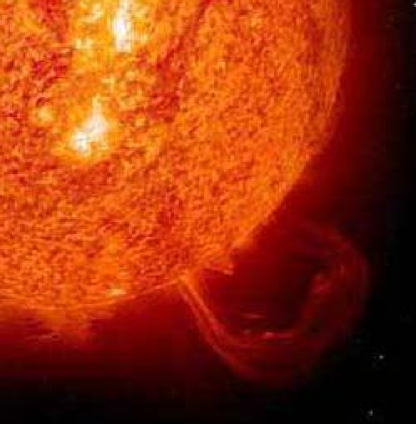
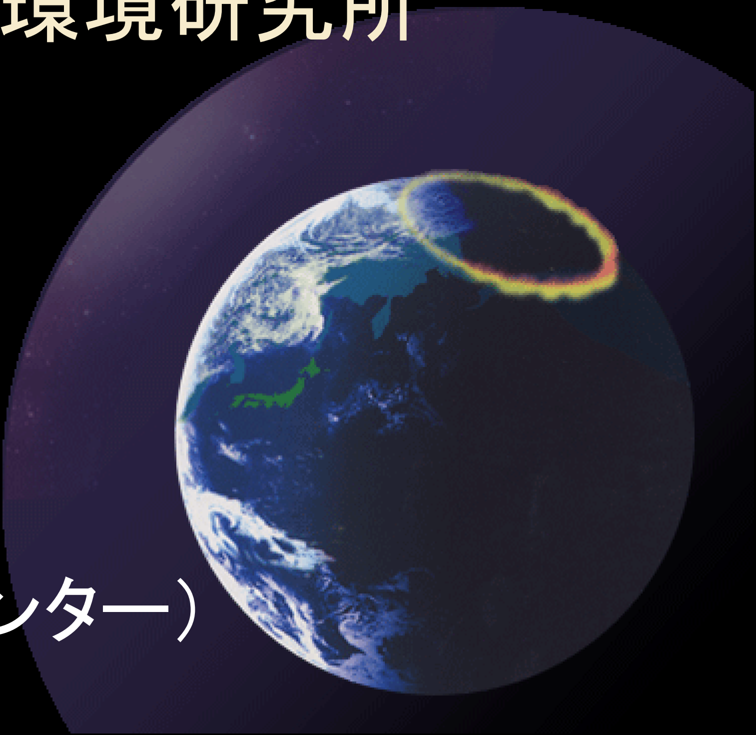


超並列ブラソフコードによるFX1とHX600の性能評価

梅田隆行
名古屋大学太陽地球環境研究所

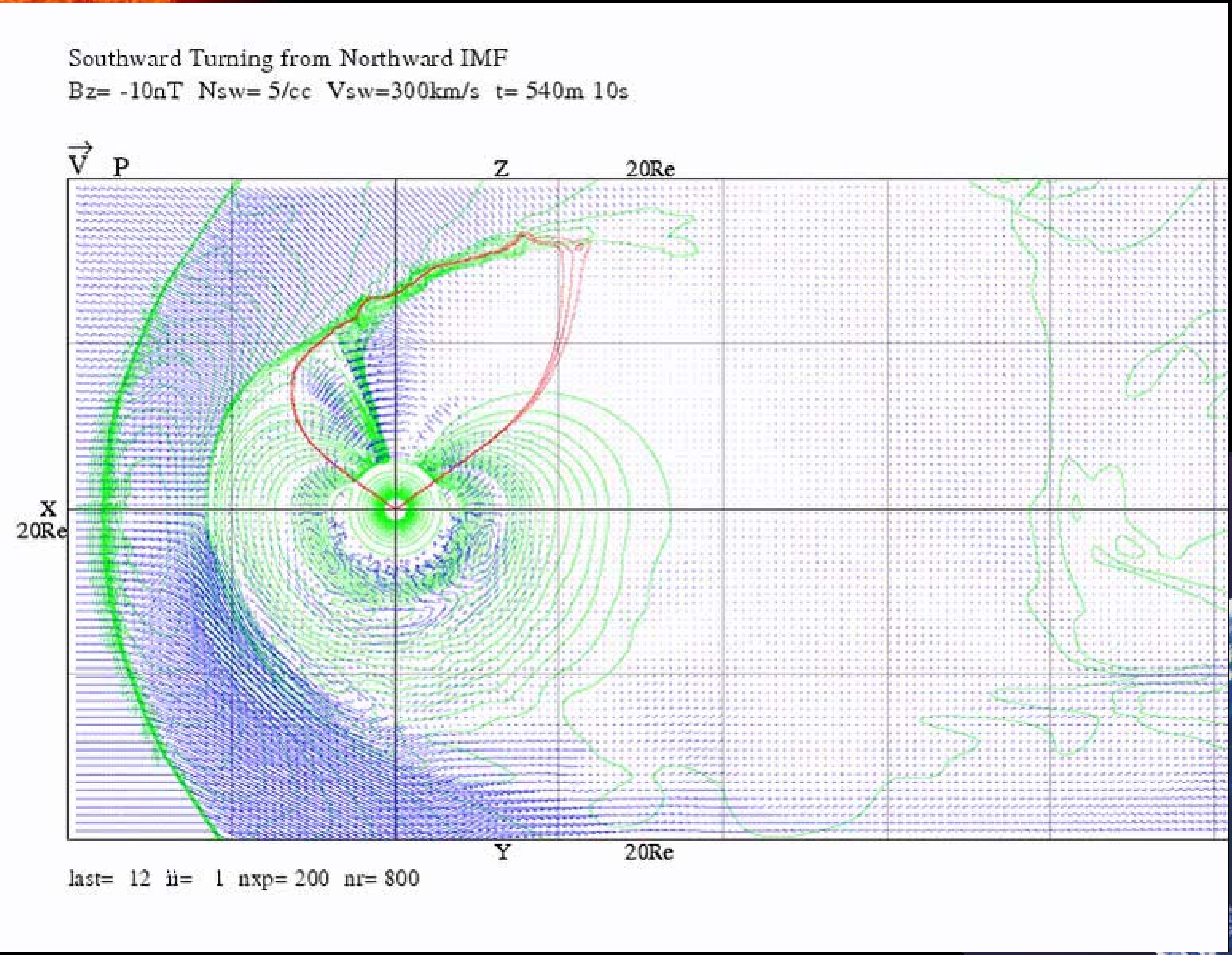
研究協力者:
荻野瀧樹(名大太陽研)
深沢圭一郎(九大基盤センター)
成行泰裕(高知高専)
石井克哉、永井亨(名大基盤センター)



太陽地球環境(STE)のシミュレーション

- プラズマシミュレーション
  - 宇宙の99.99%はプラズマ
  - 特に「無衝突」状態を扱う
    ex.太陽風プラズマの平均自由行程: 1AU
- 惑星大気シミュレーション
  - 高密度中性大気
- 天文・天体シミュレーション
  - 恒星近傍: 高温・高圧・高密度
  - 基本的にMHD＋α

地球磁気圏のMHDシミュレーション



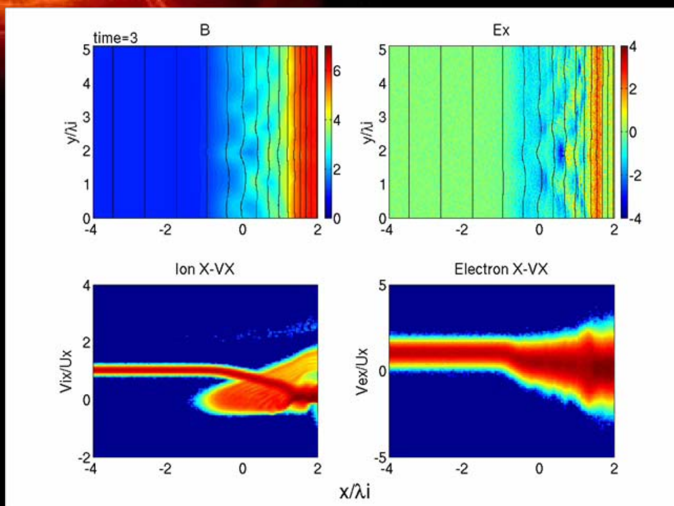
- 衝撃波
- 渦
- 磁力線の繋ぎ換え

⇒「境界層」

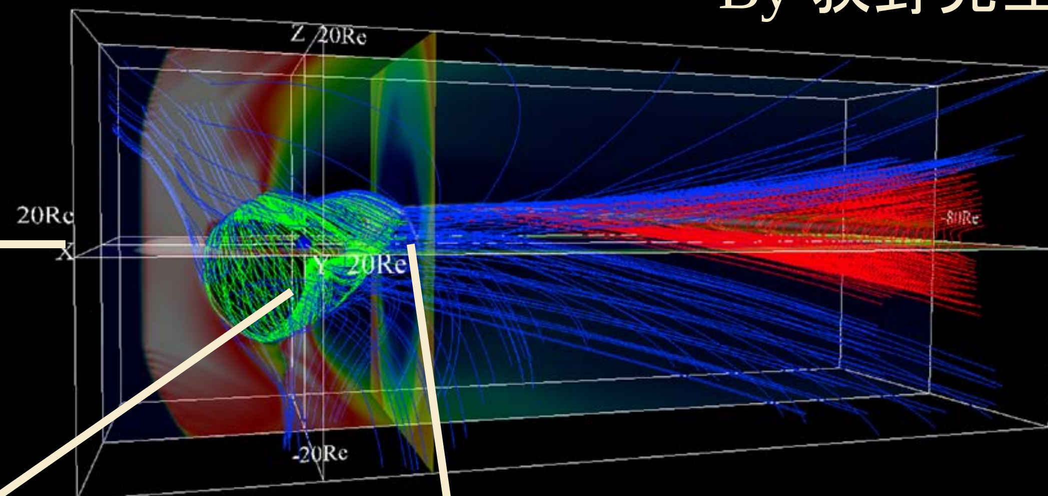
By 荻野先生

宇宙プラズマ中の“スケール間”結合

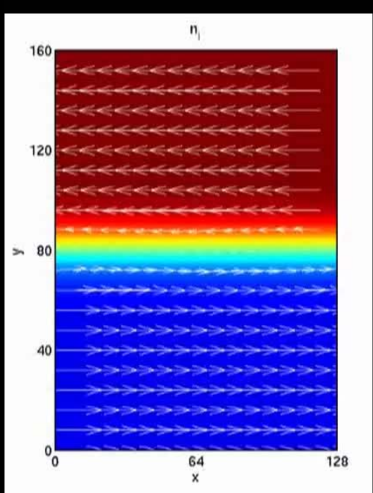
無衝突衝撃波



地球磁気圏(3D MHDシミュレーション)
By 荻野先生

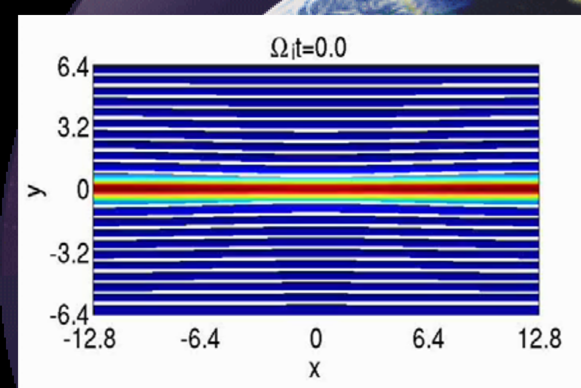


Kelvin-Helmholtz
不安定性(渦乱流)



運動論

MHDの「境界層」
と粒子スケール
の関係は??



磁気リコネクション

プラズマシミュレーションコード

近似レベルにより大まかに3つに分けられる

- 運動論コード
  - 電子・イオン共に粒子の運動論効果を考慮する
  - プラズマ振動、磁場によるサイクロトロン運動
- ハイブリッドコード
  - 電子を流体的に扱い、イオンの粒子的運動論効果のみを考慮する
- 流体コード
  - 粒子（イオン・電子）の運動を平均化し、流体として扱う
  - 流体コードにもいろいろある:
    単一流体（MHD）・Hall-MHD・多流体
  - 他の流体シミュレーションとの最大の違いは「磁場」

基礎方程式

次々世代

“無衝突”Boltzmann方程式

$$\frac{\partial f_s}{\partial t} + \mathbf{v}\cdot\frac{\partial f_s}{\partial \mathbf{r}} + \frac{q_s}{m_s}(\mathbf{E}+\mathbf{v}\times\mathbf{B})\cdot\frac{\partial f_s}{\partial \mathbf{v}} = 0$$

Vlasov方程式（6次元）

モーメント計算
+単一流体近似

MHD方程式
（3次元×8変数）

現状

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\nabla\cdot(\mathbf{v}\rho)$$

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} = -(\mathbf{v}\cdot\nabla)\mathbf{v} - \frac{1}{\rho}\nabla p + \frac{1}{\rho}\mathbf{J}\times\mathbf{B}$$

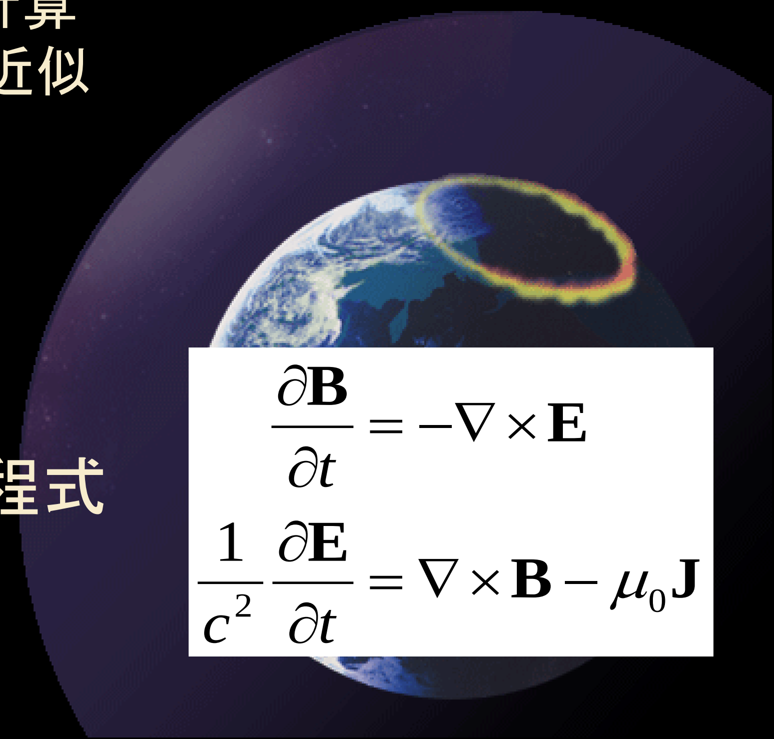
$$\frac{\partial p}{\partial t} = -(\mathbf{v}\cdot\nabla)p - \gamma p\nabla\cdot\mathbf{v}$$

詳しくは深沢氏の講演で

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = -\nabla\times\mathbf{E} = \nabla\times(\mathbf{v}\times\mathbf{B})$$

$$\mu_0\mathbf{J} = \nabla\times\mathbf{B}$$

Maxwell方程式
（電磁場）



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

$$\frac{1}{c^2}\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} = \nabla\times\mathbf{B} - \mu_0\mathbf{J}$$

宇宙プラズマの“運動論”シミュレーション

- 無衝突プラズマを扱う
- 荷電粒子と電磁界との相互作用を解く
- 電磁界
  Maxwell方程式

$$\begin{aligned} \nabla \times \boldsymbol{B} &= \mu_0 \boldsymbol{J} + \frac{1}{c^2}\frac{\partial \boldsymbol{E}}{\partial t} & \nabla \cdot \boldsymbol{E} &= \frac{\rho}{\epsilon_0} \\ \nabla \times \boldsymbol{E} &= -\frac{\partial \boldsymbol{B}}{\partial t} & \nabla \cdot \boldsymbol{B} &= 0 \end{aligned}$$

- プラズマの運動
  個々の粒子の運動を考える
  藤本氏の講演で

$$\begin{aligned} \frac{\mathrm{d}\boldsymbol{r}_n}{\mathrm{d}t} &= \boldsymbol{v}_n \\ \frac{\mathrm{d}\boldsymbol{v}_n}{\mathrm{d}t} &= \frac{q_n}{m_n}(\boldsymbol{E} + \boldsymbol{v}_n \times \boldsymbol{B}) \end{aligned}$$

分布関数として考える
ブラソフ方程式

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \boldsymbol{v}\frac{\partial f}{\partial \boldsymbol{x}} + \frac{q}{m}(\boldsymbol{E} + \boldsymbol{v} \times \boldsymbol{B})\frac{\partial f}{\partial \boldsymbol{v}} = 0$$

研究目的

名大計算科学への貢献

- 様々なスカラ型超並列計算機において

  ☆コードの並列性能を評価

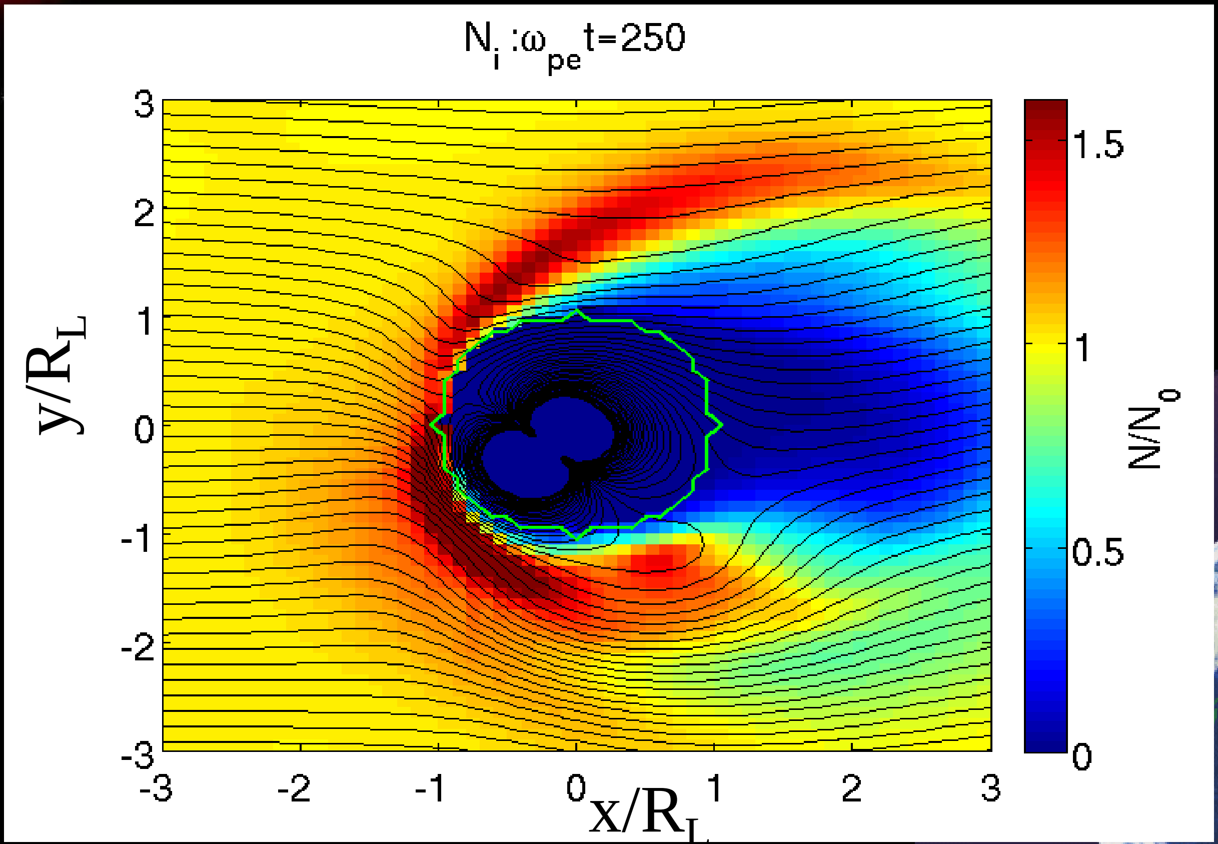
  ☆コードのパーツ（組み込み関数等）の速度を評価

太陽地球系科学（物理）への貢献

- 256~1024以上の並列計算を長時間行う必要がある
  - 5次元シミュレーション：100GB以上
  - 粒子の時空間解像度で流体スケールを解く

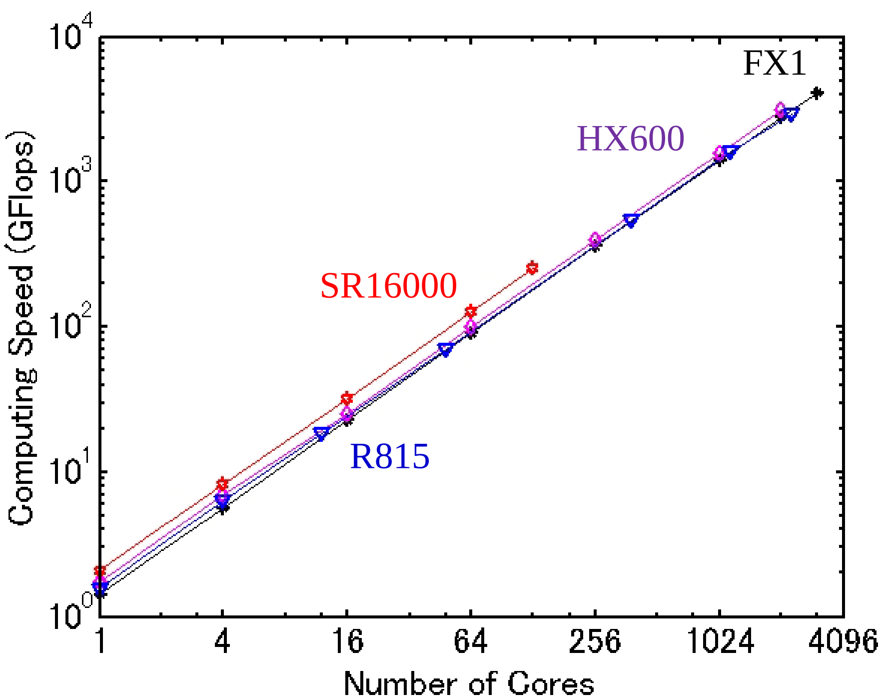
⇒256以上の並列計算がスムーズに流れ、CPU使用料が現実的な計算機環境が不可欠

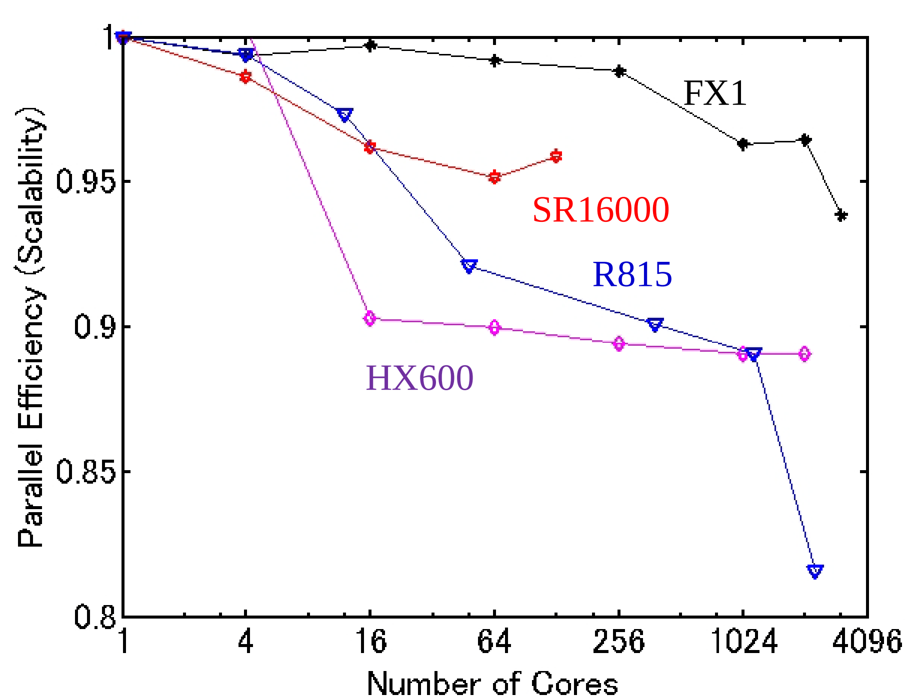
弱磁場天体磁気圏のブラソフシミュレーション



世界初
ただし、5次元（実空間2次元＋速度空間3次元）

性能評価①:
弱いスケーリング (1GB/core)



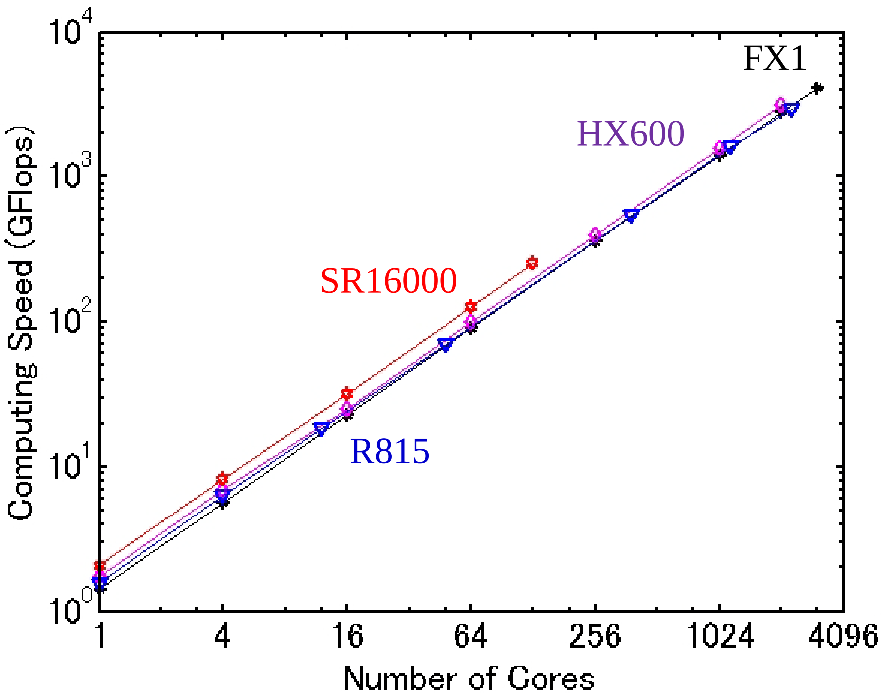


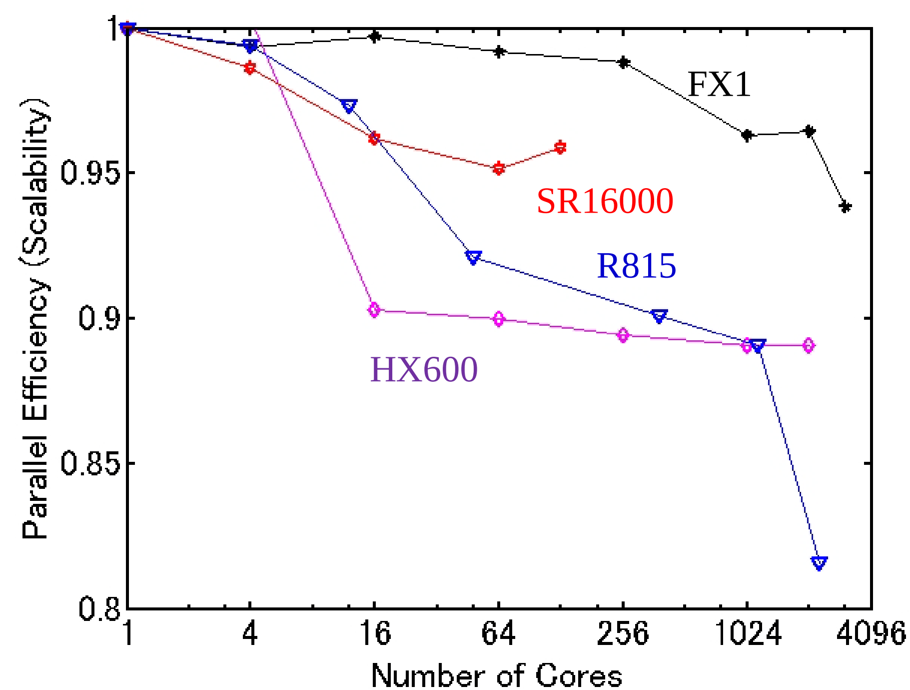
◆単コア性能(理論性能:10GFlops)

FX1: 1.42GFlops(実効効率:14.2%)

HX600: 1.74GFlops (実効効率:17.4%)

性能評価①:
弱いスケーリング (1GB/core)



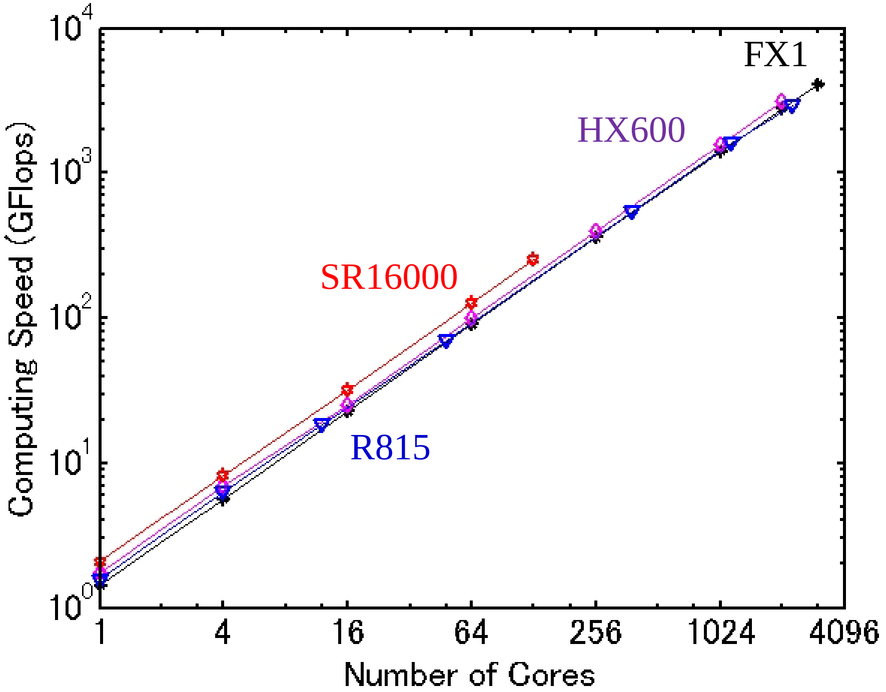


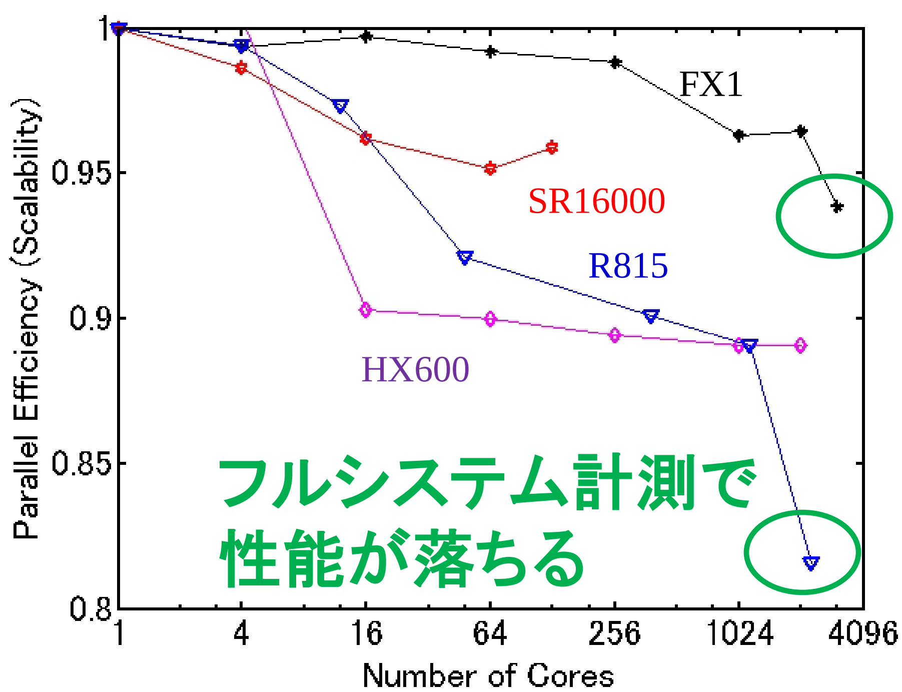
◆並列性能

FX1:4.10TFlops@3072コア（実効効率:13.3%）MPI+Impact

HX600:3.17TFlops@2048コア（実効効率:15.5%）Flat MPI

性能評価①:
弱いスケーリング (1GB/core)





◆太陽研 DELL PowerEdge R815

Opteron 2.2GHz (12core) ×4CPU、96GB ／ノード

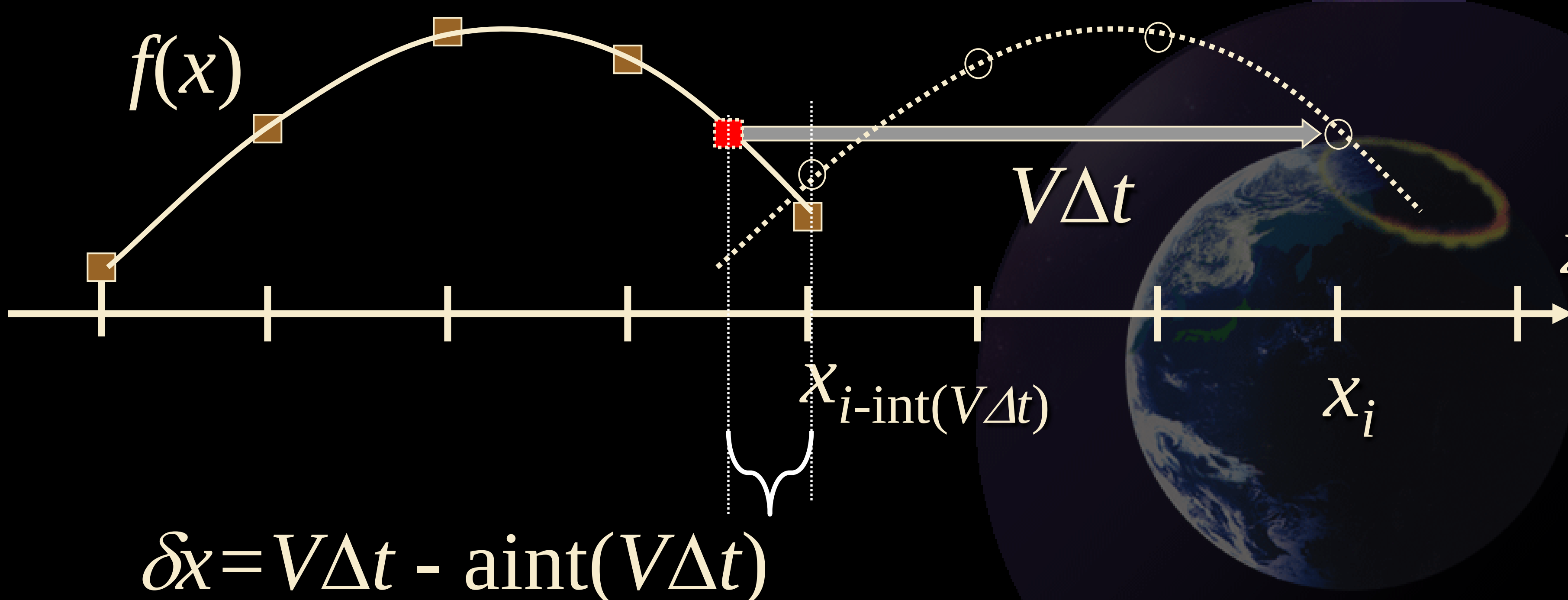
48ノード ⇒ 理論性能:20TFlops、Linpack:15.8TFlops

性能評価②:
組み込み関数の性能

- プラズマ運動論シミュレーション:
  整数ー実数変換を多用

$$\frac{\partial f}{\partial t} + V\frac{\partial f}{\partial x} = 0$$

$$f(x_i, t+\Delta t) = f(x_i - V\Delta t, t)$$



性能評価②:
組み込み関数の性能

```
real(kind=8) :: A(:), B(:)
DO i=1,1024*1024*16
  B(i)=floor(A(i))
  B(i)=aint(A(i))
  B(i)=aint(A(i)+0.5d0)
  B(i)=anint(A(i))
END DO
```

=dble(floor(A))

A＞0なら同じ答え

同じ答え

性能評価②:
組み込み関数の性能

	FX1	HX600-frt	HX600-ifort
`floor(A)`	0.193 sec	0.100 sec	0.170 sec
`aint(A)`	0.260 sec	0.276 sec	0.100 sec
`aint(A+0.5)`	0.272 sec	0.281 sec	0.100 sec
`anint(A)`	0.073 sec	0.178 sec	0.101 sec

まとめ

- ブラソフコードの並列性能:
  - FX1では93%以上、HX600では89%以上の並列効率
    FX1では13%以上、HX600では15%以上の実効効率
  - FX1ではMPI+ImpactとFlat MPIはほぼ同速
    HX600ではFlat MPIが1割ほど速い
  - 全リソースを用いた計測では性能が若干落ちる傾向
- 組み込み関数の性能:
  - 富士通コンパイラで、floor（＋整数⇒倍精度実数）と
    anint が不自然に速い

⇒導入時のベンチマークコードの影響が出ている