

Kninja を使った
微惑星の大領域集積計算：
アイスラインから外側への惑星移動

小南淳子

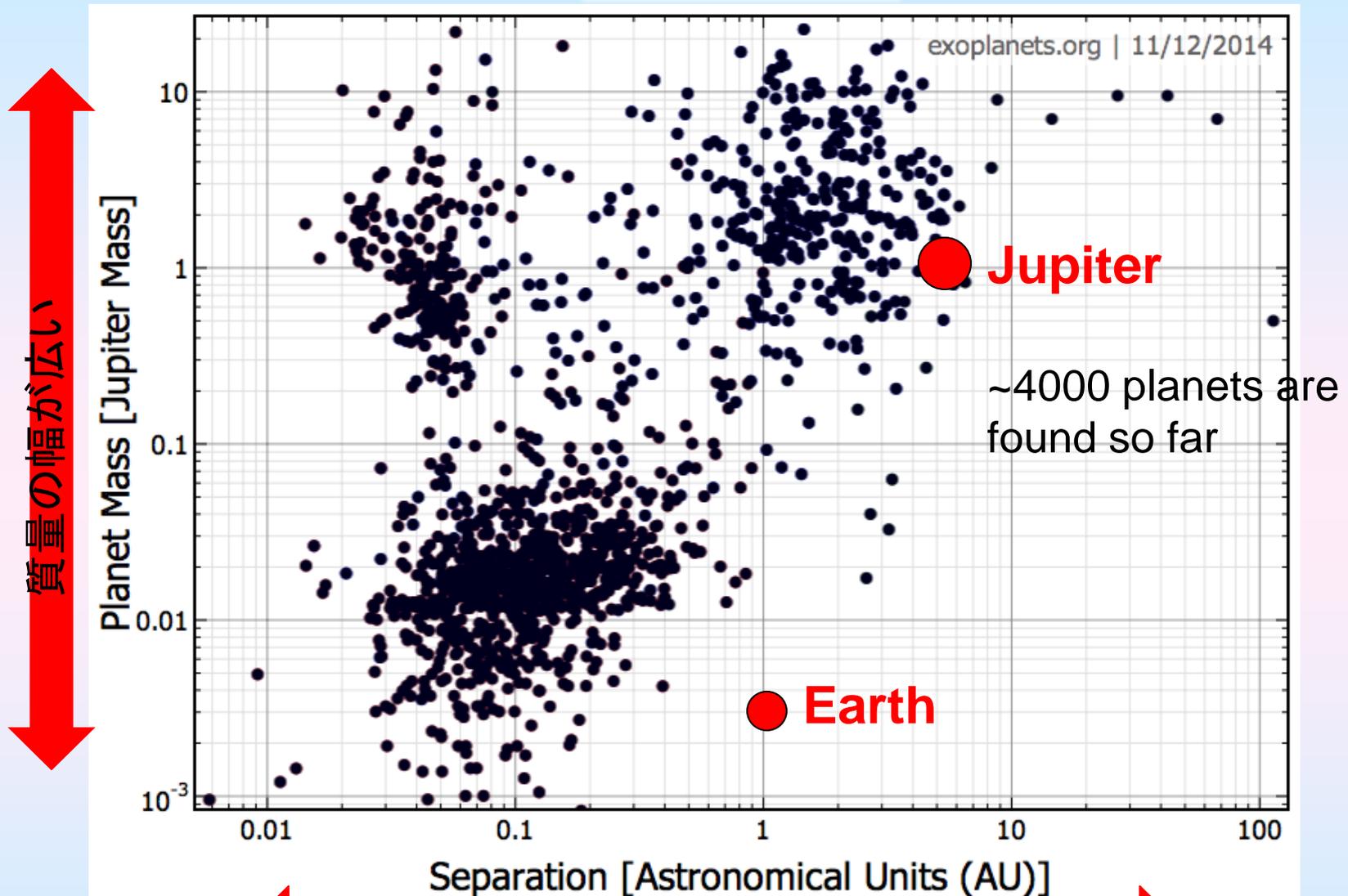
HPCI 戦略プログラム研究員
東京工業大学ELSI産学官連携研究員

台坂博(一橋)、似鳥啓吾(理研AICS)、
牧野淳一郎(理研AICS)、藤本正樹(JAXA)

アウトライン

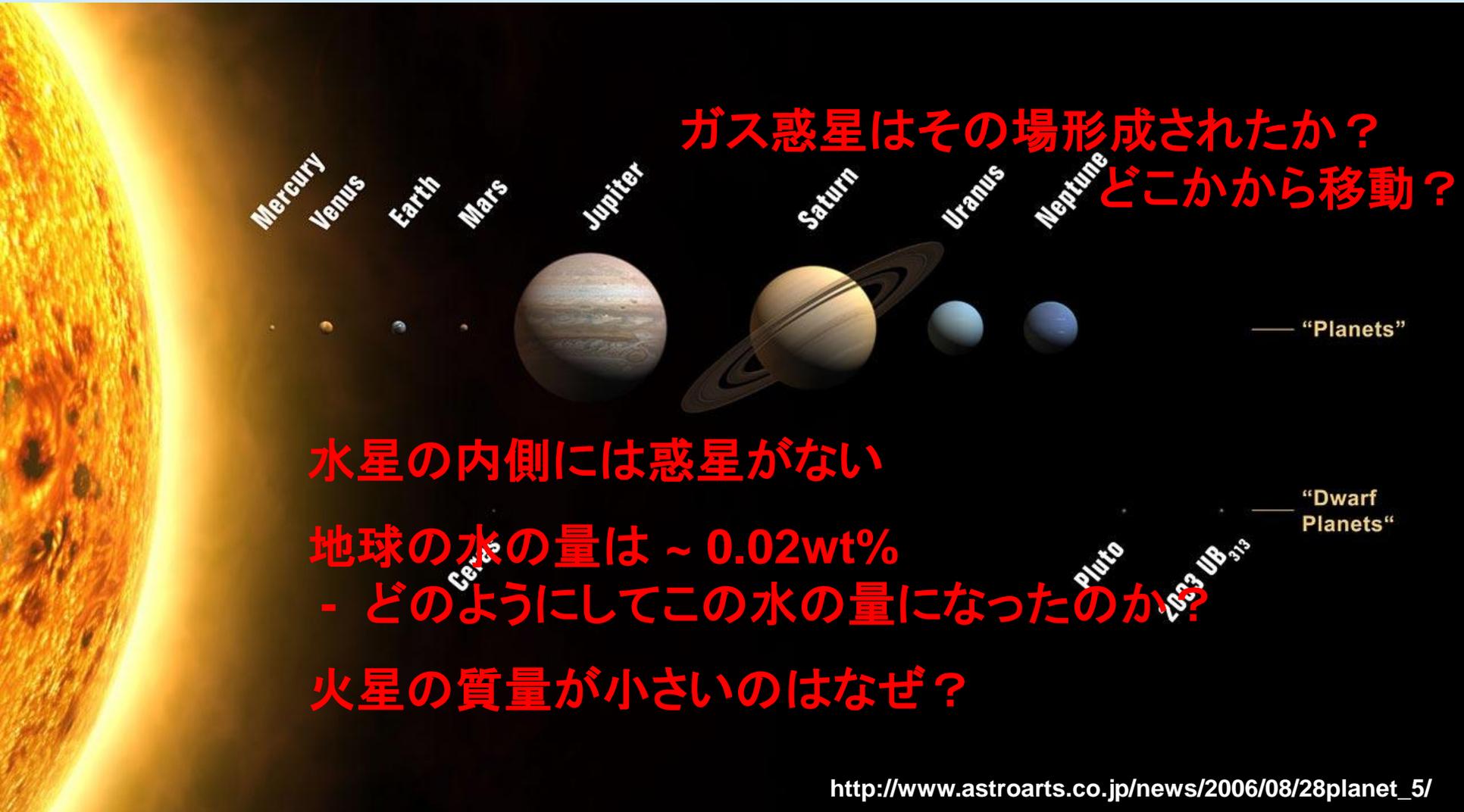
- 惑星形成N体コードを「京」で実装、チューニングして、高い性能を実現した。
1024ノード程度まで。
小ノード数では理論ピークの30%の性能。
- 大領域のself-consistent な計算を行い、アインシュタインの方程式での惑星移動が自然に起こることを見いだした

系外惑星



太陽系とは似ていない系が数多く発見されている。
汎惑星形成理論はまだ構築されていない。

我々の太陽系



解明されていないこともまだ多くある。
太陽系がどのようにして形成されたのかまだ謎が多い。

多くのN体計算が行われてきた中で なぜ惑星形成理論はまだよく解明されて いないのか

- 大領域で計算されていない
細切れの微惑星円盤しか計算できなかった
- 初期に置く微惑星質量が大きい
大きめの惑星が微惑星円盤に構造を作りその構造が惑星の軌道進化を変える
- 完全衝突合体が仮定されている
本来なら生成される破片は惑星の軌道進化を変える

近年の惑星形成シミュレーション

テスト粒子計算: 青、微惑星の自己重力入り計算: 赤

領域の拡大

小惑星帯から、地球へ微惑星が降る量を計算

(e. g. Raymond et al. 2006、 1200体)

ガス惑星が移動することの、惑星集積への影響

(e.g. Tsiganis et al. 2005、 3500体)

M型星周りのハビタブル惑星の計算

(e.g. Ogihara and Ida 2009、 5000体)

タイプ1惑星移動による惑星集積への効果

(e.g. Kominami and Ida 2005、 14000体)

円盤外側の計算

(e.g. Kominami and Makino 2014、 38000体)

粒子数の増大

微惑星円盤のレゾリューションをあげたときの惑星移動

(e.g. Minton and Levison 2014、 $\sim 10^4 - 10^5$ 体)

自己重力入りの計算は多くても3万體ほどしか計算されていない⁶

必要な粒子数と計算時間

粒子数

典型的な小惑星の質量 $\sim 10^{23}$ g

→ 0.7 – 40AUに 10^6 粒子

積分時間

ガス惑星のレゾナンスなどの効果をみようとする
と、少なくとも 10^5 年は必要

数十万体を10万年計算する必要が出てくる

**領域の拡大、かつ粒子数の増加を実現させるため
並列計算コードを開発**

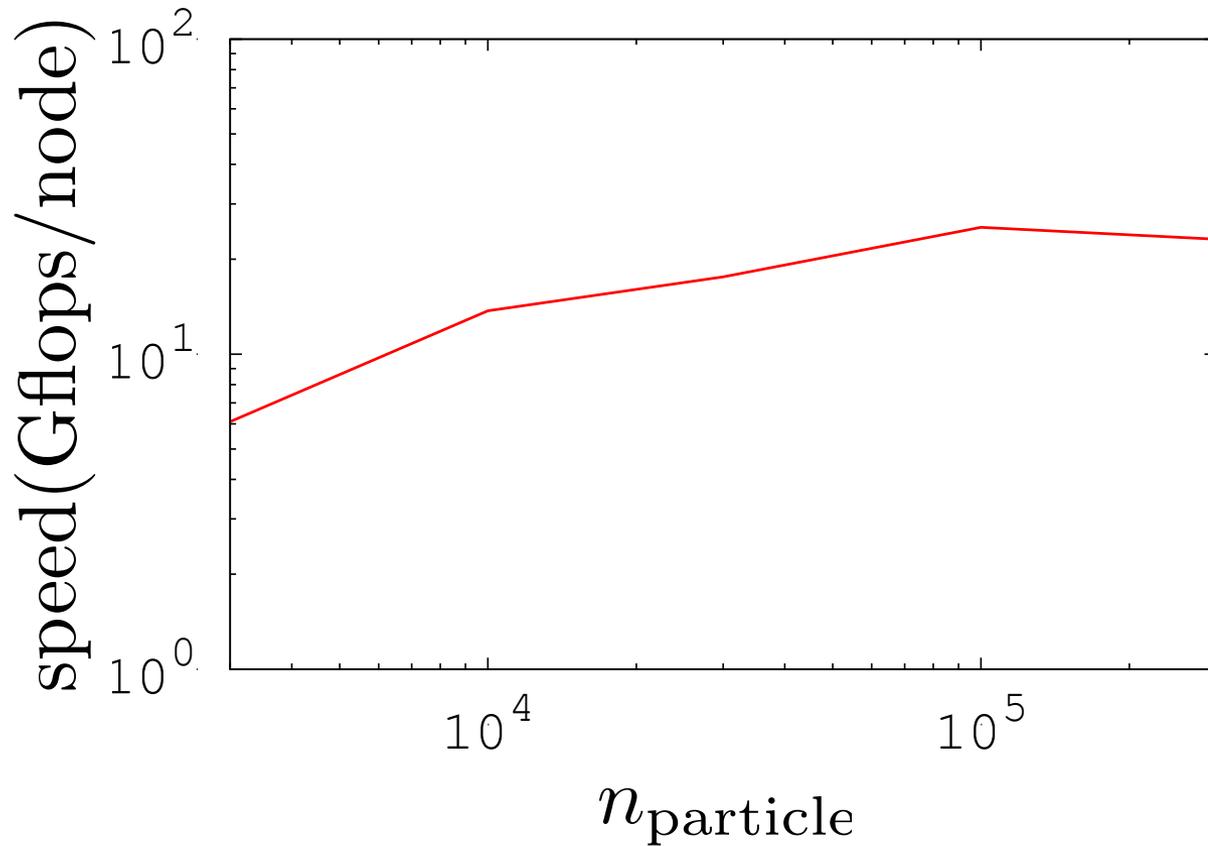
惑星形成N体コードKninja を「京」で実装

(Kominami, Daisaka, Nitadori & Makino. in prep)

数値計算方法

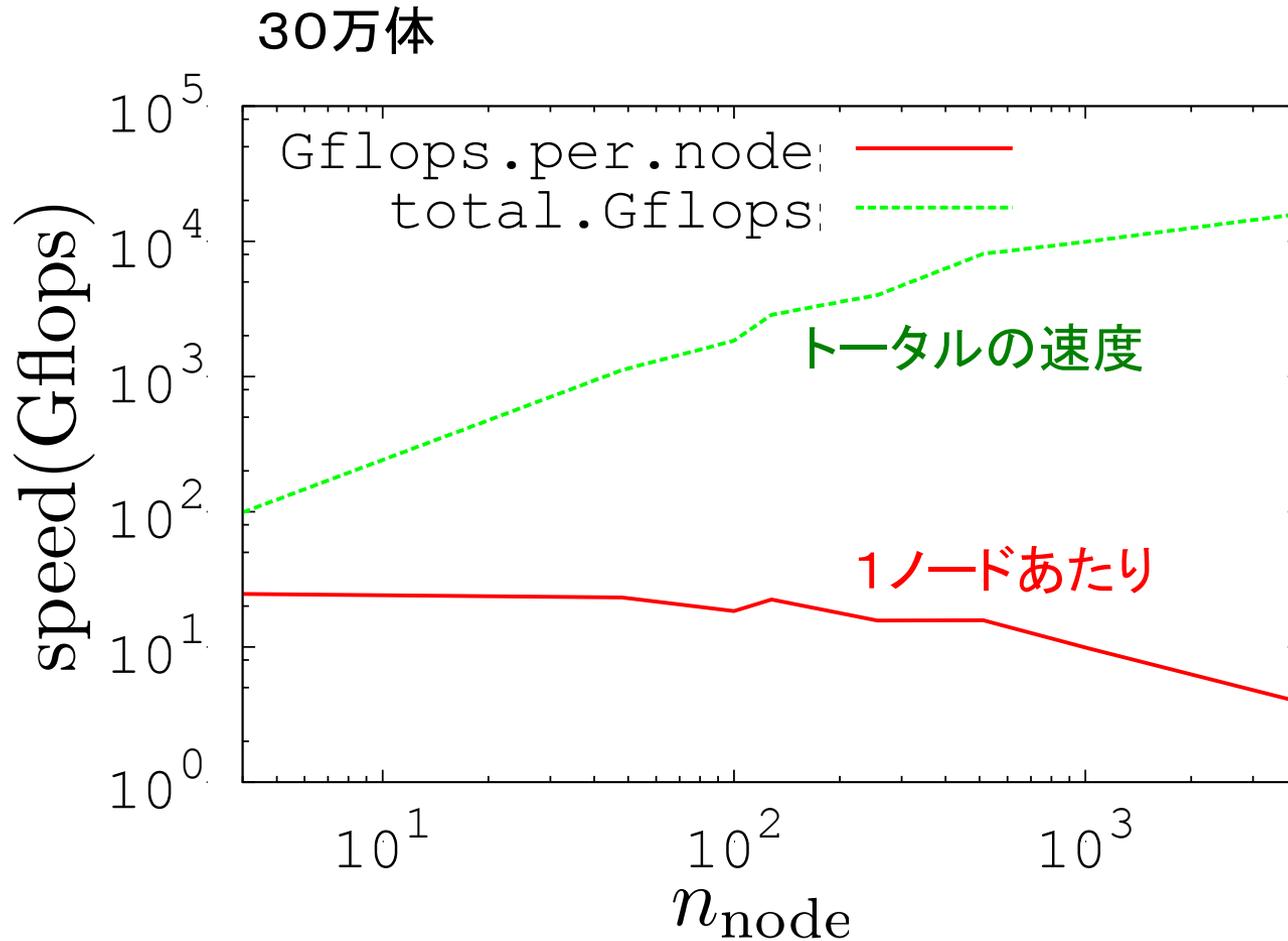
- Kninja : 惑星集積並列N体計算コード
(4次エルミートスキーム、ブロックタイムステップ法、
並列化はNinja アルゴリズムを採用(Nitadori et al. 2006))
- 完全衝突合体: 粒子間距離が物理半径より小さく
なったとき ($|r_1 - r_2| < r_p$)、2体は合体 ($m_{\text{new}} = m_1 + m_2$)
- 計算機 : スーパーコンピューター「京」

Node 固定 (48) : Gflopsと粒子数の関係



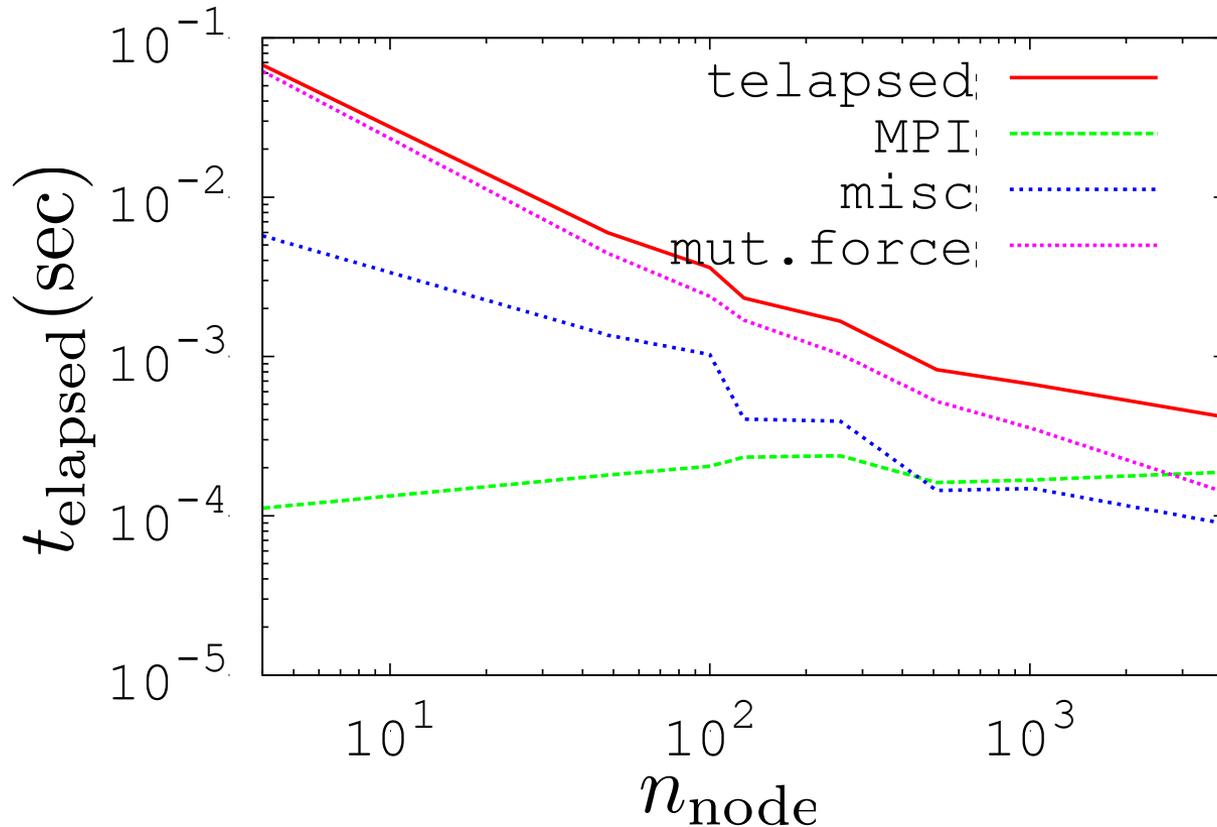
「京」の理論ピーク性能(128Gflops/node)の3割くらいでている

速度 (Gflops) とノード数の関係



ノード数100くらいで30Gflopsくらい出ている

1blockstep あたりのかかった時間の内訳



1blockstep あたりの平均active particle 数 471

数百ノードより大きくなると通信の方が大きくなる

MPI通信時間の内訳

- (a) AllGather: 時刻のアクティブ粒子の数を交換(横)
- (b) AllGatherv: アクティブ粒子を交換(横)
- (c) ReduceScatter: 加速度を合計(横)
- (d) AllGatherv: 加速度を放送(縦)

大ノード数では(a) – (c) が遅いので原因を調査中

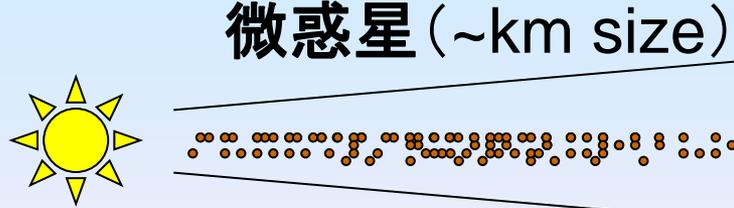
性能評価のまとめ

- 惑星集積並列コードKninja を開発した
- ノード数の少ない所ではピーク性能の30%をだすことができた
- 数百ノード以上になると通信が他の計算部分より占めるようになる
- MPI通信の中で、遅い部分があり、調査中

アイスラインの外側での惑星移動

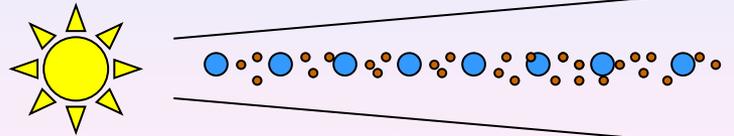
(Kominami, Daisaka, Makino and Fujimoto, in prep)

地球型惑星形成理論



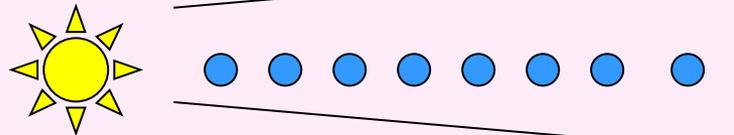
微惑星 (~km size)

(Greenberg et al. 1978,
Wetherill and Stewart 1989, 1993,
Kokubo and Ida 1996,
Inaba et al. 2001)



暴走成長

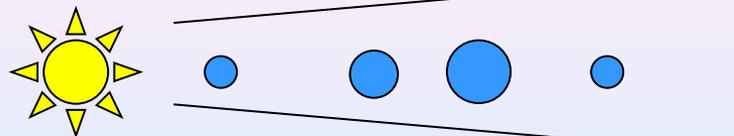
(Makino et al. 1998
Kokubo and Ida 1998)



寡占成長

(Weidenschilling et al. 1997
Kokubo and Ida 1998,2000,2002)

孤立質量



原始惑星 (火星質量)

巨大衝突時代

地球型惑星

数千体～1万体のN体計算により検証されてきた
円盤内側の計算結果が円盤外側にも適用できると考えられてきた

ガス惑星のコアが形成されるまでの時間

原始惑星がガス惑星のコアまで集積するための時間(30AU付近)

$$t_{\text{formation}} \sim 10^{10} \text{ years}$$

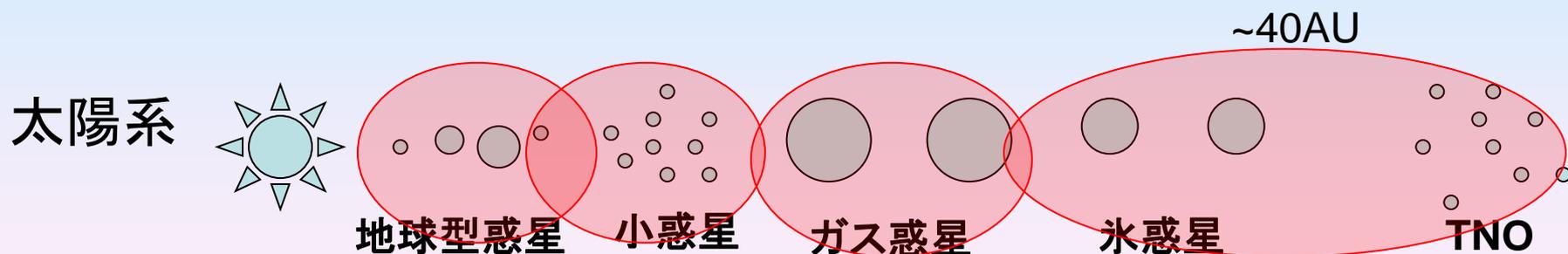
$$t_{\text{solar.system}} \sim 10^9 \text{ year} < t_{\text{formation}}$$

$$t_{\text{gas.disk}} \sim 10^6 \text{ year} < t_{\text{formation}}$$

ニースモデルなどの、円盤内側で惑星を作って
外側に移動させるメカニズムがある可能性

ニースモデルの初期条件がどのようにできたのかは
明らかにされていない

大領域計算を行うとわかること



- **アイスラインを含めた広い微惑星円盤の集積進化：
アイスラインでの固体面密度の増加の効果** ← **これに注目**
- ガス惑星のコアが、ガスを少しずつまとっていったって、その質量が徐々に増加していった場合の微惑星円盤の力学的進化
- 地球上の水分がどこからきたのか、などの物質循環

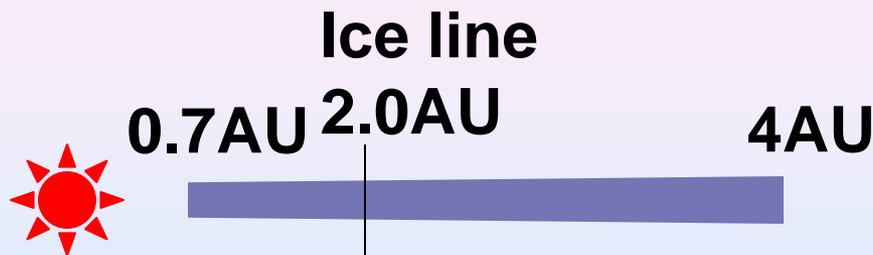
計算方法

- Kninja : 惑星集積並列N体計算コード (Kominami et al. in prep)
- 計算機 : スーパーコンピューター「京」

性能評価

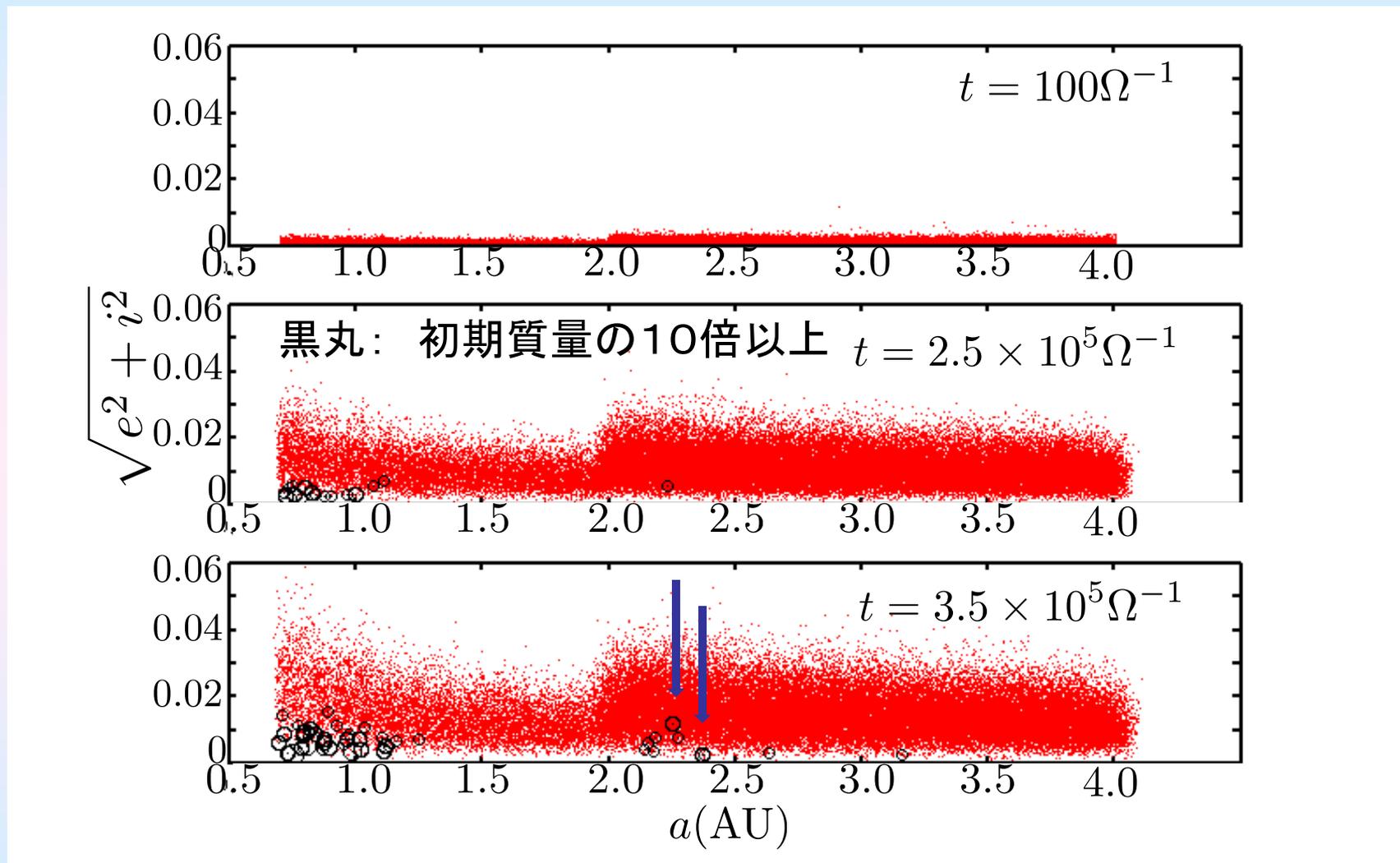
- 使用ノード数 1024
- 実行性能は理論ピーク性能の30%
- 計算時間は1週間ほど

Simulation 1 : 初期条件



- 微惑星の総数 = 82362 (個々の微惑星質量 10^{24} g)
- MMSN の面密度分布で、離心率、軌道傾斜角はレーリー分布
 $\langle \tilde{e}^2 \rangle^{1/2} = 2$ $\langle \tilde{i}^2 \rangle^{1/2} = 4$ (Kokubo and Ida 1998)

暴走成長天体がアイスライン以遠にも形成



円盤の内縁と、アイスラインのすぐ外側に
暴走成長天体が形成

Simulation 2 : 初期条件

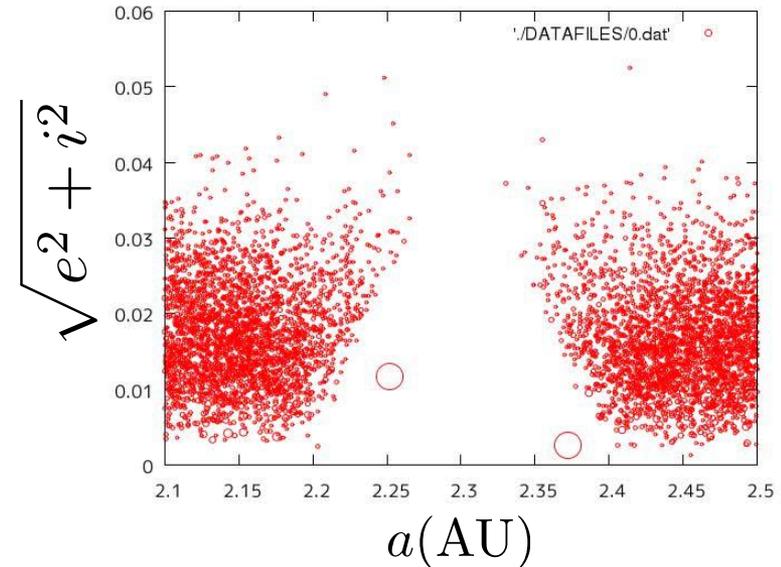
アイスラインのすぐ外側の原始惑星

- 数ヒル以内の微惑星は原始惑星に食べられてしまう
- 徐々にガスをまとっていく

0.1地球質量まで質量をふやし、
微惑星円盤にギャップを作る

微惑星と原始惑星の質量比が
100くらい

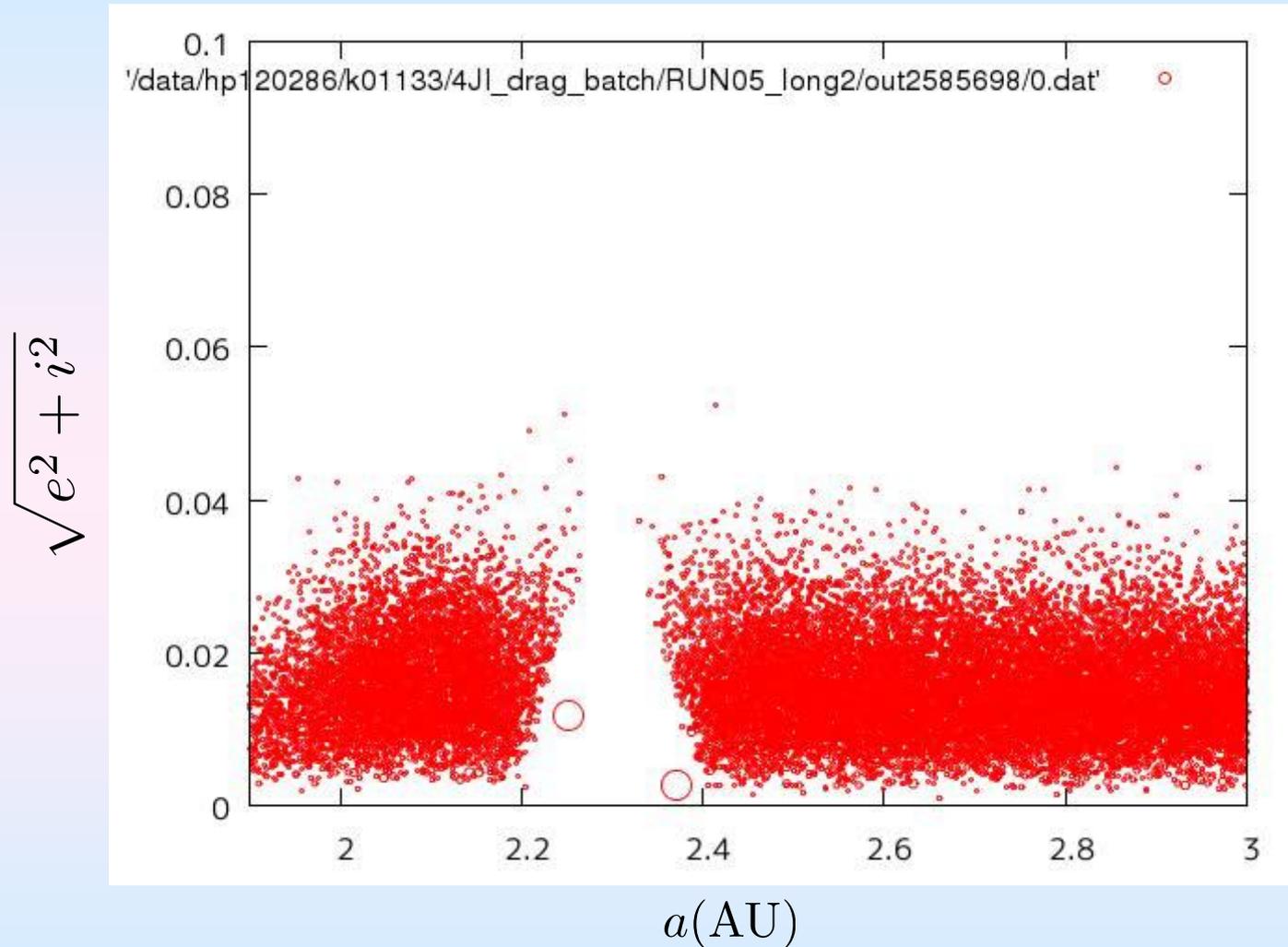
→ Planetesimal Driven Migration



ある惑星の両側に密度構造ができ、非対称なトルクが働くため惑星が一方に移動する現象

今までの計算は微惑星の自己重力抜きでの計算
微惑星の自己重力入りの計算は試されていない

惑星移動



原始惑星はそのすぐ外側の微惑星をはねとばして外側の
原始惑星は外側に、内側の原始惑星は内側に移動

まとめ

広い領域、かつ大粒子数での惑星集積計算が必要となってきた。

本研究では並列コードを開発し、今までにない大領域かつ、大粒子数の計算を可能にした。

その結果、惑星形成理論の突破口となる可能性があるメカニズムを再現できた。

- 惑星形成N体コードを「京」で実装、チューニングして、高い性能を実現した。
1024ノード程度まで。
100ノードくらいで理論ピークの30%の性能。
- 大領域のself-consistent な計算を行い、アイスラインの外側での惑星移動が自然に起こることを見いだした

ここまで