

---

# 萌芽研究課題 「高エネルギー粒子加速」 と 共通コード 「高次精度MHDコードCANS+」

HPCI戦略プログラム分野5 全体シンポジウム  
富士ソフトアキバプラザ、2014年3月4日

---

松本洋介、松元亮治（千葉大学）

collaborators:

星野真弘、天野孝伸（東大）、蔵満康浩（台湾中央大）、  
三好隆博（広島大）、簗島敬（JAMSTEC）、川島朋尚（上海天文台）

---

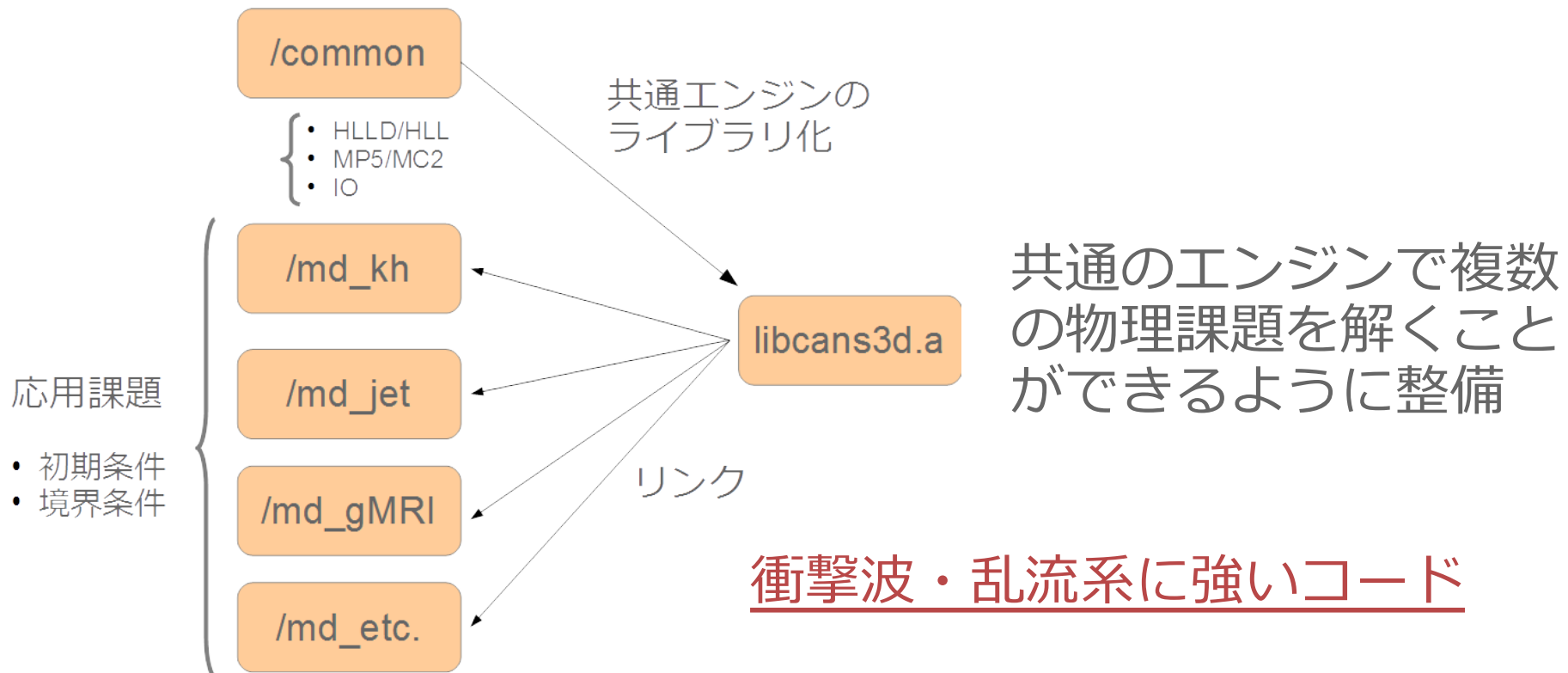
---

## 共通コード開発進捗

- ◎磁気流体コードの高次精度化（詳細は天文学会で）
- ◎シミュレーションサマースクールの主催
- ◎粒子コードはマイナーアップグレード

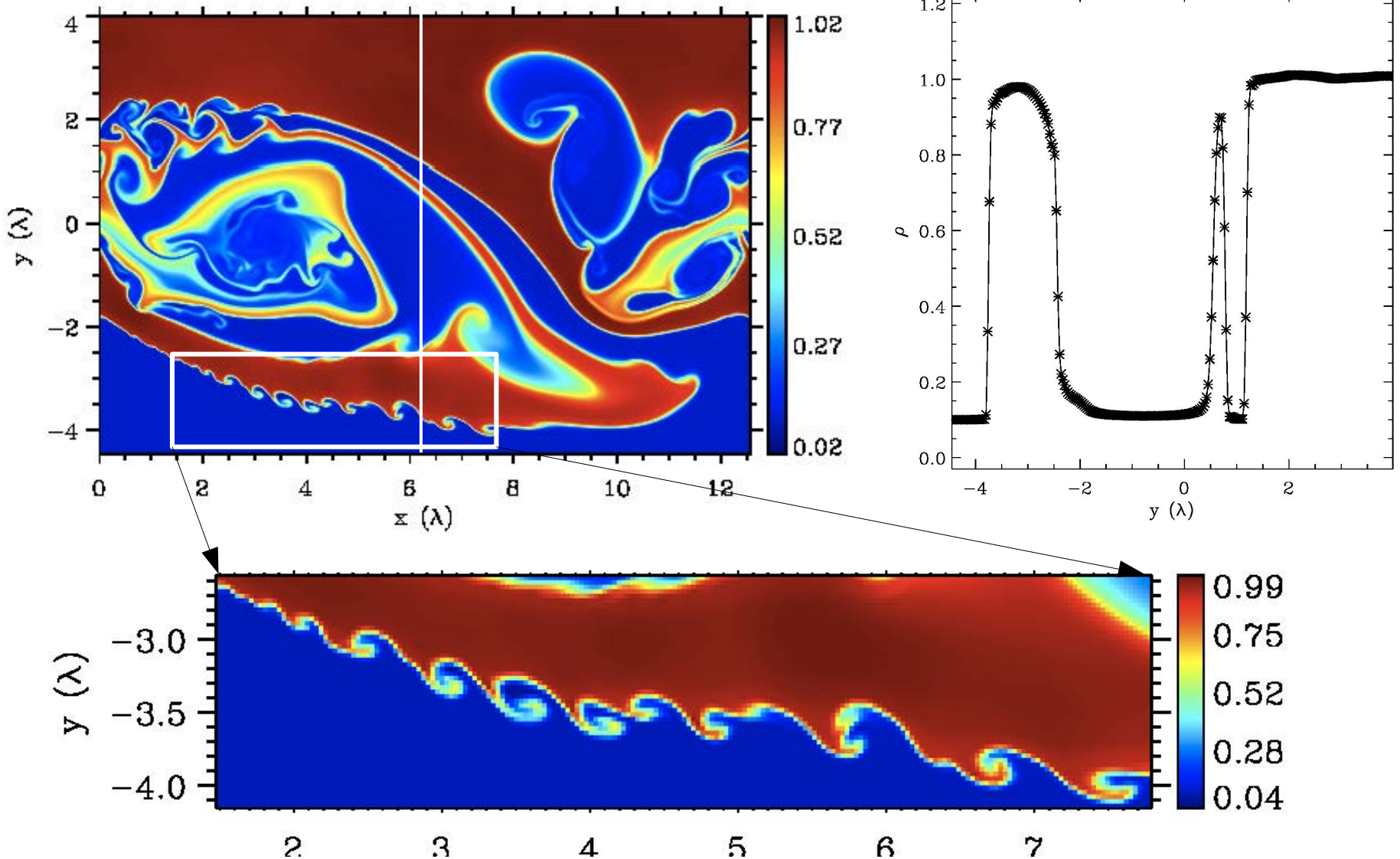
# CANS+ (CANS plus)

- ◎HLLD法をベースとした有限体積法 (Miyoshi & Kusano '05)
- ◎セル境界への補間：MP5法 (Suresh & Huynh '97)
- ◎divBクリーニング：9 wave 法 (Dedner+ '02)
- ◎MPI 3次元領域分割（実行効率14% @XC30）
- ◎カーテシアン、円筒座標系、放射冷却、非一様セル幅



# Kelvin-Helmholtz turbulence

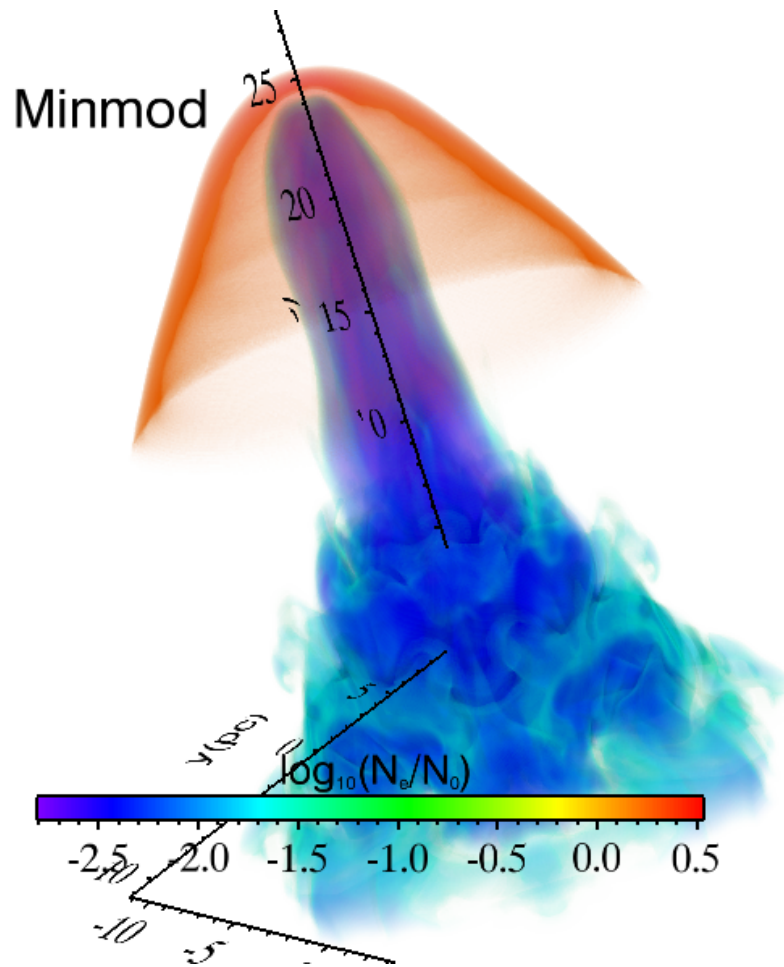
Density



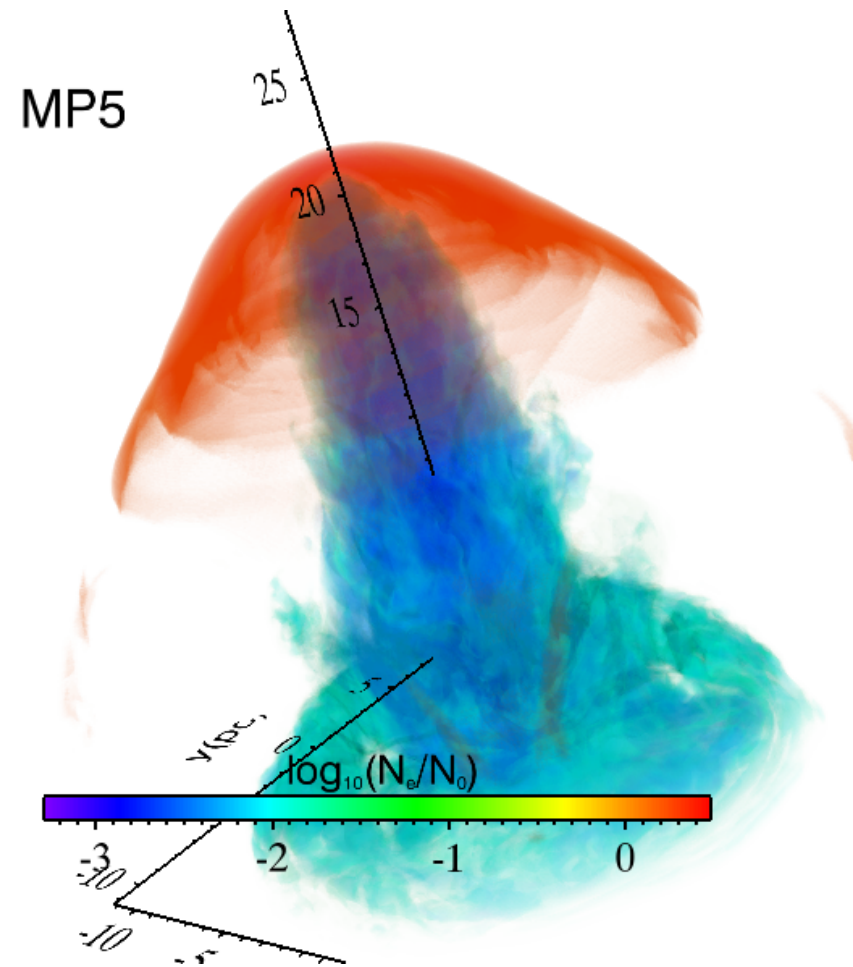


# Jet propagation

2 次精度



5 次精度



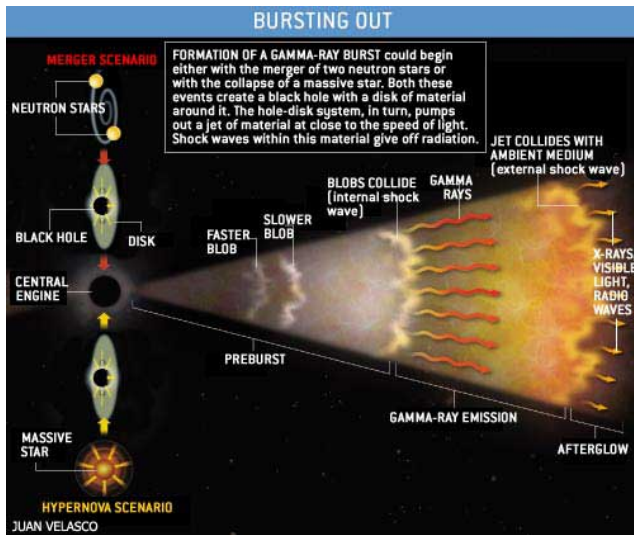
---

# 「高エネルギー粒子加速」

---

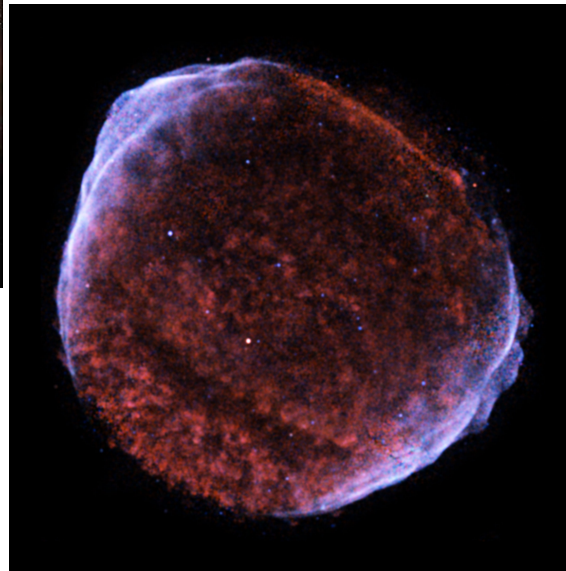
# Shock experiments as particle accelerators

GRB, AGN jets ( $v_{\text{sh}} \sim c$ )



e.g., Meszaros '01

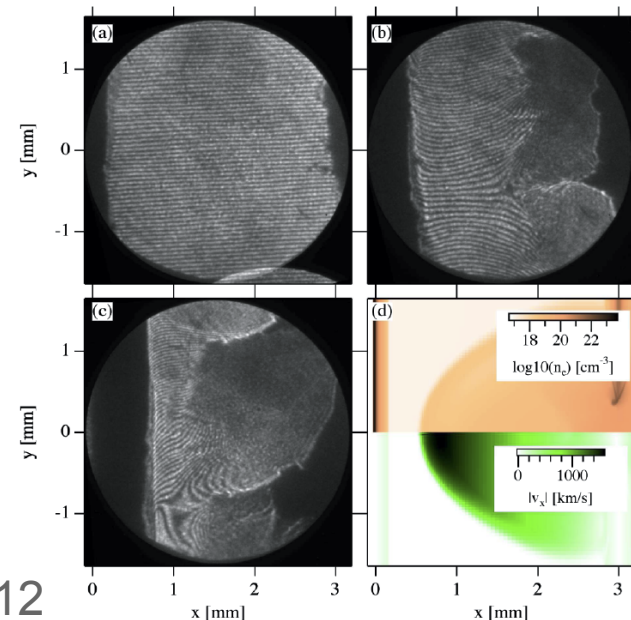
SNR shocks ( $M_A > 100$ )



e.g., Bamba+ 03

$v_{\text{sh}}/c$

High power laser

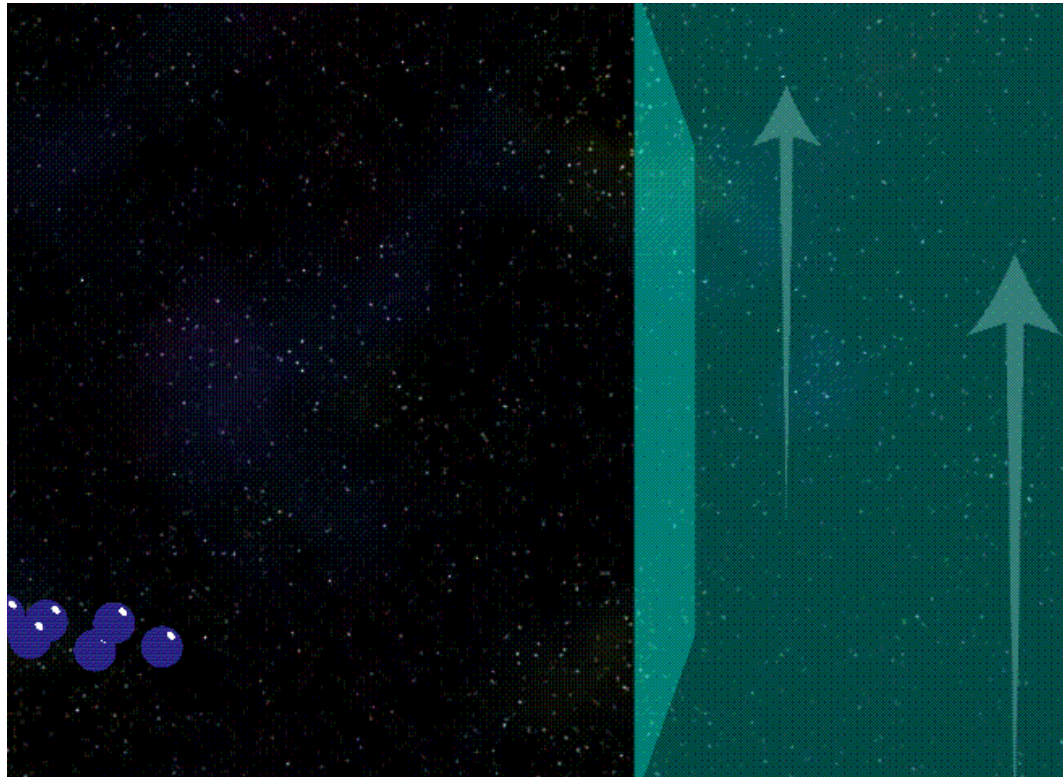


Kuramitsu+ 12

# 衝撃波における粒子加速と課題

---

## 衝撃波統計（1次フェルミ）加速



入江さん作

- ある程度“事前に加速”が必要（特に**電子**）：インジェクション問題
- 閉じ込め・散乱体となりうる、大振幅磁場乱流の起源

# Particle-in-Cell simulation

Particle push

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

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

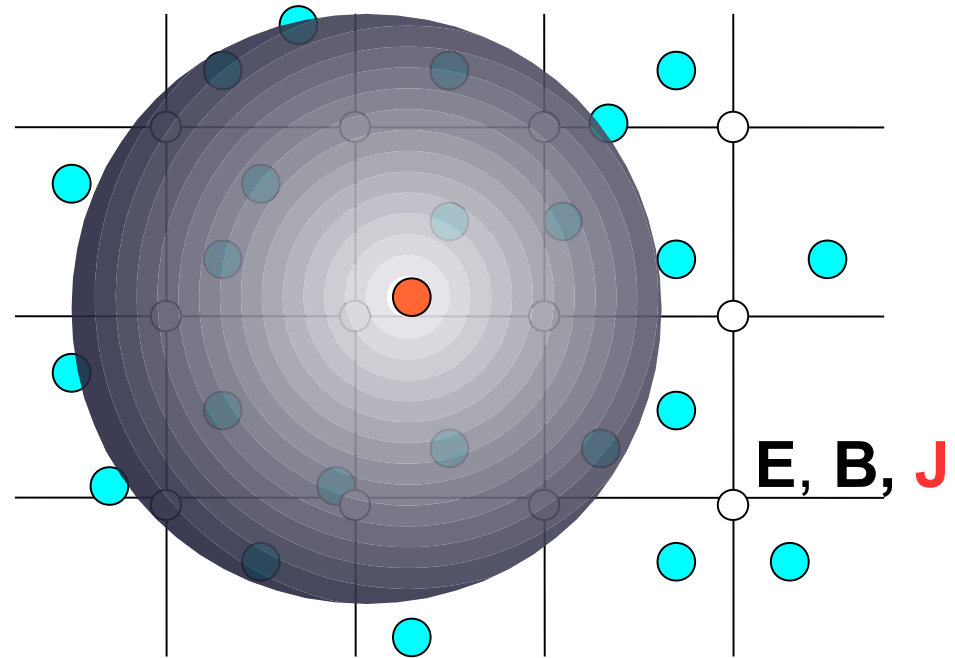
$$\mathbf{J} = \sum_p q_p \frac{\mathbf{u}_p}{\gamma_p}$$



Maxwell equation

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

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



最小スケール：デバイ長 =  $v_{the}/\omega_{pe}$

ダイナミックレンジ

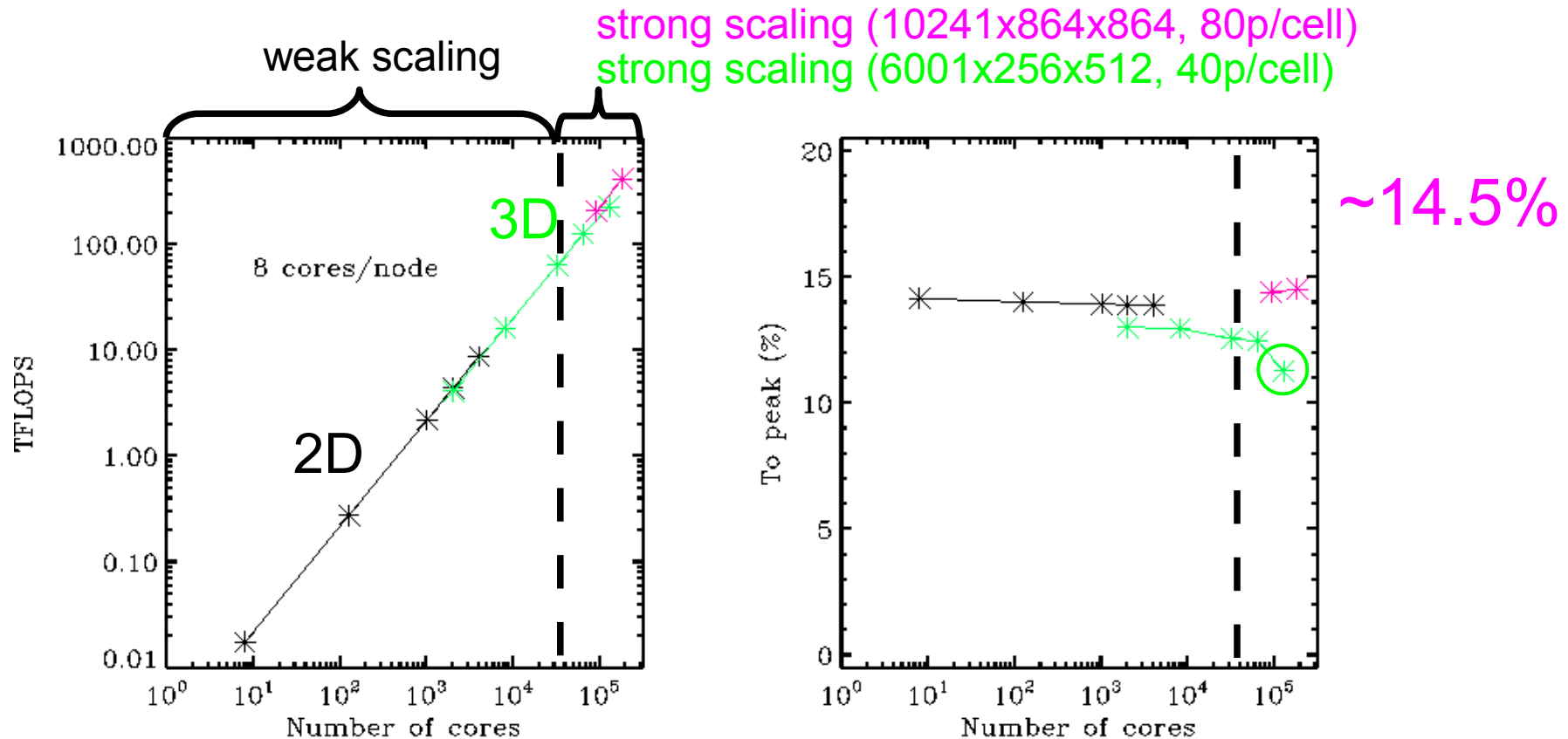
●  $M/m$ : イオン・電子質量比

●  $M_A = V_{sh}/V_A$ : (アルヴェン) マッハ数

●  $V_{sh}/c$ : 相対論的か否か

高 $M/m$ 、高 $M_A$ 、非相対論 ( $V_{sh}/c \ll 1$ )

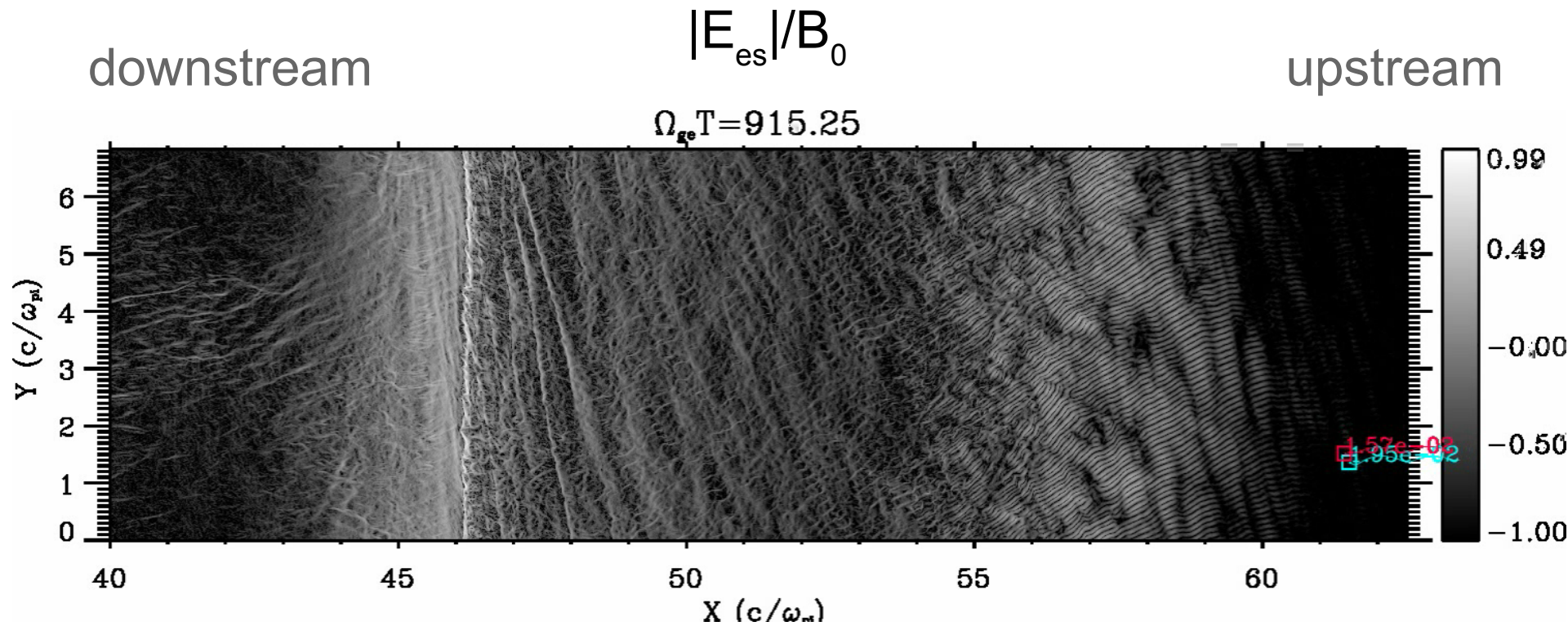
# PIC code performance



- ⦿ SIMD optimized (vectorized)
- ⦿ MPI+OpenMP hybrid parallelization
- ⦿ Implicit FDTD
- ⦿ High-accuracy current deposit algorithm (Esirkepov '01)
- ⦿ Quadratic spline for shape function (will be upgraded to the cubic)



# e- acceleration at $M/m=225$ , $M_A \sim 45$ shock



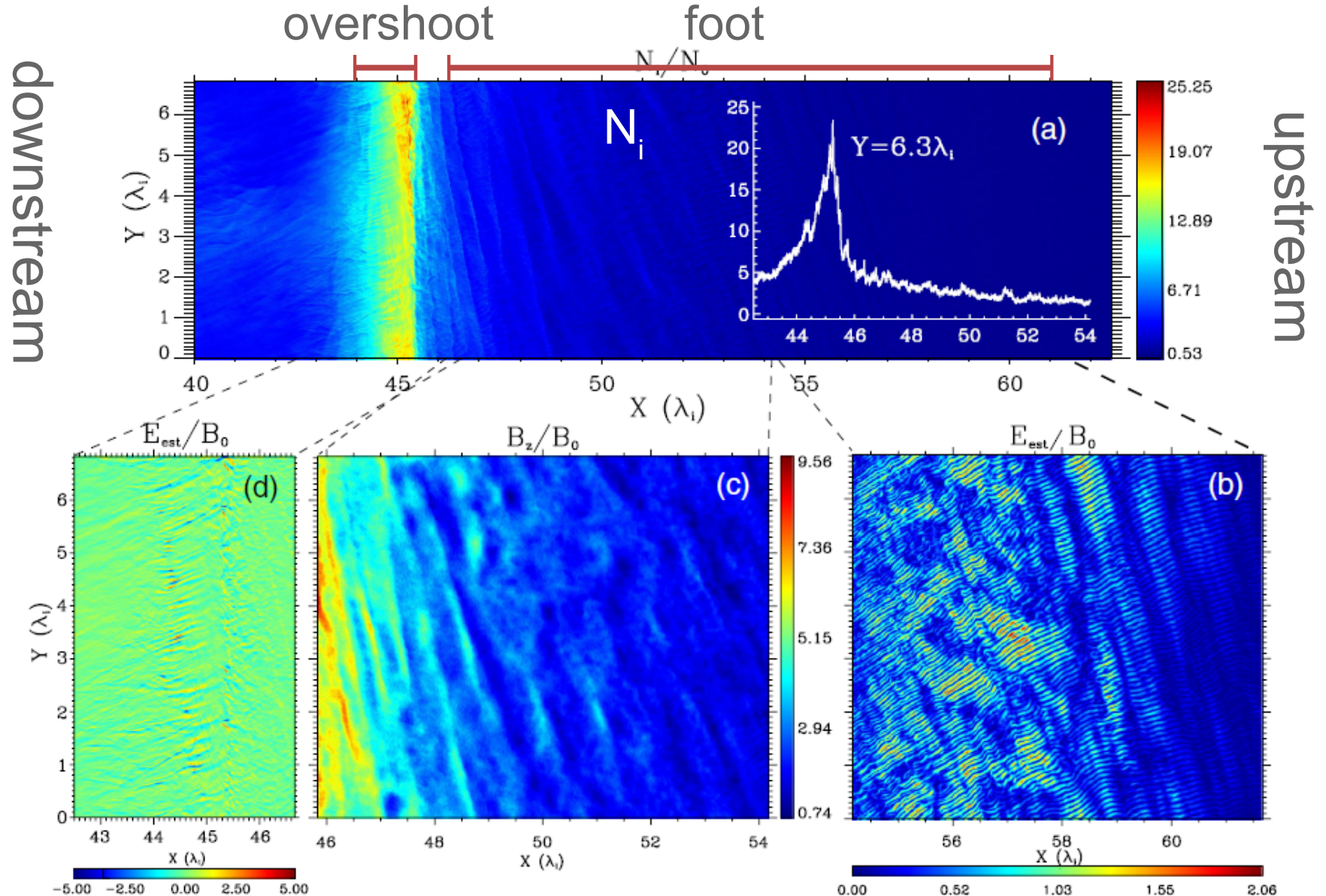
Matsumoto+ '13 *PRL*



:accelerated

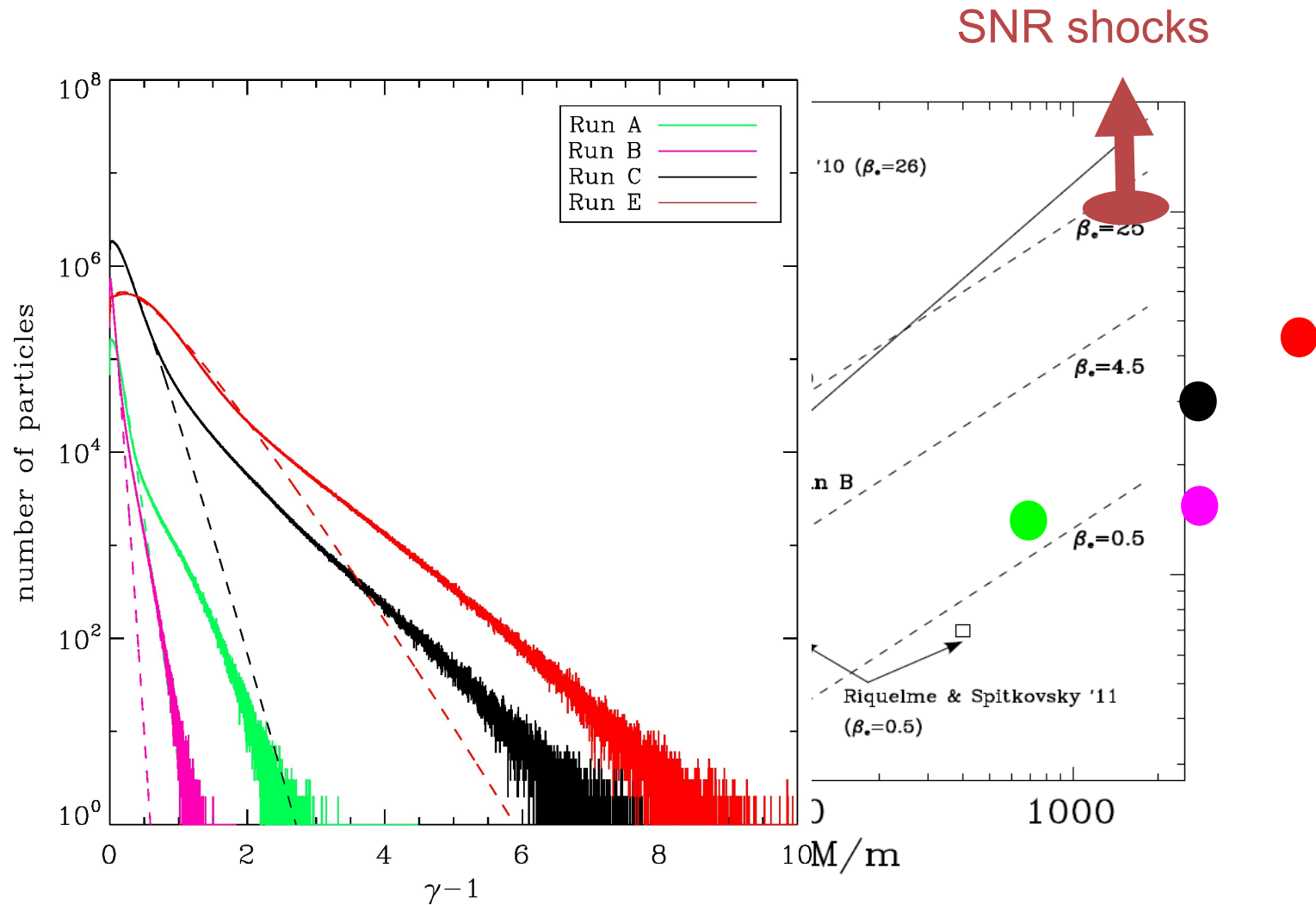
:thermal

# Overview ( $\Omega_{gi} T \sim 4$ )





# Electron energy spectra in downstream



# Cosmic ray acceleration on

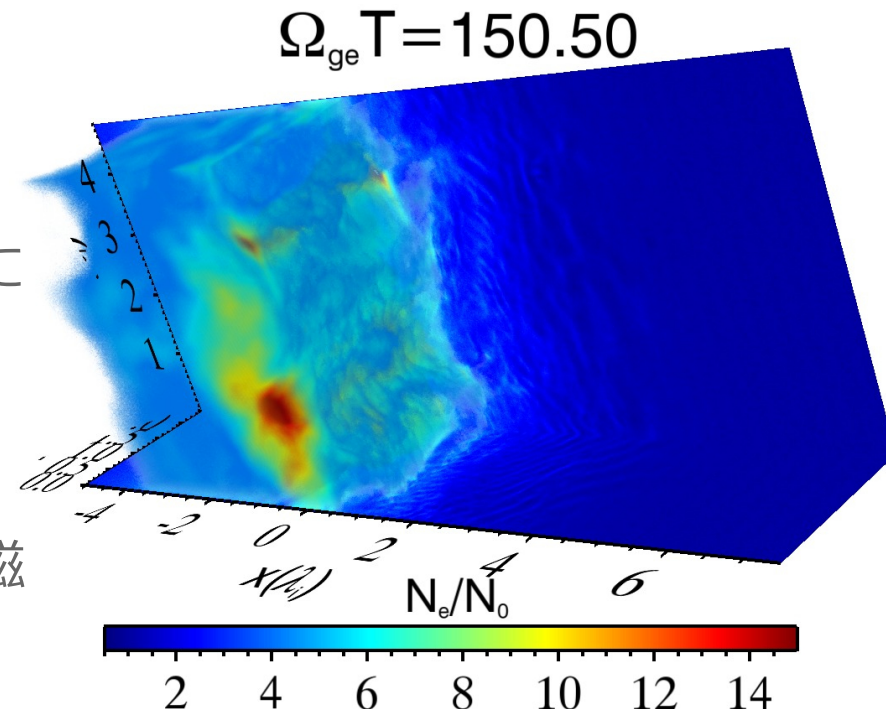


❖ FY2012-2013 一般利用課題（代表、制限付き）

- ◎ 2D PICシミュレーション、電子の前段階加速、磁気乱流は個別に議論

❖ FY2014 若手人材育成課題

- ◎ 3D PICシミュレーションで、相対論的電子加速（前段階加速、磁気乱流生成）
- ◎  $10^{12}$  particles



# まとめ

---

## 共通コード開発

- ◎5次精度MHDコードの開発・整備・公開（HP）
- ◎共同研究、博士論文研究に使用中

## 萌芽研究課題

- ◎理論・室内レーザー実験グループと議論を行いながら、無衝突衝撃波における粒子加速研究を進めた
- ◎2, 3次元PICコードの最適化
- ◎2次元PICシミュレーションによる電子前段階加速
- ◎「京」若手採択で3D PICシミュレーションが本格化

## References

- ◎Y. Matsumoto, T. Amano, & M. Hoshino, *Phys. Rev. Lett.*, 2013.
  - ◎Y. Matsumoto, T. Amano, & M. Hoshino, *Astrophys. J.*, 2012.
  - ◎Y. Kuramitsu, Y. Sakawa, ..., YM, *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, 2012.
  - ◎Y. Kuramitsu, Y. Sakawa, ..., YM, *et al.*, *Plasma Phys. Control. Fusion*, 2012.
-