

サブ課題C：宇宙線加速 (プラズマ粒子シミュレーション)

松本洋介
千葉大学

共同研究者

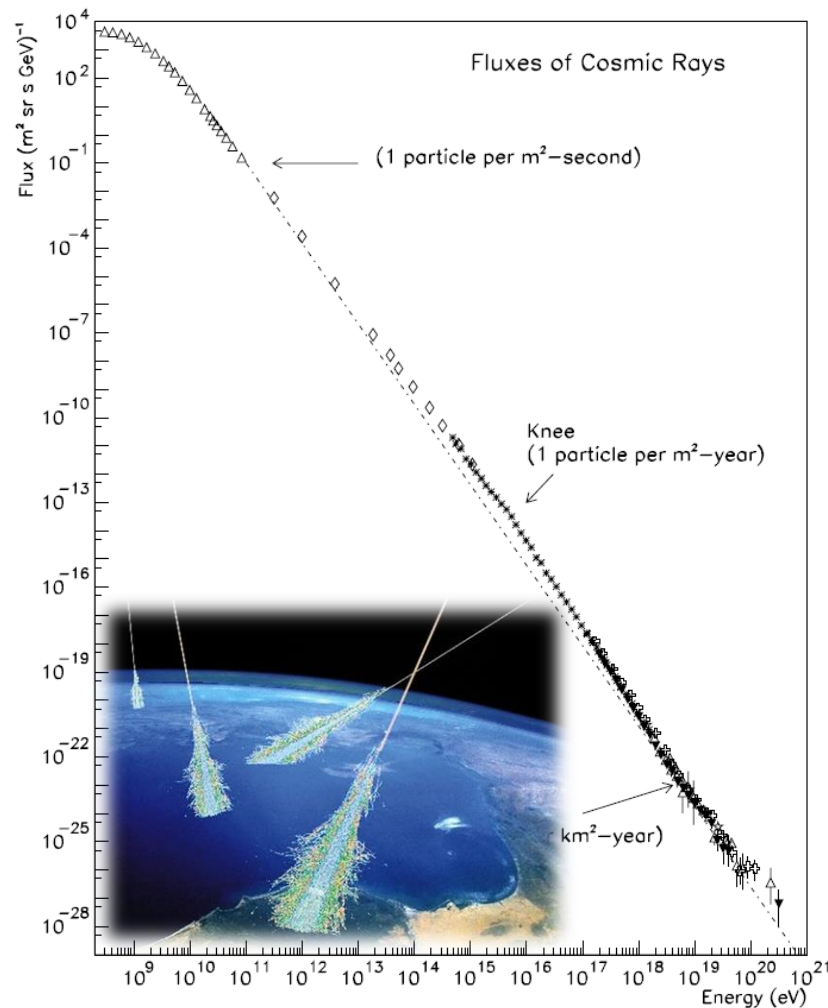
天野孝伸、星野真弘（東大）

加藤恒彦（NAOJ）

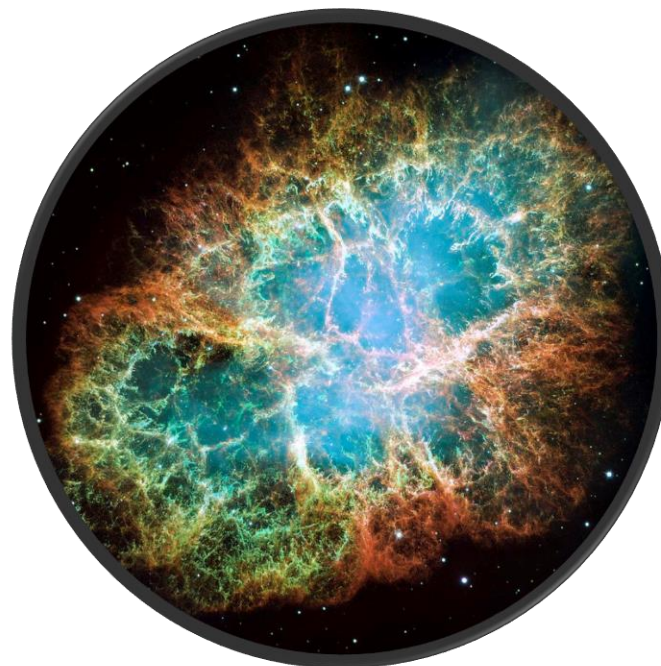
宇宙線の起源

地球に届く宇宙線のフラックス

宇宙の爆発的現象に伴う**衝撃波**での荷電粒子（陽子・電子）の加速メカニズムを探求（サブ課題B・Cの成れの果ての話）

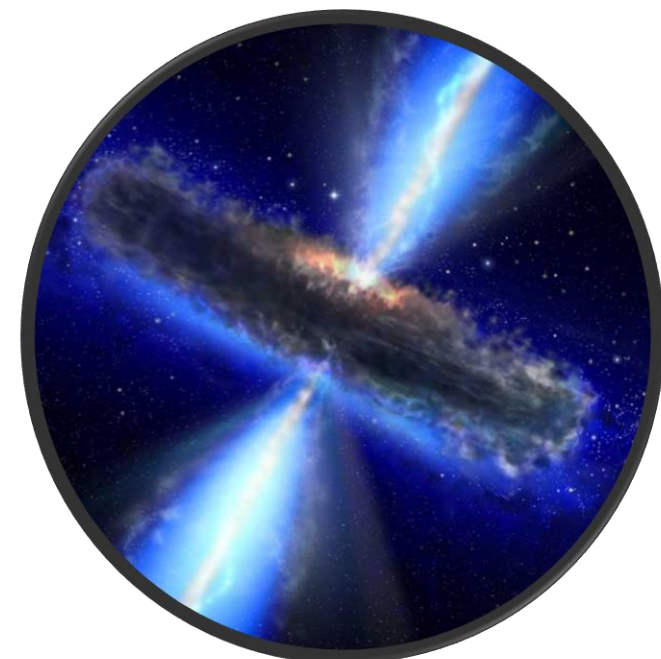


超新星爆発
(銀河宇宙線)



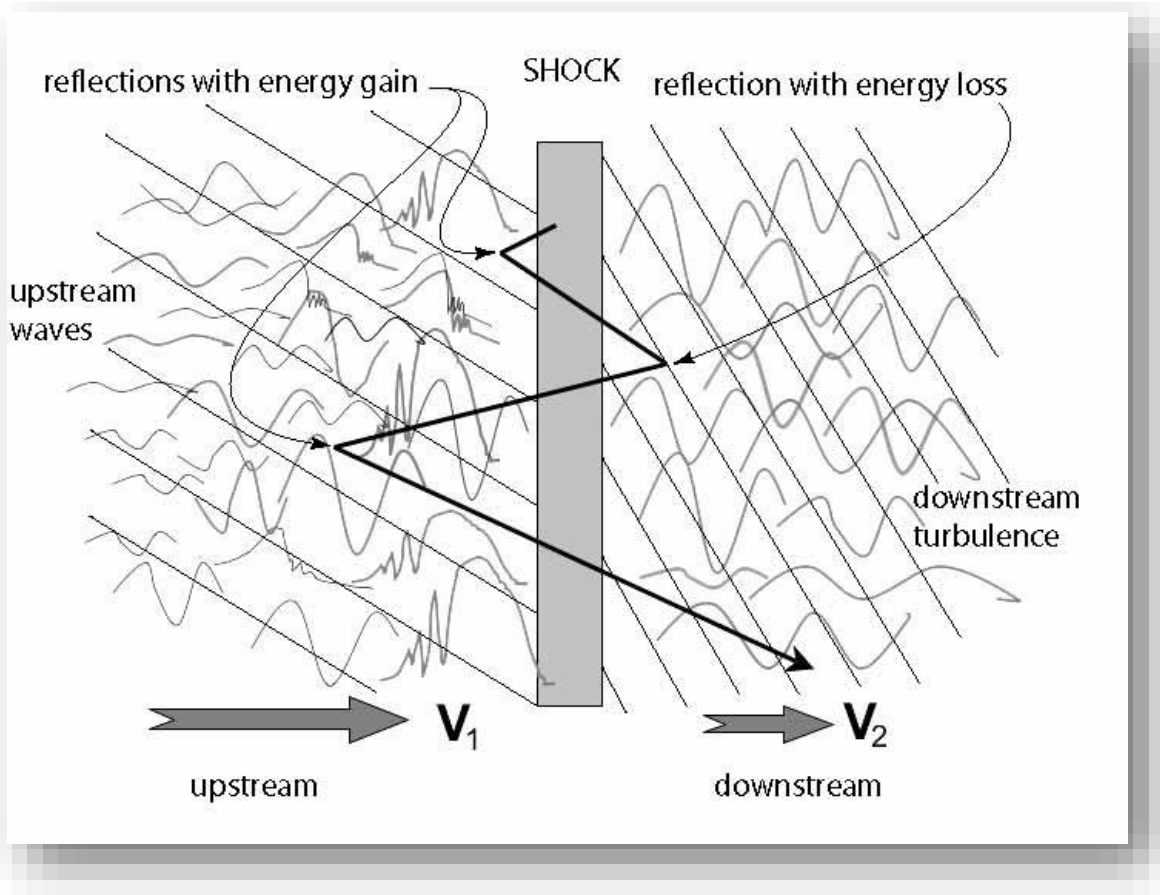
サブ課題B

宇宙ジェット
(超高エネルギー宇宙線)



サブ課題C

衝撃波統計加速



Treumann & Jaroschek 08

- $V_1 - V_2 > 0$ ($\text{div}(V) < 0$) → 弾性正面衝突によるエネルギーゲイン（1次のフェルミ加速）
- エネルギースペクトルはべき乗分布になり、べき指数は圧縮比で決まる
- 十分に強い衝撃波ではべき指数-2
- 衝撃波を横切る→粒子の拡散は何が担うかがわからないので、第一原理計算で説明を目指す
- **宇宙線注入問題（特に電子）**

プラズマ第一原理計算：PICシミュレーション

Vlasov eq. as particle motions

$$\frac{d\mathbf{x}_p}{dt} = \frac{\mathbf{u}_p}{\gamma_p}$$

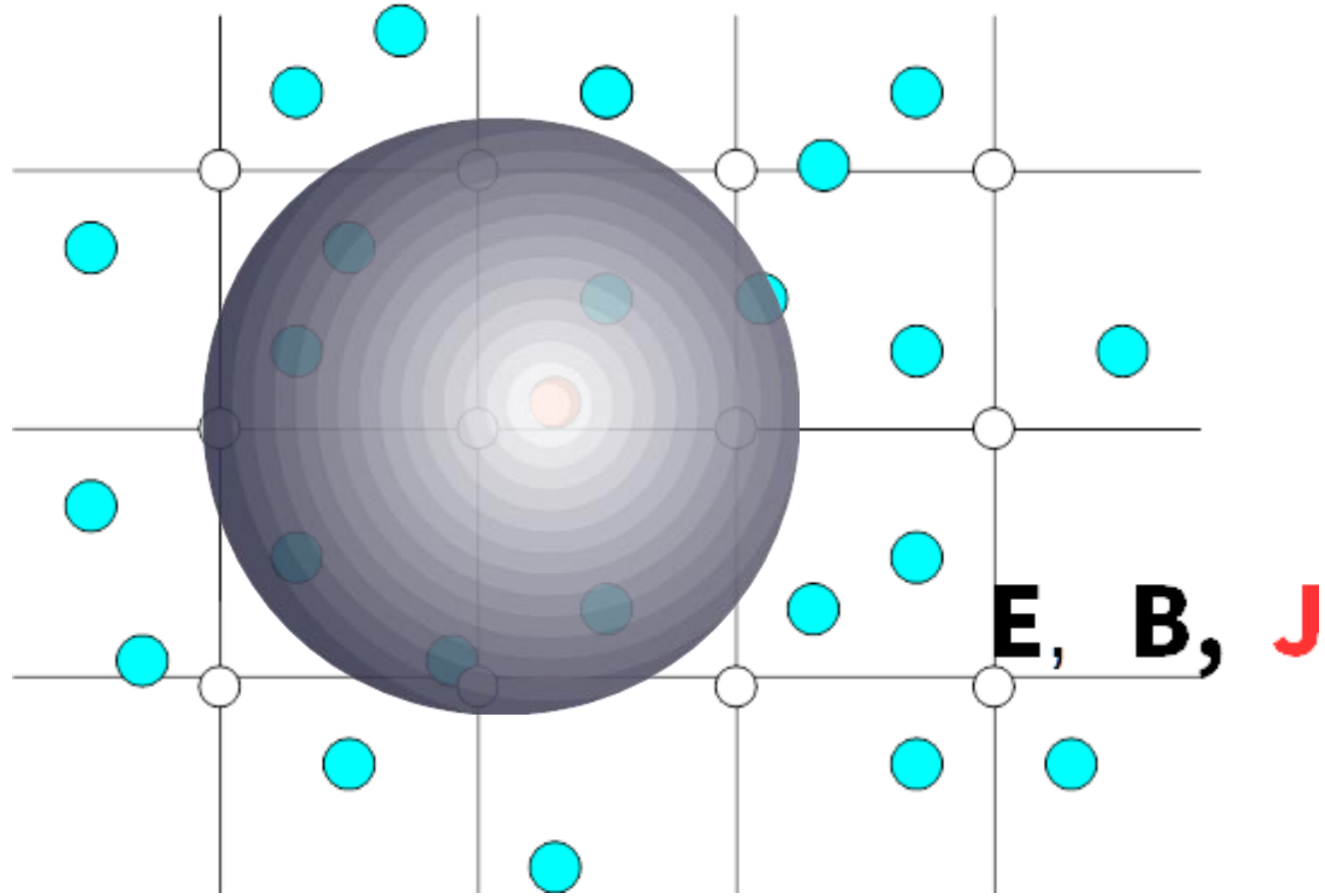
$$\frac{d\mathbf{u}_p}{dt} = \frac{q}{m} \left(\mathbf{E} + \frac{\mathbf{u}_p}{c\gamma_p} \times \mathbf{B} \right)$$

$$\mathbf{J} = \sum_p q_p \frac{\mathbf{u}_p}{\gamma_p}$$

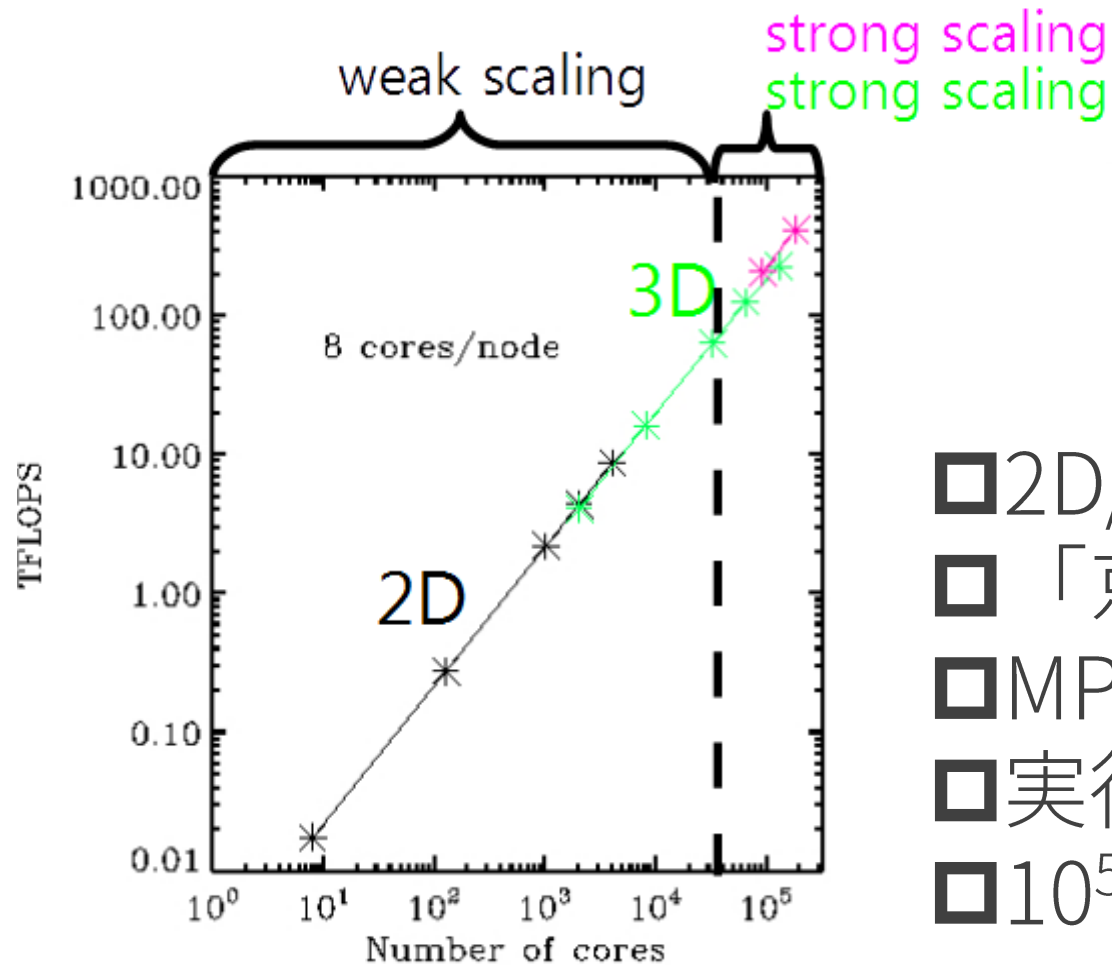
Maxwell eqs. on grid points

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = -c \nabla \times \mathbf{E}$$

$$\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} = c \nabla \times \mathbf{B} - 4\pi \mathbf{J}$$



スパコンで衝撃波を作る



- 2D/3D PICコード
- 「京」でSIMD最適化
- MPI+OpenMP ハイブリッド並列
- 実行効率は約15%
- 10⁵ コアまでスケール

最近の世界動向 (TRISTAN-PIC 対 その他)

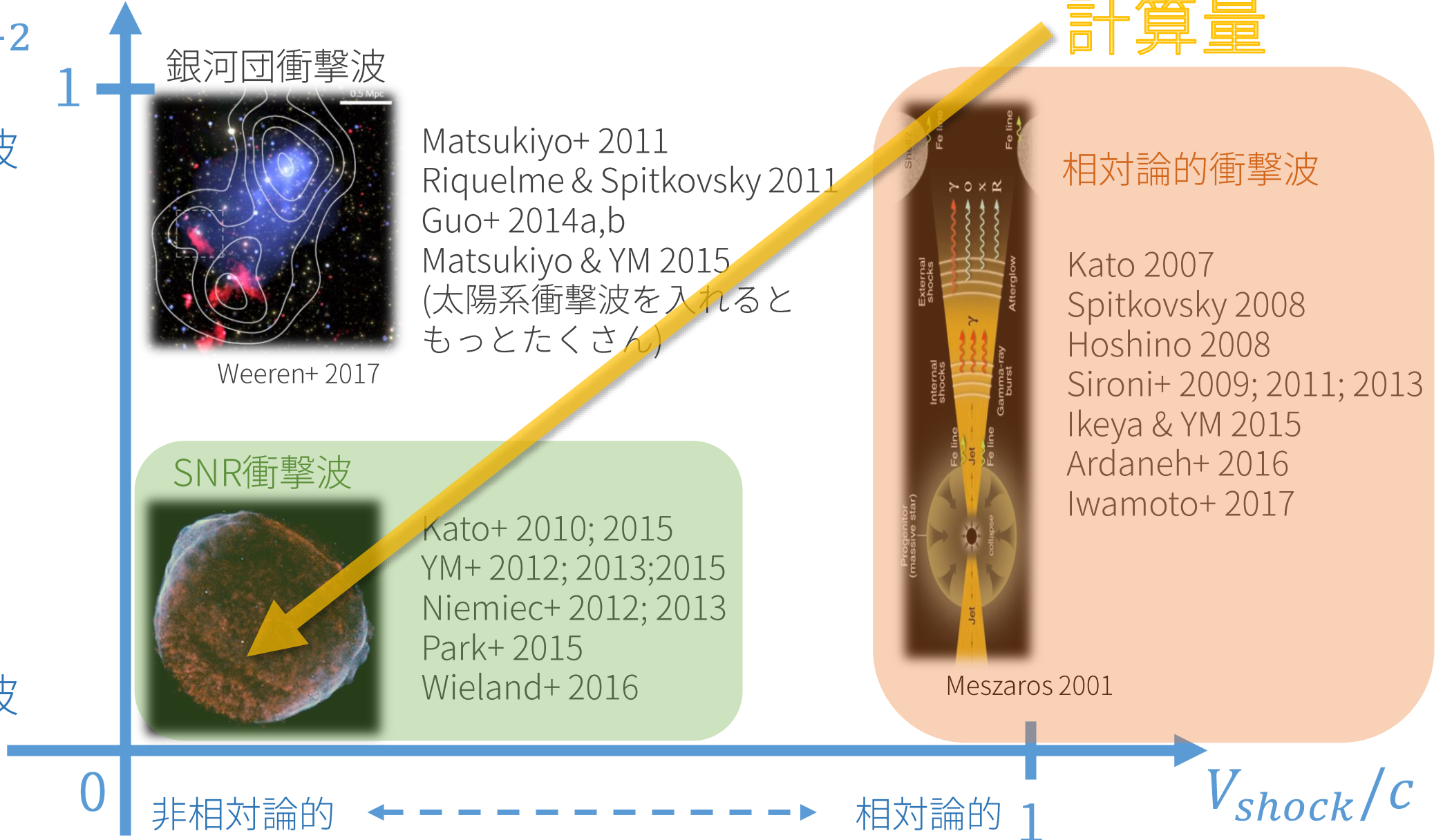
計算量

$$\sigma = M_A^{-2}$$

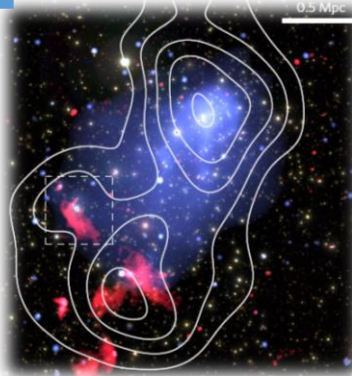
弱い衝撃波



強い衝撃波



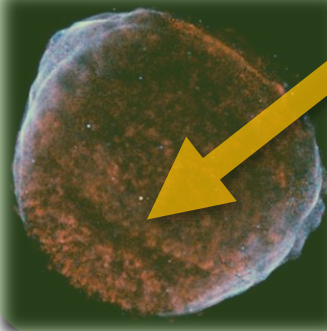
銀河団衝撃波



Weeren+ 2017

Matsukiyo+ 2011
 Riquelme & Spitkovsky 2011
 Guo+ 2014a,b
 Matsukiyo & YM 2015
 (太陽系衝撃波を入れると
 もっとたくさん)

SNR衝撃波



Kato+ 2010; 2015
 YM+ 2012; 2013; 2015
 Niemiec+ 2012; 2013
 Park+ 2015
 Wieland+ 2016

相対論的衝撃波

Kato 2007
 Spitkovsky 2008
 Hoshino 2008
 Sironi+ 2009; 2011; 2013
 Ikeya & YM 2015
 Ardaneh+ 2016
 Iwamoto+ 2017



Meszáros 2001

0

非相対論的

相対論的

1

V_{shock}/c

非相対論的高マッハ数衝撃波 における電子加速

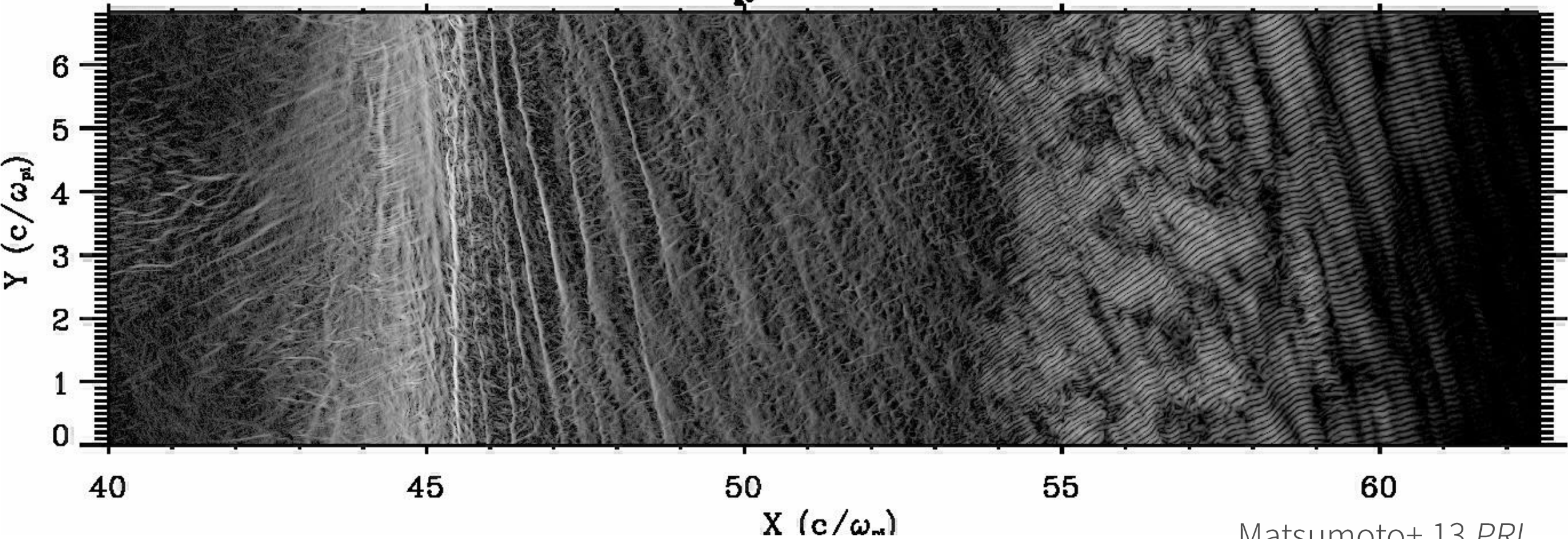
これまで2D → 3D@京

電子サーフィン加速

downstream

upstream

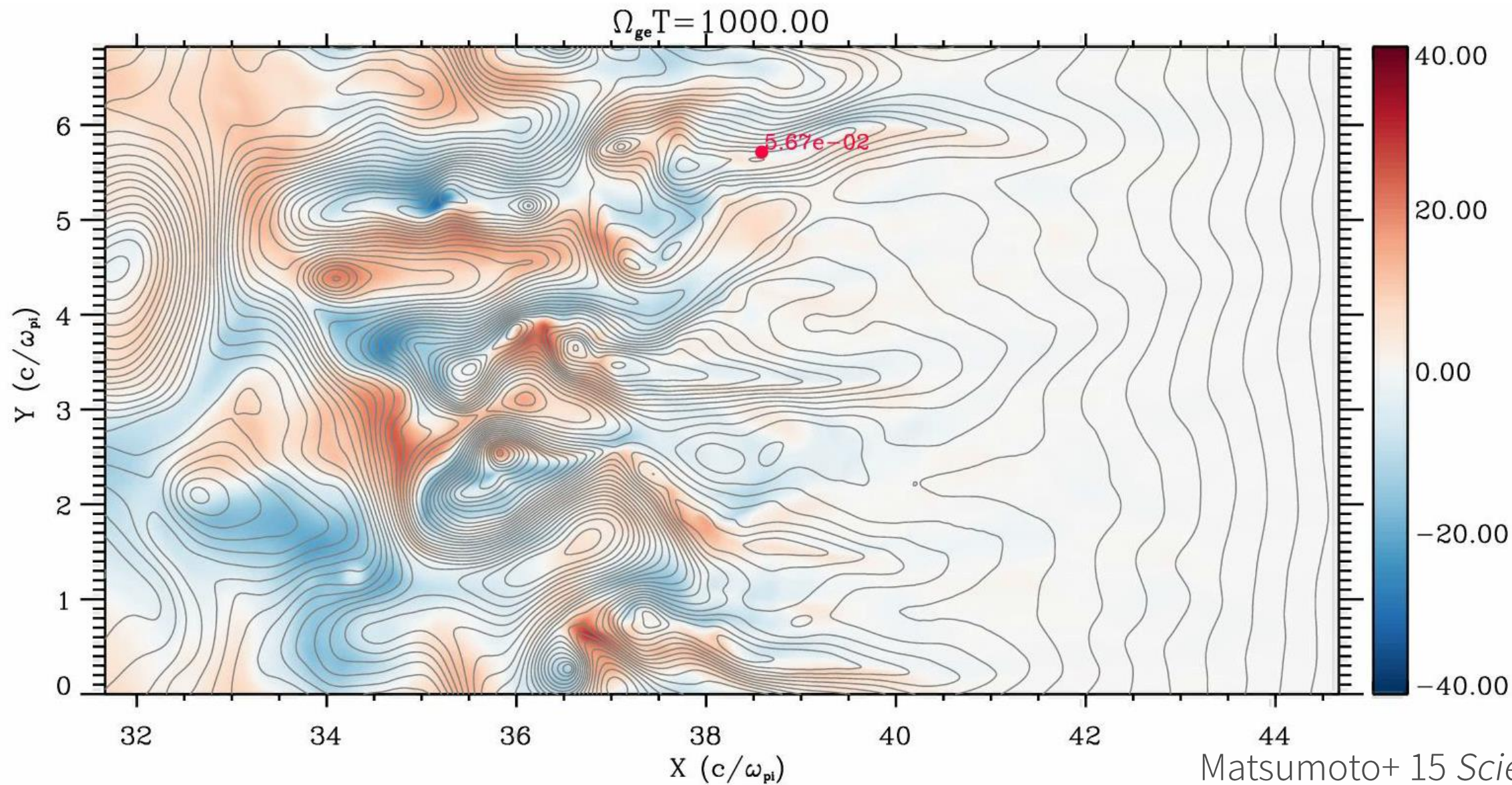
$$\Omega_{ge}T = 900.25$$



Matsumoto+ 13 *PRL*

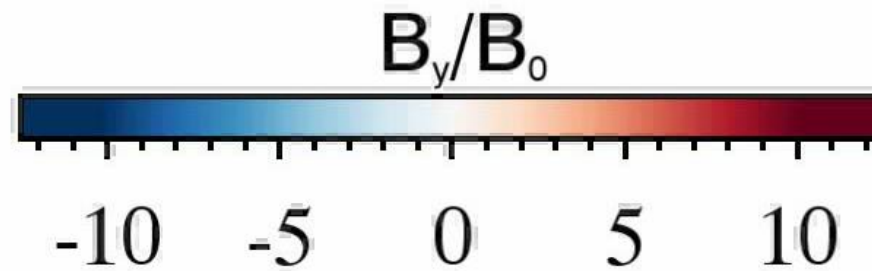
gray: electrostatic field strength , squares: electron orbits

乱流リコネクションによる電子統計加速

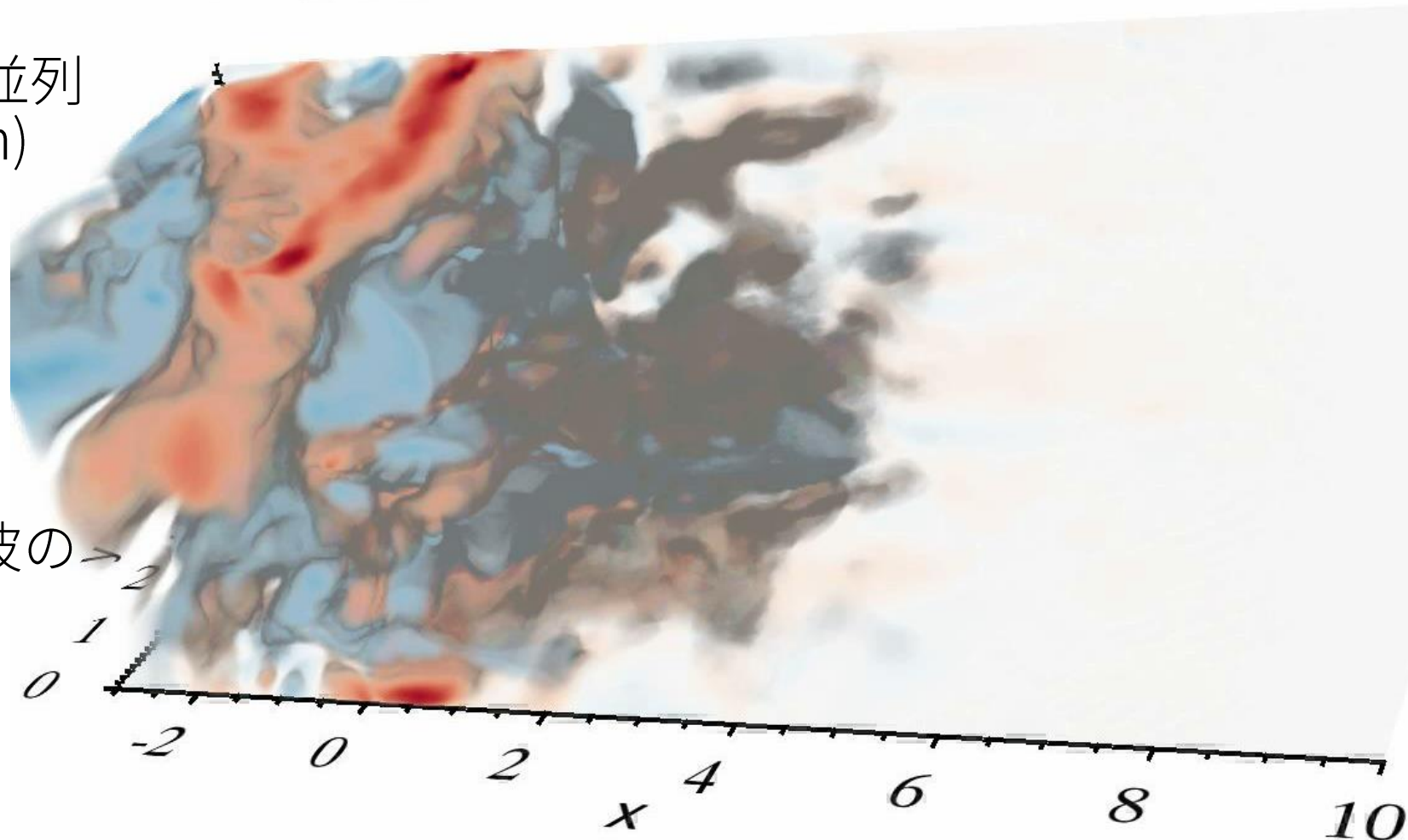


blue/red: B_z , gray: in-plane B field lines, circle: electron orbit

「京」を使った 衝撃波の超大規模数値 実験



T=6.92



□ 9216ノード (73,728コア) 並列
計算 (4×10^6 node*hour/run)

□ 8800x768x768 セル

□ 1兆粒子 (陽子+電子)

□ メモリ100TB

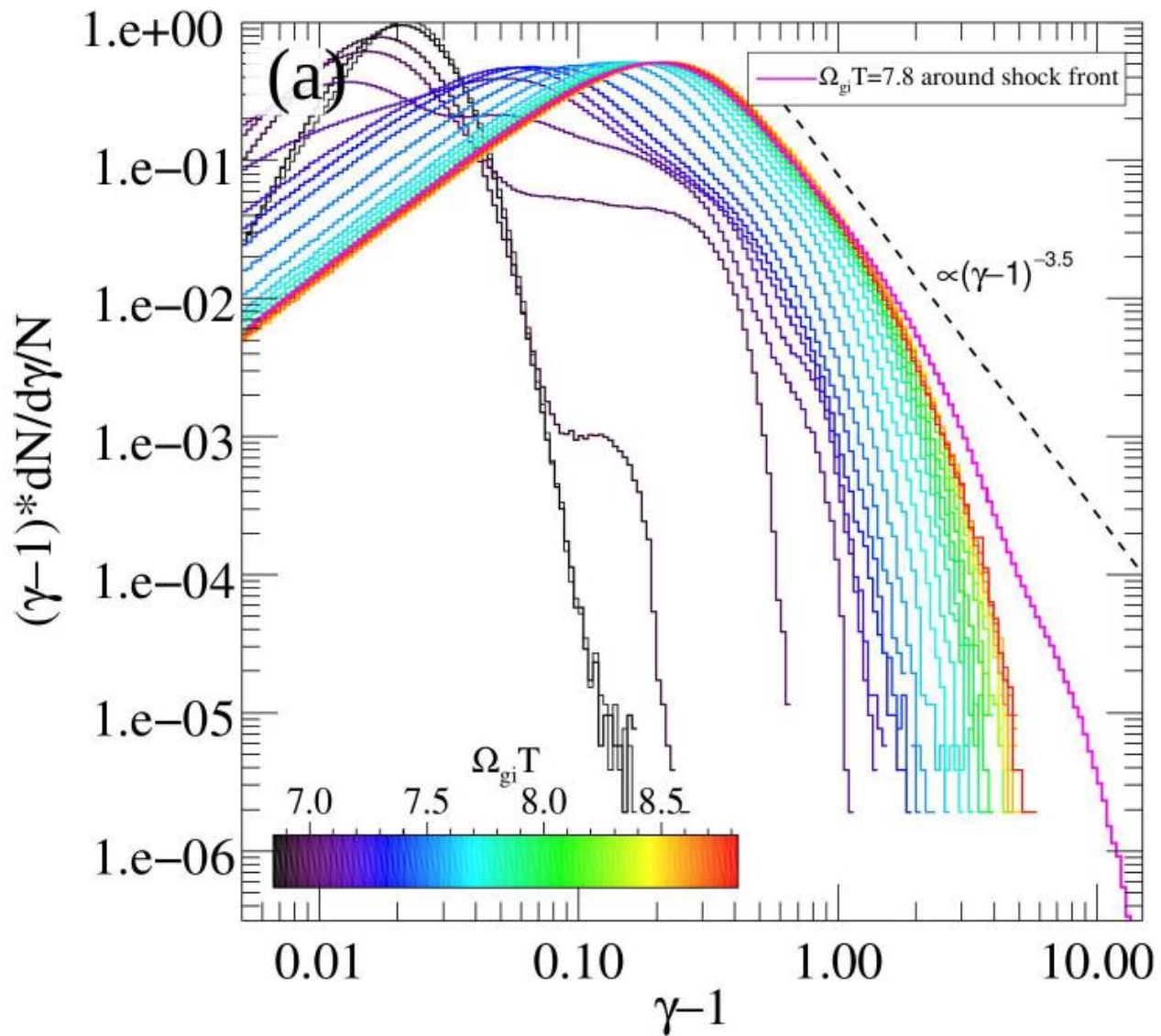
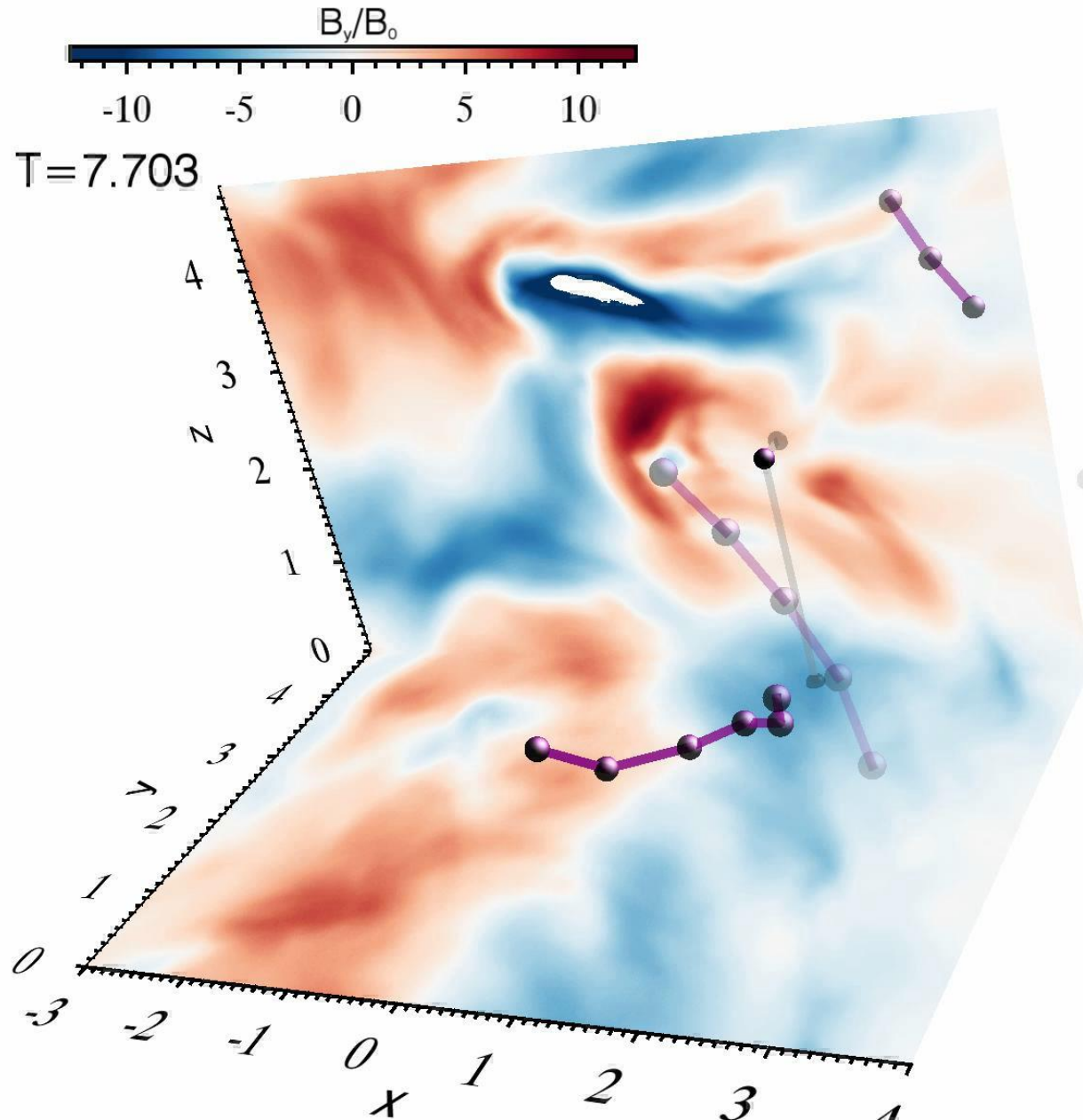
□ データ1PB

□ 世界初の高マッハ数衝撃波の
3次元PIC計算

□ 電子の長時間加速

□ PRLに投稿中

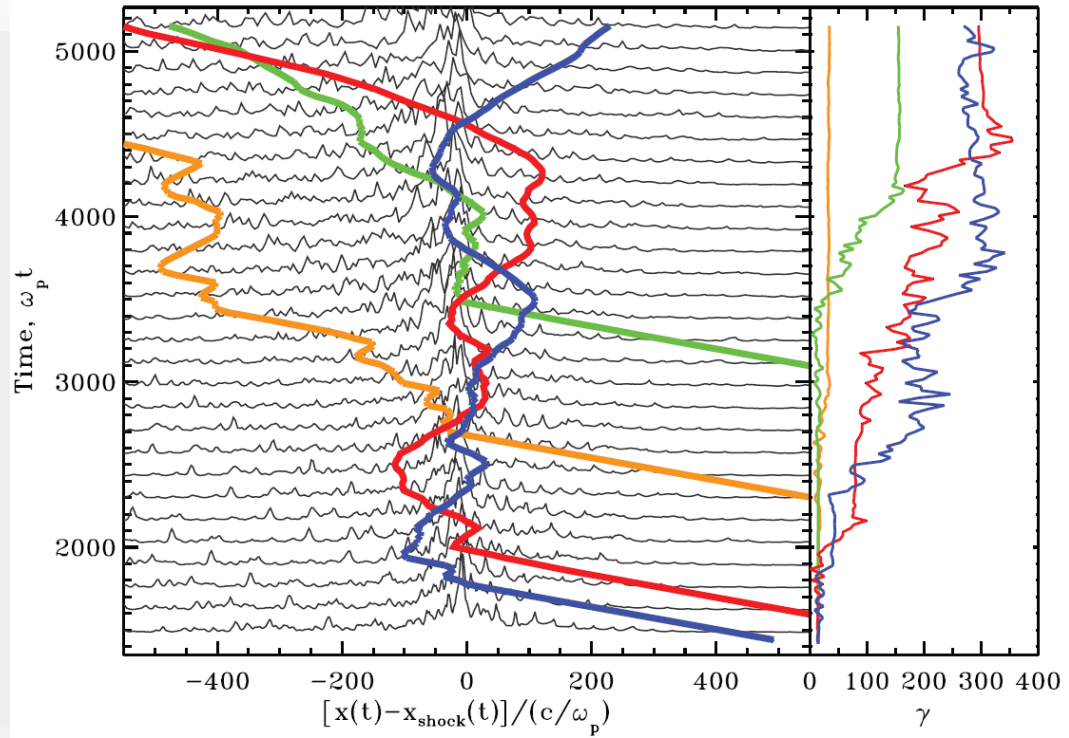
電子の磁気乱流による散乱（閉じ込め）と加速



相対論的衝撃波 における電子加速

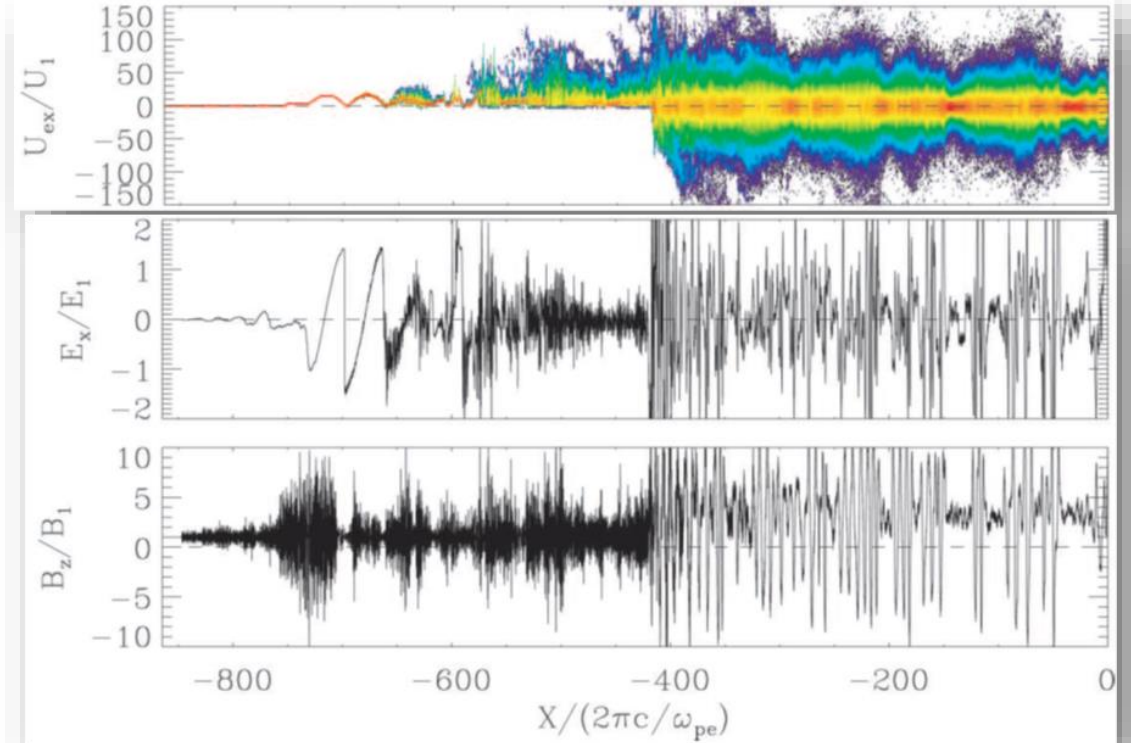
数値チェレンコフ問題を解決→実用化へ

電子加速メカニズム



Spitkovsky08; Sironi & Spitkovsky 11, 13

磁気乱流を散乱体としたDSA



Hoshino+ 92; Lyubarsky 06; Hoshino 08

衝撃波面から伝播する大振幅電磁波による航跡場加速

$$\sigma_e = \frac{B^2}{4\pi\rho_0 c^2 \Gamma} \quad : \text{磁気エネルギーと電子運動エネルギーの比}$$

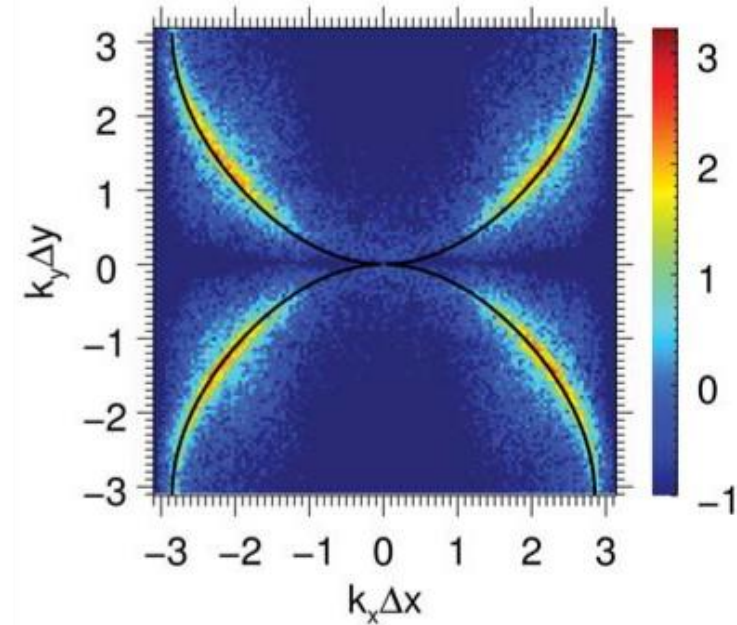
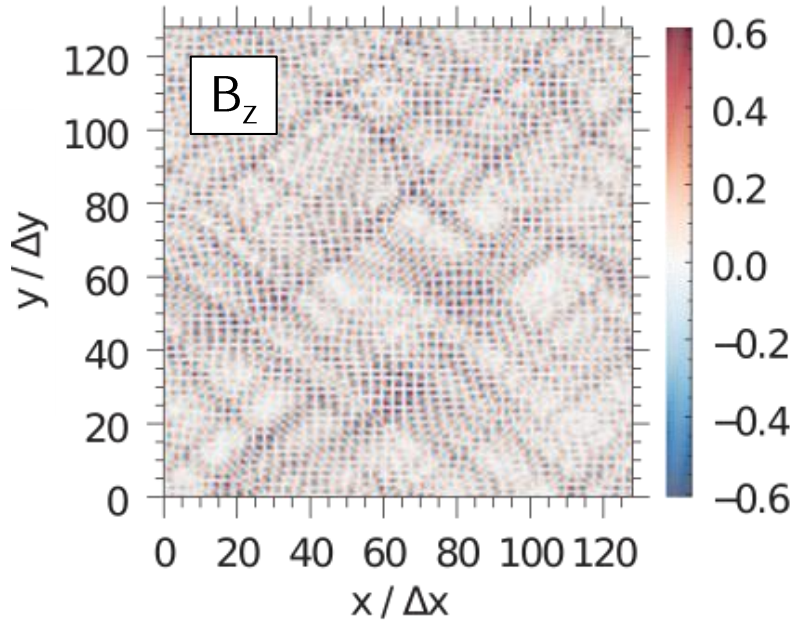
$\sigma_e \sim 10^{-6}$



$\sigma_e \sim 10^{-1}$

数値チェレンコフ不安定 (NCI)の問題

- ✓ 周期境界系
- ✓ X方向に相対論的流れ ($\gamma = 100$)



- ✓ 波数空間で特徴的な場所で励起
- ✓ 電磁場の数値解法に起因する数値分散が原因
- ✓ 粒子加速問題では必ず対処が必要

対処方法

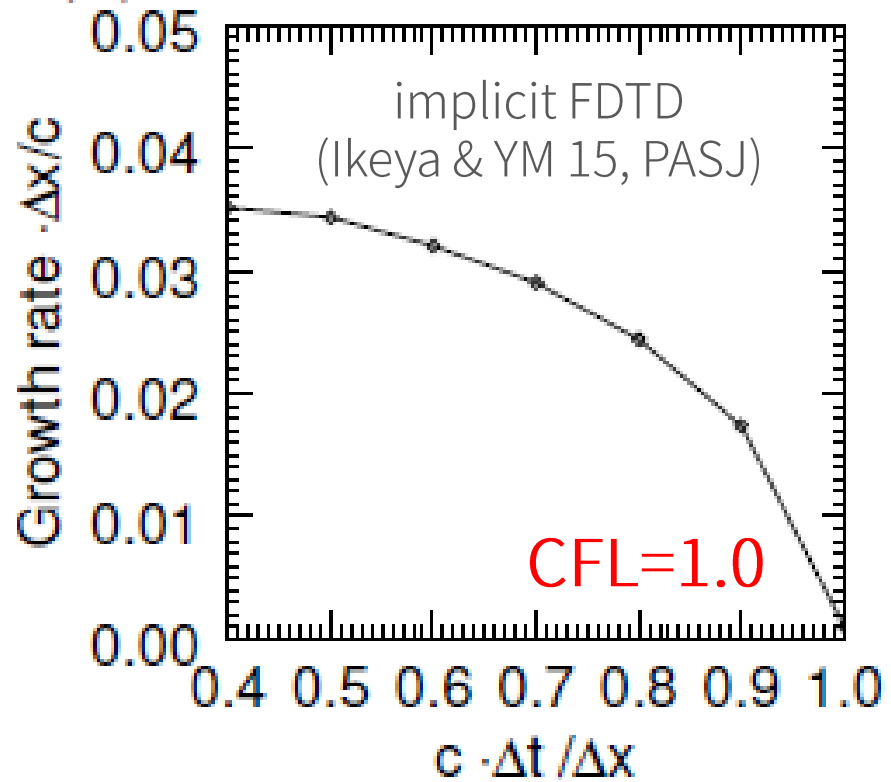
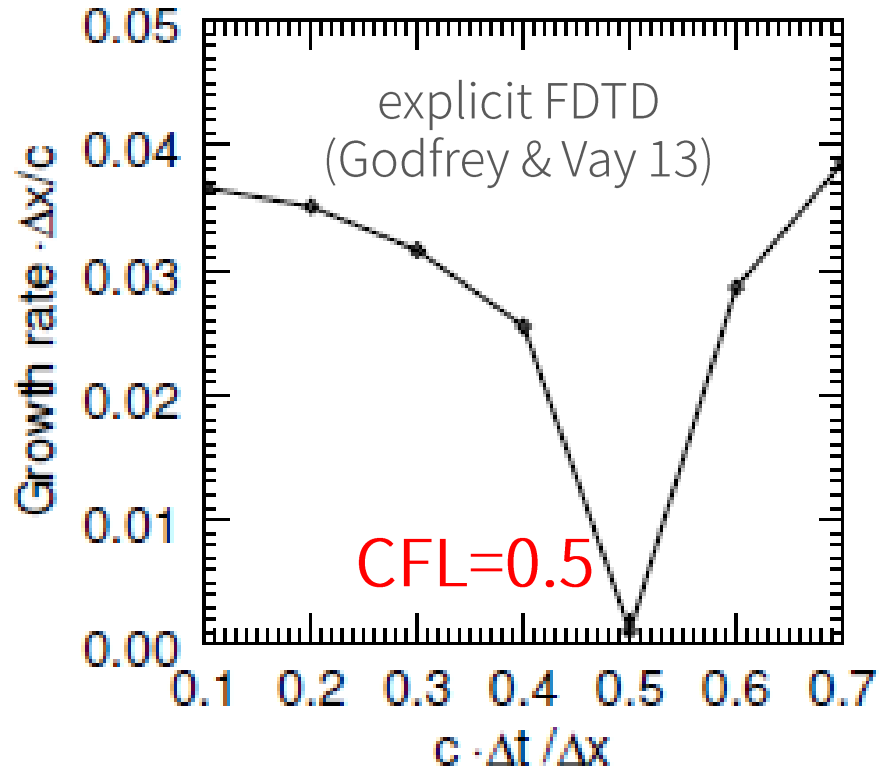
□ スペクトル法で解く (Vay+ 13)

- ✓ フーリエ空間でマクスウェル方程式を解く
- ✓ 波数空間でNCIを除去
- ✓ 大規模並列計算で効率が出ない

□ FDTD (差分法)

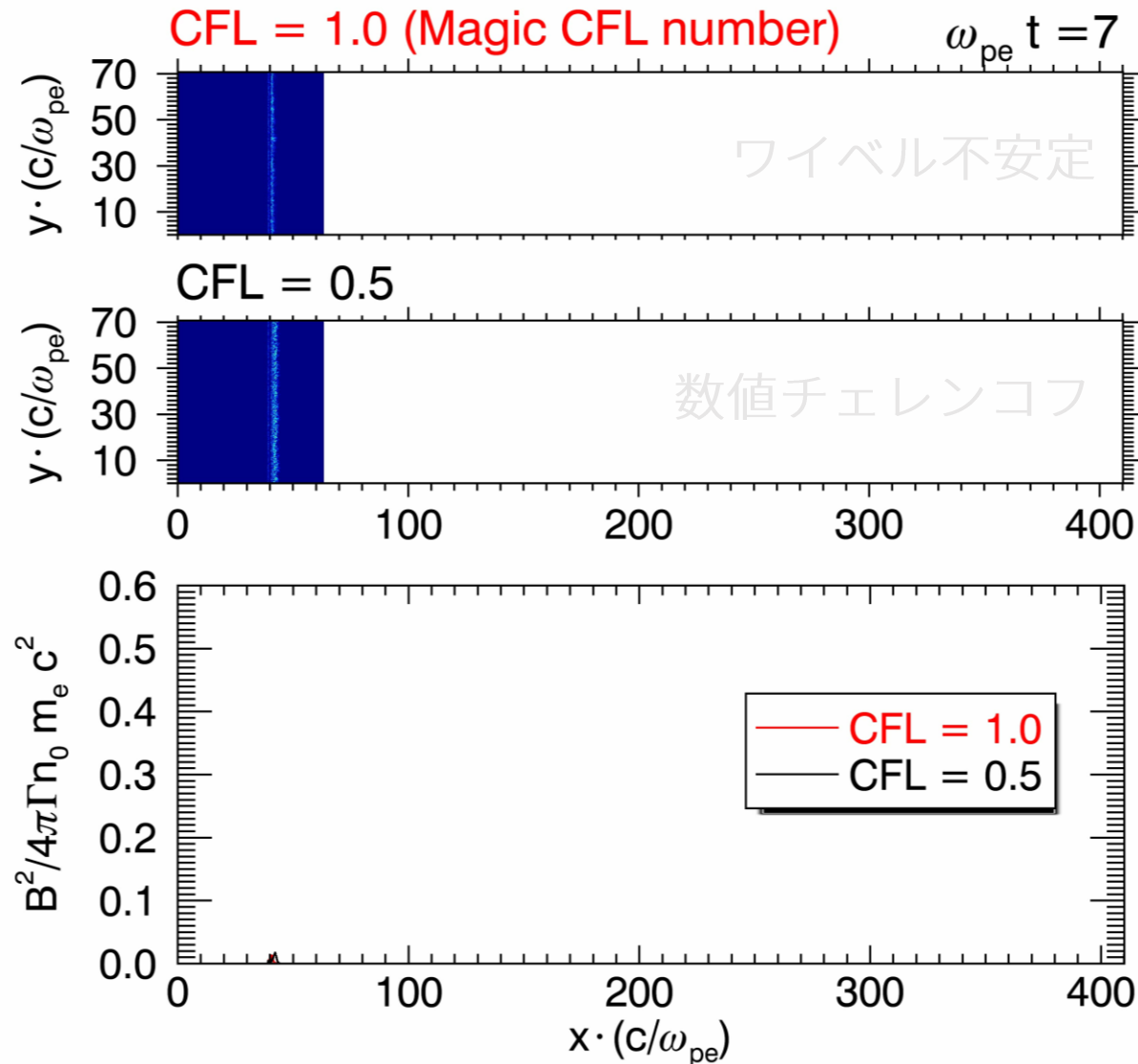
- ✓ J, E, B に対してフィルタリング (Greenwood+ 04; Sironi & Spitkovsky 09)
- ✓ 物理的な電磁波も同時に落としてしまう

マジックCFL数



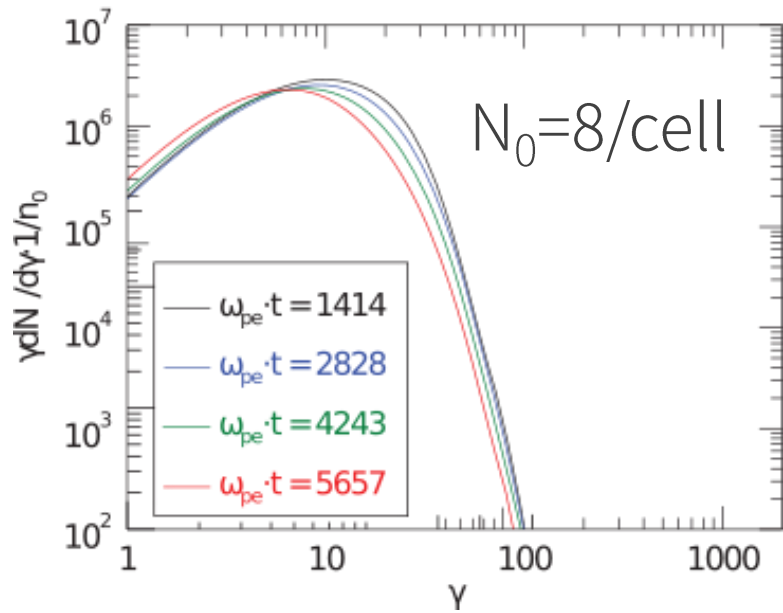
- NCIの成長率が特定のCFL数 ($c\Delta t/\Delta x$)で急激に減少することが発見 (Vay+ 11)
- PICアルゴリズムに強く依存
 - ✓ Esirkepovの電流計算法 (Esirkepov 00)
 - ✓ 電磁場に対して陽解法 (Godfrey & Vay 13) & 陰解法 (Ikeya & YM 15)
 - ✓ 粒子に対する電磁場の補間方法にも依存

マジックCFLを用いた陽電子・電子 相対論衝撃波計算 (上流ローレンツ因子=100)

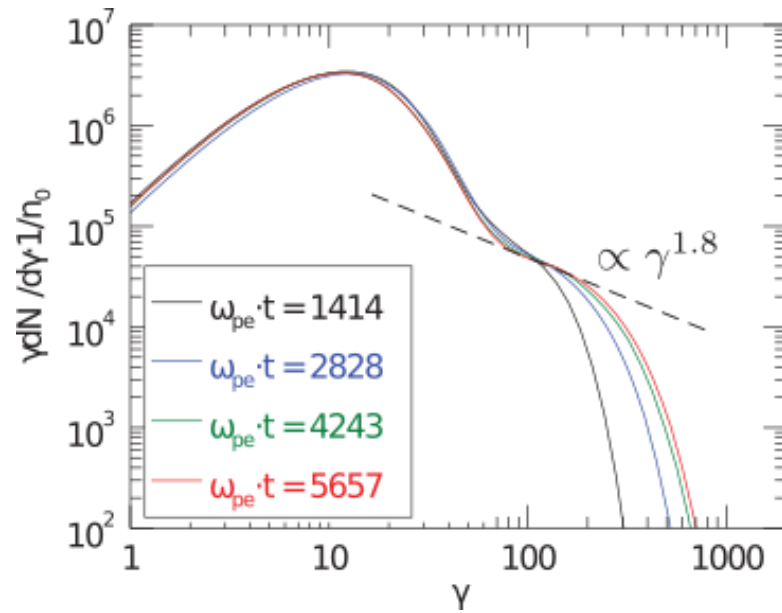


下流における電子エネルギースペクトルの比較

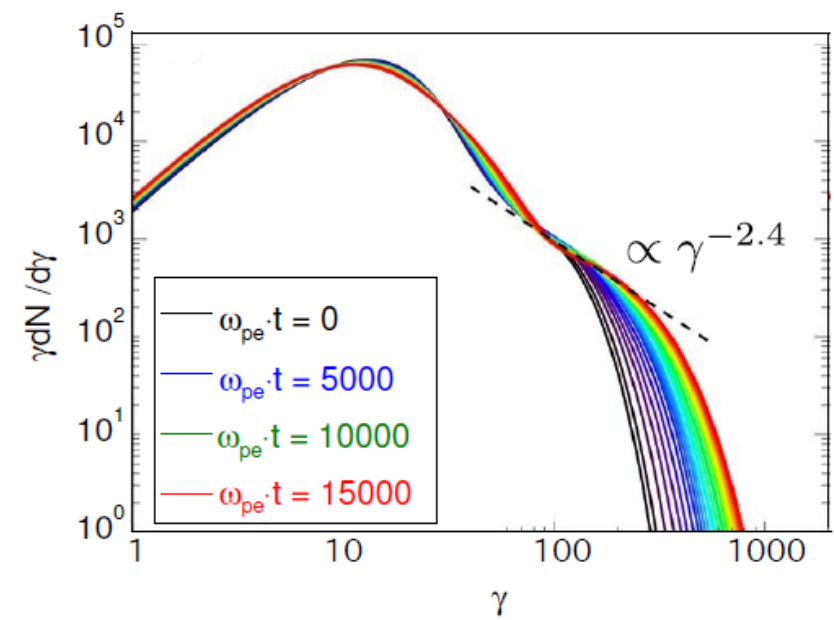
CFL=0.5 (Non-magic)



$N_0=50/\text{cell}$, CFL=1.0



Sironi+13



- NCIがあると、磁気乱流が抑えられ、加速は起きない
- 過去の報告に比べ、より効率的な加速が実現
- べき指数 -1.8 vs. -2.4 (Sironi+13)

まとめと今後

- 非相対論的衝撃波：電子注入問題の解決が視野に入ってきた
- 相対論的衝撃波：数値チェレンコフ問題を解決し、電子加速問題について成果が出始めた

- ポスト京では陽子加速
- PICコードのバージョンアップを計画
 - ✓ロードバランサーの実装
 - ✓「京」の運用停止を見据えて、メニーコアシステム（Oakforest-PACS）上での最適化
- より大規模・長時間発展を（強スケーリングで）追うことを可能にすることを目指す