

pCANS: 電磁粒子コード版CANS

松本洋介
千葉大学理学研究科
&
pCANS developers

内容

▶ イン트로ダクション

▶ pCANS

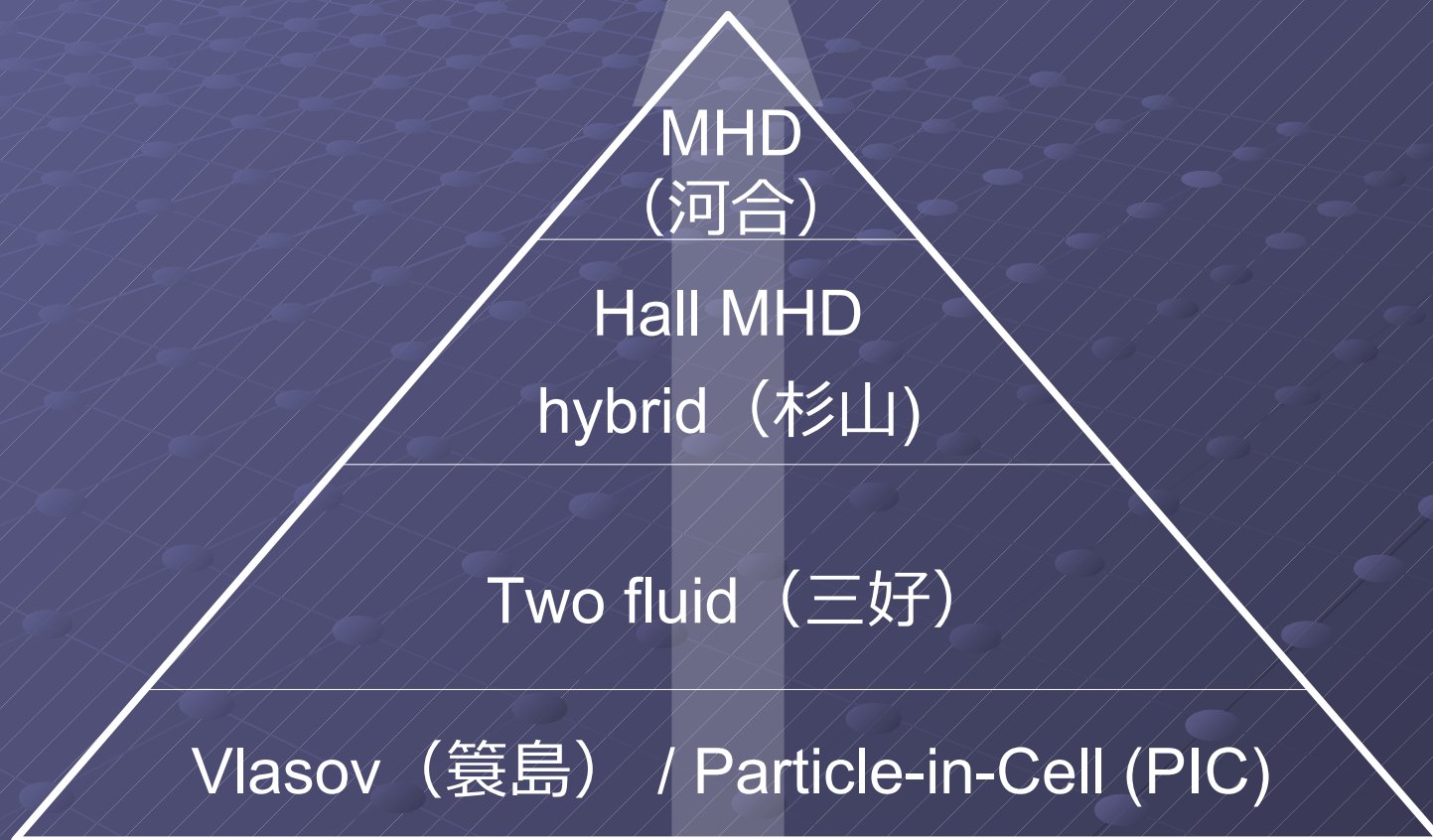
- イン트로ダクション
- サマースクールでの実施状況
- 高精度化
- 「京」での実行性能
- 3次元コードの開発状況
- IDLの3次元可視化ツール

▶ まとめと今後

イントロダクション

プラズマシミュレーション手法

近似レベル (≡計算量の逆数)



取り扱える現象のスケール

MHD vs. PIC

MHD

- ▶ 流体的な大規模構造
- ▶ 構造形成（宇宙ジェット、星形成、銀河団）
- ▶ ダイナモ（地球、太陽）
- ▶ 恒星風、フレア
- ▶ 有限体積（差分）法
- ▶ 数値スキームにバリエーション（Roe's、HLLD、CIP、etc.）
- ▶ 計算コスト小
- ▶ 並列化効率大

PIC

- ▶ 無衝突プラズマ第一原理シミュレーション手法
- ▶ 粒子加速（無衝突衝撃波、磁気リコネクション）
- ▶ 粒子輸送（KH不安定、乱流）
- ▶ 磁場生成（Weibel不安定）
- ▶ 粒子法
- ▶ アルゴリズムはほぼ完成
- ▶ 計算コスト大
- ▶ 並列化に工夫が必要

粒子と電磁場

粒子の運動、加速

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

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

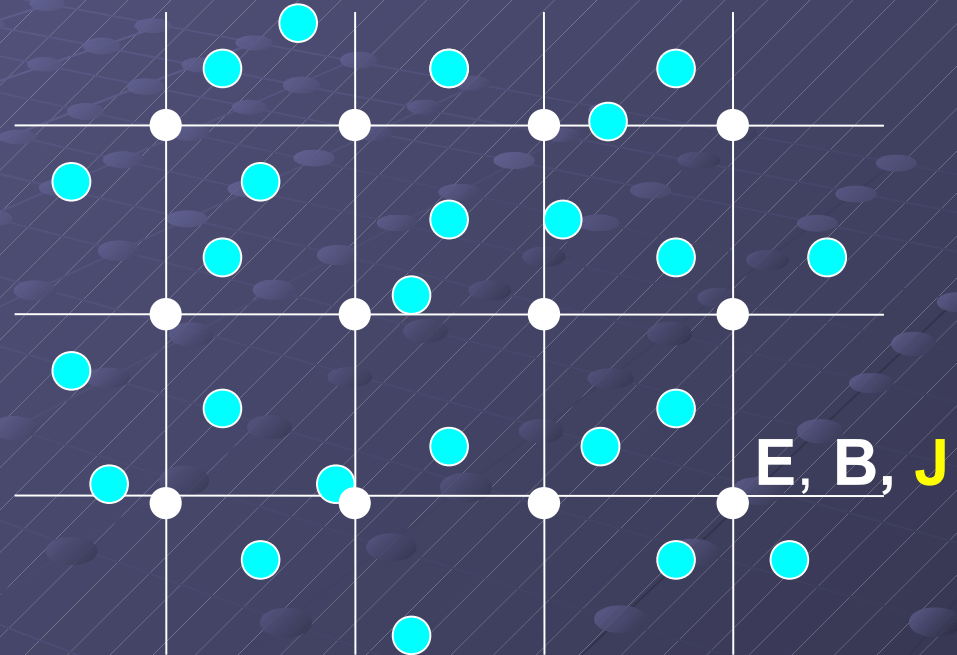
$$\mathbf{J} = \sum_p q_p \frac{\mathbf{u}_p}{\gamma_p}$$



Maxwell equation

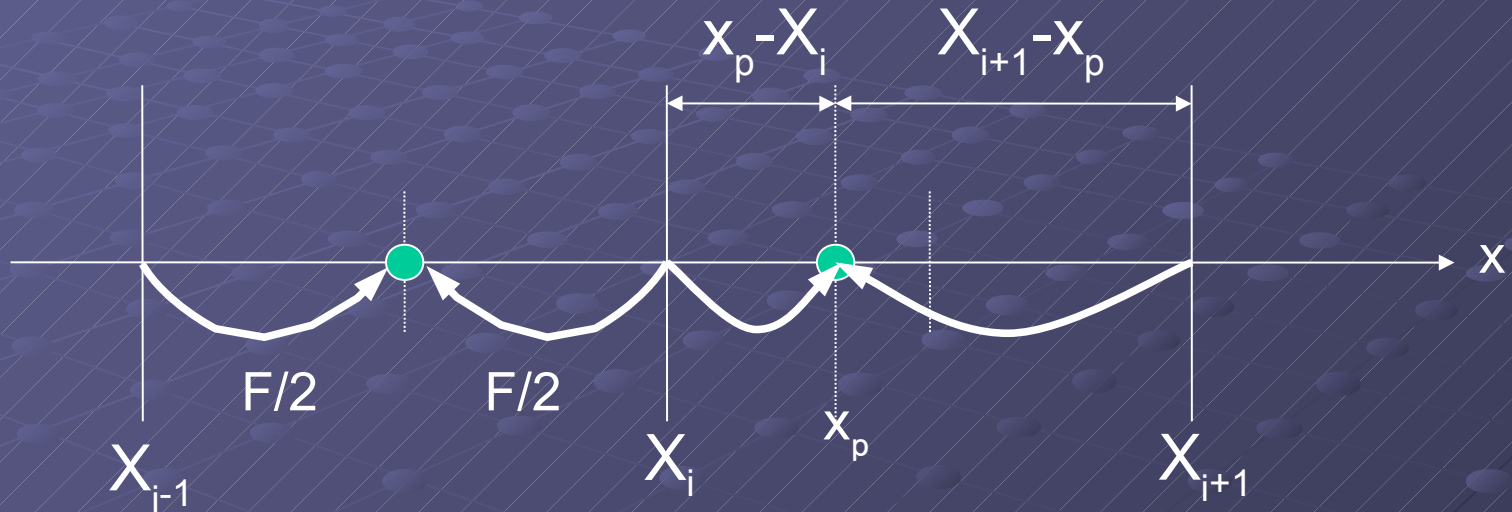
$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = -c \nabla \times \mathbf{E}$$

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



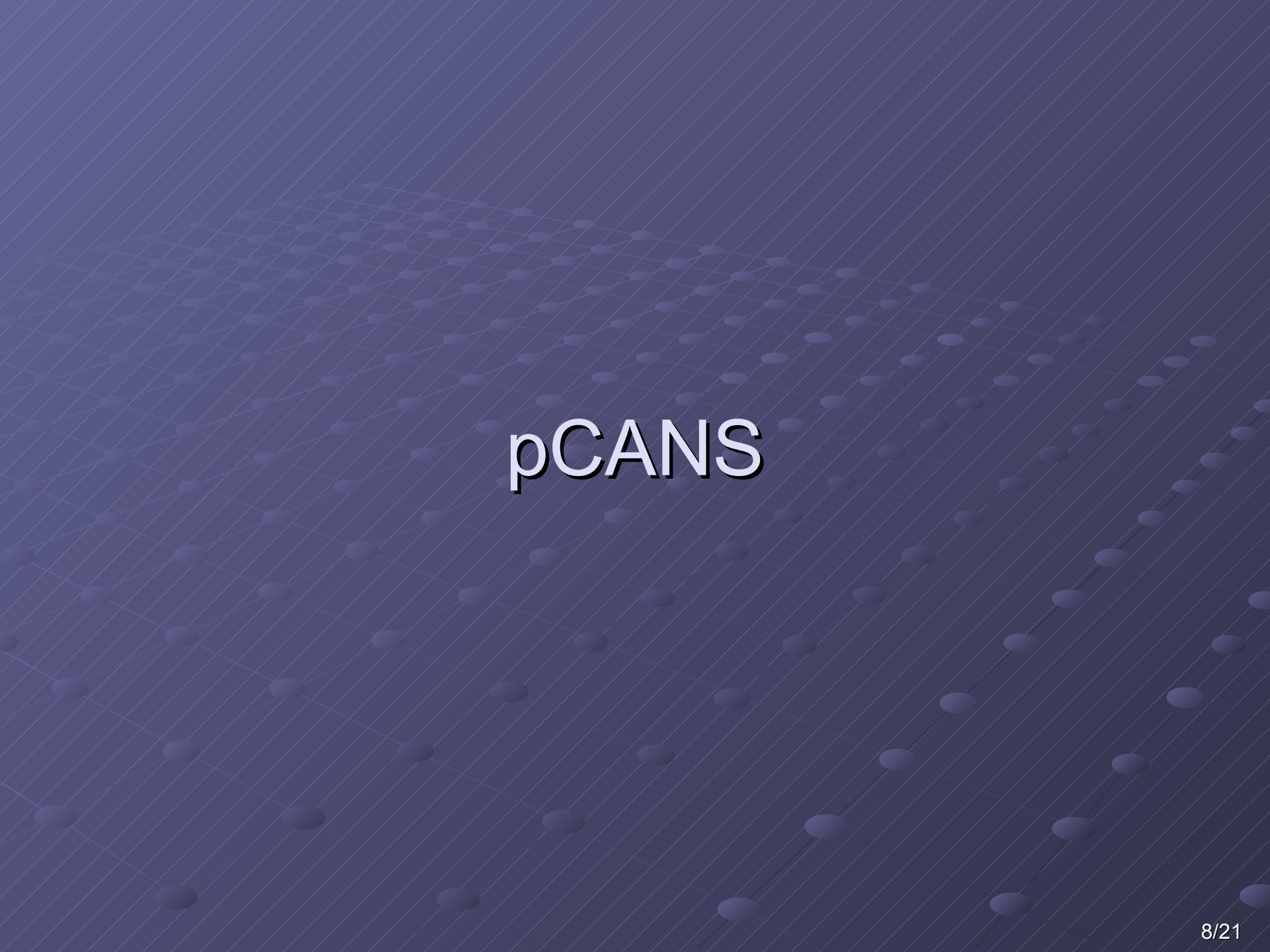
流体スケールからデバイ長まで自己無撞着に解くことができる。

Particle-in-Cell法



$$F_p = F_i \left(1 - \frac{x_p - X_i}{\Delta x} \right) + F_{i+1} \left(\frac{x_p - X_i}{\Delta x} \right)$$

形状関数



pCANS

CANS

Coordinated Astronomical Numerical Software

- ▶ 磁気流体 (MHD) シミュレーションコードパッケージ
- ▶ 太陽や星、星間空間などにおける 宇宙の流体現象を対象としたシミュレーションを簡単に実行可能
- ▶ 数値スキームの選択が可能
- ▶ 多くの物理課題が整備
- ▶ Fortran77
- ▶ IDLによる可視化



pCANS



- ▶ PICシミュレーションコードパッケージ
- ▶ CANSと同じようなディレクトリ構成
- ▶ CANS経験者であればすぐに使えるはず。。。。
- ▶ 1, 2次元コード (, 3次元コードも。。。)
- ▶ 物理課題の整備 (weibel, mrx, shock, KH, etc.)
- ▶ Fortran90
- ▶ MPI並列化 (PCからスパコンまでポータブル)
- ▶ IDLによる可視化 (3次元まで)
- ▶ 日本語マニュアルの整備

世界におけるPICコード

	公開／非公開	フリー／商用	並列化	開発元
TRISTAN-MP	公開	フリー	○	Princeton/USA
OSIRIS	非公開	フリー	○	UCLA/USA
VSim	非公開	商用	○	Tech-X corp./USA
KEMPO	非公開	フリー	○	京都大学
CELESTE3D	公開	フリー	○	LANL/USA
pCANS	公開	フリー	○	千葉大学

シミュレーションサマースクール： pCANSを用いた実習

- 44名の受講者の内、15名がpCANSによる実習を選ぶ
- 課題として、二流体不安定（3名）、ワイベル不安定（2名）、磁気リコネクション（3名）、無衝突衝撃波（2名）、無衝突KH不安定（3名）
- FX10@東大の12ノード（192並列）を使った並列計算による課題の実施

サマースクールの反響

マニュアルサイトの訪問数の推移

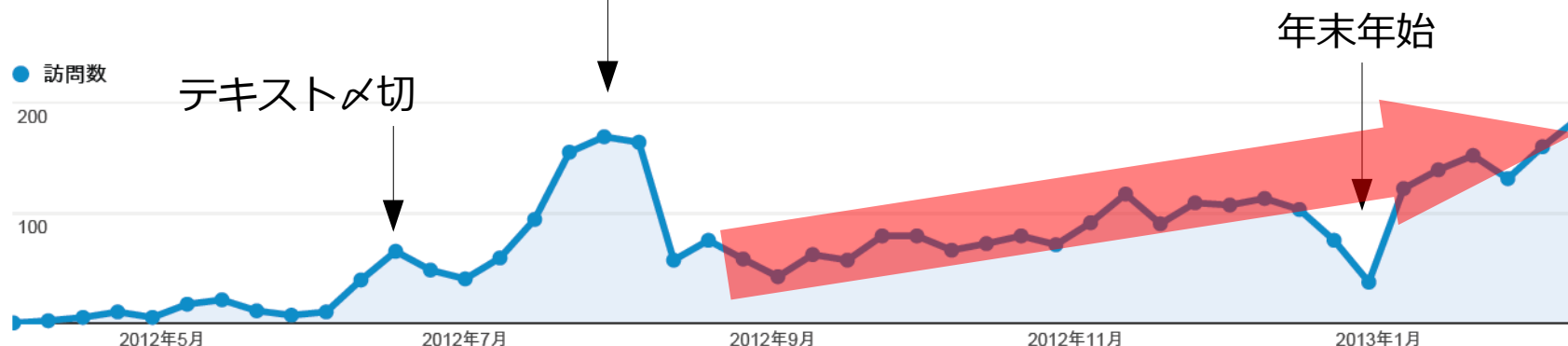
ユーザー サマリー

2012/04/01 - 2013/02/16

訪問数の割合: 100.00%

サマリー

サマースクール



このサイトのユーザー数: 1,670



訪問数: 3,449



ユーザー数: 1,670



ページビュー数: 9,328



訪問別ページビュー: 2.70



訪問時の平均滞在時間: 00:02:10



直帰率: 68.40%



新規訪問の割合: 47.64%



52.31% Returning Visitor

1,804 訪問数

47.69% New Visitor

1,645 訪問数

* 管理者IPは除く

pCANSのアップデート

- ▶ 電荷保存法の変更
- ▶ 0–2次の粒子形状関数をスイッチできるように
- ▶ 「京」での性能評価
- ▶ 3次元コードの開発
- ▶ 3次元IDL可視化ルーチンの開発

電荷保存法

$$\underline{\nabla \cdot \mathbf{E} = 4\pi\rho_e}$$

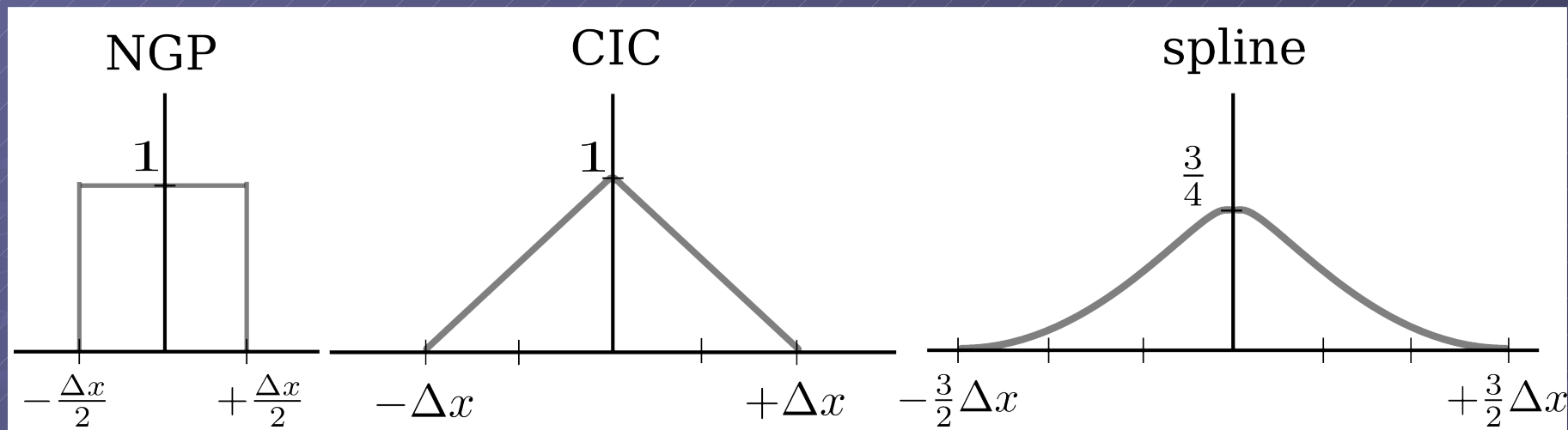
ρ_e と $\mathbf{J}$ を独立にPIC法で計算すると、必ずしも電荷保存則を満たさないため、（静）電場に誤差が生じる。

$$\frac{\partial \rho_e}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{J} = 0$$

粒子の位置（形状関数）の時間変化からセル境界における電荷流束（ qv ）を求める。

- Density Decomposition法（Esirkepov, CPC, 2001）の採用
- 同じアルゴリズムで任意の次数の形状関数に適用可能
- 分岐処理（if文）がない
- 精度が良い

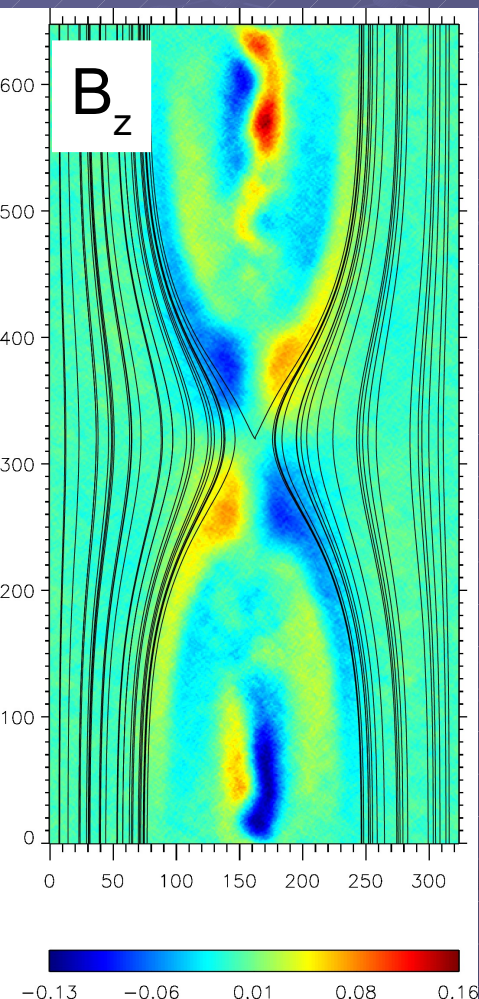
粒子形状関数



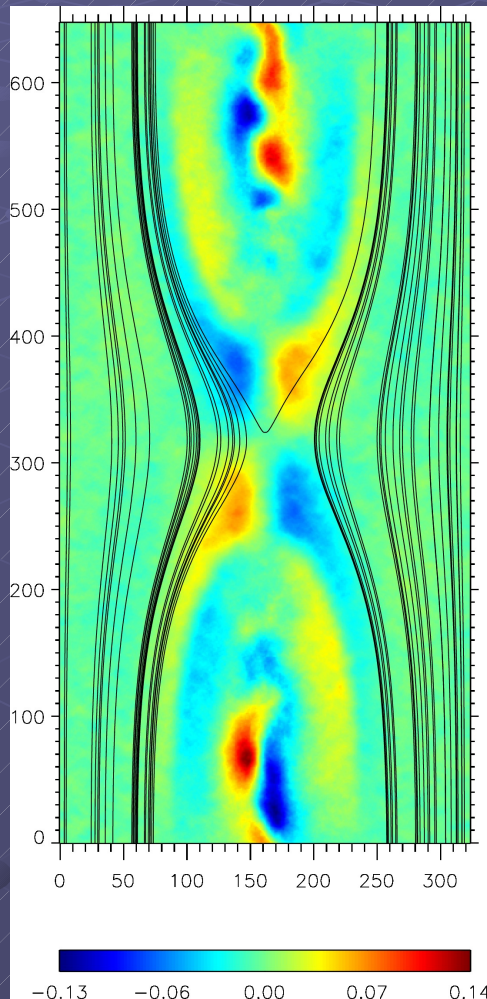
- ▶ 計算コストが一番低いのはNGP（0次）だが、コストと精度のバランスがとれたCIC（1次）法が広く使われる。
- ▶ 2次のスプラインの方法により、形状関数によるノイズを大きく減らせる。相対論的流れの現象を取り扱うのに必要とされる。
- ▶ Density decomposition法を採用したことにより、0 – 2 次まで拡張が可能に

形状関数による違い (MRX)

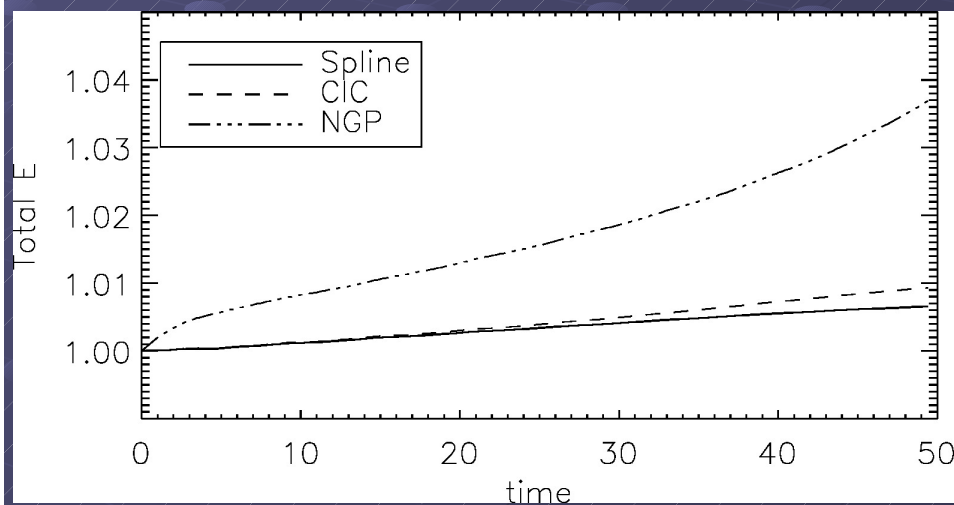
CIC



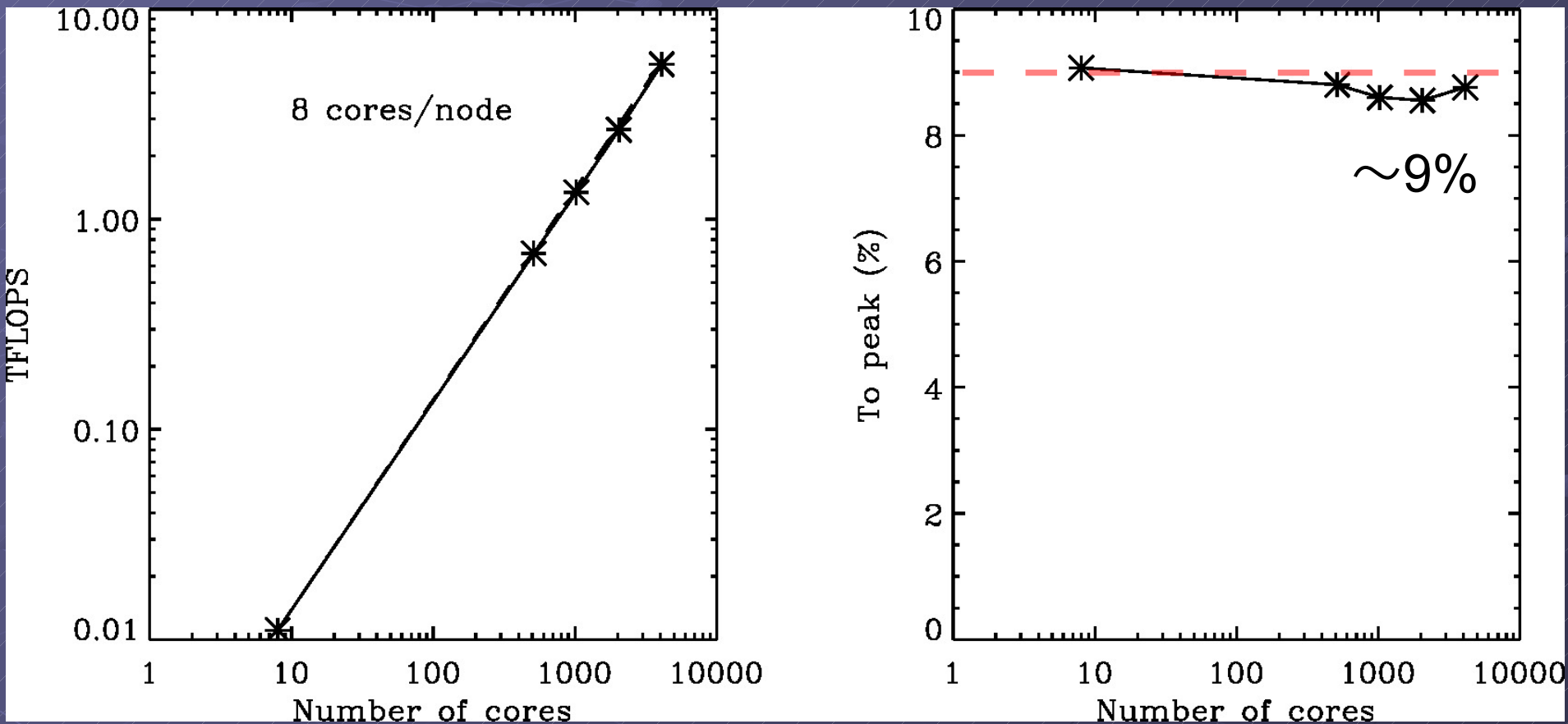
Spline



全エネルギー



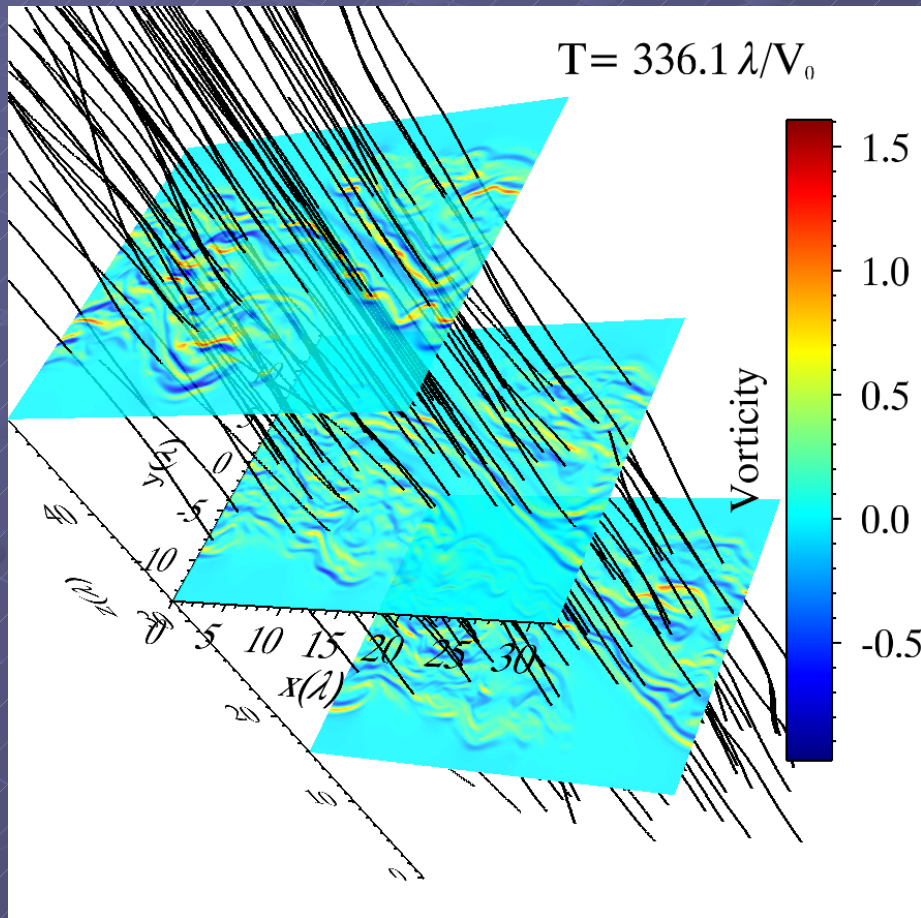
「京」におけるパフォーマンス (pCANS+ α)



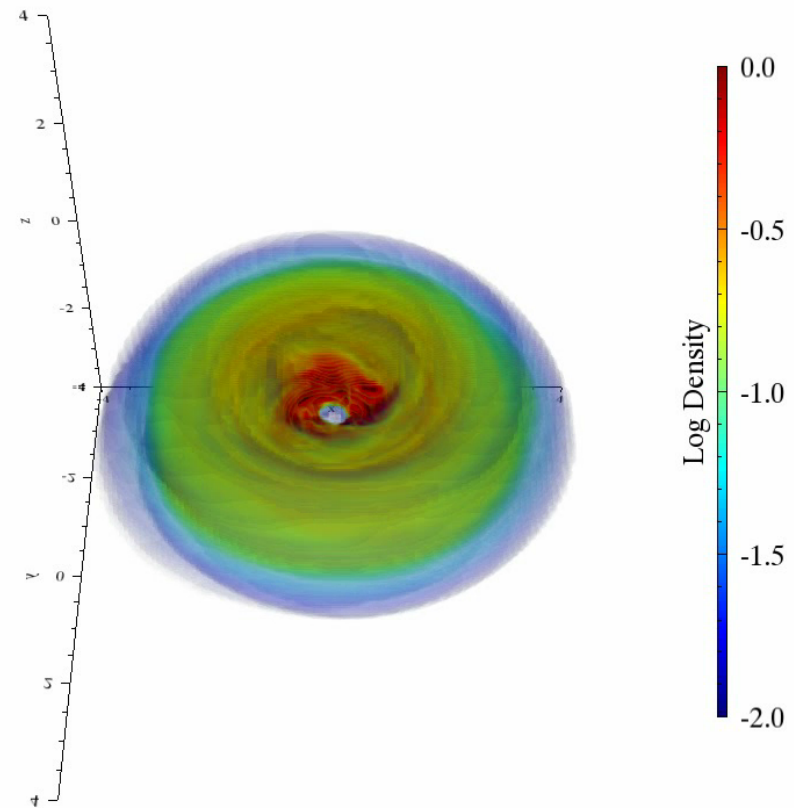
弱スケーリング

IDLによる3次元可視化ツール

3次元スライス

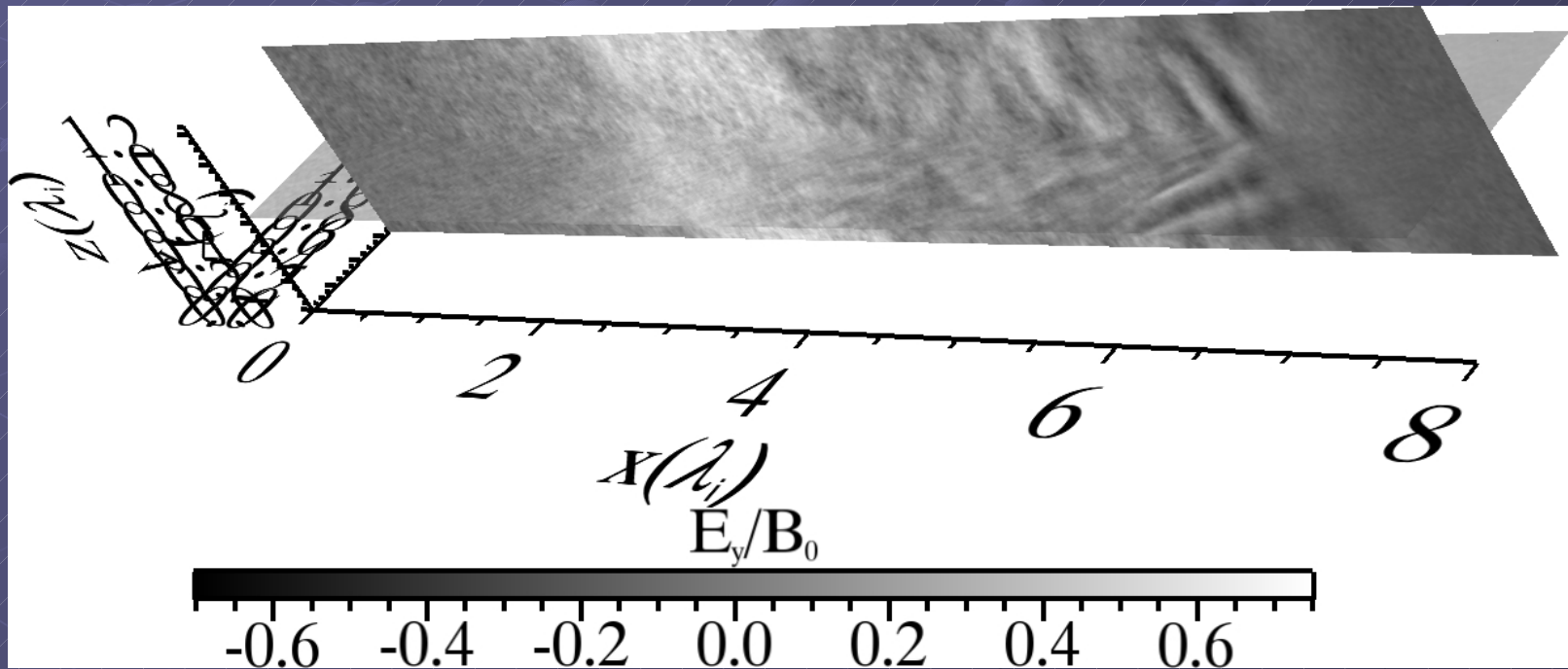


ボリュームレンダリング



3-Dコード

- ▶ 電荷保存法はdensity decomposition法
- ▶ 形状関数は2次
- ▶ $y - z$ 面での2次元領域分割、ハイブリッド並列化
- ▶ 「京」でテスト計算中（衝撃波、KH不安定）
- ▶ 今後pCANSに組み込む予定



まとめと今後

- pCANSの紹介。コード・マニュアルがある程度整備された。
- サマースクール後、認知度は少しずつ上昇中（？）例：大阪大の院生が利用中で、3次元コードで共同研究に発展。
- 電荷保存法を変え、精度のスイッチを容易に。
- 2次元コードは「京」でもそこそこ高効率に実行（OpenMPによるハイブリッド並列化＋チューニングが必要）。
- 3次元コードの公開
- 3次元IDL可視化ツールの整備→CANSと共有