

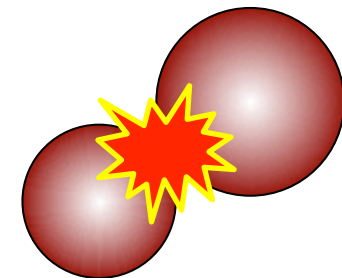
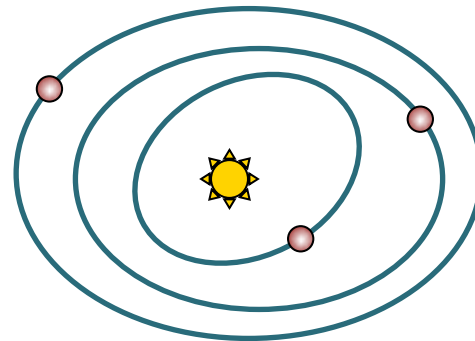
計算惑星科学シンポジウム@石垣 (2013/11/20)

惑星形成研究における 計算科学と計算機

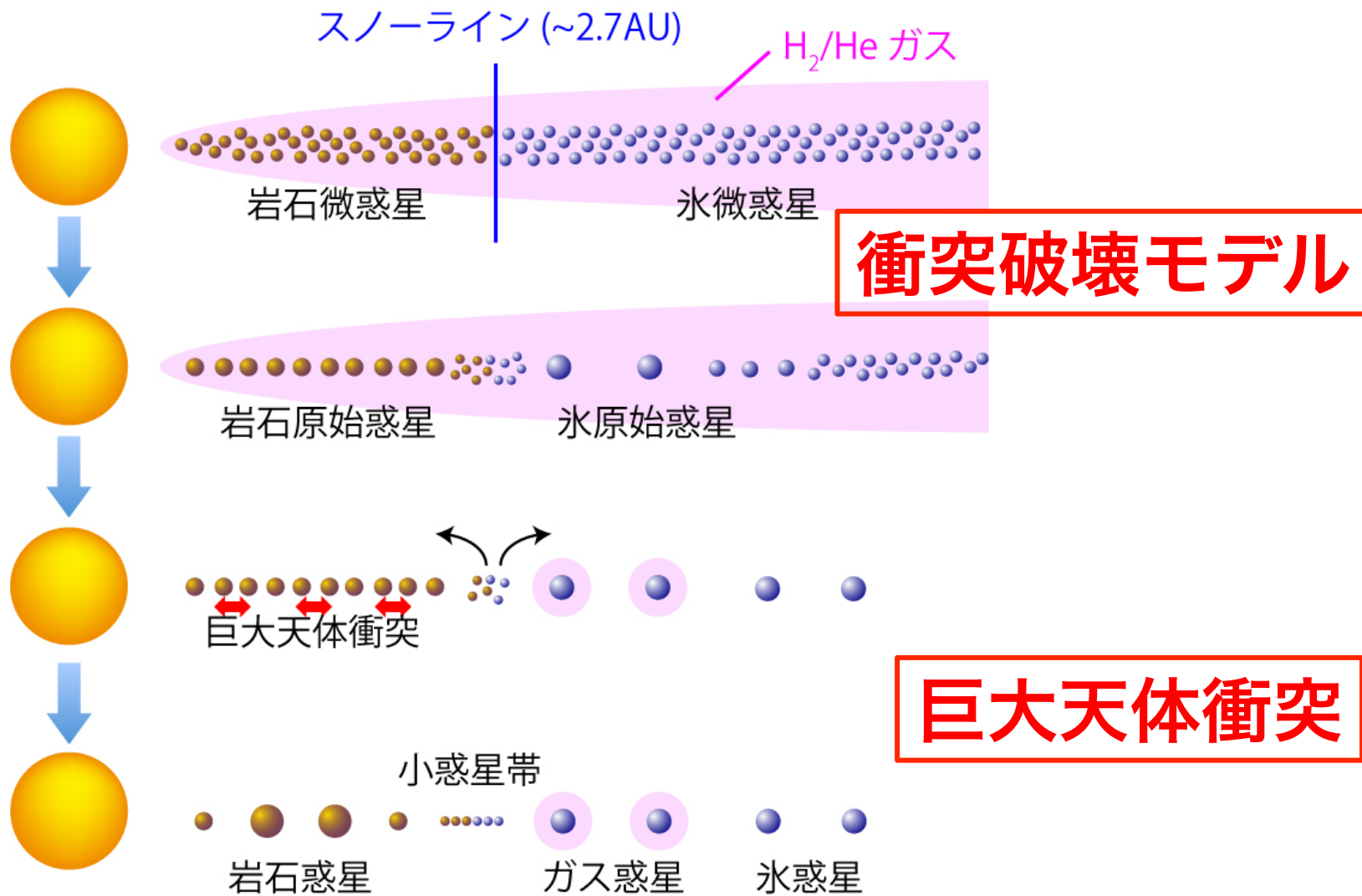
～計算機でこり押しできそうなことをつらつらと～

玄田英典 (東工大・地球生命研究所)

惑星形成 = \sum (天体の軌道進化 + 天体の衝突)



惑星形成 (太陽系)



衝突合体と破壊

微惑星

合体・衝突

原始惑星、惑星



小規模

破壊的

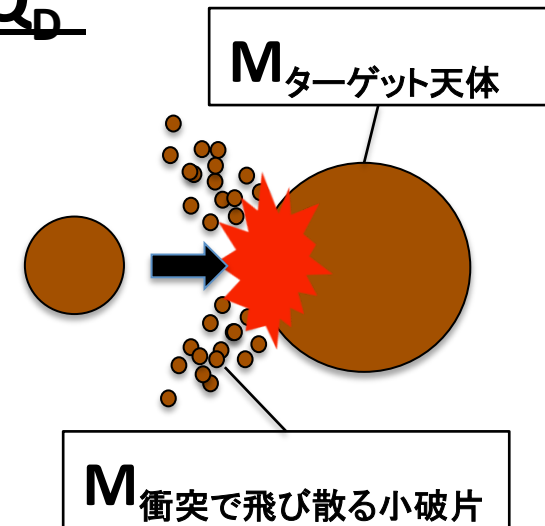


境界衝突エネルギー： Q_D^*

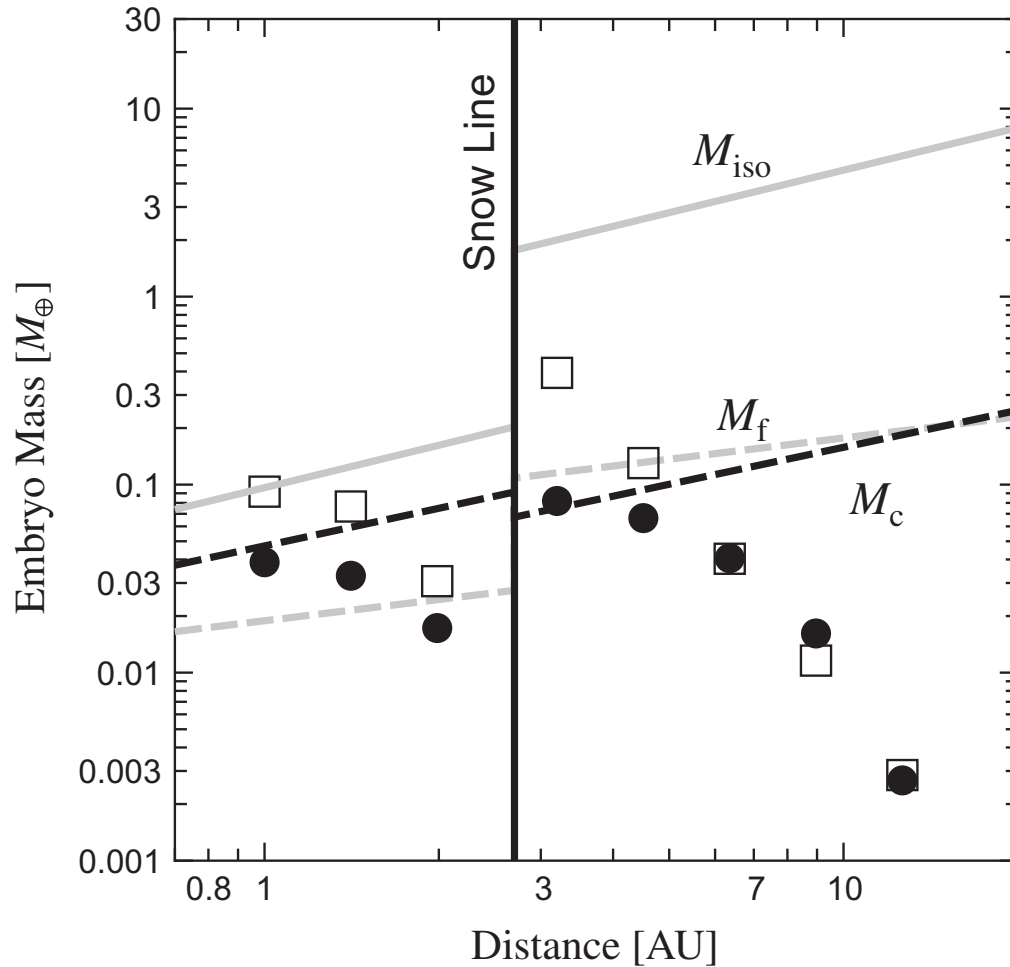
$M_{\text{衝突で飛び散る小破片}} = 0.5 \times M_{\text{ターゲット天体}}$
となる衝突における

衝突(運動)エネルギー値

を天体質量で割ったもの。



最終原始惑星質量



微惑星の衝突破壊を
考慮した原始惑星形成の
計算(統計的手法)

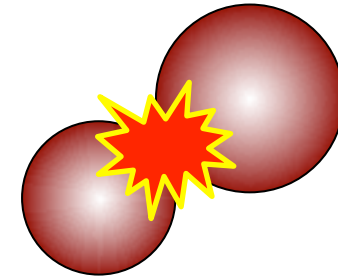
Kobayashi et al. 2010

$$M_f \sim Q_D^* 0.75$$



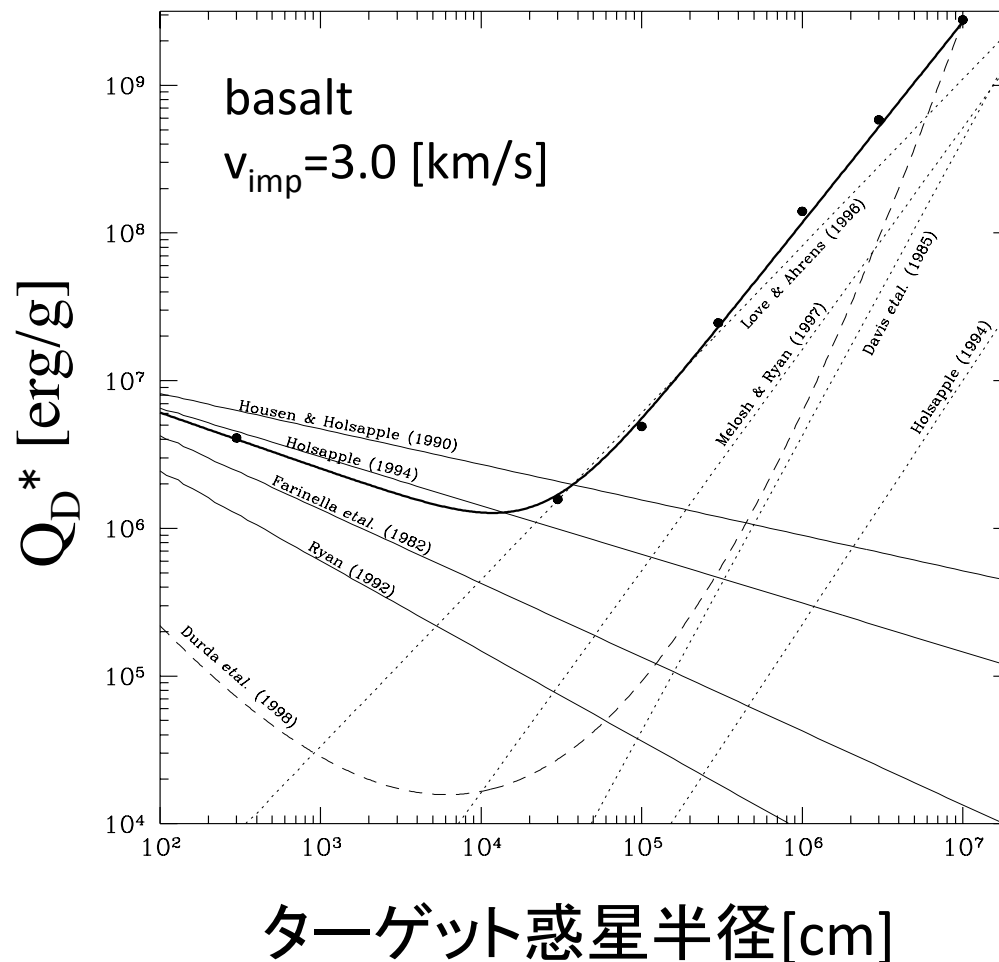
$$M_f = 0.14 \left(\frac{\tilde{b}}{10} \right)^{3/4} \left(\frac{a}{5 \text{ AU}} \right)^{3/2} \left(\frac{M_*}{M_\odot} \right)^{3/8} \left(\frac{\rho}{1 \text{ g/cm}^3} \right)^{-1/8} \times \left(\frac{\Sigma_{s,0}}{2.7 \text{ g/cm}^2} \right)^{3/4} \left(\frac{Q_D^*}{3.1 \times 10^6 \text{ erg/g}} \right)^{3/4} M_\oplus$$

Q_D^* に関する研究



Benz & Asphaug (1999)

被引用回数: 272回



SPH法を用いた衝突計算
(Smoothed Particle Hydrodynamics)

岩石同士、氷同士の衝突
天体サイズ (3cm ~ 100km)
合計480通りの衝突計算
粒子数: 約5万

解像度依存性 (収束性)
は詳しく調べられていない

藤田
(東大M2)

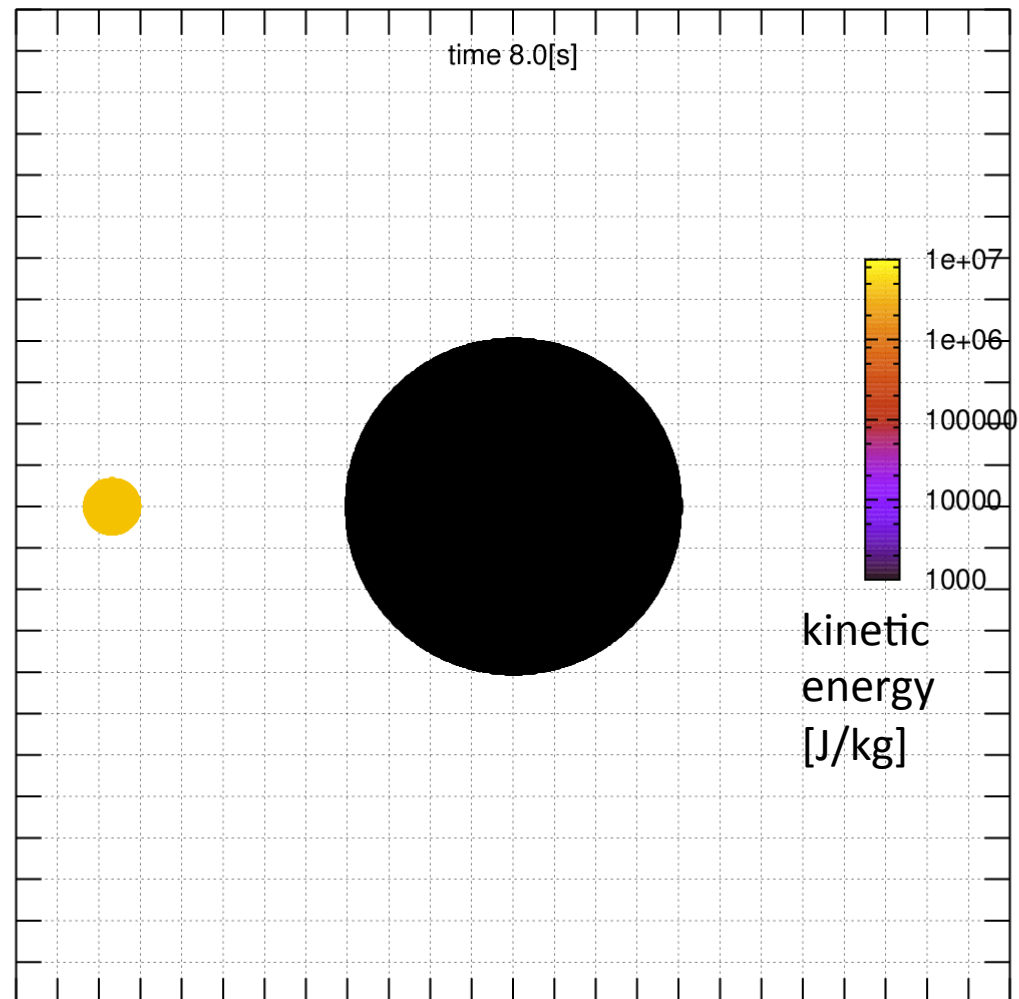


計算の一例

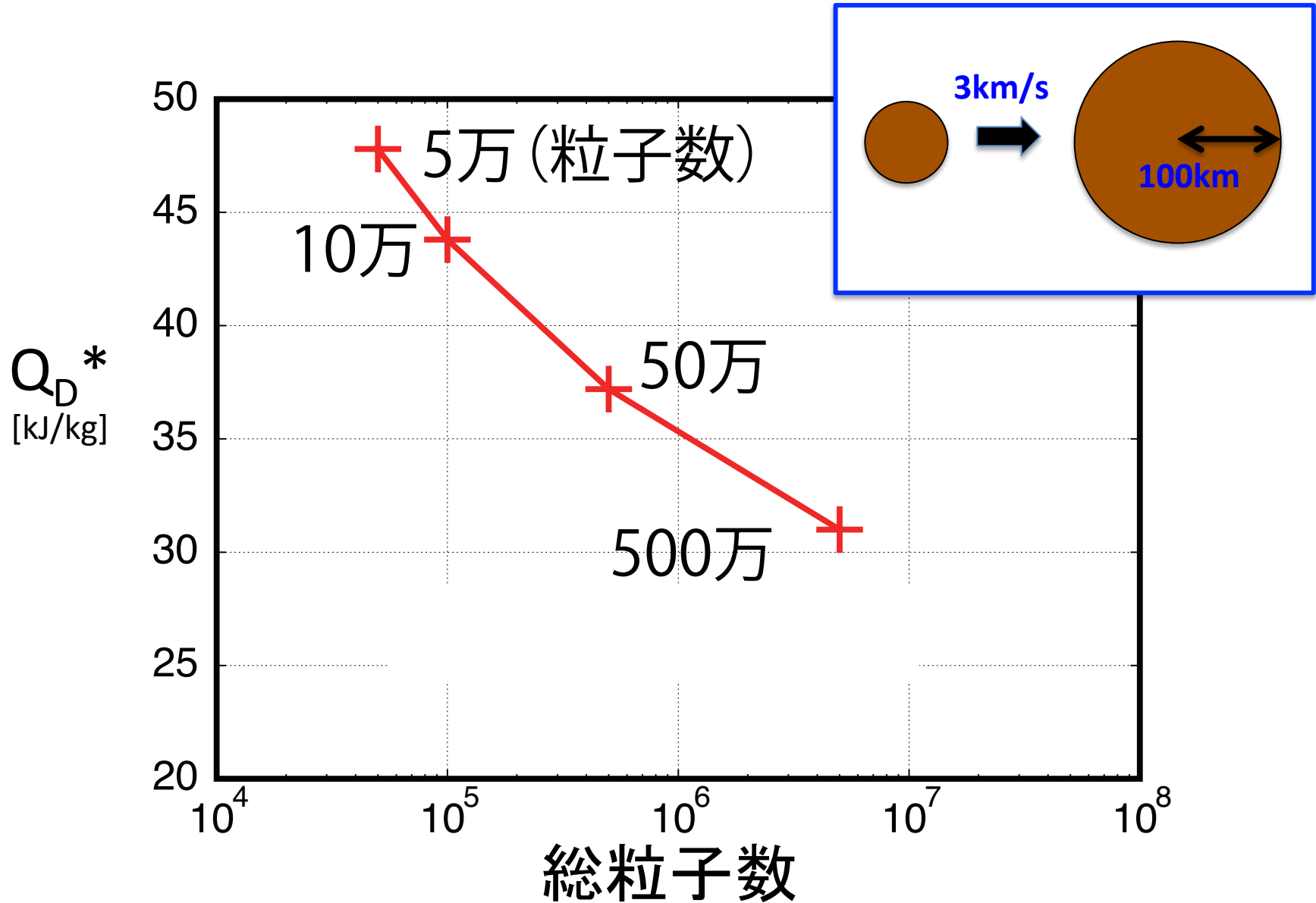
正面衝突, 衝突速度=3.0 [km/s], 粒子数=500万, 岩石一様組成

ターゲット天体 半径:100[km]

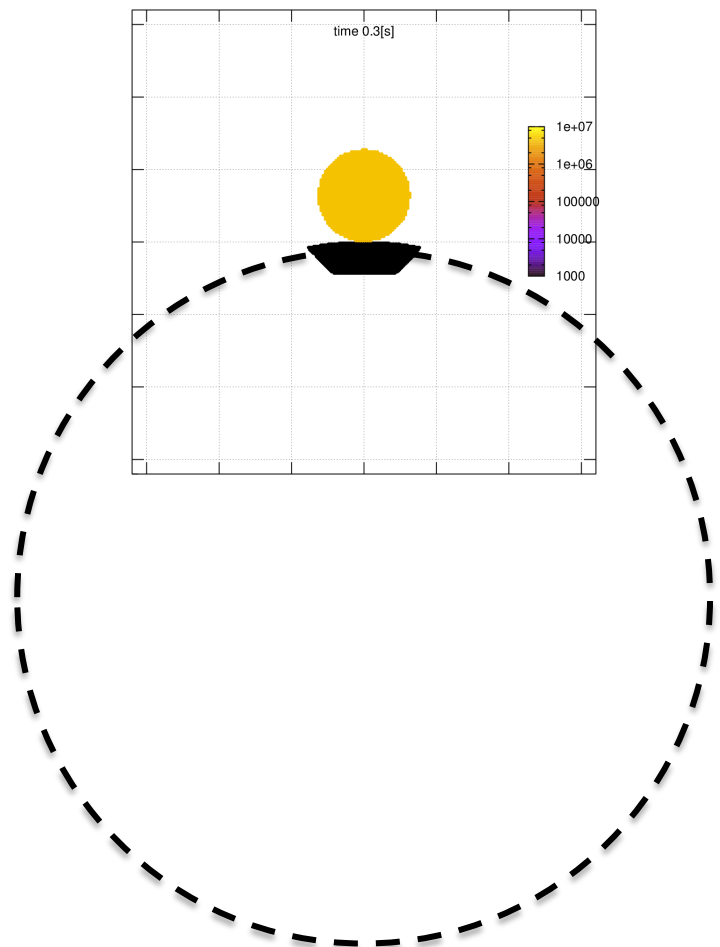
衝突天体 半径: 15[km]



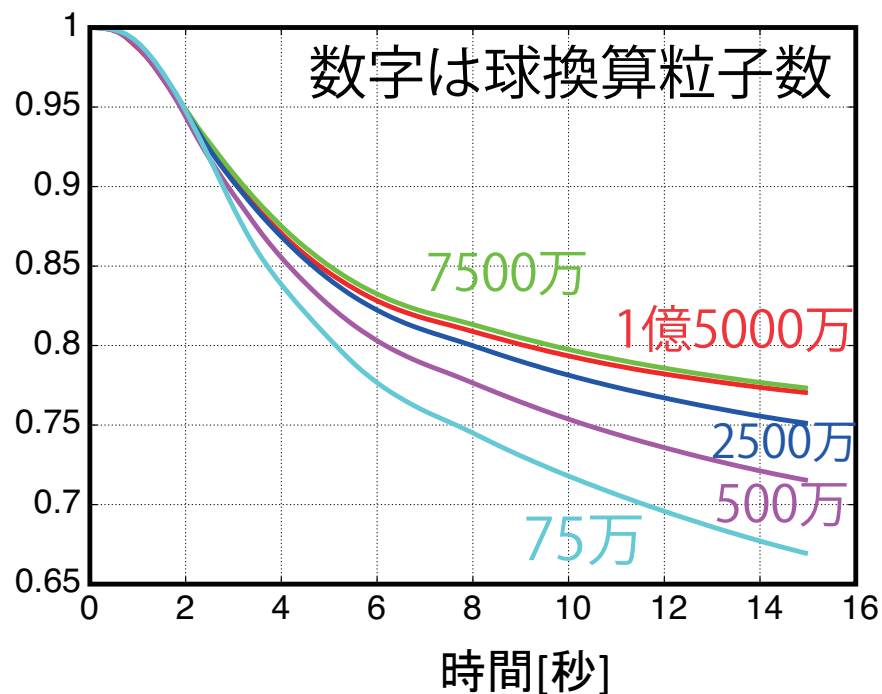
粒子数依存性



衝突地点近傍の超高解像度計算



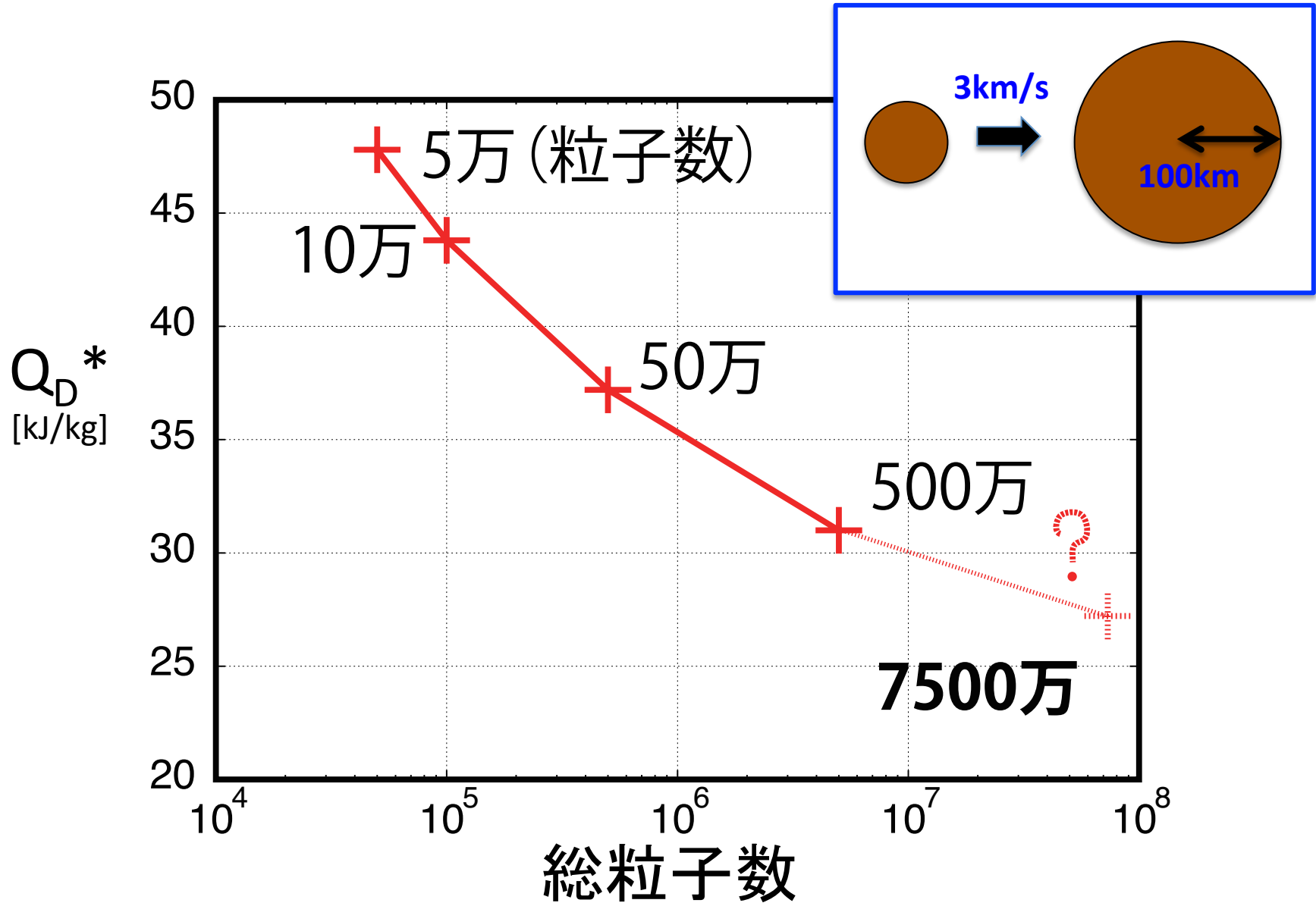
総運動エネルギー / 総エネルギー



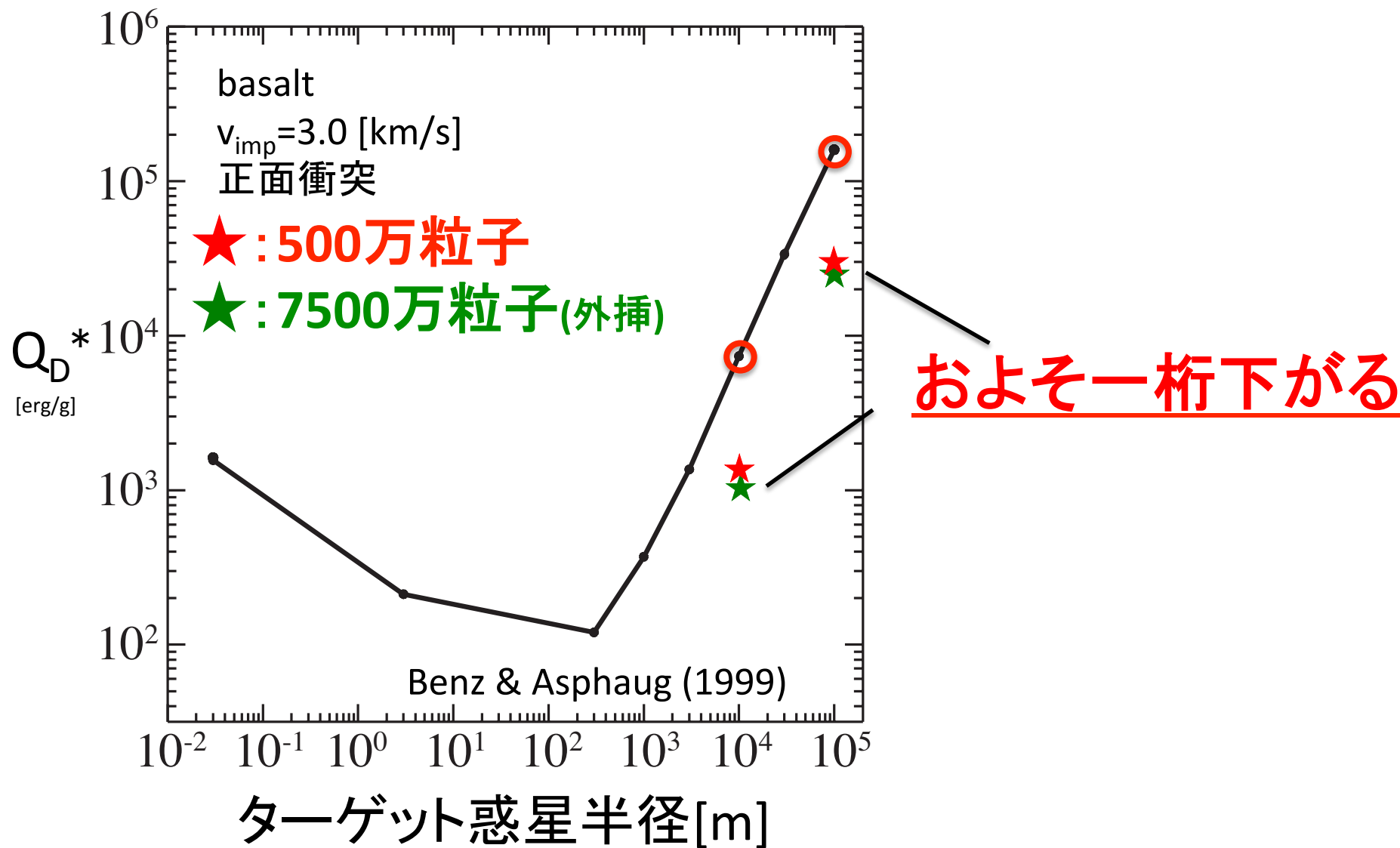
7500万球換算粒子数で
エネルギー分配は収束

計算に要する粒子数: 500万
球換算粒子数: 5000万

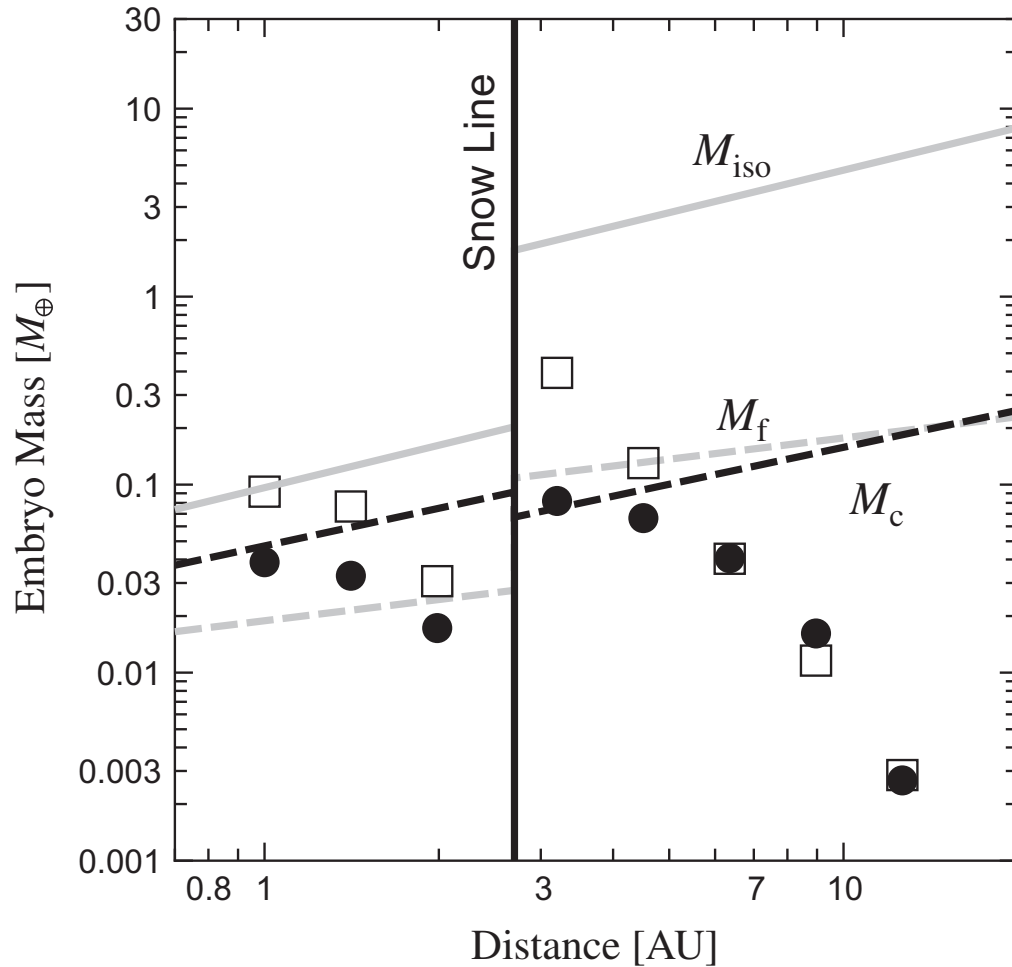
粒子数依存性



先行研究との比較



最終原始惑星質量



微惑星の衝突破壊を
考慮した原始惑星形成の
計算(統計的手法)

Kobayashi et al. 2010

$$M_f \sim Q_D^* 0.75$$



$$M_f = 0.14 \left(\frac{\tilde{b}}{10} \right)^{3/4} \left(\frac{a}{5 \text{ AU}} \right)^{3/2} \left(\frac{M_*}{M_\odot} \right)^{3/8} \left(\frac{\rho}{1 \text{ g/cm}^3} \right)^{-1/8} \times \left(\frac{\Sigma_{s,0}}{2.7 \text{ g/cm}^2} \right)^{3/4} \left(\frac{Q_D^*}{3.1 \times 10^6 \text{ erg/g}} \right)^{3/4} M_\oplus$$

計算量の見積もり

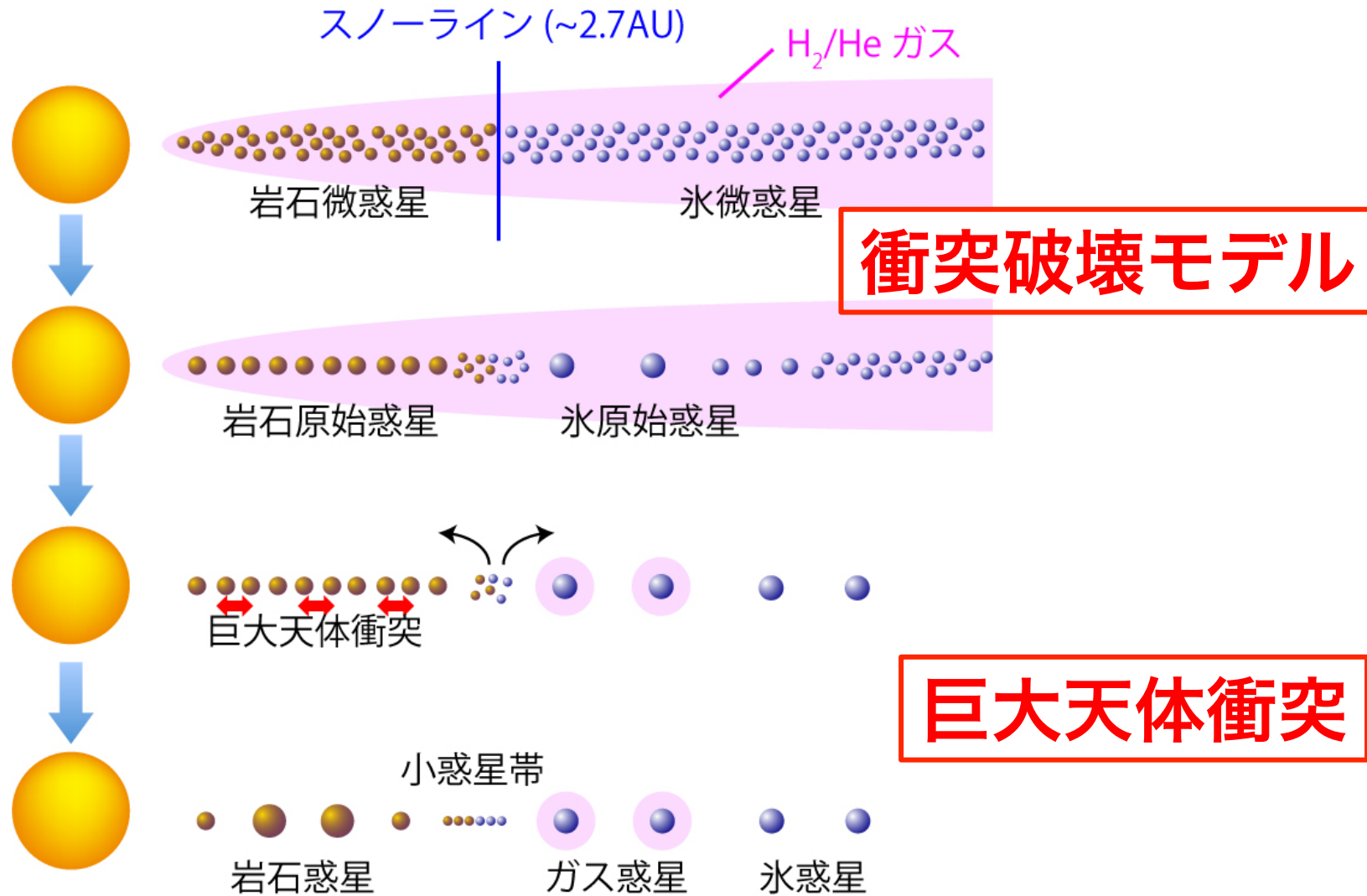
様々な天体サイズの正しい Q_D^* を求めるためには
約1億粒子の計算を約500通りする必要がある

500万粒子 12cores (Intel Xeon 3GHz)
～ 1 weeks (自作共有メモリ型並列SPHコード)

1億粒子 $(N \log N) \times (N^{1/3})$
約100倍の計算量
20cores 50 weeks = 1年

500ラン 1000cores 50 weeks = 1年

惑星形成(太陽系)



巨大天体衝突 (Giant Impacts)

地球型惑星の様々な特徴に影響

- ▶ 惑星の個数、形成時間、自転速度・方向など

Chambers & Wetherill 1998, Kokubo & Genda 2010 など

- ▶ 巨大衛星（月）の形成 Canup 2004, Ida et al. 1997など

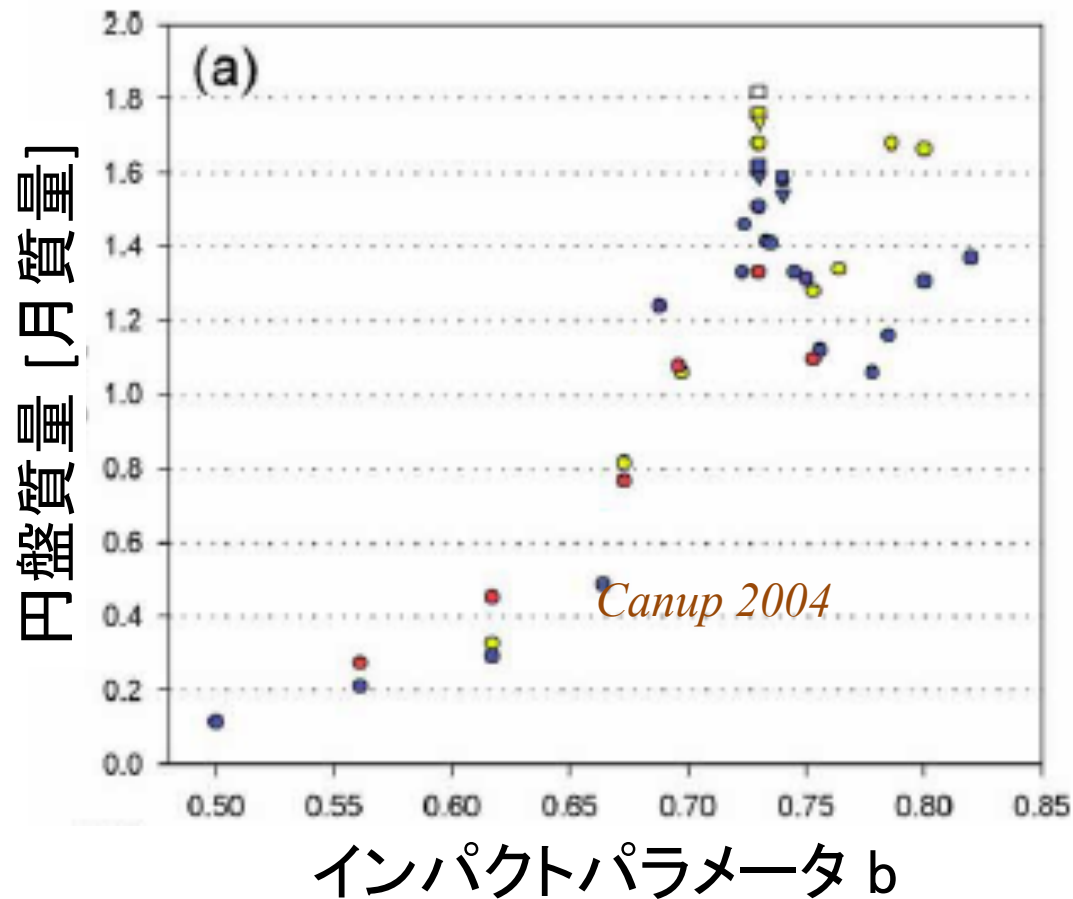
- ▶ 巨大金属コア惑星（水星）の形成

Benz et al. 1988, Benz 2007 など

- ▶ 大気・海の散逸 Genda & Abe 2003, 2005 など

- ▶ マグマオーシャンの形成 Melosh & Sonnet 1988 など

原始月円盤の形成



SPH法による計算

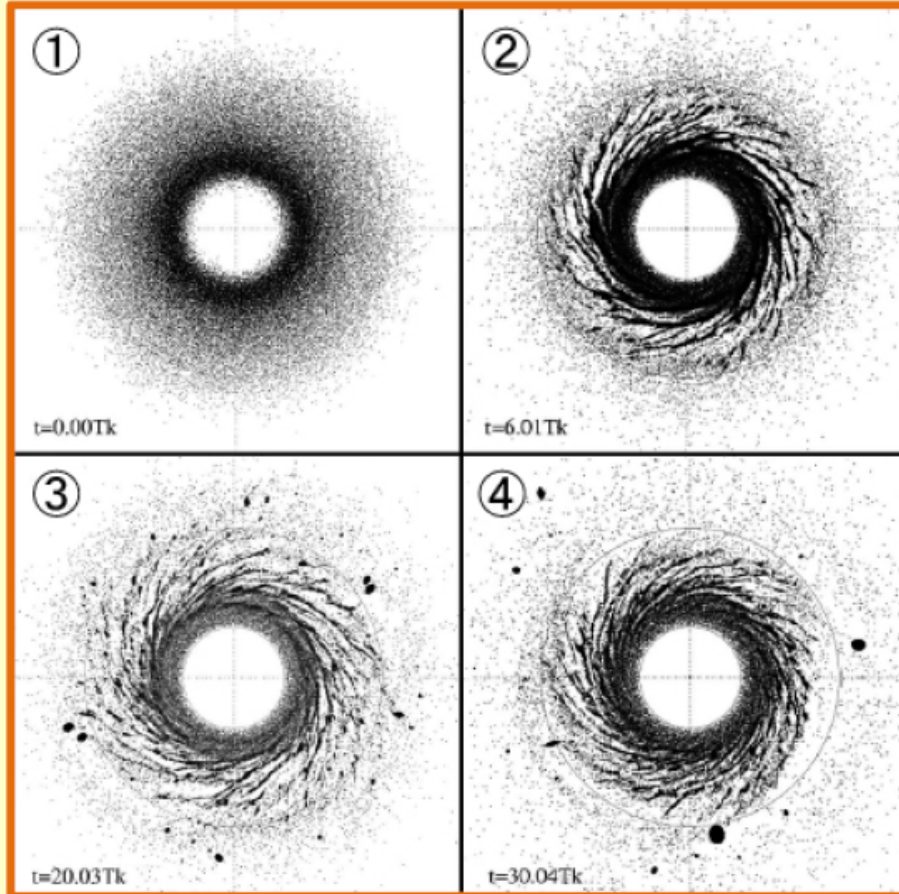
10本以上の論文

SPH粒子数: 10^5 個

原始月円盤から月の形成

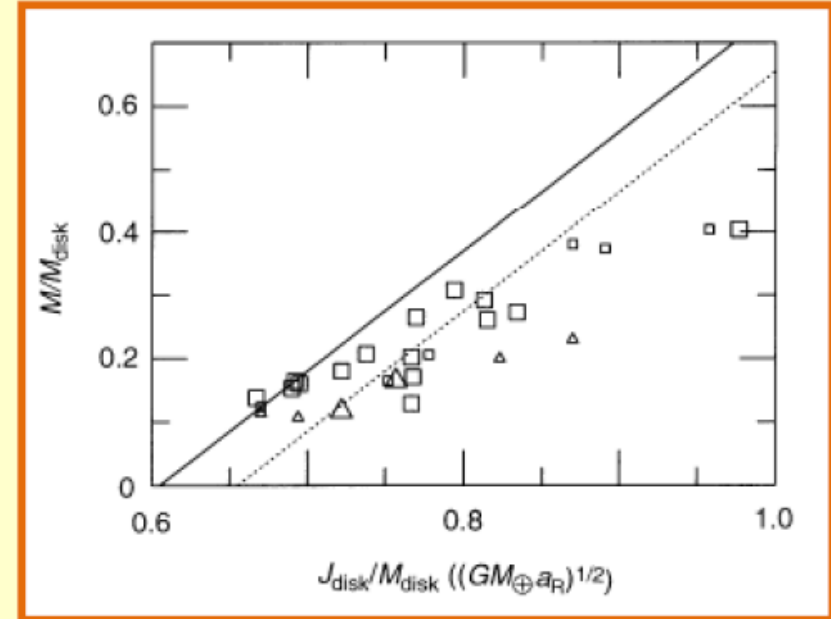
原始月円盤の進化

形成される月の質量



Takeda & Ida (2001) ApJ

1ヶ月～1年で月が形成

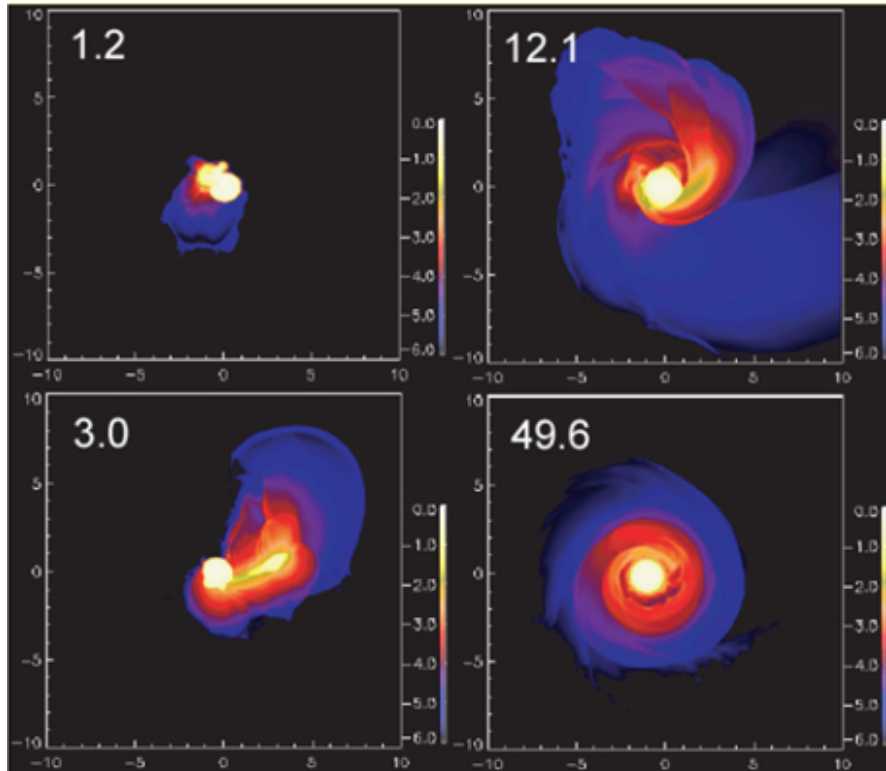


Ida, Canup & Stewart (1997) Nature

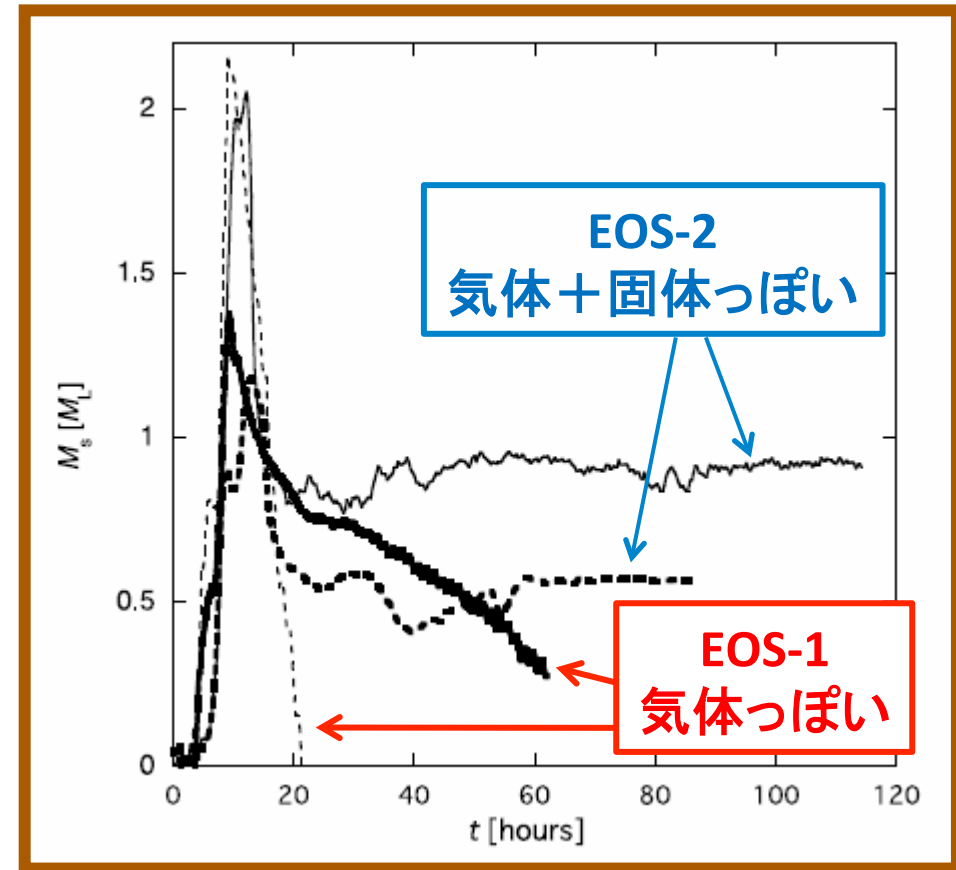
角運動量と質量保存から

$$\frac{M}{M_{\text{disk}}} \approx 1.9 \frac{J_{\text{disk}}/M_{\text{disk}}}{\sqrt{GM_{\oplus}a_R}} - 1.15M_{\text{disk}} - 1.9M_{\infty}$$

格子法によるシミュレーション



Wada, Kokubo & Makino (2005)

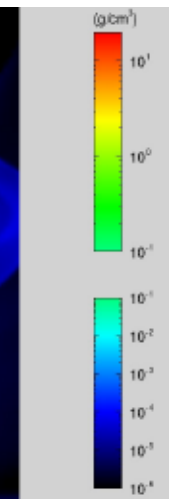
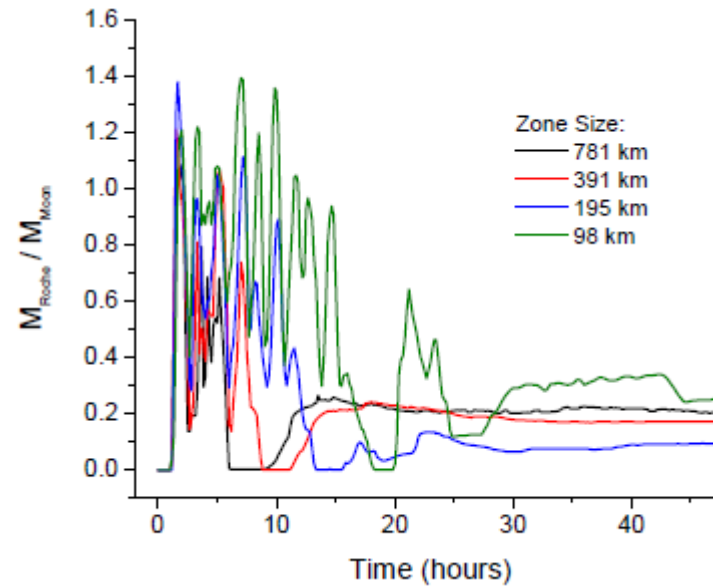
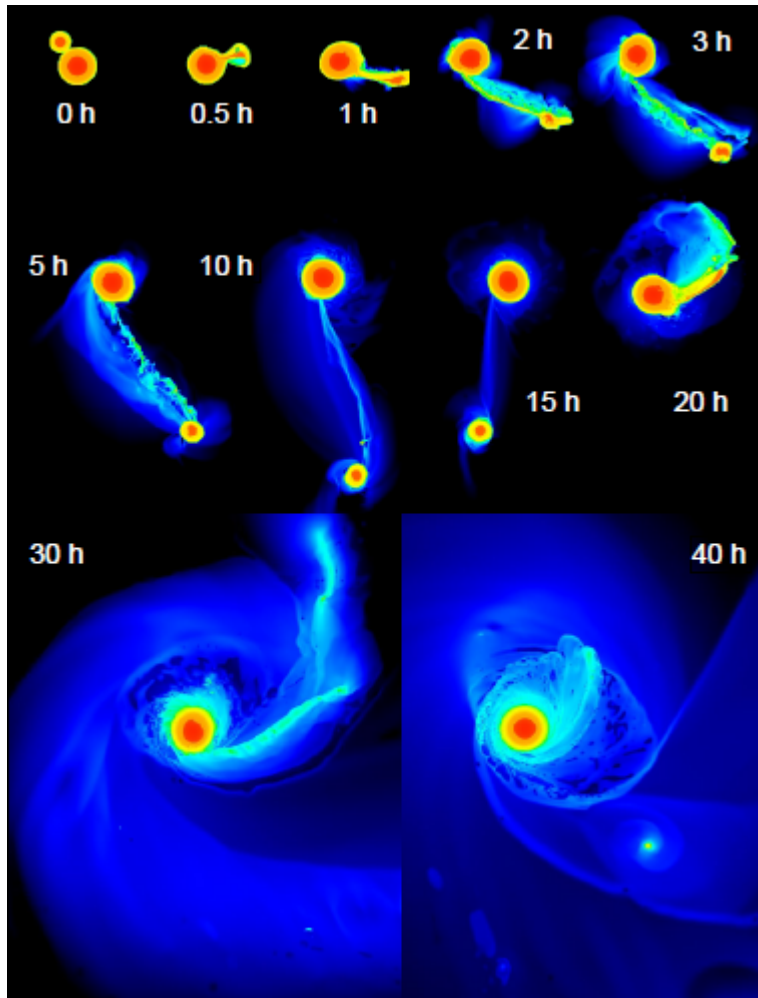


気体っぽい円盤が形成されると、
円盤質量・角運動量が減少

Canup, Barr and Crawford 2013

AMR-CTH法

EOS: M-ANEOS



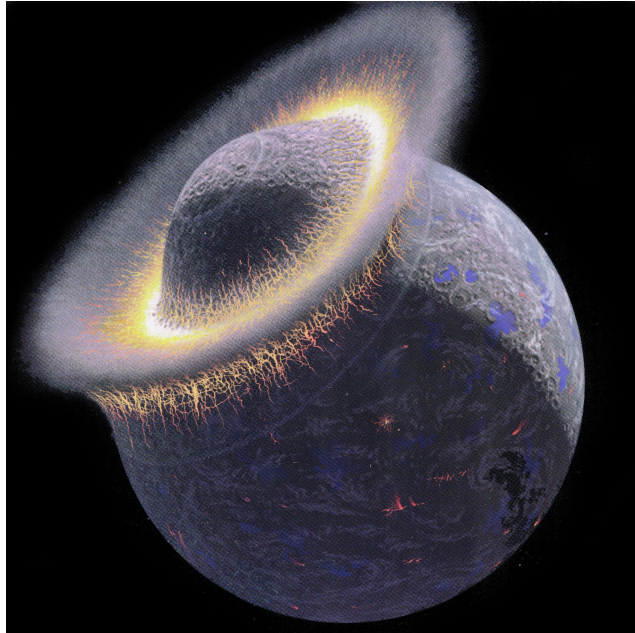
計算量の見積もり

自己重力入りSPHの計算

10^5 粒子 12cores (Intel Xeon 3GHz)
～ 2 weeks (自作共有メモリ型並列SPHコード)

10^8 粒子 $(N \log N) \times (N^{1/3})$
 $10^{4.5}$ 倍の計算量
1000cores で 50 weeks = 1年

巨大天体衝突による大気・海散逸



大気・海入りの巨大天体衝突計算

計算困難な点

- ▶ 地面・海・大気の密度差大
→ DSPHで解決？ Saitoh & Makino 2013
Hosono et al. 2013
- ▶ 大気・海は薄い
→ 粒子数大
→ 計算機パワーで解決？

cf. 大気・海の典型的厚さ $\sim 10\text{km}$ ← 10粒子で表現
固体惑星の半径 $\sim 1000\text{km}$

10^6 粒子の計算はされている

10^9 粒子

計算量の見積もり

自己重力入りSPHの計算

- 10^5 粒子** 12cores (Intel Xeon 3GHz)
~ 2 weeks (自作共有メモリ型並列SPHコード)
- 10^8 粒子** $(N \log N) \times (N^{1/3})$
10^{4.5}倍の計算量
1000cores で 50 weeks = 1年
- 10^9 粒子** 10000cores で 200 weeks = 4年

まとめ

- ▶ 惑星形成において天体衝突は重要なプロセスの一つであり、衝突現象は単純ではない。
- ▶ 衝突破壊モデル(Q_D^*)を正しく求める必要がある
 - 衝突パラメータ依存性を調べるには
最低500ラン必要 → 10000コア・1年
- ▶ 巨大天体衝突でどのような月が形成されるのかを調べるには1億粒子ぐらい必要そう
 - 分散メモリ型並列コードで1000コア・1年