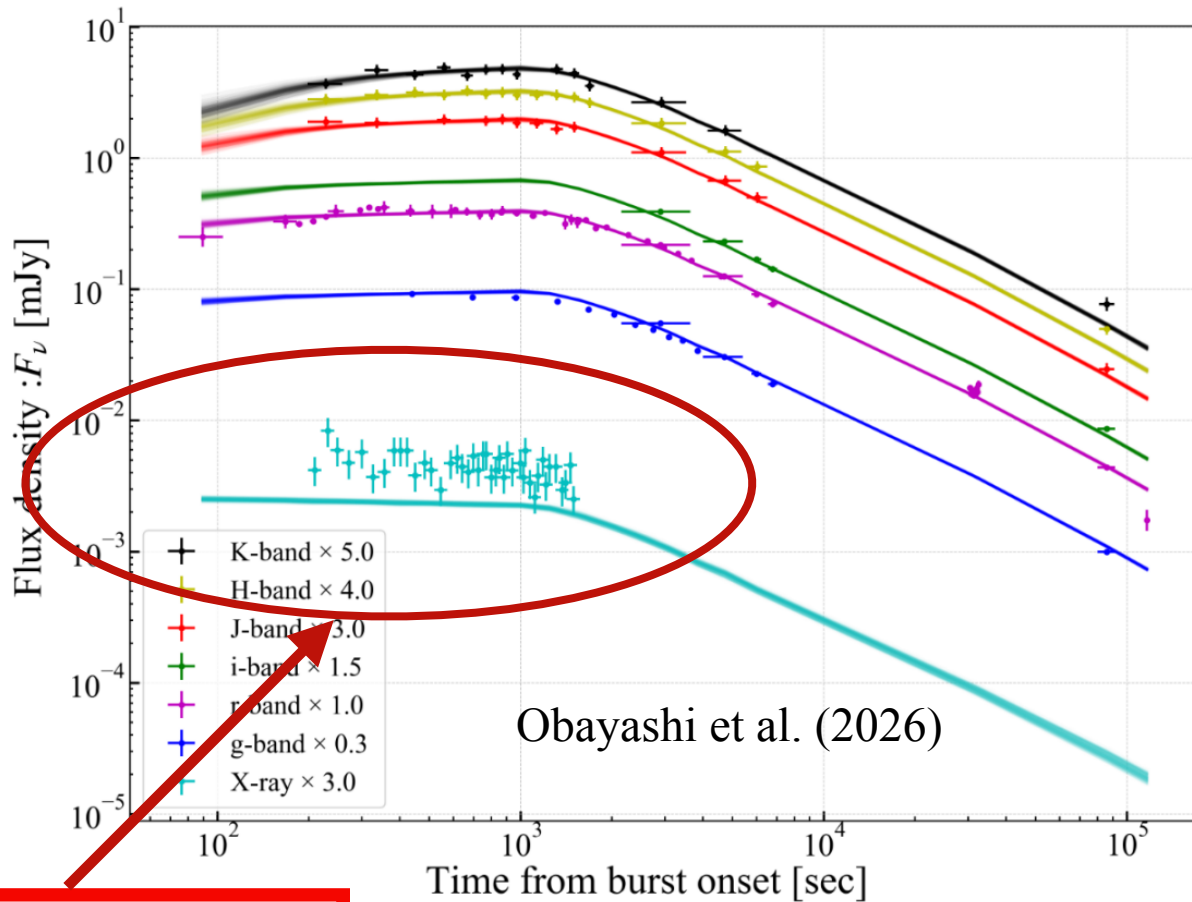
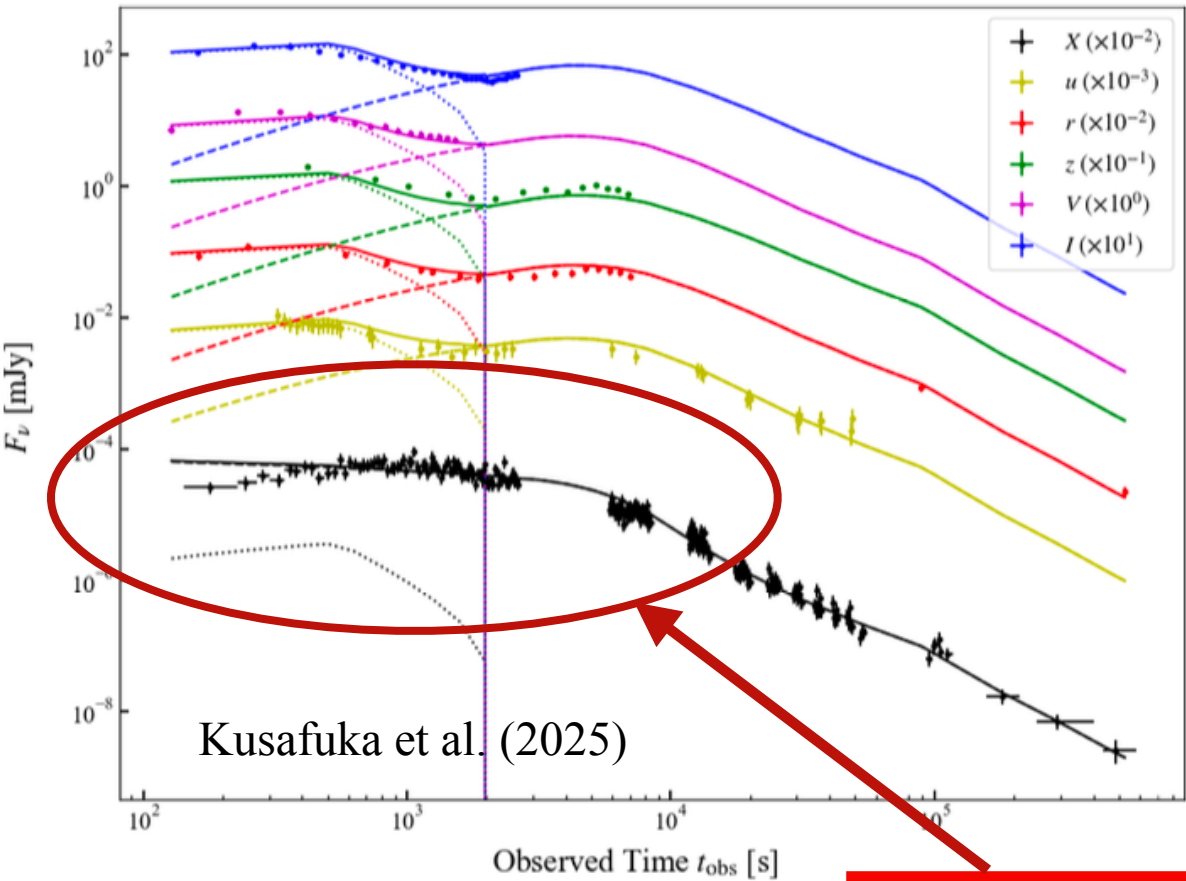
Name	MHD	RS	SSC	pp/py	Language
afterglowpy					Python/C
AMES		○	○	○	Python/C++
PyBlastAfterglow		○	○		Python/C++
jetsimpy		○	○		Python/C++
VegasAfterglow	△	○	○		Python/C++
Magglow	○	○	○	○	Julia

Kusafuka & Asano (2025b)



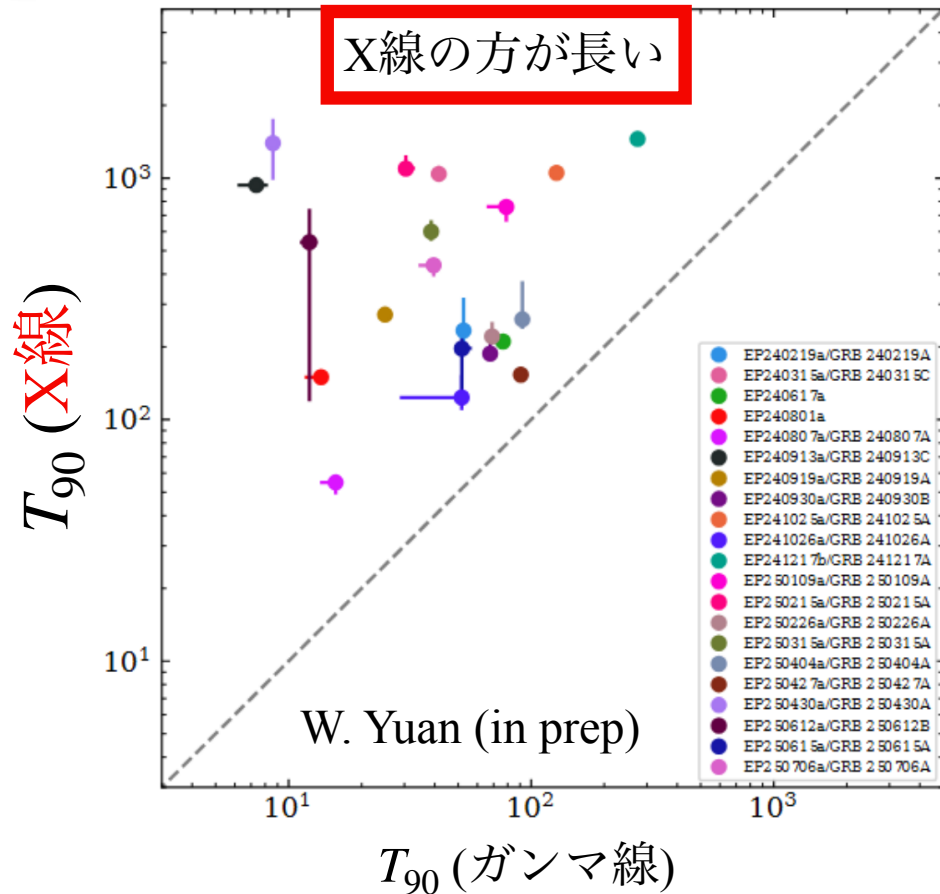
X-ray shallow decay と T_{90}

	GRB 110213	XRF 080330	GRB 080710
$T_{90}/(1+z)$	48 s	24 s	65 s
Δ_0/c	1000 s	300 s	470 s

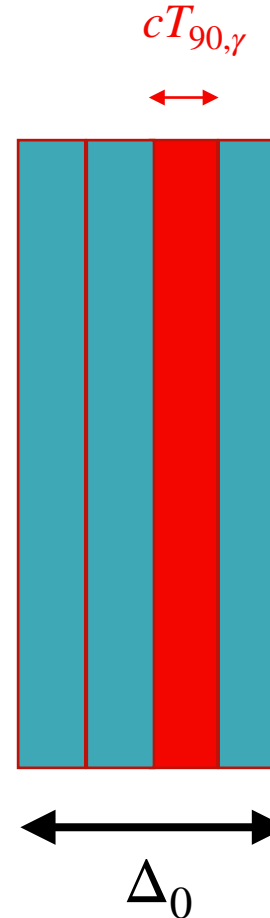


数千秒のフラットなX線

即時放射との繋がり



一部のシェルがガンマ線を放つ？



ガンマ線：赤色

X線：青色

1次元の流体運動を考慮



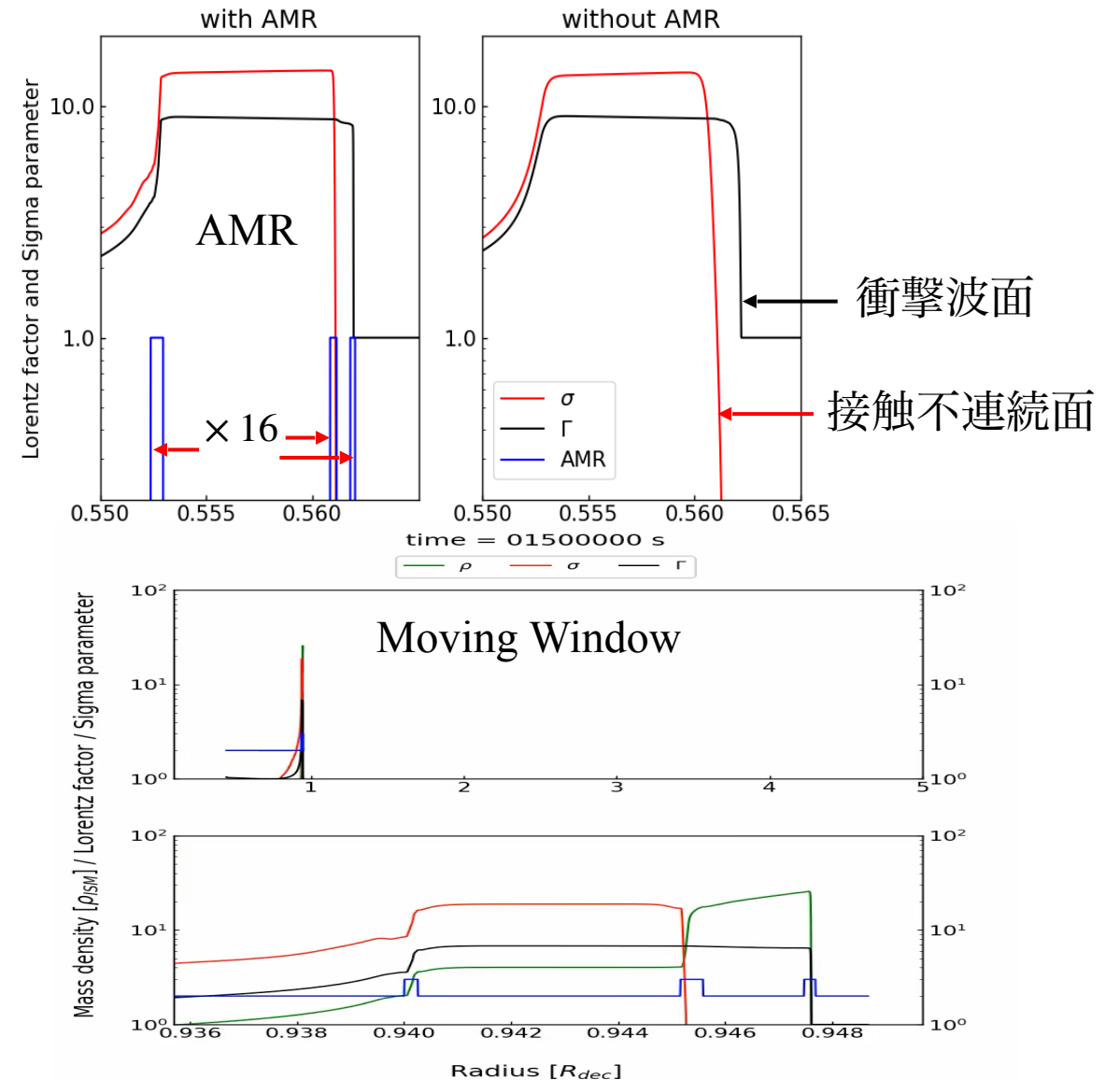
衝撃波下流の構造まで考慮

衝撃波面だけ考慮

1D 相対論的磁気流体

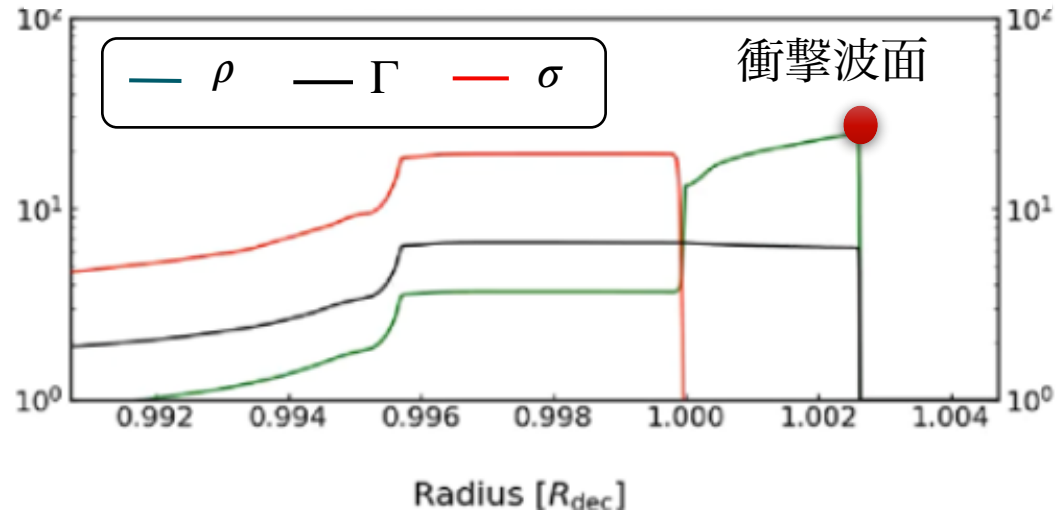
1D SRMHD code (Kusafuka & Asano (2024))

- 7th order **MP7** (Suresh & Huynh 1997)
- 3rd order **SSPRK(3,3)** (Gottlieb & Shu 1999)
- **minmod** flux limiter (Roe 1986)
- **CENTRAL** Riemann solver (Rusanov 1962)
- **MPI** parallel computation (with load balance)
- **AMR** (Berger & Oliger 1984)
- **Moving Window** (Mimica et al. 2004)



1D ラグランジュ粒子法

ラグランジュ粒子を衝撃波直下に時事刻々注入

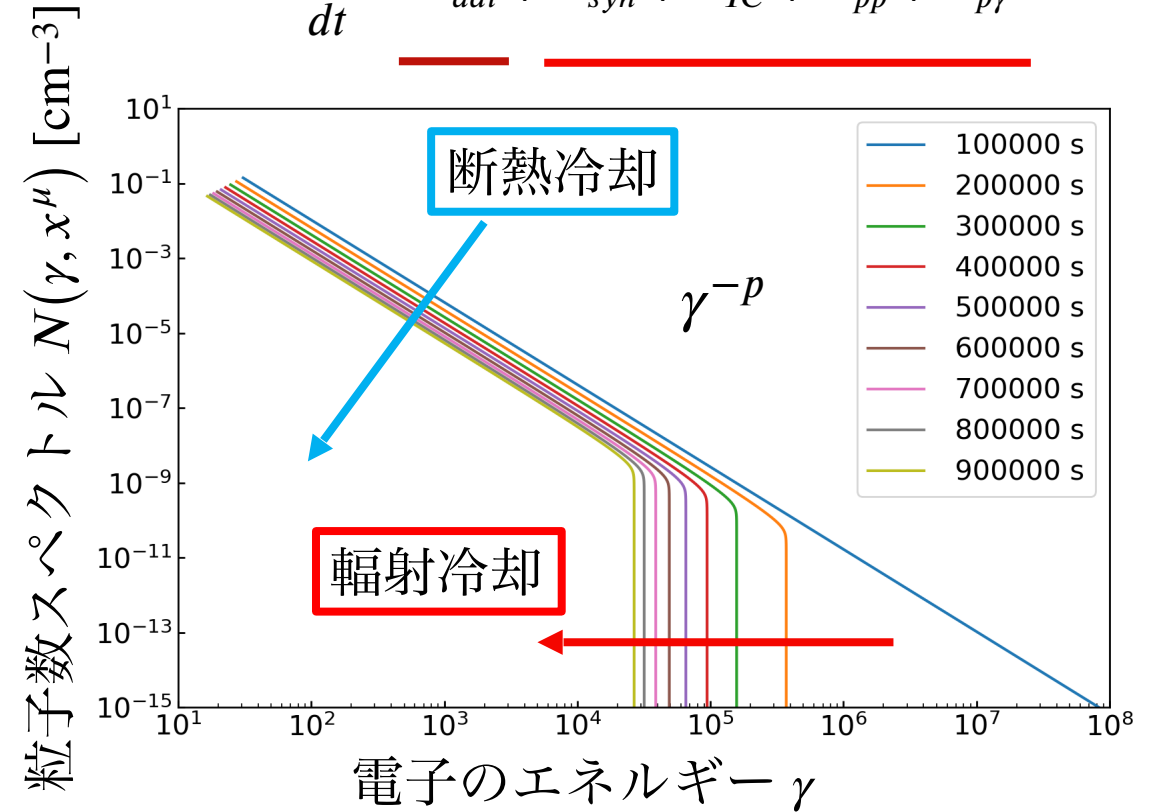


加速粒子の輸送方程式

$$\Gamma \frac{d}{dt} \left(\frac{n_p}{n_{MHD}} \right) + \frac{\partial}{\partial \gamma} \left[\Gamma \frac{d\gamma}{dt} \left(\frac{n_p}{n_{MHD}} \right) \right] = 0$$

特性曲線法 (Vaidya et al. 2018)

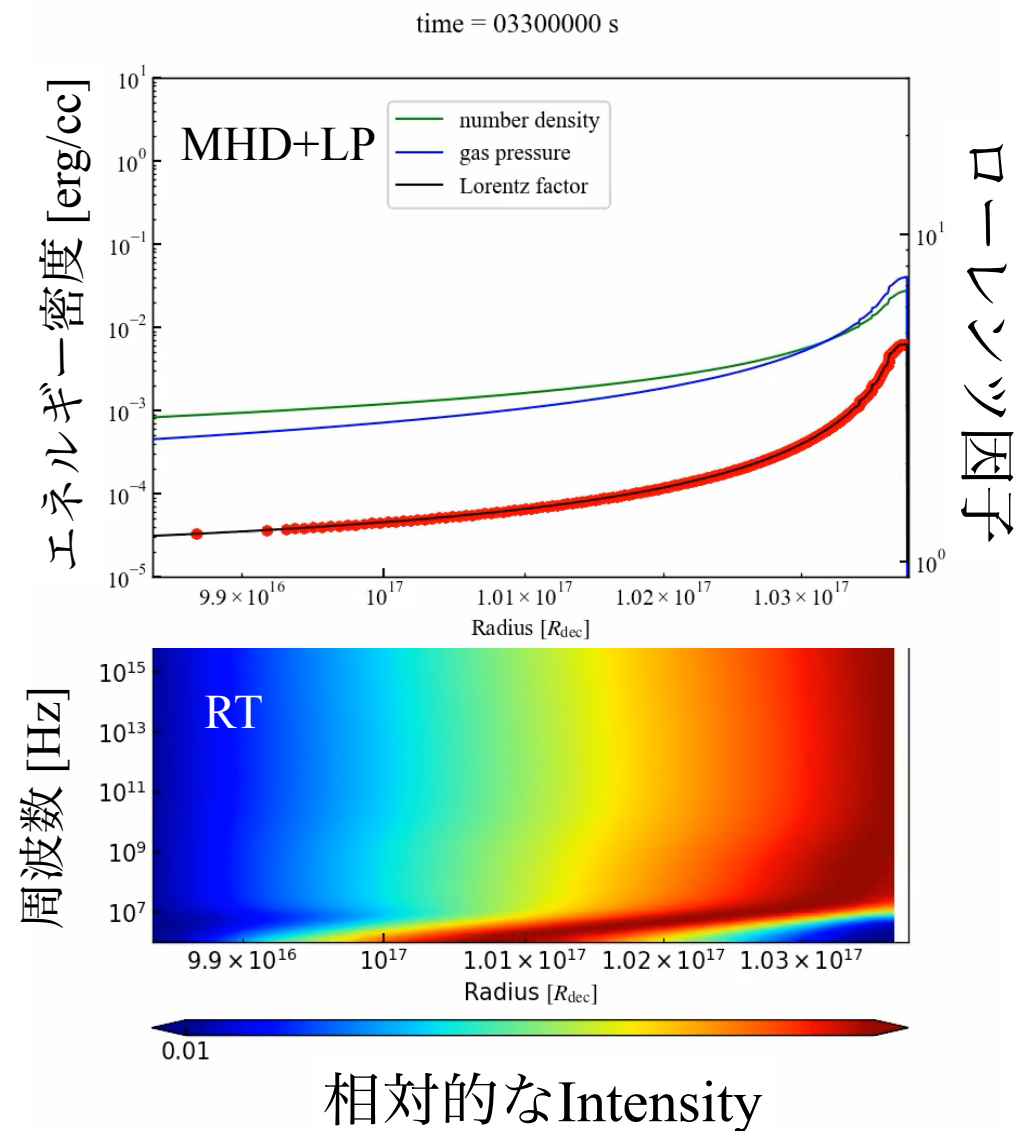
$$\Gamma \frac{d\gamma}{dt} = \dot{E}_{adi} + \dot{E}_{syn} + \dot{E}_{IC} + \dot{E}_{pp} + \dot{E}_{p\gamma}$$



2D 相対論的輻射輸送計算

2D RT code (Kusafuka & Asano (in prep))

- 7th order **MP7** (Suresh & Huynh 1997)
- 3rd order **SSPRK(3,3)** (Gottlieb & Shu 1999)
- **minmod** flux limiter (Roe 1986)
- **HLL** Riemann solver (Harten et al 1983)
- **MPI** parallel computation (with load balance)
- **Impact parameter** (Hummer & Rybicki 1971)
- **Moving Window** (Mimica et al. 2004)
- **Moving Mesh Refinement** (along a ray)

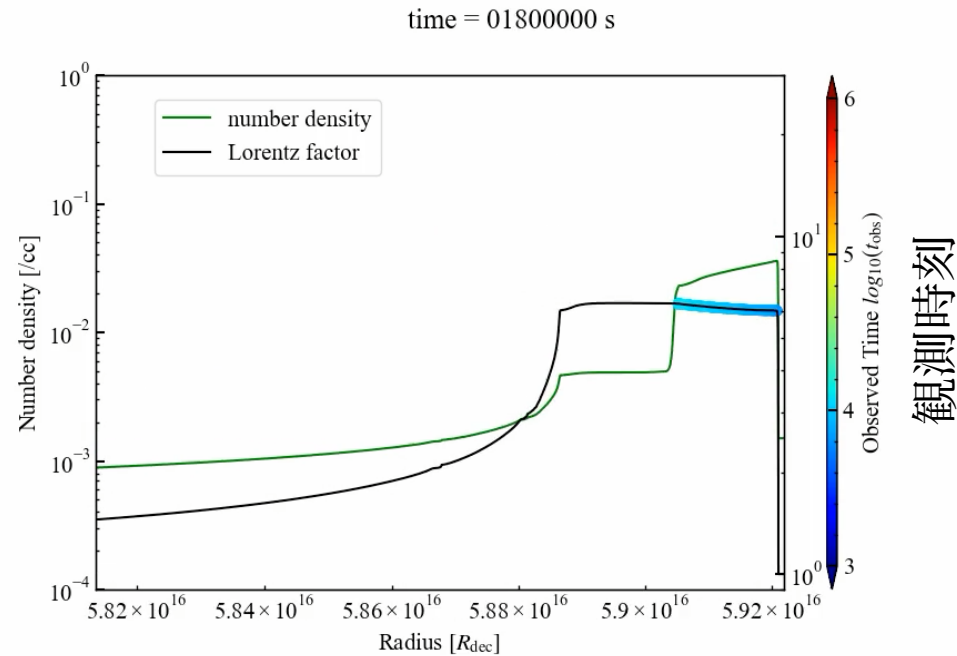


先進衝撃波と逆行衝撃波の計算

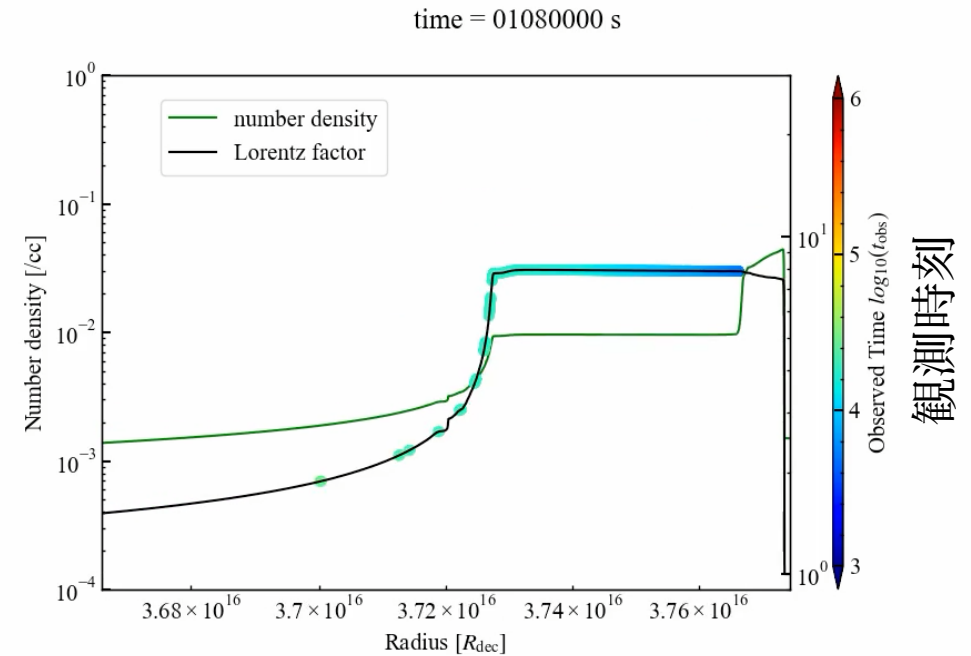
$$\Gamma_0 = 10 \quad E_0 = 10^{50} \text{ erg}$$

$$\sigma_0 = 10 \quad n_{\text{ISM}} = 1 \text{ cm}^{-3}$$

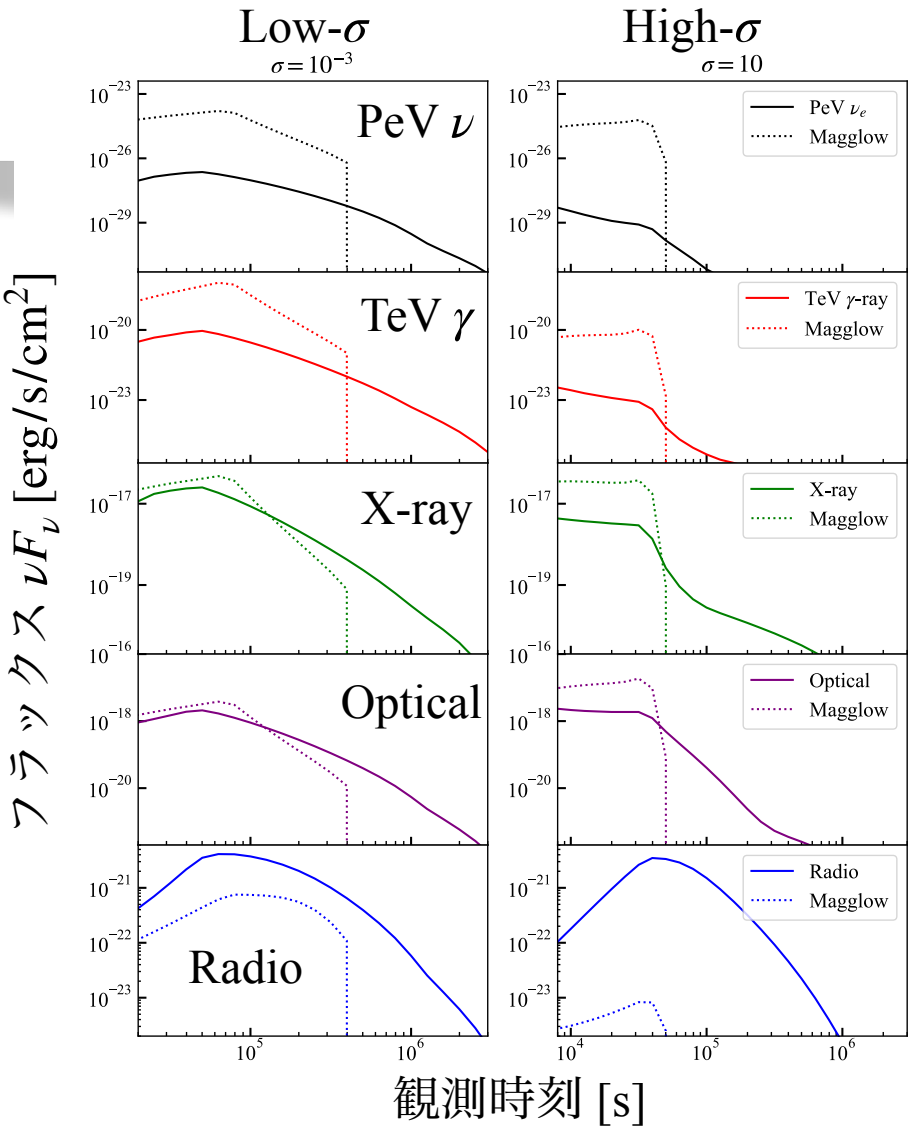
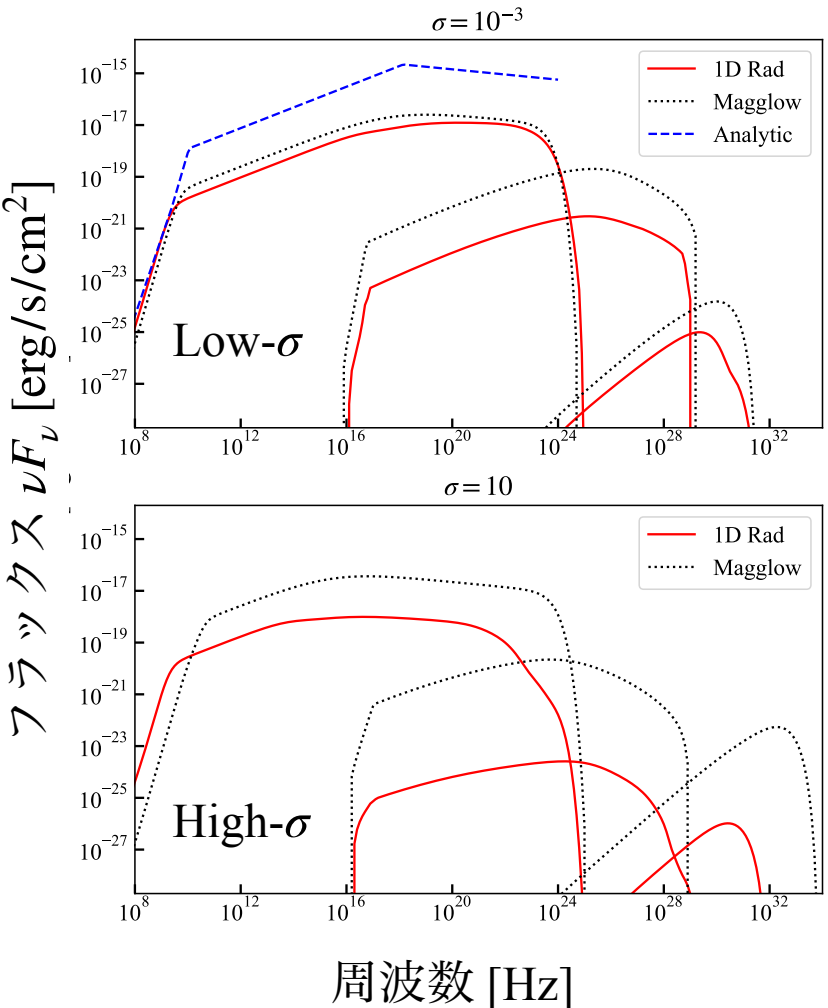
先進衝撃波だけにラグランジュ粒子注入



逆行衝撃波だけにラグランジュ粒子注入



逆行衝撃波の場合



$\Gamma_0 = 10$ $E_0 = 10^{50}$ erg
 $\sigma_0 = 10$ $n_{\text{ISM}} = 1 \text{ cm}^{-3}$

IC/ $p\gamma$ は桁で暗い

High- σ はより暗い

電波は明るく続く

なぜIC/pgは暗い？

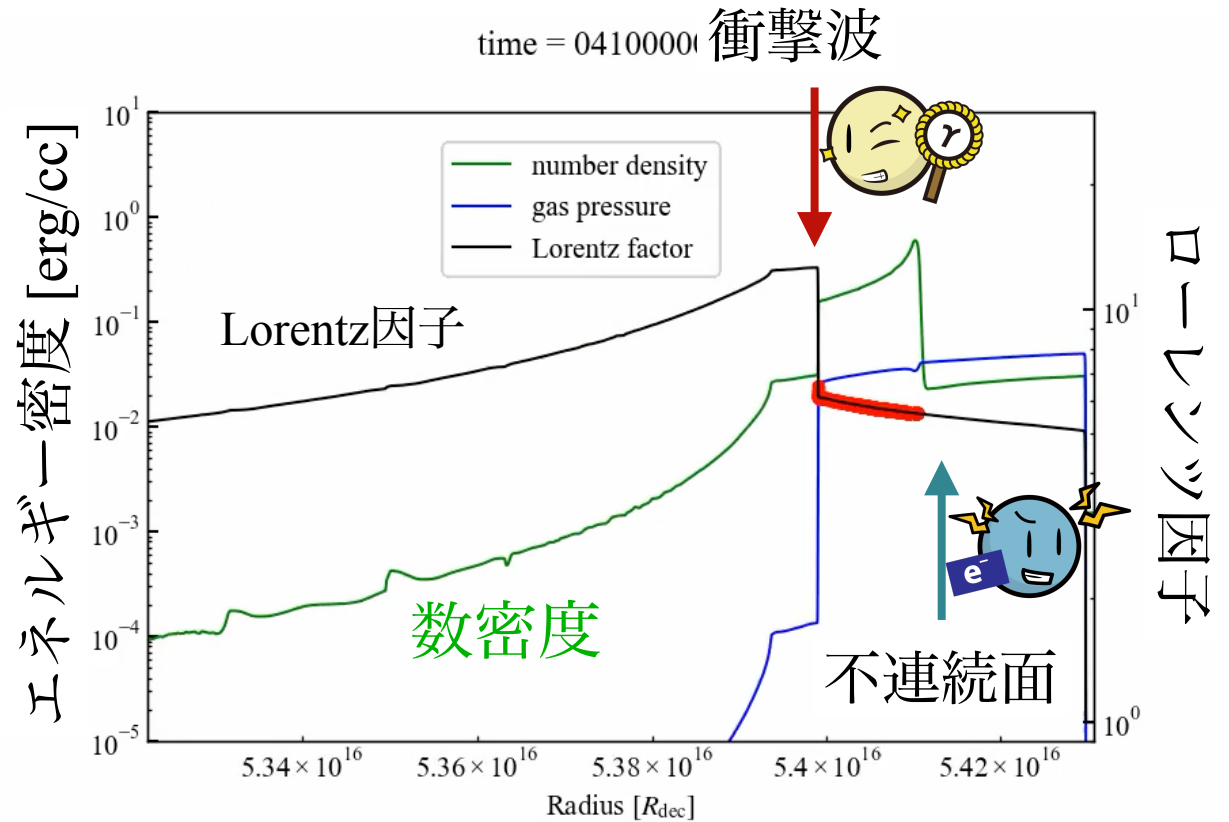
加速電子は**接触不連続面**に集中



種光子は可視光・X線が主

冷却が強いので、**衝撃波直下**で主に生成

1D空間分布が大きく影響



なぜhigh- σ は暗い？

光の逃走タイムスケール (Fukushima et al. 2017)

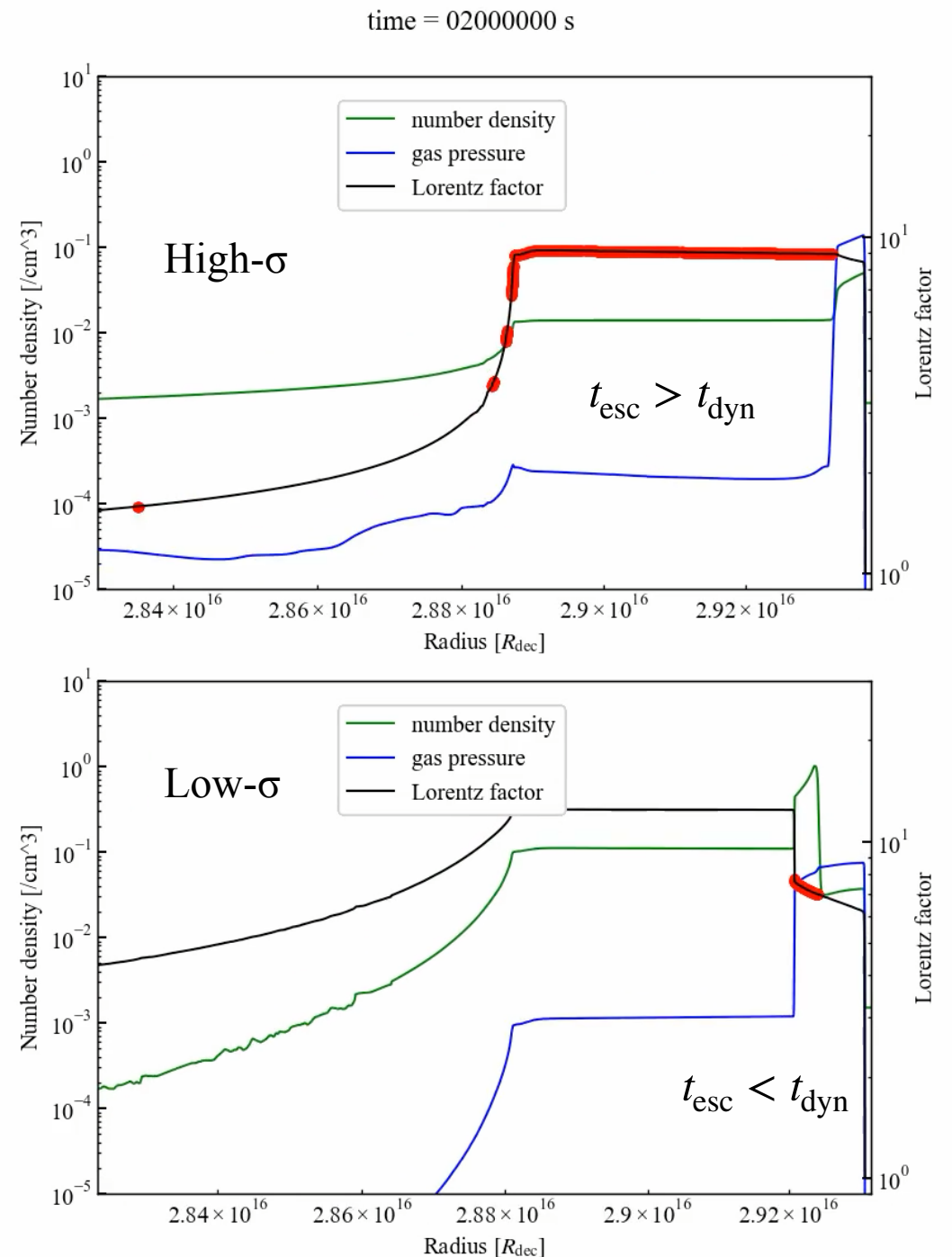
$$t_{\text{esc}} = 2 \frac{\Gamma_{\text{RS}} \Delta_{\text{RS}}}{c} \propto \sigma \quad \text{Zhang \& Kobayashi (2005)}$$

逃走時間が長いと暗くなる (Aguilar-Ruiz et al. 2025)

$$\frac{P'_{\nu', \text{esc}}}{h\nu'} = \frac{\Delta n'_{\nu', \text{esc}}}{\Delta t'} = [1 - \exp(-\Delta t' / t'_{\text{esc}})] \frac{\tilde{n}'_{\nu'}}{\Delta t'},$$

where $\tilde{n}'_{\nu'} = n'_{\nu'}(t') \exp(\Delta t' / t'_{\text{esc}})$.

ダイナミカル時間 vs 逃走時間



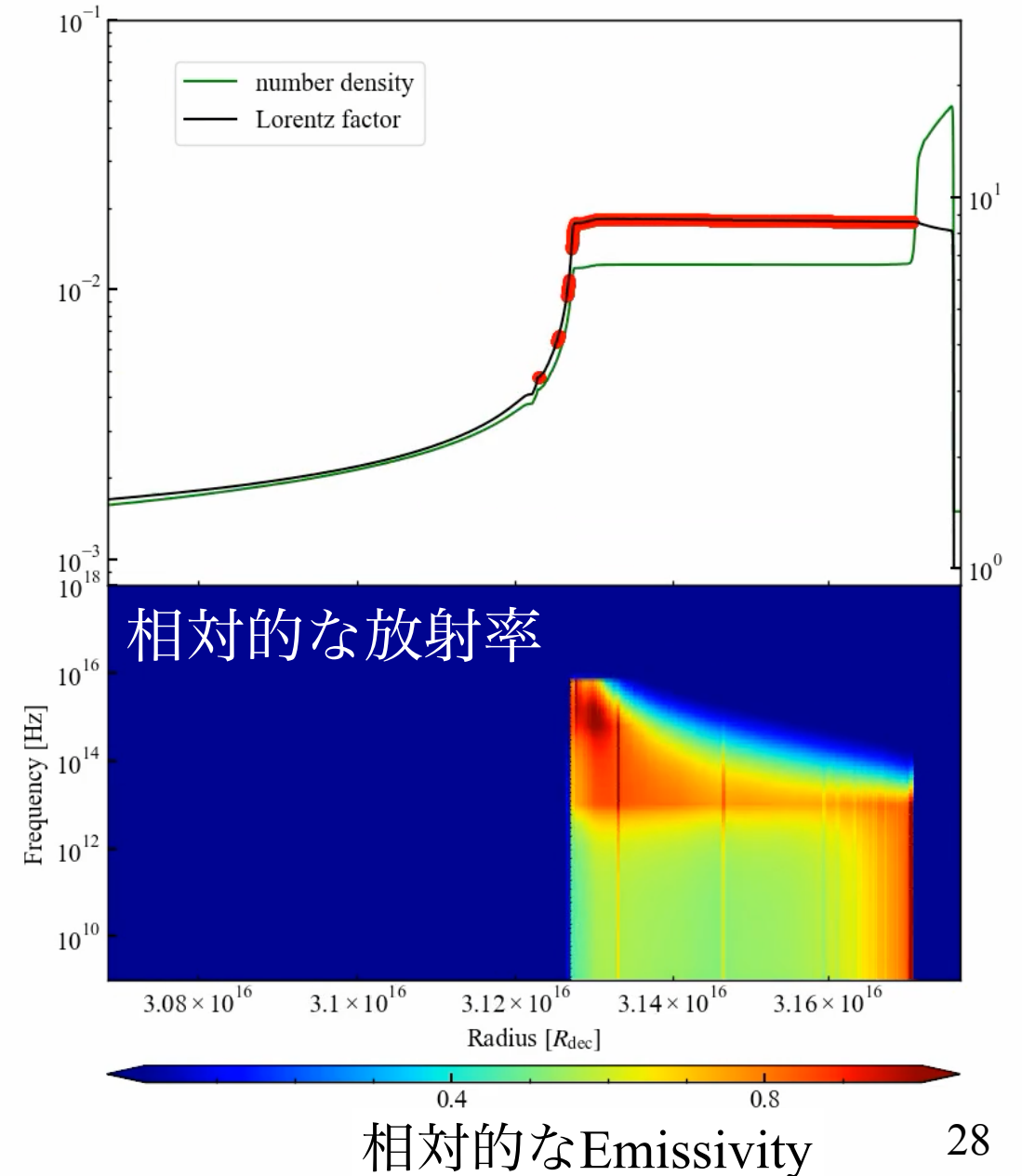
なぜ電波は明るい？

低エネルギー電子の数は断熱冷却により増える

加速電子は接触不連続面近傍に集中

希薄波が通過するにつれ、SSAは弱まっていく

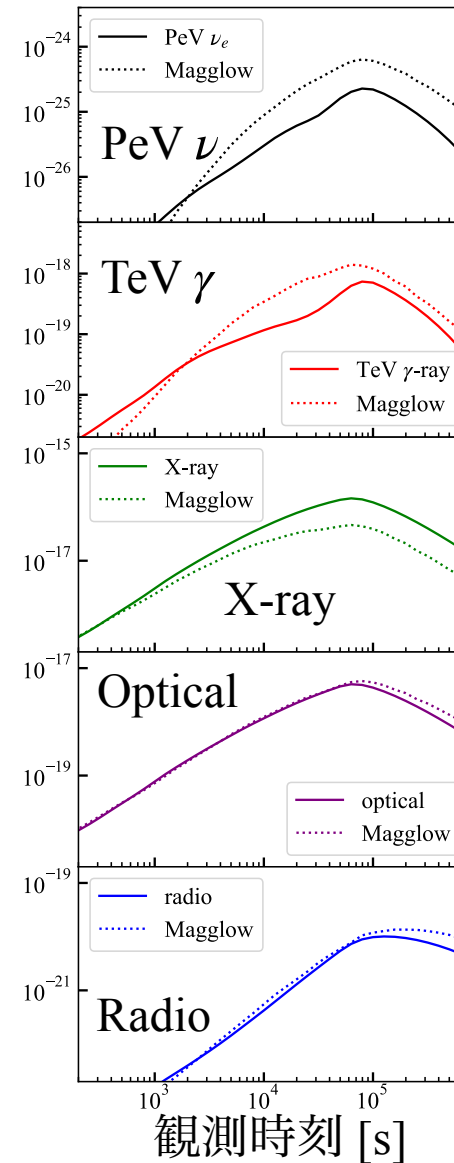
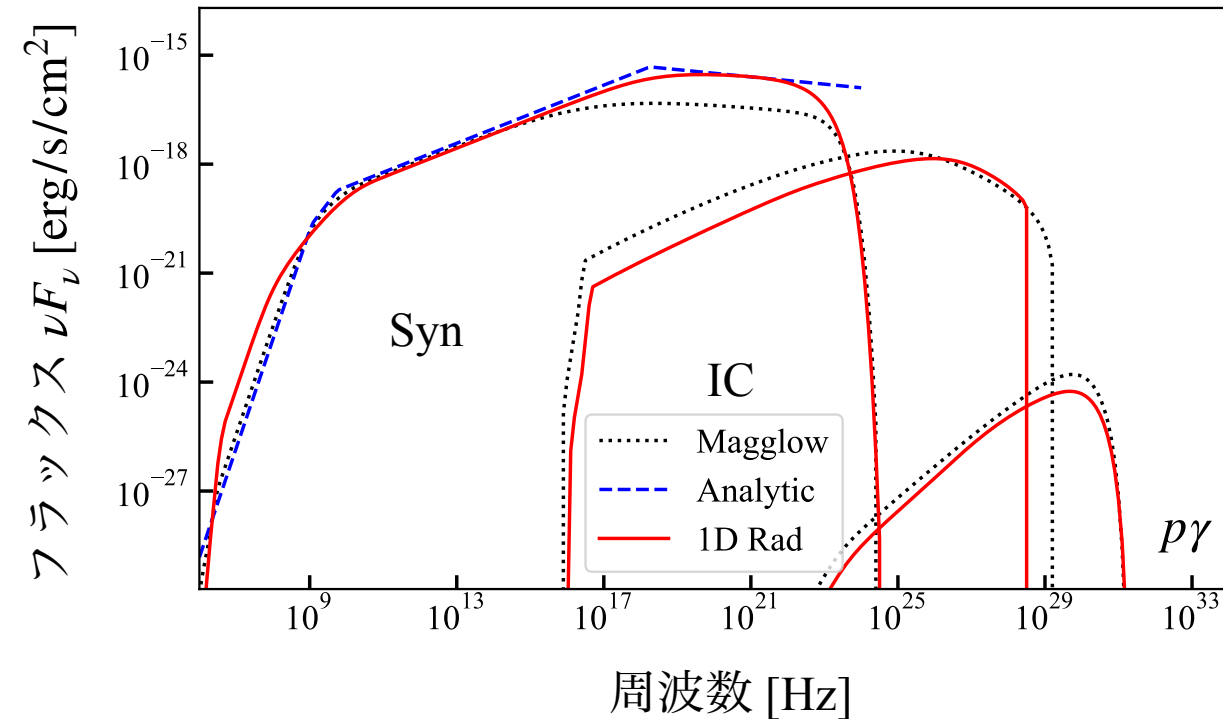
希薄波が通過し切るまで明るい電波放射



相対的なEmissivity

先進衝撃波の場合

One-zone近似は放射冷却を過大評価



$$\Gamma_0 = 10 \quad E_0 = 10^{50} \text{ erg}$$

$$\sigma_0 = 10 \quad n_{\text{ISM}} = 1 \text{ cm}^{-3}$$

X線は後半明るくなる
可視・電波は大体一致

γ 線・ ν_e は基本的に暗い
高周波数側だと同程度

One-zoneとの違い

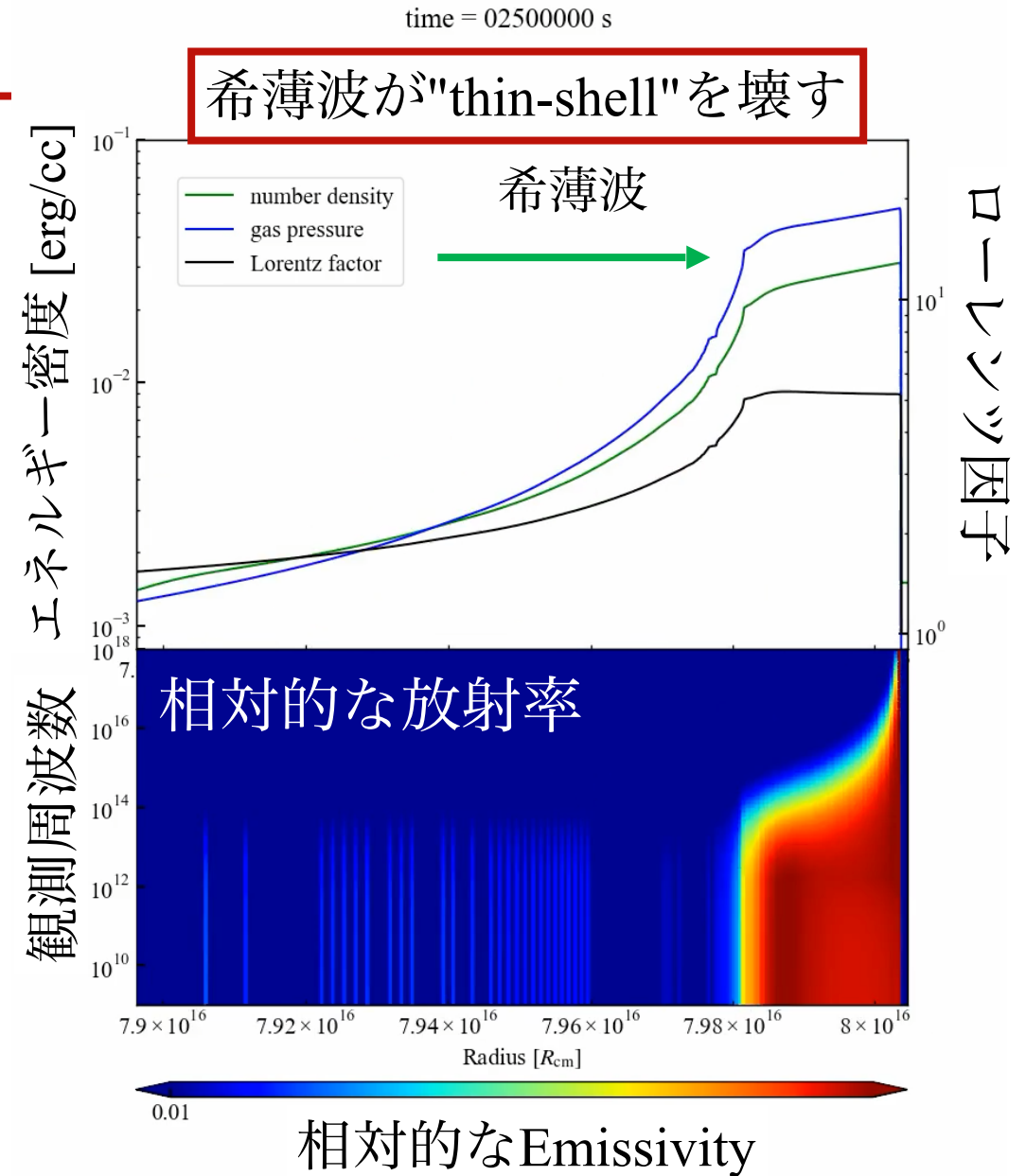
下流の構造の違いが原因

One-zone近似 (Magglow)

一様

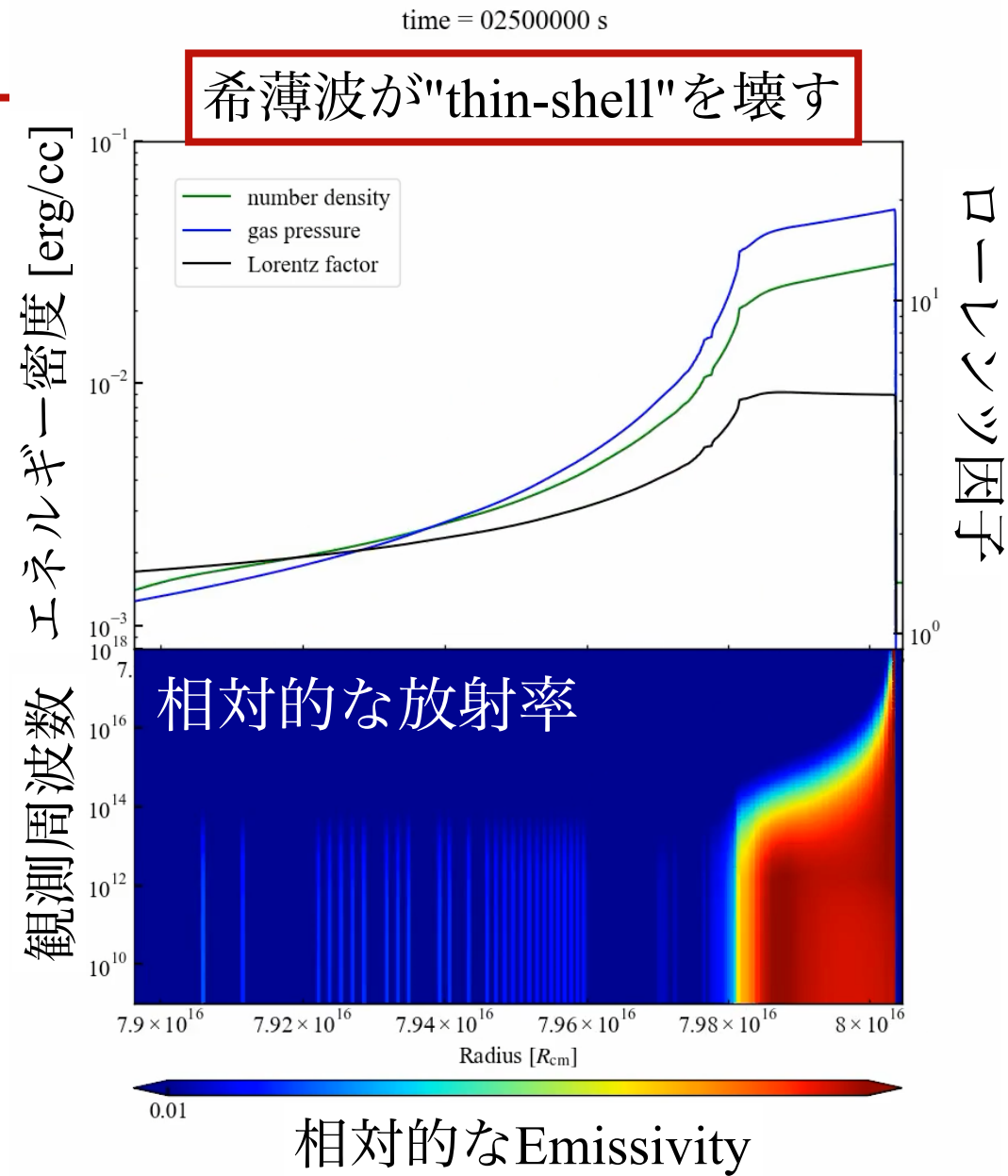
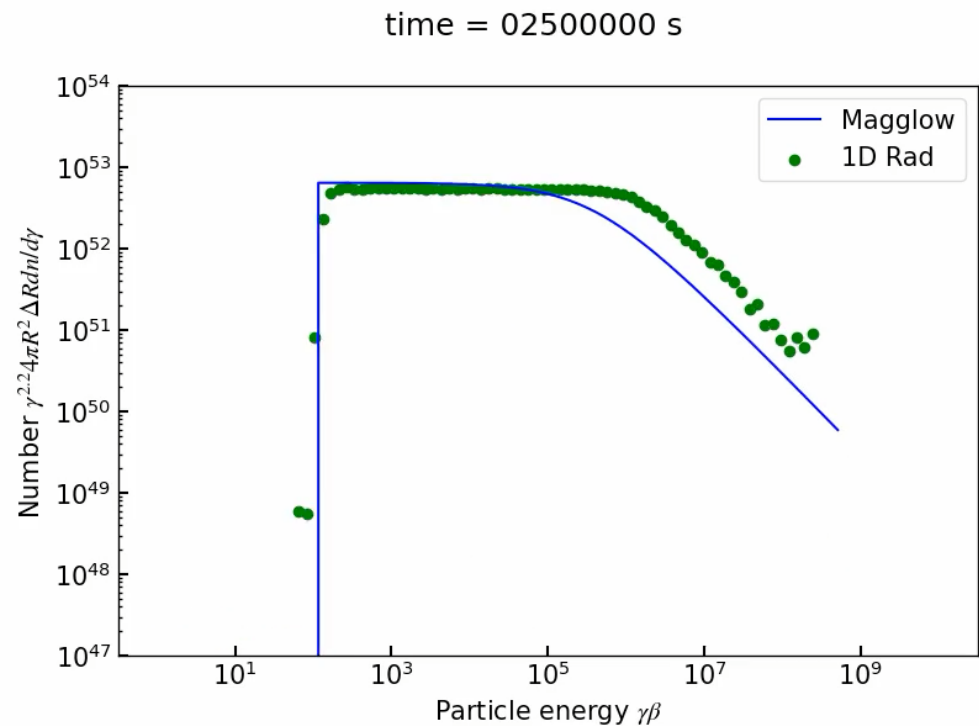
1D シミュレーション

非一様



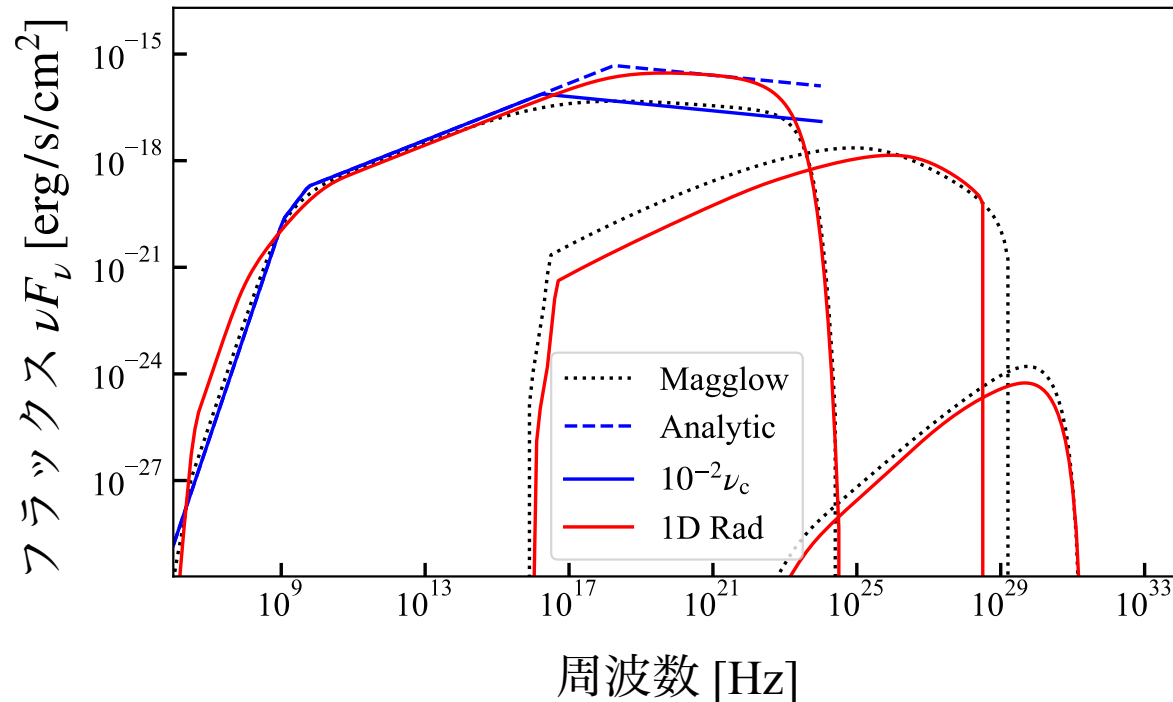
冷却が弱まる効果

下流は希薄波により磁場が弱い



すると何が変わる？

観測から推定される物理描像が大きく変わる



実はGRBはこれまでの予想より
桁で濃い環境で起きてるかも？

Scaling lawを元に考えると

$$\nu_c \propto E^{-1/2} n_0^{-1} \epsilon_B^{-3/2}$$

$$F_{\nu, \max} \propto E f_e n_0^{1/2} \epsilon_B^{1/2}$$

$$\nu_m \propto E^{1/2} f_e^{-2} \epsilon_e^2 \epsilon_B^{1/2}$$

CSM密度 $n_{\text{real}} = 10^2 n_{\text{prev}}$

$$\epsilon_{e, \text{real}} = 10^{-1} \epsilon_{e, \text{prev}} \quad f_{e, \text{real}} = 10^{-1} f_{e, \text{prev}}$$

まとめ

希薄波がダイナミクスや放射を変える

Magnetic Bullet

