

Kninja を使った惑星集積計算

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)、牧野淳一郎(理研AICS)、藤本正樹(JAXA)

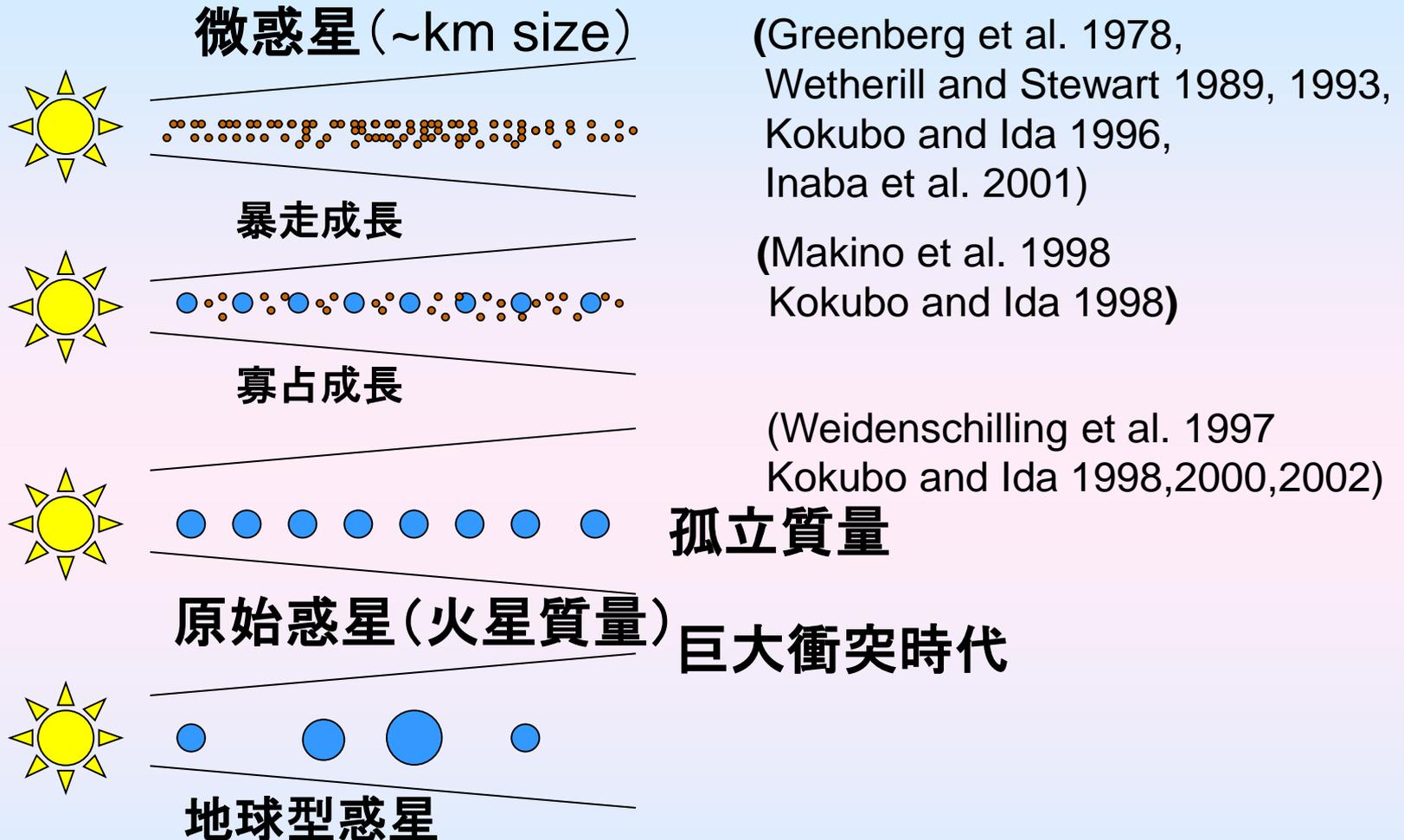
我々の太陽系



http://www.astroarts.co.jp/news/2006/08/28planet_5/

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。

地球型惑星形成理論



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

古典的モデルの問題

- 形成時間問題
- ガス円盤からの効果による惑星落下問題
- ガス円盤に対する理解の進展
 - Dead zone での微惑星形成
太陽からの距離によって微惑星がどのように形成されたかに違いがあることがわかってきた
(戒崎シナリオなど)
 - 円盤外側からのPebble accretion
惑星集積がpebbleによって促進される可能性あり

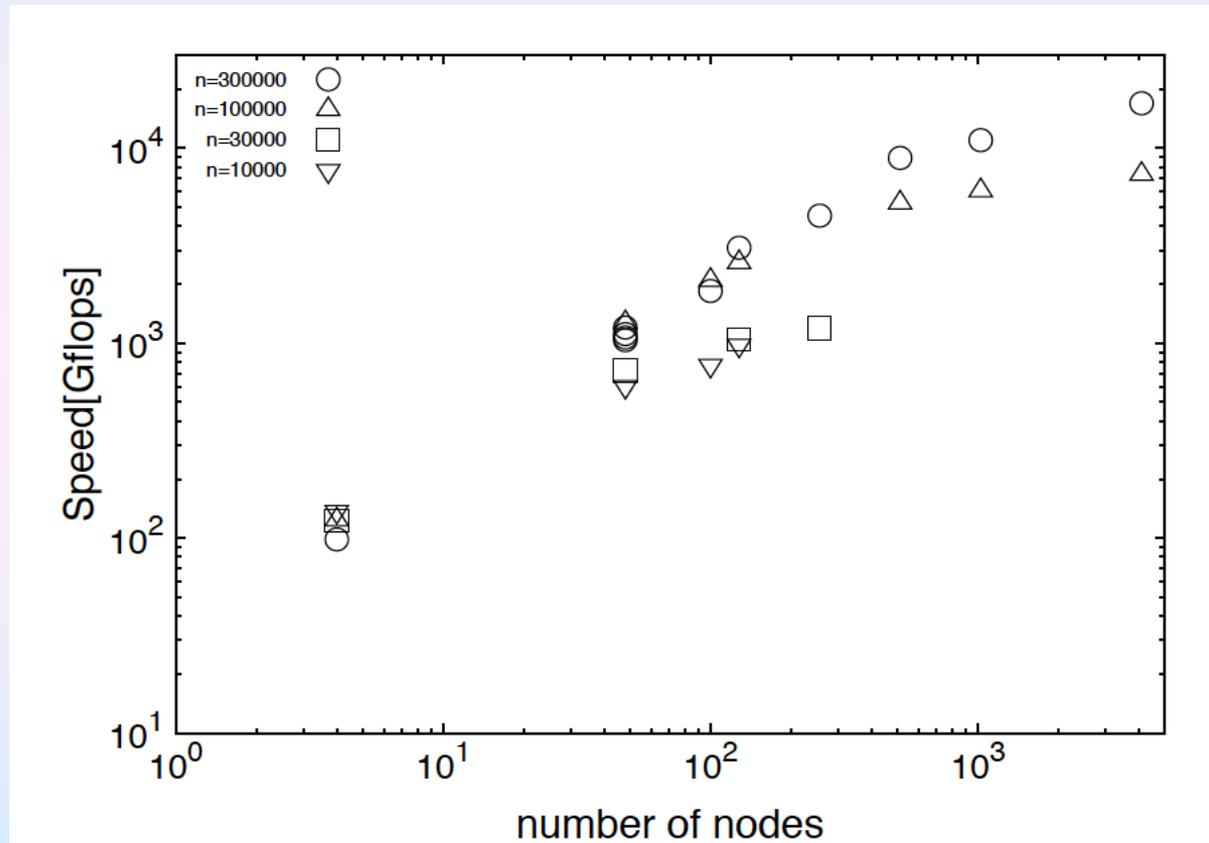
惑星のその場形成という前提を取り払わないといけない

今までのN体計算で足りなかった点

- 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。動径方向移動を考慮するには足りない。
- 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

Kninja を開発

- Kninja : 惑星集積並列N体計算コード
(Kominami, Daisaka, Nitadori & Makino, in prep)
- 計算機 : スーパーコンピュータ「京」



30万体の計算で~20Tflopsの速度が出る性能

原始惑星の外側移動の計算

アイスラインでの面密度増加

- 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

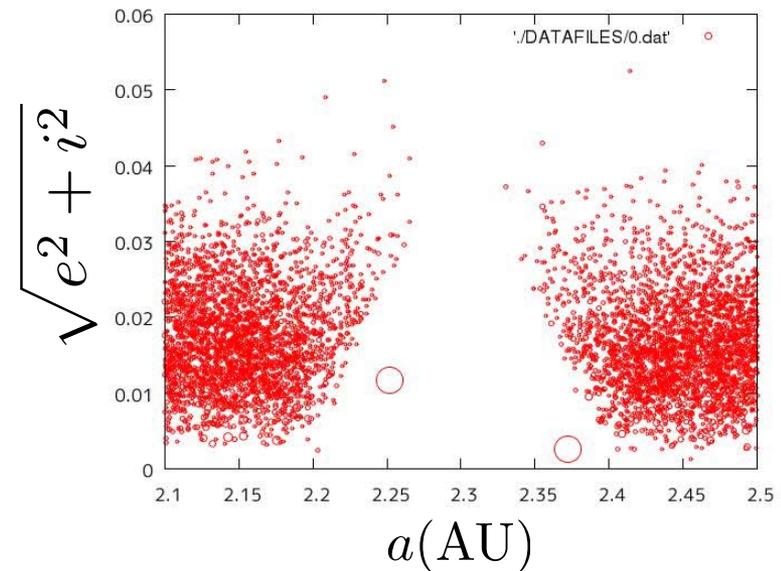
→ Planetesimal Driven Migration

(e.g. Ida et al. 2000, Minton & Levison 2014, Kominami et al. 2016)

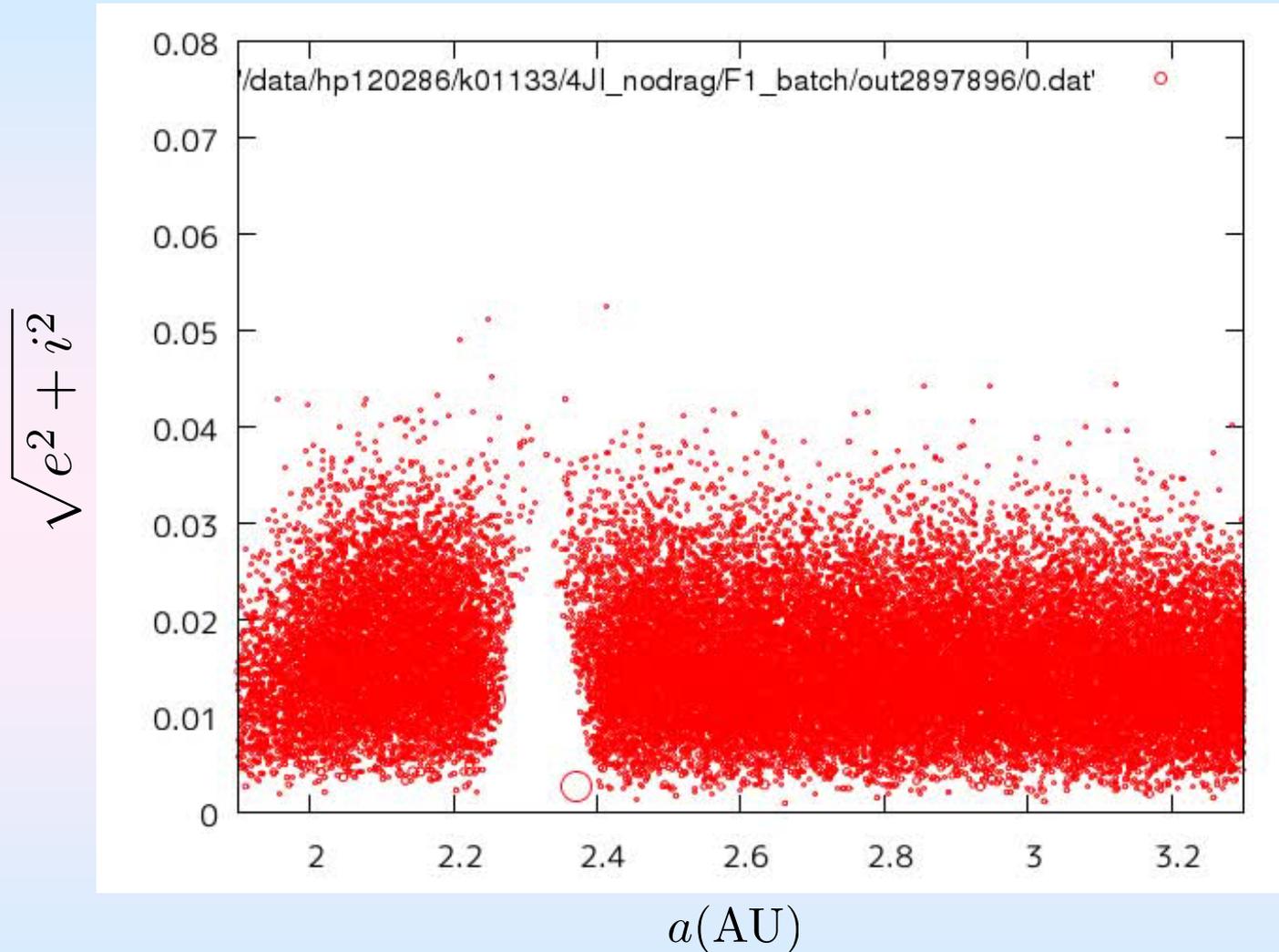
ある惑星の両側に密度構造ができ、非対称なトルクが
働くため惑星が一方に移動する現象

PDMのタイムスケール : $\sim \text{several} \times 10^4 \text{ years}$

type-I migration のタイムスケール : $\sim \text{several} \times 10^4 \text{ years}$

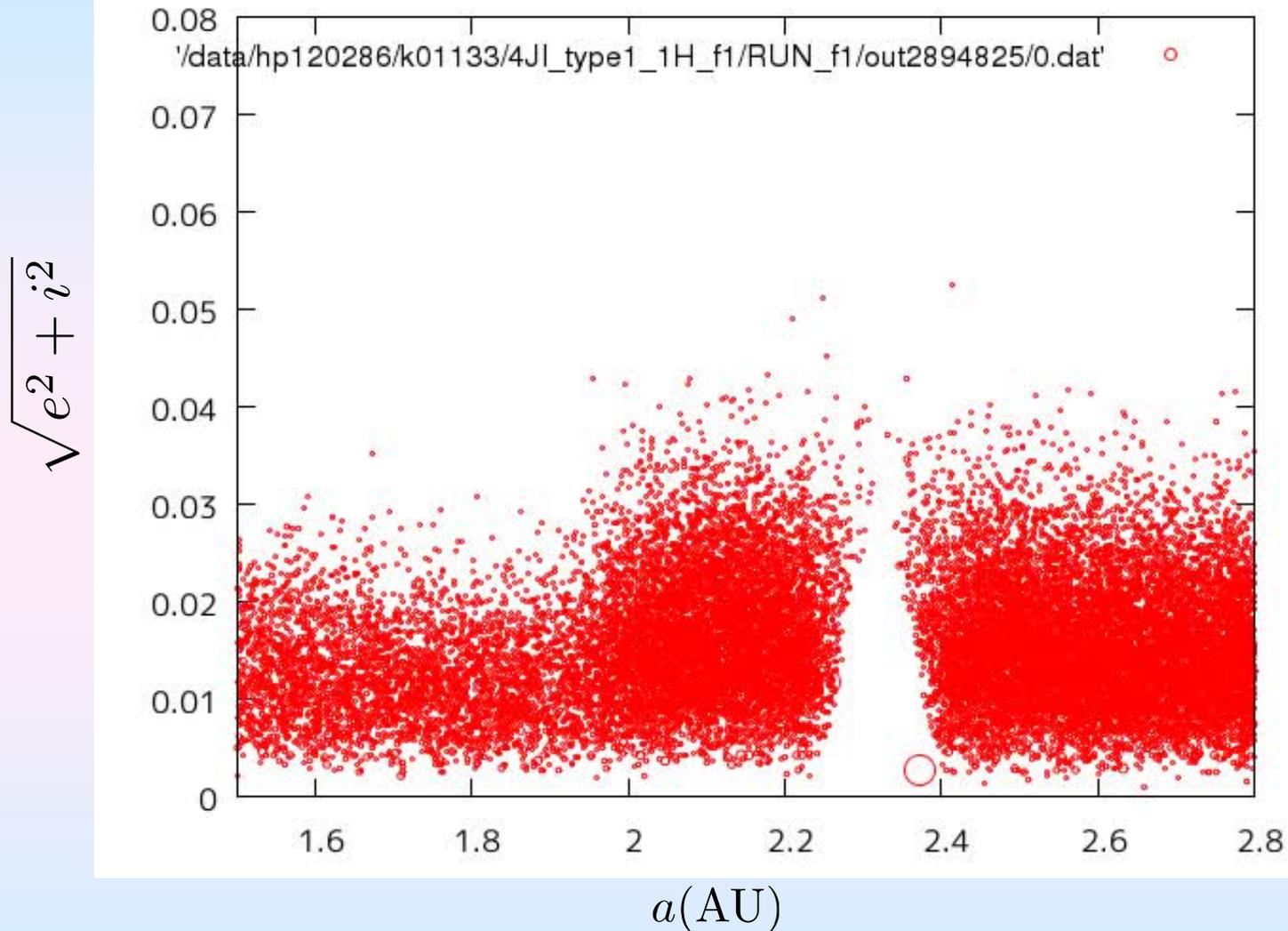


原始惑星移動(ガスなし)



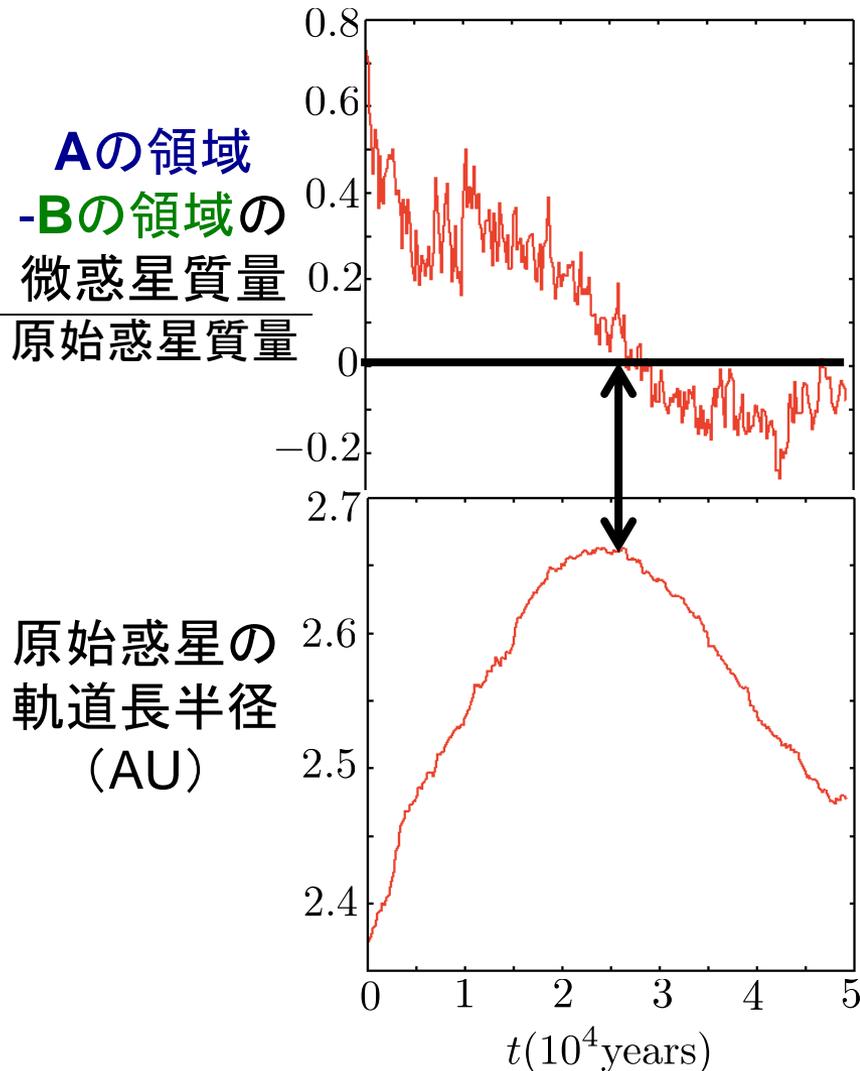
外側の原始惑星は外側へ、内側の原始惑星は内側へ
微惑星を跳ね飛ばすことで角運動量を得て移動。

ガス抵抗とタイプ1惑星移動効果入り

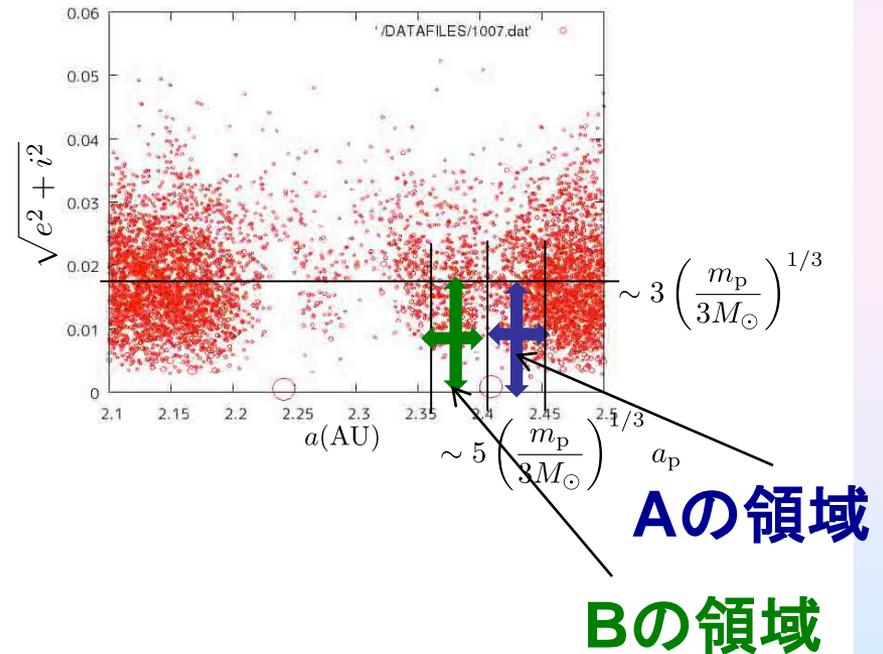


外側の原始惑星はタイプ1惑星移動の効果に打ち勝ち、外側へ移動。
内側の原始惑星はアイスラインで止まることなく、内側へ移動。

原始惑星の軌道長半径の進化と はねとばされる微惑星の質量

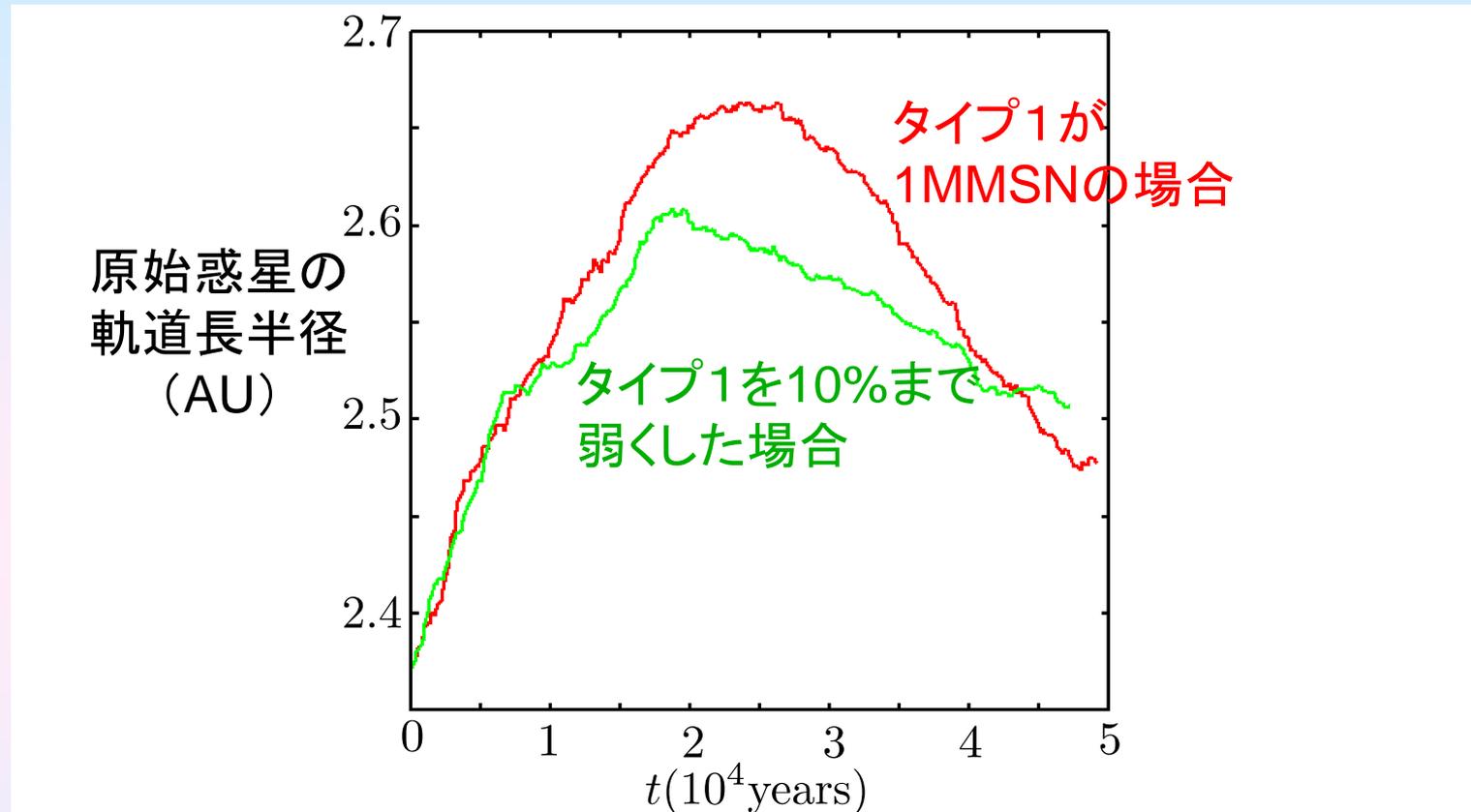


A > B のときに外側に進む



一旦、負になるとPDMによりu-turnしてしまう。

タイプ1惑星移動の効果を弱くした場合との比較



タイプ1を弱くすれば外側移動が続くわけではない。
微惑星が大きい。滑らかでない惑星移動により、反対方向のPDMのキックが一旦働くと内側移動になる。

→ 微惑星を小さくすると原始惑星が外側移動を続ける可能性あり

議論とまとめ

スーパーコンピュータ「京」上で走るKninjaというコードを開発

アイスラインでの微惑星密度変化を入れた大領域のN体計算で、
原始惑星移動が確認された

- (1) 原始惑星は、微惑星をはねとばすことで移動を開始
- (2) ランダム速度の小さい微惑星が進行方向に十分数あるうちは
移動が続く→ランダム速度の増加はブレーキになる
→ガス抵抗はランダム速度の上昇を抑え、外側移動を
促進させる
- (3) タイプ1 惑星移動の効果は微惑星質量が小さい場合で確認
する必要あり。

小さい微惑星からの計算(さらにNの大きい計算)
を行う必要がある。ポスト京ではコードを改良し、
～1億体の粒子数の計算をできるようにする。