

原始惑星系円盤の大域的 非理想磁気流体シミュレーション

大阪大学理学研究科宇宙地球科学専攻

富田 賢吾

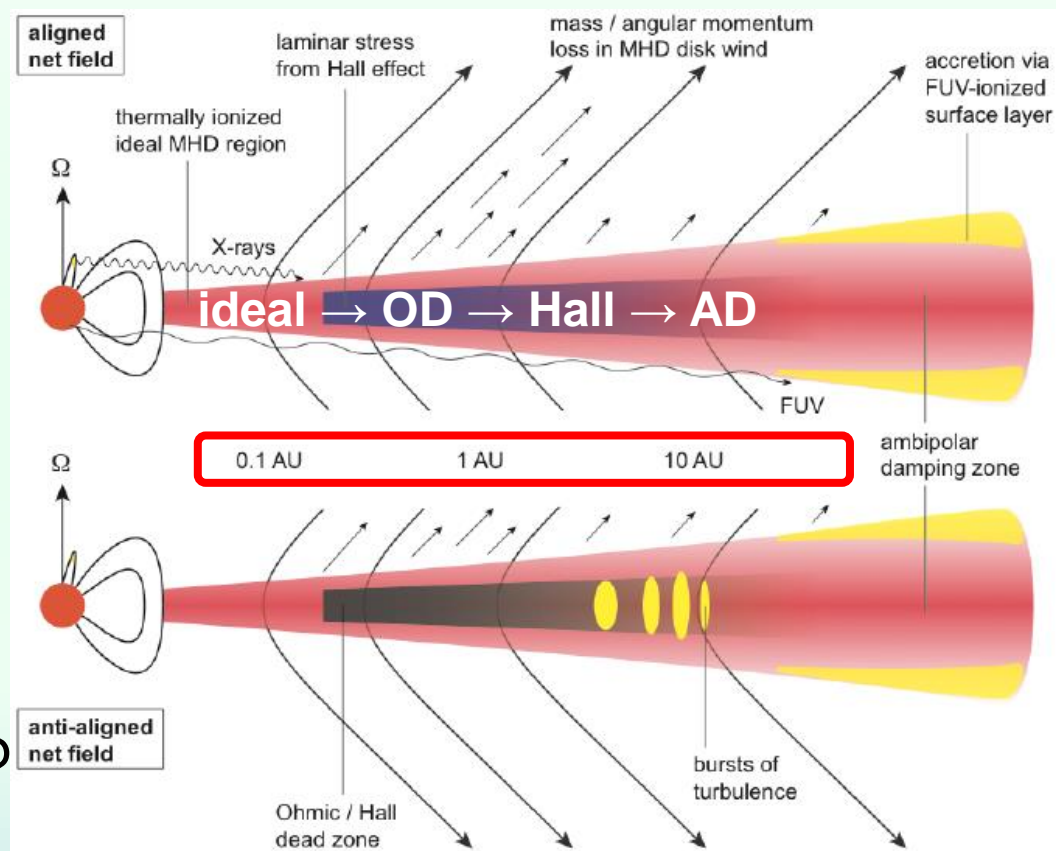
原始惑星形成円盤の大局計算

原始惑星系円盤は磁場と電離度、非理想MHD効果によって領域毎に複雑な構造を示す

本プロジェクトの目的:
大局的非理想MHD計算により円盤内の乱流・磁場の構造を明らかにし、惑星形成への影響を調べる

必要な要素技術:

- 磁気回転不安定で駆動される乱流を分解する高解像度
- 非理想MHD効果
- 大きなダイナミックレンジ
- (輻射輸送、化学反応)



(Simon et al. 2015)

Athena++

- Princeton大学、大阪大学を中心に開発している公開MHDコード
- 論文準備中: Stone, Tomida and White in prep.
- 柔軟な座標系: **non-uniform spacing, Spherical**, Cylindrical...
- Static / Adaptive Mesh Refinement (AMR) (一様時間刻み)
- 実績ある近似リーマン解法 + CT法を用いた安定なMHDソルバ
- 多様な物理過程を含み幅広い宇宙物理学の問題に適用可能
 - **非理想MHD**、一般相対論、輻射輸送、自己重力、化学反応...
- 高い実行性能と大規模並列化: ベクトル化、**動的スケジューリング**他
- **Hybrid parallelization**: MPI + OpenMP
- 並列入出力 with MPI/HDF5, 標準的な解析ソフトをサポート
- 使いやすく、習得しやすく、維持しやすい設計 + ドキュメント
- 厳重な品質管理: Intel CompilerやCray MPIライブラリのバグを発見
- 多様な大型計算機をサポート; Intel, BG/Q, **Xeon Phi KNL** etc.

HOME

ダウンロード

ドキュメント

チュートリアル

— Links —

[Athena++ 公式](#)

[管理者のページ](#)

— 主な開発者 —

James M. Stone
Professor
Department of
Astrophysical Sciences
Princeton University

Kengo Tomida
(このページの管理者)
Assistant Professor
Department of Earth
and Space Science
Osaka University

Christopher White
Department of
Astronomy
University of California,
Berkeley

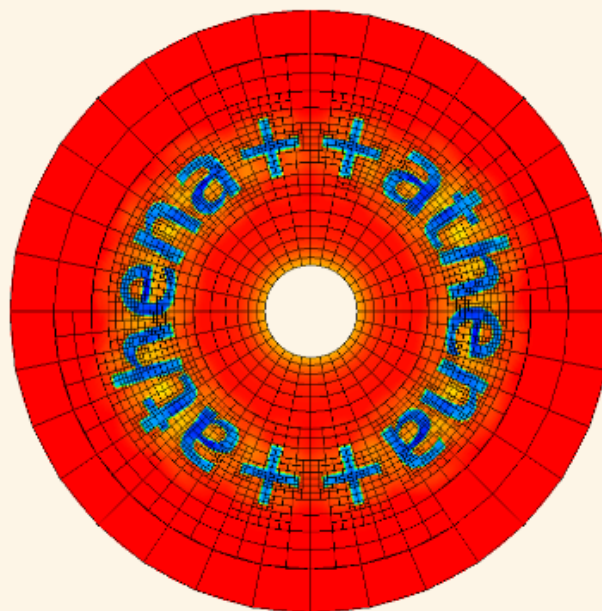
紹介

Athena++は[Athena MHDコード](#)をC++言語で完全に再設計した新しい宇宙物理学用（輻射）磁気流体シミュレーションコードです。

近似リーマン解法とConstrained Transport法を組み合わせた磁気流体計算に加え、

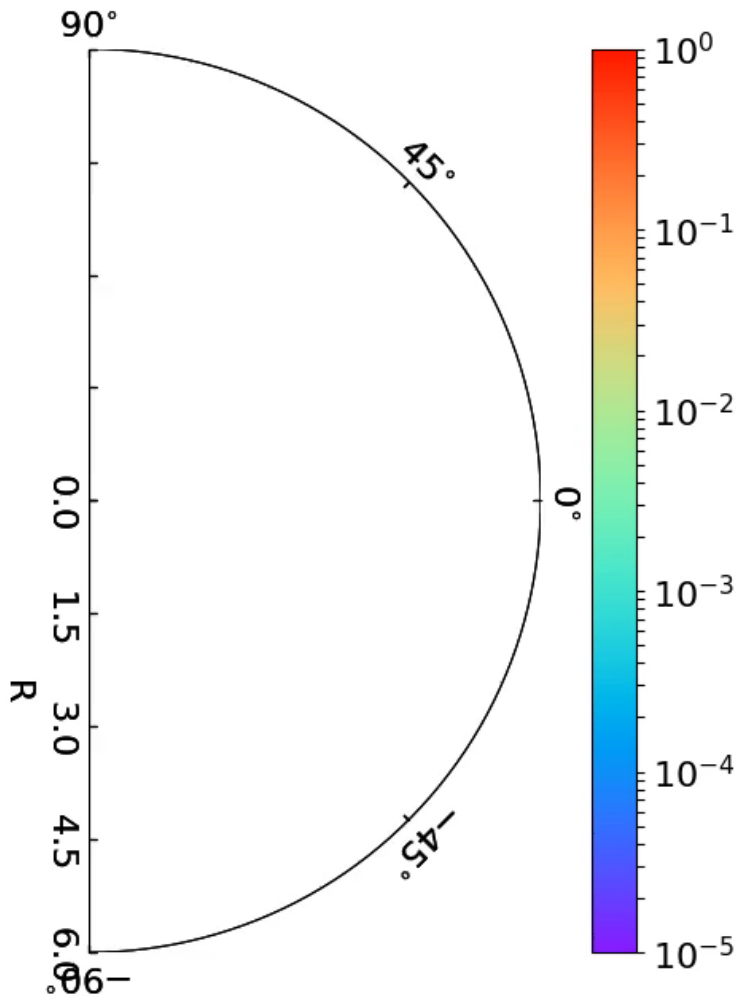
- (1) Adaptive Mesh Refinement(AMR)を含む柔軟な格子配置
- (2) 一般相対性理論を含む多様な物理過程
- (3) 現代的な計算機に対応した高い性能とかつ大規模並列性
- (4) モジュール化された読みやすいコード 等の特徴があります。

現在公開しているコードは β 版であり、改善のため頻繁に更新される可能性があることを御理解の上ご利用ください。



Athena++による大域的円盤計算

Time = 0 Kepler rot. at R = 1



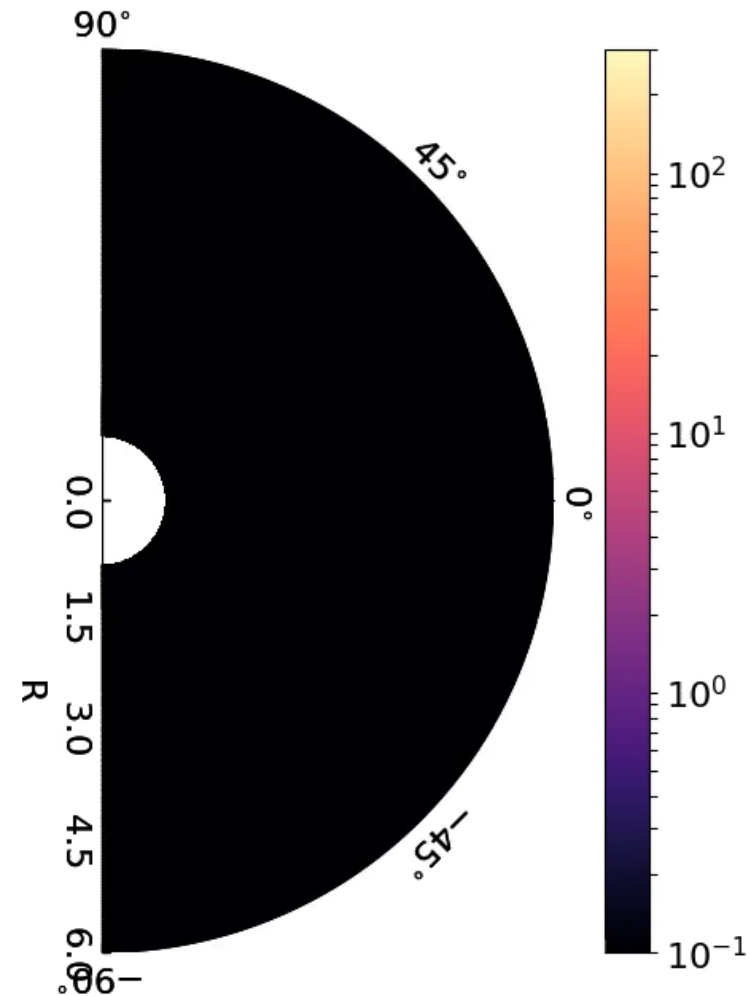
←
ガス密度

→
プラズマベータ

理想MHD計算

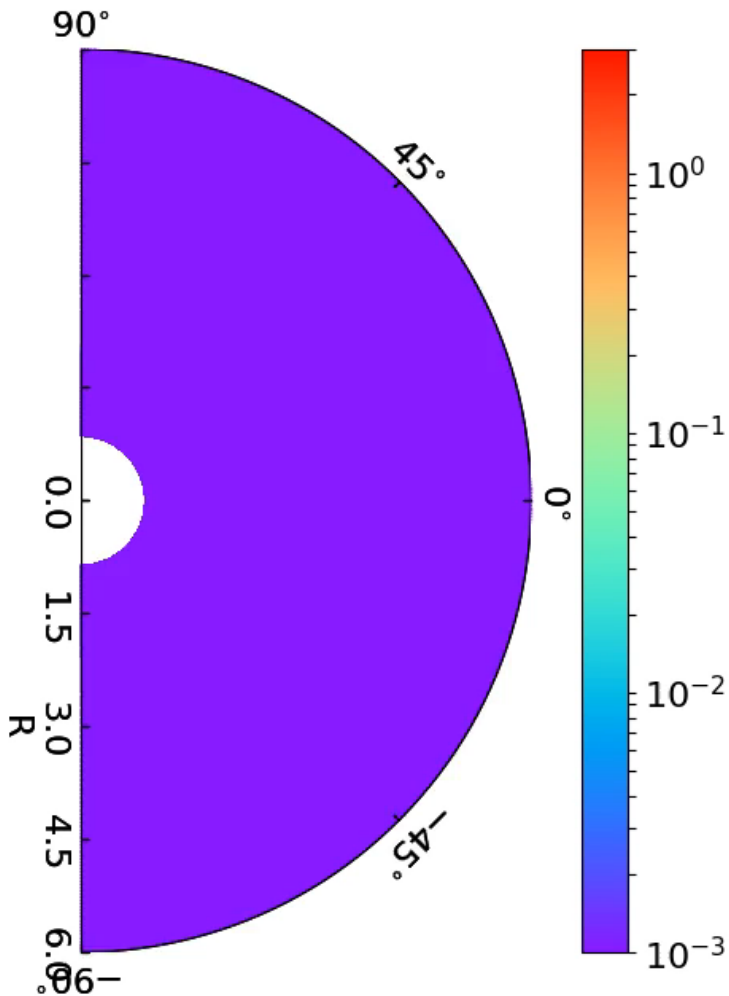
準定常解を求め
るために長時間
安定な初期・
境界条件を構築

Time = 0 Kepler rot. at R = 1

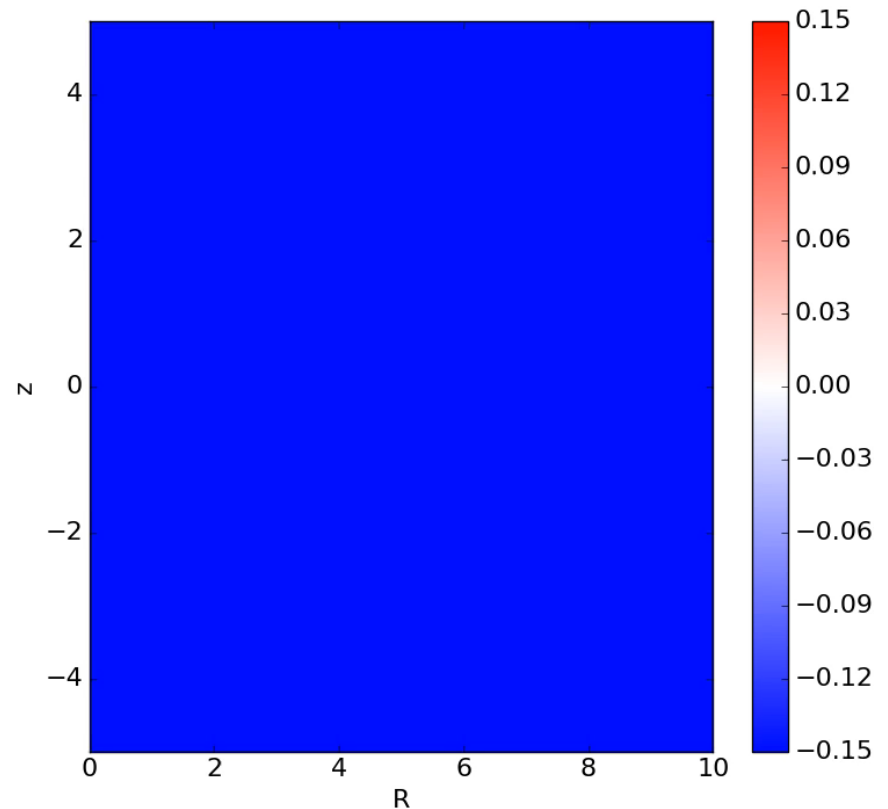


大域的磁場と降着流

Time = 0 Kepler rot. at R = 1



Time = 0 Kepler rot. at R = 1



← $\alpha = \text{stress/pressure}$ ↑ v_r + field lines

3D大域計算により非局所的構造・大域磁場の重要性が明らかになった

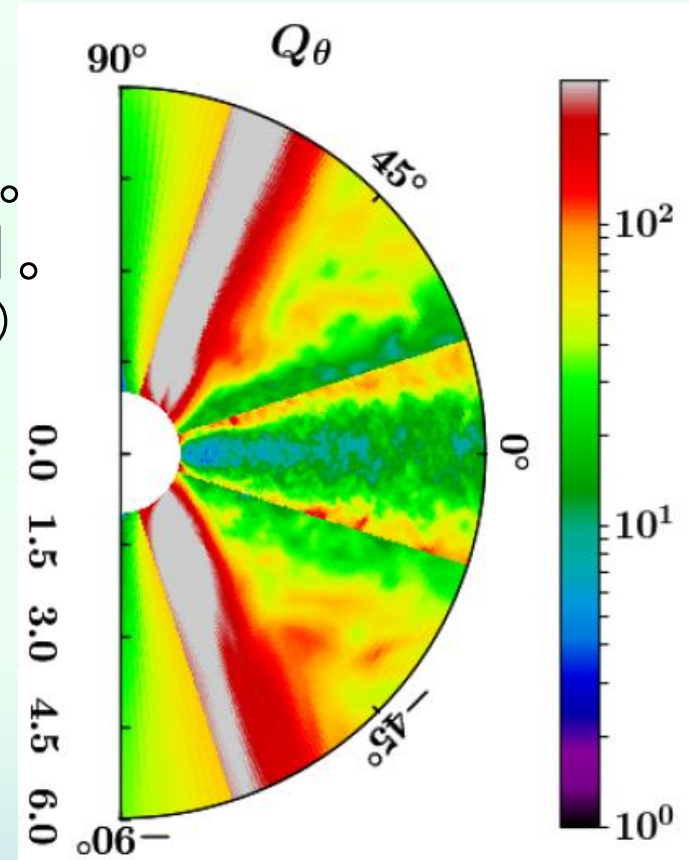
⇒ 非理想MHD + 高解像度に拡張

Oakforest-PACSでの計画

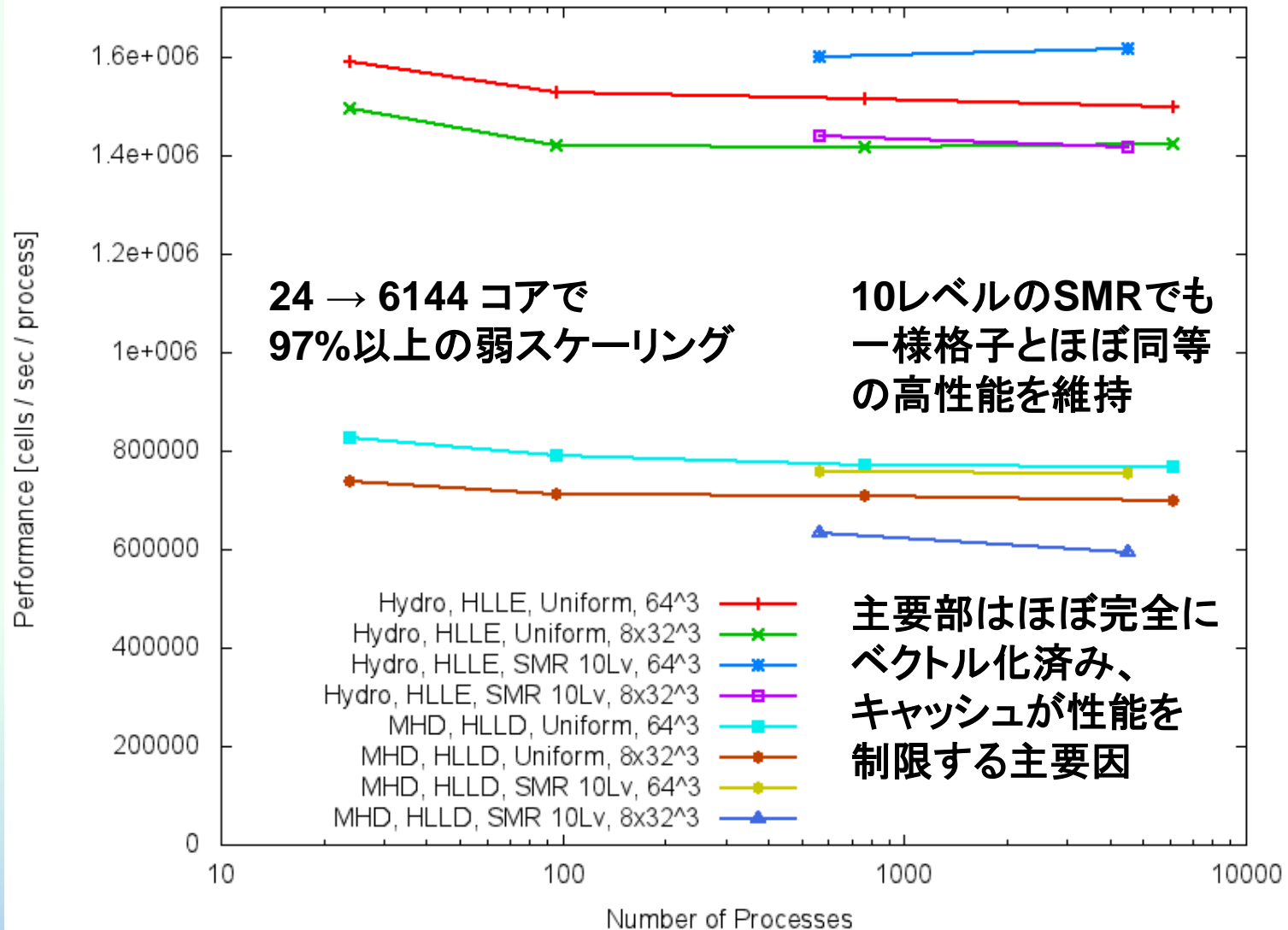
大目的: 非理想磁気流体効果を含む大域計算により原始惑星系円盤の構造と進化、特にデッドゾーン境界の構造を明らかにする。本研究では1-100AUの惑星形成領域に注目。(星近傍~円盤内縁の計算がHPCIで採択:hp180128)

- 非理想磁気流体効果の導入
 - 計算コードは既に導入済み
 - 散逸率のテーブル実装済み (Okuzumi+)

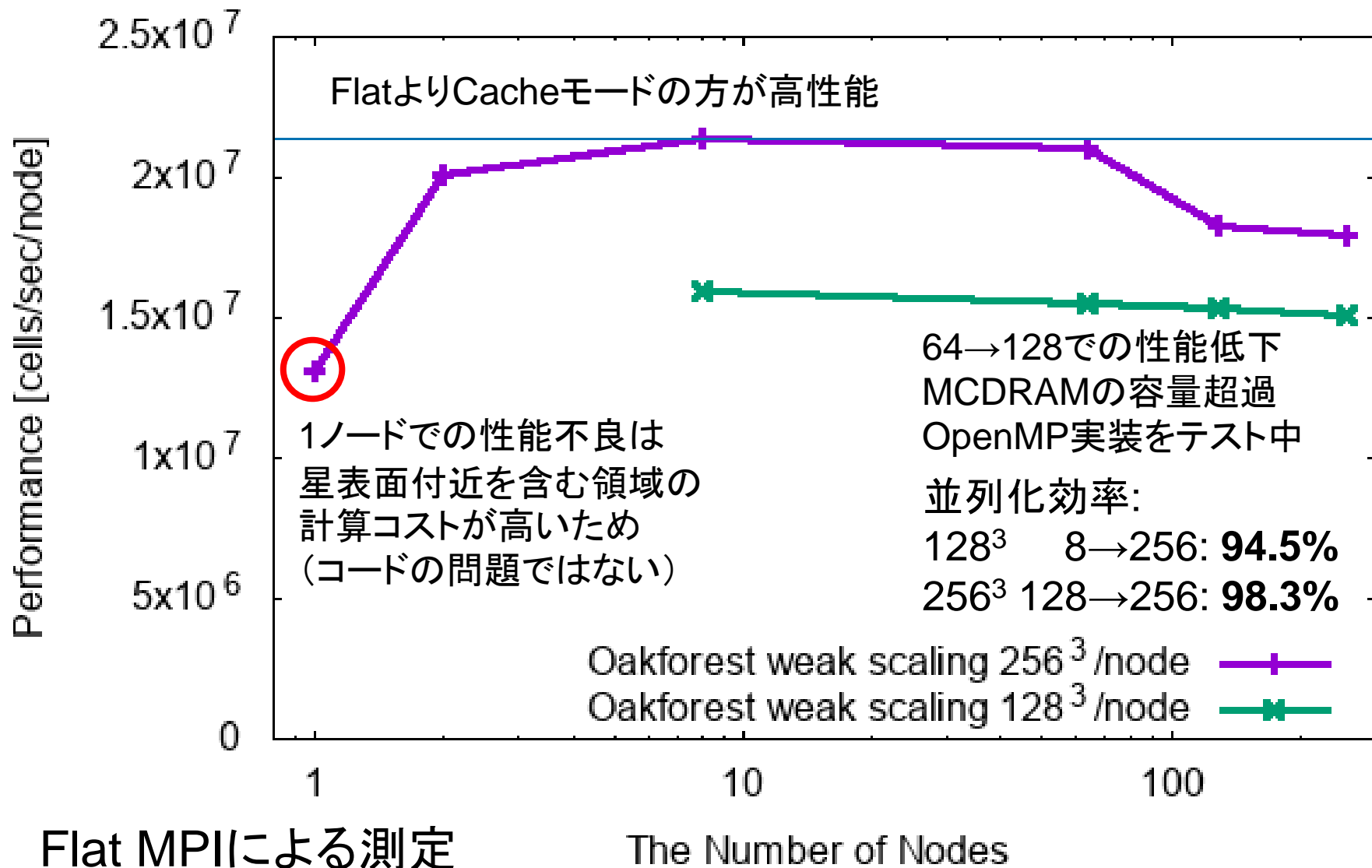
- 更なる高解像度化
 - 円盤乱流を分解するには高解像度が必要
 - $Q = \lambda_{\text{MRI}} / \Delta x \sim 15-20$ (Hawley et al. 2013)
 - Takasao et al. の約4倍の高解像度が必要



弱スケーリング (XC30、理想MHD)



弱スケーリング(OFP、実コード)



必要計算資源の見積もり

- 空間分解能

MRIを分解することを目的に解像度を設定する (Hawley et al. 2013)

縦方向に対し円盤のスケールハイトあたり30格子点を基準とする

→動径方向、方位各方向は格子のアスペクト比が1に近いよう設定

スケールハイト ~ 5度 → 分解能 0.16度 → $N_\theta \sim 1000$ 、 $N_\phi \sim 2000$

対応する N_r は非一様格子を用いて $N_r \sim 2000$

SMRを用いて円盤以外の解像度を落とす → $1/10 \Rightarrow 4 \times 10^8$ 格子点

- 時間ステップ数

時間刻みを決定するのは円盤内縁でのケプラー回転速度

→ CFL ~ 0.3で計算するとすれば一周あたりおよそ6700ステップ

MRIが準定常状態に達するには少なくとも5回転、できれば10回転

→ $r=50\text{AU}$ で10回転 ~ 内縁 $r=1\text{AU}$ で3500回転 → ~ 2300万ステップ

必要計算資源の見積もり

- 総計算コスト

4×10^8 格子点 \times 2300万ステップ = 9.2×10^{15} 格子点・ステップ

- Athena++の性能（申請書類時点より向上）

ノード当たり 128^3 格子点で計算を実行する

実コードで 1.5×10^7 格子点/秒/ノード @ 256ノード

1モデル当たりの所要時間～660時間～16万ノード時間

- モデル数

上述の高解像度モデルを異なる円盤密度について2モデル

モデル選定のための低解像度計算（計算量1/32）を10モデル程度

- 総資源量

16万ノード時間 \times (2 + 10/32) ～ 37万ノード時間

データ出力時間及び予備を見込んで43.2万ノード時間～50ノード年

弱スケーリングテスト (Mira, BG/Q)

