

地球型惑星の形成

巨大天体衝突ステージにおける
原始惑星の合体・非合体

玄田 英典

(東工大・地惑・COE-PD)

共同研究者: 小久保 英一郎 (国立天文台)、井田 茂 (東工大)

- 修士 : 月の起源(円盤散逸)に関する研究 with 阿部
博士 : 地球型惑星の大気と海の起源に関する研究 with 阿部
- PD { 海の起源と初期進化 with 生駒
系外惑星(HD149026b)の形成 with 生駒・Guillot・谷川・井田
地球型惑星の形成(巨大天体衝突) with 小久保・井田
小惑星の自転 with 武田・小久保・大槻
月の起源(難揮発性元素) with 倉本

地球型惑星の形成

巨大天体衝突ステージにおける
原始惑星の合体・非合体

玄田 英典

共同研究者: 小久保 英一郎 (国立天文台)、井田 茂 (東工大)

修士 : 月の起源(円盤散逸)に関する研究 with 阿部

博士 : 地球型惑星の大気と海の起源に関する研究 with 阿部

PD { 海の起源と初期進化 with 生駒
系外惑星(HD149026b)の形成 with 生駒・Guillot・谷川・井田
地球型惑星の形成(巨大天体衝突) with 小久保・井田
小惑星の自転 with 武田・小久保・大槻
月の起源(難揮発性元素) with 倉本

地球型惑星の形成

巨大天体衝突ステージにおける
原始惑星の合体・非合体

玄田 英典

玄田 A 典

共同研究者: 小久保 英一郎 (国立天文台)、井田 茂 (東工大)

修士 : 月の起源(円盤散逸)に関する研究 with 阿部

博士 : 地球型惑星の大気と海の起源に関する研究 with 阿部

PD { 海の起源と初期進化 with 生駒
系外惑星(HD149026b)の形成 with 生駒・Guillot・谷川・井田
地球型惑星の形成(巨大天体衝突) with 小久保・井田
小惑星の自転 with 武田・小久保・大槻
月の起源(難揮発性元素) with 倉本

合体する場合



合体しない場合

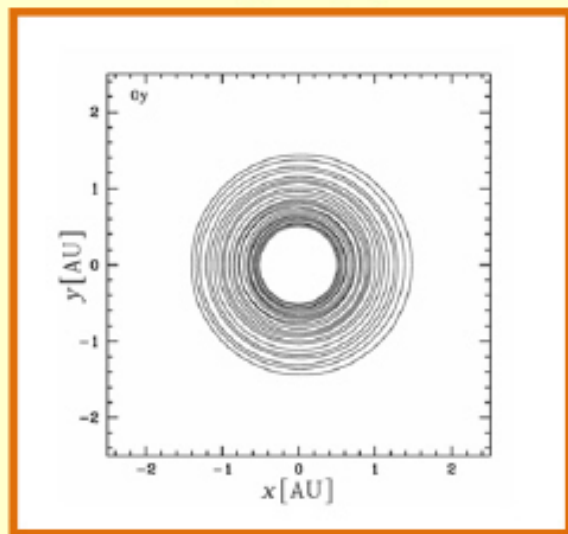
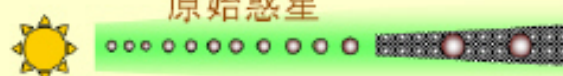


目次

- 1. イントロ (4枚)
- 2. 計算手法など (3枚)
- 3. 計算結果 (3枚)
- 4. まとめ・今後 (1枚)

惑星形成の現代的描像

原始太陽系円盤



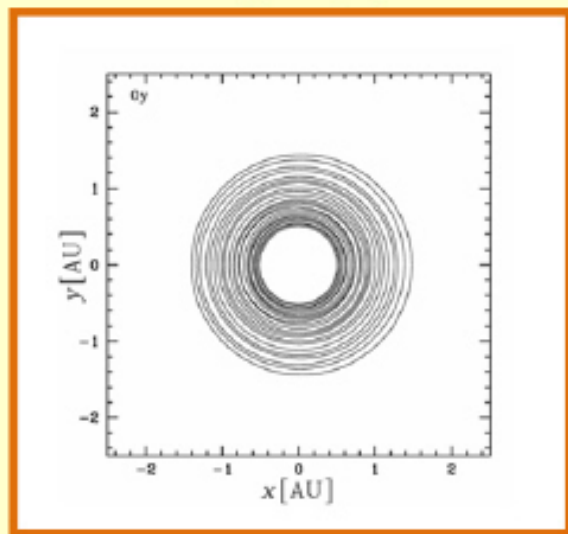
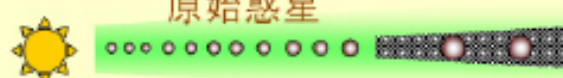
巨大天体衝突ステージにおける
原始惑星の軌道進化・合体成長

その一例

Chambers & Wetherill (1998), Agnor et al. (1999),
Chambers (2001), Iwasaki et al. (2002),
Kominami & Ida (2002, 2004), Nagasawa et al. (2005),
Raymond et al. (2004, 2005, 2006), Kokubo et al. (2006),
Ogihara et al. (2007) などなど

惑星形成の現代的描像

原始太陽系円盤



巨大天体衝突ステージにおける
原始惑星の軌道進化・合体成長

その一例

Chambers & Wetherill (1998), Agnor et al. (1999),
Chambers (2001), Iwasaki et al. (2002),
Kominami & Ida (2002, 2004), Nagasawa et al. (2005),
Raymond et al. (2004, 2005, 2006), Kokubo et al. (2006),
Ogihara et al. (2007) などなど

これまでにわかったこと

- ▶ タイムスケール : 10^7 - 10^8 年
- ▶ 惑星の個数 : 約 4 ± 1 個
- ▶ 惑星の質量 : 中心 — 大
両端 — 小
- ▶ 惑星の離心率 : ~ 0.1 (~ 0.01 :ダンピング入り)
- ▶ 惑星の自転 : 方向 — ランダム
速度 — 超高速
- ▶ 衛星形成 : ありえそう

これまでにわかったこと

- ▶ タイムスケール : 10^7 - 10^8 年 **延びる**
- ▶ 惑星の個数 : 約 4 ± 1 個
- ▶ 惑星の質量 : 中心 — 大
両端 — 小
- ▶ 惑星の離心率 : ~ 0.1 (~ 0.01 :ダンピング入り)
- ▶ 惑星の自転 : 方向 — ランダム
速度 — 超高速
- ▶ 衛星形成 : ありえそう

これまでにわかったこと

- ▶ タイムスケール : 10^7 - 10^8 年 延びる
- ▶ 惑星の個数 : 約 4 ± 1 個 ??
- ▶ 惑星の質量 : 中心 — 大
両端 — 小
- ▶ 惑星の離心率 : ~ 0.1 (~ 0.01 :ダンピング入り)
- ▶ 惑星の自転 : 方向 — ランダム
速度 — 超高速
- ▶ 衛星形成 : ありえそう

これまでにわかったこと

- ▶ タイムスケール : 10^7 - 10^8 年 延びる
- ▶ 惑星の個数 : 約 4 ± 1 個 ?? よく混ざりそう
- ▶ 惑星の質量 : 中心 — 大
両端 — 小
- ▶ 惑星の離心率 : ~ 0.1 (~ 0.01 :ダンピング入り)
- ▶ 惑星の自転 : 方向 — ランダム
速度 — 超高速
- ▶ 衛星形成 : ありえそう

これまでにわかったこと

- ▶ タイムスケール : 10^7 - 10^8 年 延びる
- ▶ 惑星の個数 : 約 4 ± 1 個 ?? よく混ざりそう
- ▶ 惑星の質量 : 中心 — 大 両端 — 小 少し均される
- ▶ 惑星の離心率 : ~ 0.1 (~ 0.01 :ダンピング入り)
- ▶ 惑星の自転 : 方向 — ランダム
速度 — 超高速
- ▶ 衛星形成 : ありえそう

これまでにわかったこと

- ▶ タイムスケール : 10^7 - 10^8 年 延びる
- ▶ 惑星の個数 : 約 4 ± 1 個 ?? よく混ざりそう
- ▶ 惑星の質量 : 中心 — 大 両端 — 小 少し均される
- ▶ 惑星の離心率 : ~ 0.1 (~ 0.01 :ダンビ) 増える?
- ▶ 惑星の自転 : 方向 — ランダム
速度 — 超高速
- ▶ 衛星形成 : ありえそう

これまでにわかったこと

- ▶ タイムスケール : 10^7 - 10^8 年 延びる
- ▶ 惑星の個数 : 約 4 ± 1 個 ?? よく混ざりそう
- ▶ 惑星の質量 : 中心 — 大 両端 — 小 少し均される
- ▶ 惑星の離心率 : ~ 0.1 (~ 0.01 :ダンビ) 増える?
- ▶ 惑星の自転 : 方向 — ランダム 変化なし
速度 — 超高速
- ▶ 衛星形成 : ありえそう

これまでにわかったこと

- ▶ タイムスケール : 10^7 - 10^8 年 延びる
- ▶ 惑星の個数 : 約 4 ± 1 個 ?? よく混ざりそう
- ▶ 惑星の質量 : 中心 — 大 両端 — 小 少し均される
- ▶ 惑星の離心率 : ~ 0.1 (~ 0.01 :ダンビ) 増える?
- ▶ 惑星の自転 : 方向 — ランダム 変化なし
速度 — 超高速 減少する
- ▶ 衛星形成 : ありえそう

これまでにわかったこと

- ▶ タイムスケール : 10^7 - 10^8 年 延びる
- ▶ 惑星の個数 : 約 4 ± 1 個 ?? よく混ざりそう
- ▶ 惑星の質量 : 中心 — 大 両端 — 小 少し均される
- ▶ 惑星の離心率 : ~ 0.1 (~ 0.01 :ダンビ) 増える?
- ▶ 惑星の自転 : 方向 — ランダム 変化なし
速度 — 超高速 減少する
- ▶ 衛星形成 : ありえそう 定量的に評価可能

先行研究

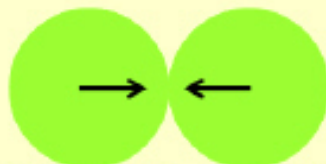
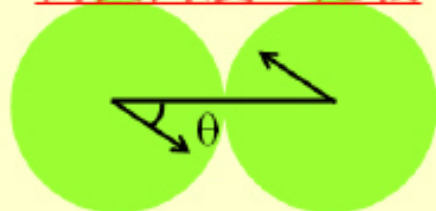
► Agnor & Asphaug (2004)

$1 M_{\text{mars}}$ の原始惑星同士の衝突計算。
40ランのSPH法の計算。各2万粒子。

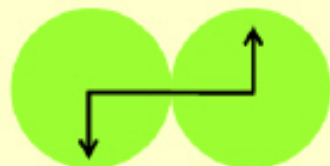
合体条件

衝突角度 30° : $V_{\text{imp}} \lesssim 1.4 V_{\text{esc}}$
45°と60°: $V_{\text{imp}} \lesssim 1.1 V_{\text{esc}}$

衝突角度の定義



正面衝突: $\theta = 0^\circ$



grazing: $\theta = 90^\circ$

研究目的

非完全合体の影響を調べる



全部入りの計算コードを開発する
(原始惑星の軌道計算+巨大天体衝突の流体計算)



軌道計算に巨大天体衝突の結果を組み込む



巨大天体衝突の結果を定式化する



様々な衝突条件で計算する



巨大天体衝突の計算コードを開発する



研究目的



非完全合体の影響を調べる

全部入りの計算コードを開発する
(原始惑星の軌道計算+巨大天体衝突の流体計算)

軌道計算に巨大天体衝突の結果を組み込む

巨大天体衝突の結果を定式化する

様々な衝突条件で計算する

巨大天体衝突の計算コードを開発する

研究目的

非完全合体の影響を調べる

全部入りの計算コードを開発する
(原始惑星の軌道計算+巨大天体衝突の流体計算)

軌道計算に巨大天体衝突の結果を組み込む

巨大天体衝突の結果を定式化する

様々な衝突条件で計算する

巨大天体衝突の計算コードを開発する



計算方法

SPH 法 (Smoothed Particle Hydrodynamics method)

- 運動方程式：圧力勾配(近傍61-64粒子)・重力加速度(全粒子)
- エネルギー方程式
- 状態方程式：Tillotson EOS (Tillotson 1962)

岩石(granite)と鉄(iron)のパラメータを使用

カーネル関数：修正スプライン関数 (Monaghan & Lattanzio 1985)

人工粘性：Monaghan & Gingold (1983) の人工粘性

時間発展：2次の予測子・修正子法

相互重力：micro-Grape6 を使用

micro-GRAPE



- ▶ 東工大に8台設置
- ▶ 123 Gflops
- ▶ 90万円
- ▶ 1ラン(2万粒子)の
CPU time : 6時間

井田研の荻原くん(M2)が昨日撮影してくれました

初期条件

▶ 7通りの質量比

1 : 1	1Mars - 1Mars	2Mars - 2Mars	5Mars - 5Mars
2 : 3	2Mars - 3Mars		
1 : 2	1Mars - 2Mars		
1 : 3	1Mars - 3Mars		
1 : 4	1Mars - 4Mars	2Mars - 8Mars	3Mars - 12Mars
1 : 6	1Mars - 6Mars		
1 : 9	1Mars - 9Mars	2Mars - 18Mars	0.5Mars - 4.5Mars

Agnor & Asphaug (2004)

▶ 6通りの衝突角度 0° , 15° , 30° , 45° , 60° , 75°

▶ 衝突速度: 1~3倍の V_{esc} (脱出速度)

基本: $0.2V_{\text{esc}}$ 刻み

合体境界付近: $0.02V_{\text{esc}}$ 刻み

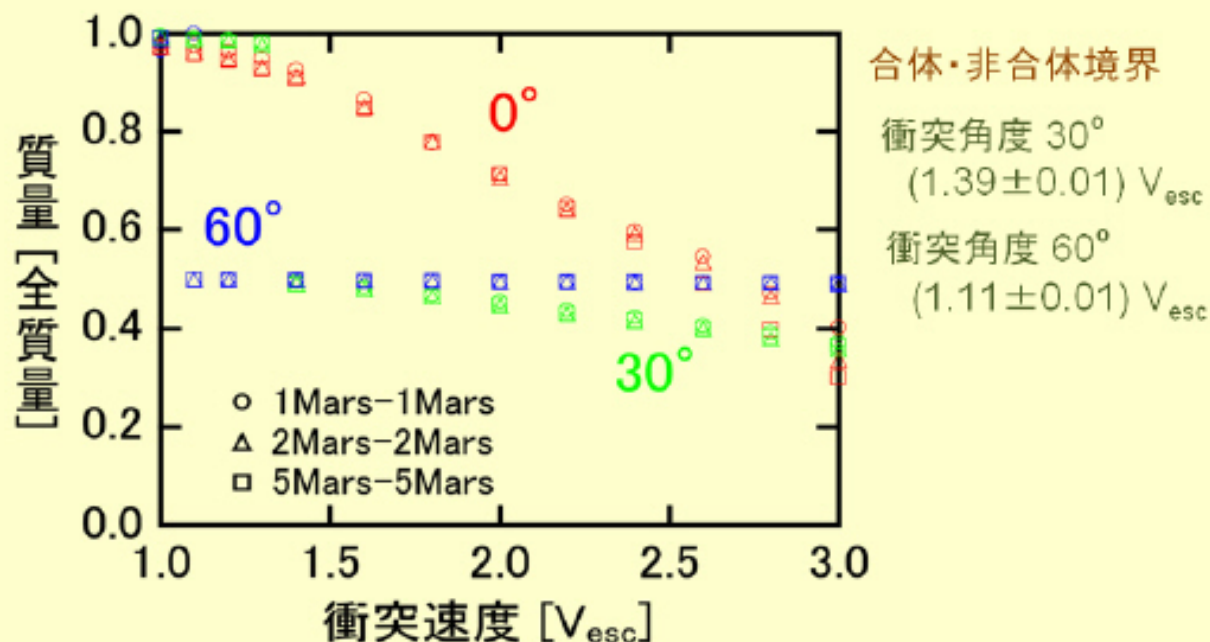
▶ SPH粒子数: 基本2万粒子、いくつか6万粒子と10万粒子

▶ 計算時間: 10^5 [s] ~ 28 [h]

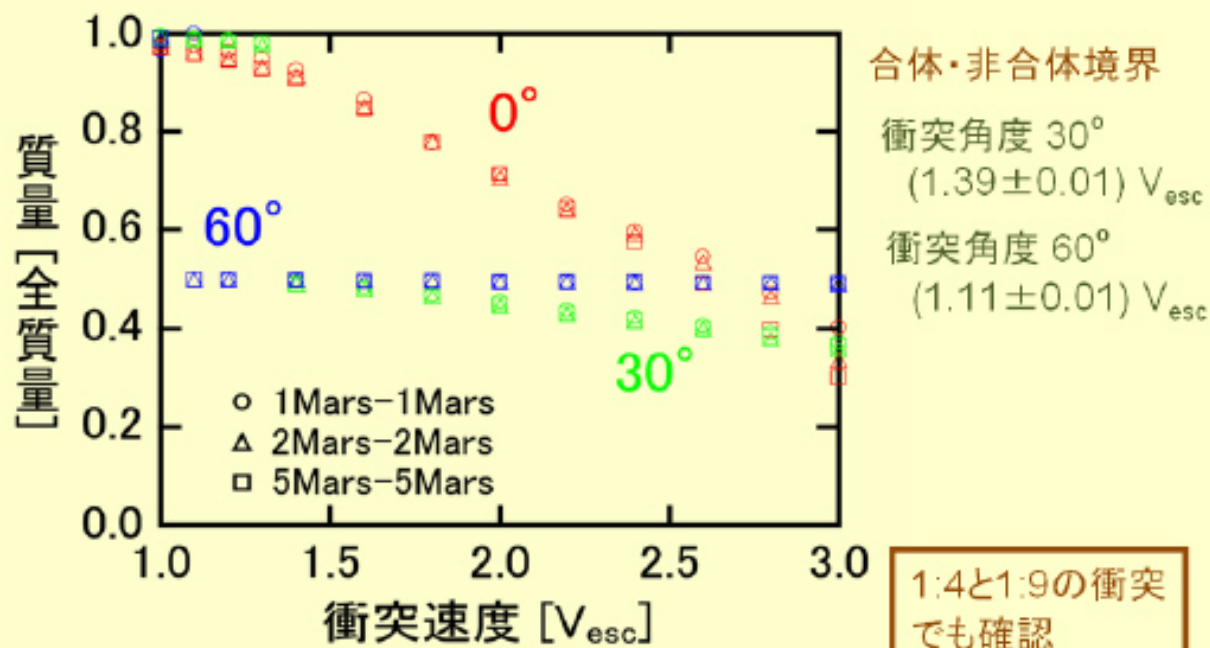
▶ 金属鉄のコア: 一律 30wt%

合計約1200ラン

計算結果 (質量比が同じ場合)

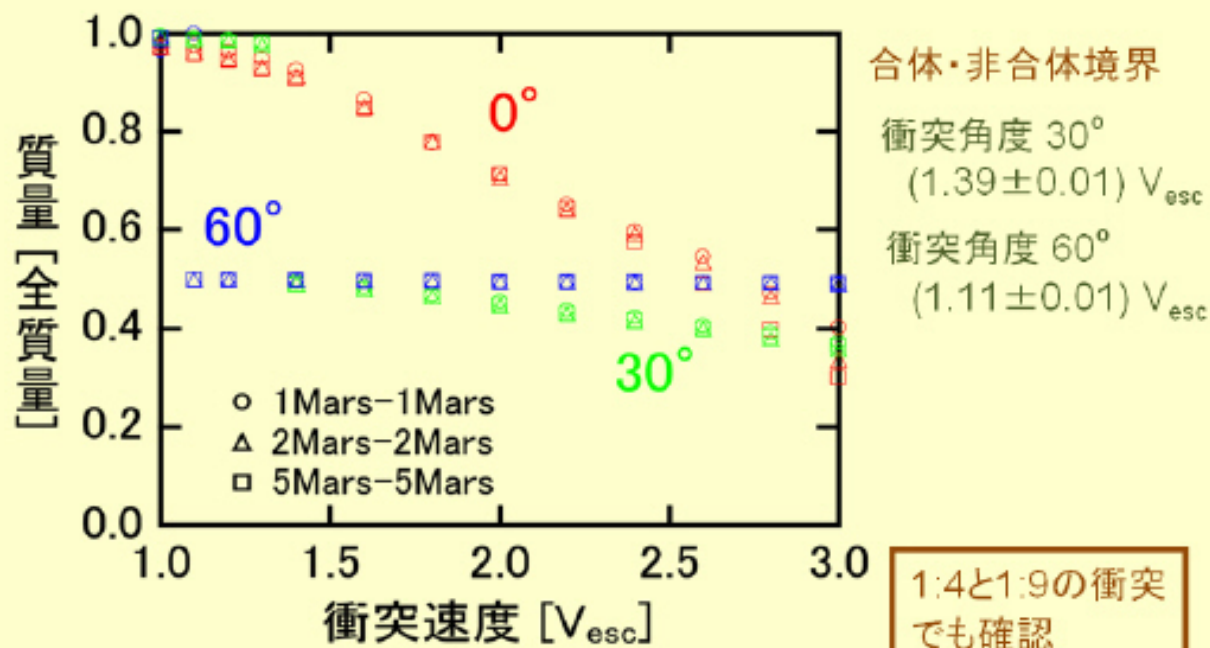


計算結果(質量比が同じ場合)



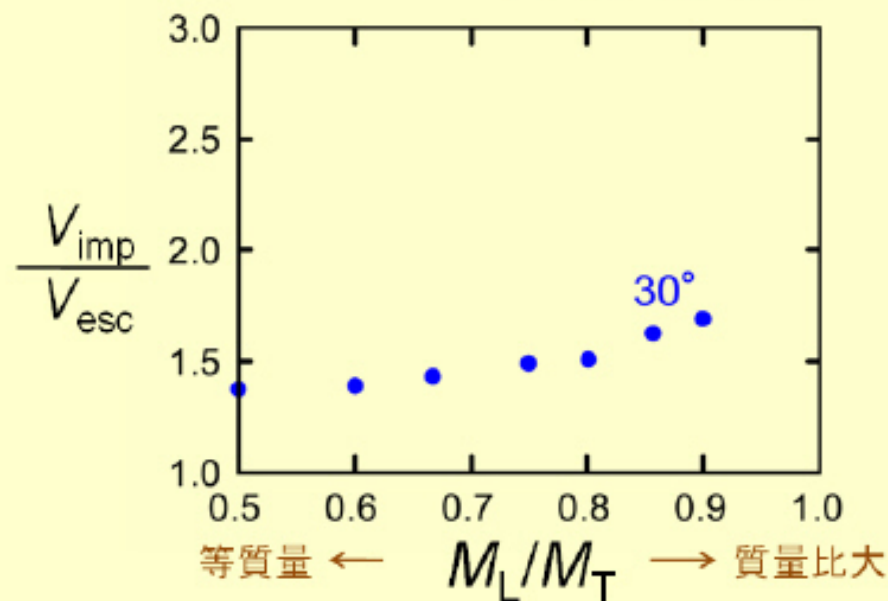
質量比が同じならば、ほぼ同じ結果になる

計算結果(質量比が同じ場合)



質量比が同じならば、ほぼ同じ結果になる

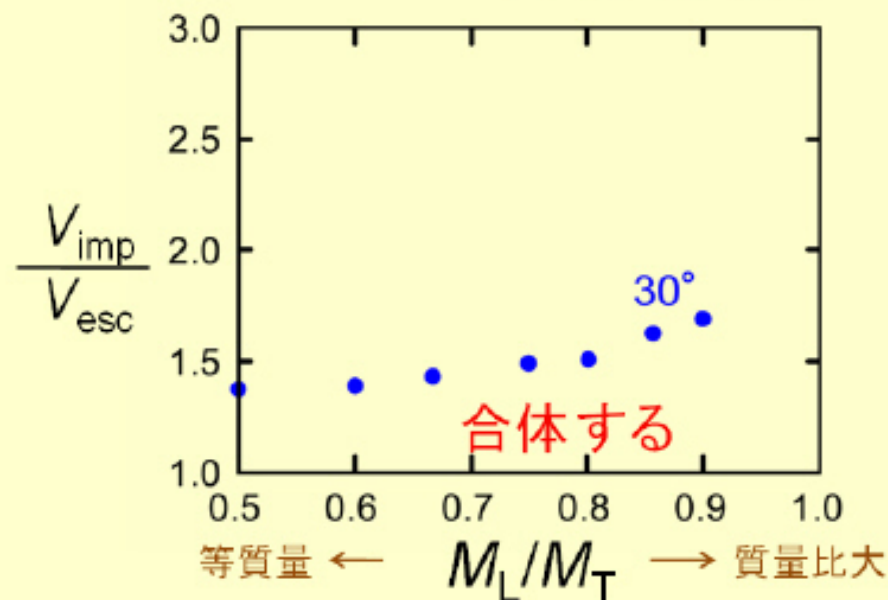
合体条件



質量比が大きい
→ 合体しやすい

衝突角度が浅い
→ 合体しやすい

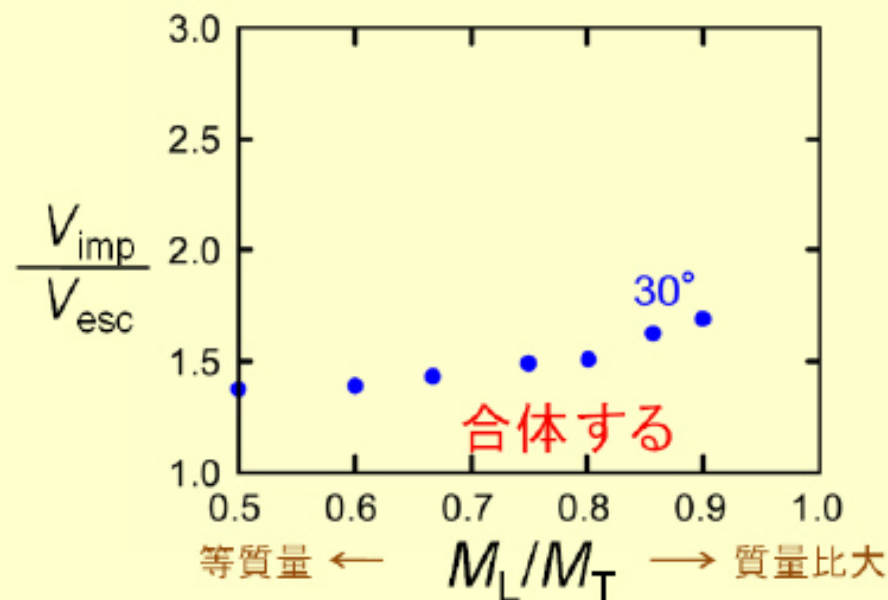
合体条件



質量比が大きい
→ 合体しやすい

衝突角度が浅い
→ 合体しやすい

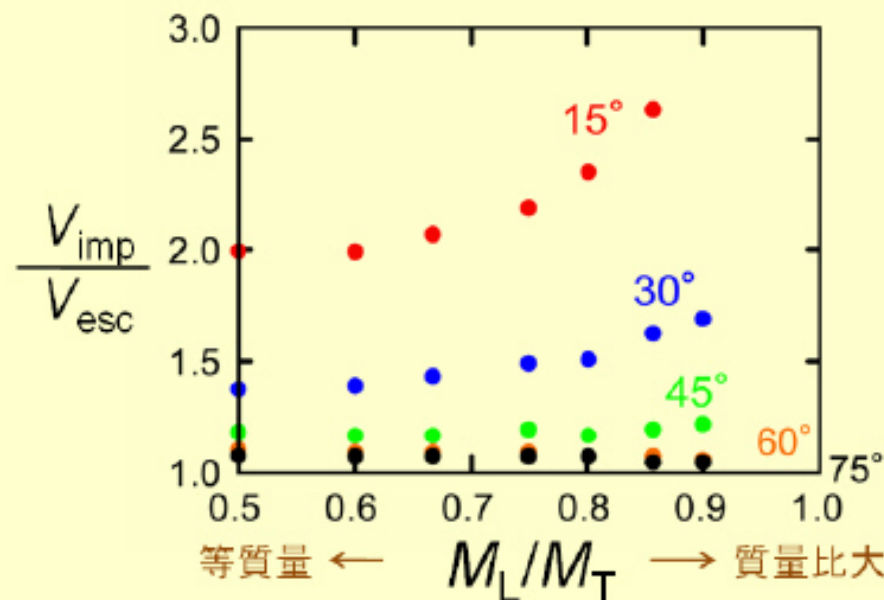
合体条件



質量比が大きい
→ 合体しやすい

衝突角度が浅い
→ 合体しやすい

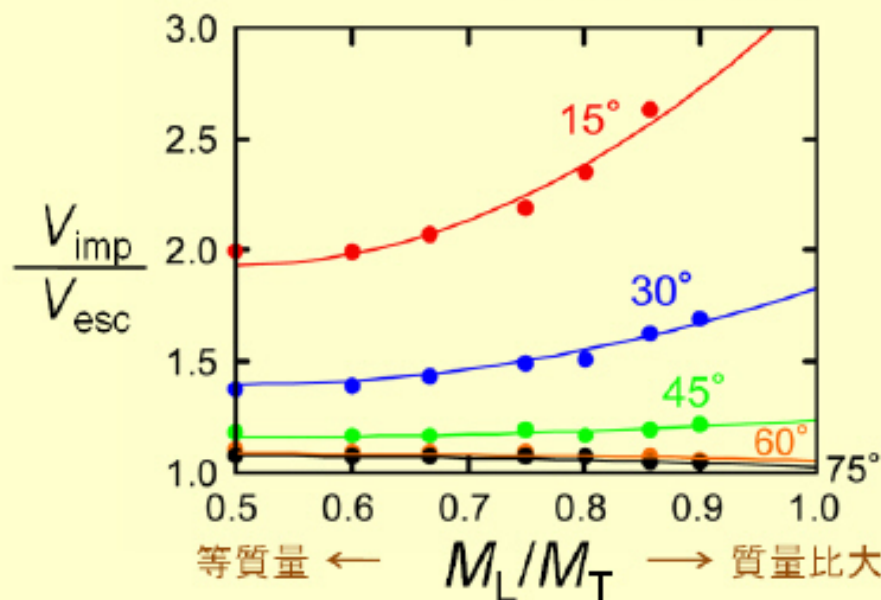
合体条件



質量比が大きい
→ 合体しやすい

衝突角度が浅い
→ 合体しやすい

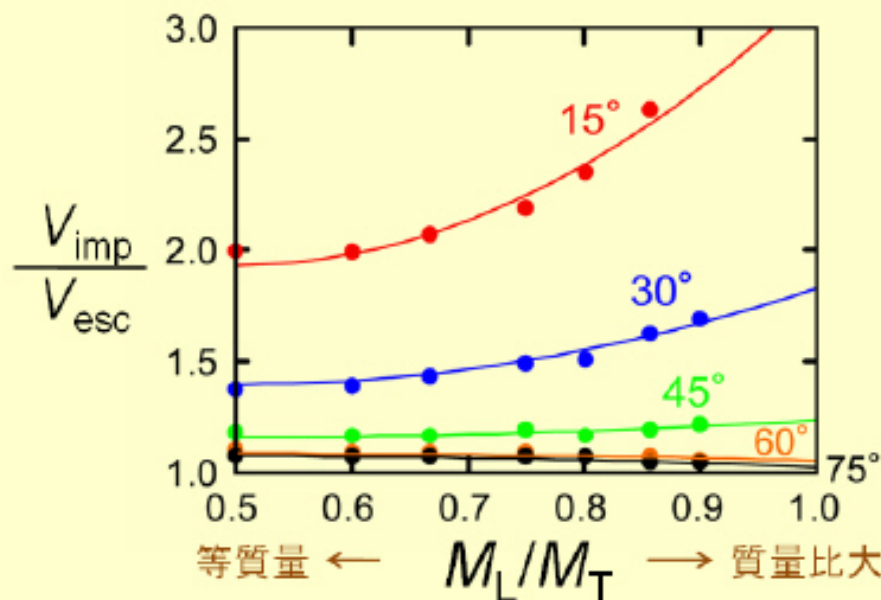
合体条件



質量比が大きい
→ 合体しやすい

衝突角度が浅い
→ 合体しやすい

合体条件



質量比が大きい
→ 合体しやすい

衝突角度が浅い
→ 合体しやすい

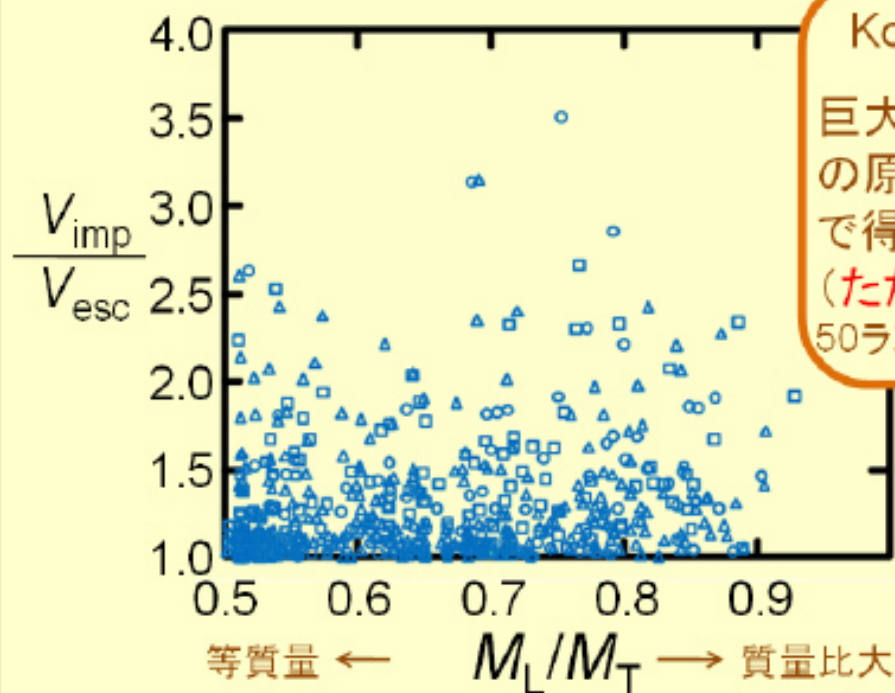
$$\Gamma = (M_L/M_T)^2$$

$$\Theta = (\sin \theta - 1)^{2.5}$$

$$(V_{\text{imp}}/V_{\text{esc}})_{\text{境界}} = a \Gamma \Theta + b \Gamma + c \Theta + d$$

$$\begin{cases} a = 11.0 \\ b = -0.203 \\ c = 1.82 \\ d = 1.08 \end{cases}$$

合体の確率



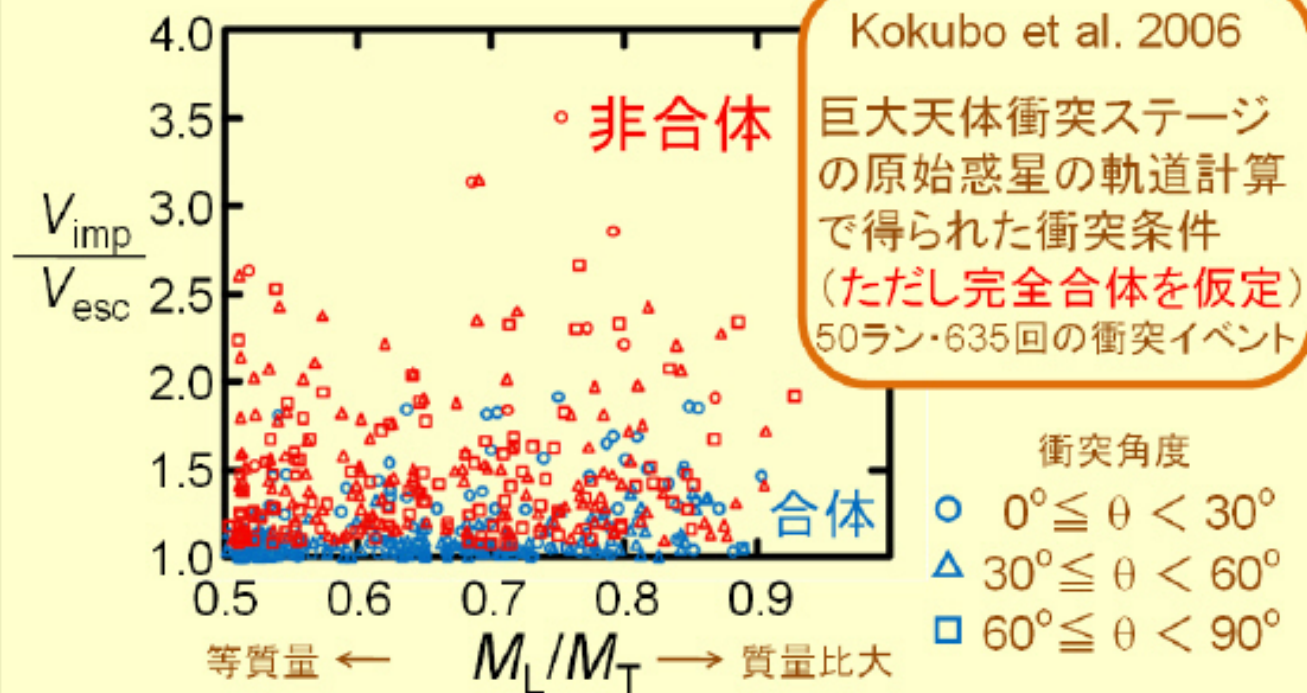
Kokubo et al. 2006

巨大天体衝突ステージ
の原始惑星の軌道計算
で得られた衝突条件
(ただし完全合体を仮定)
50ラン・635回の衝突イベント

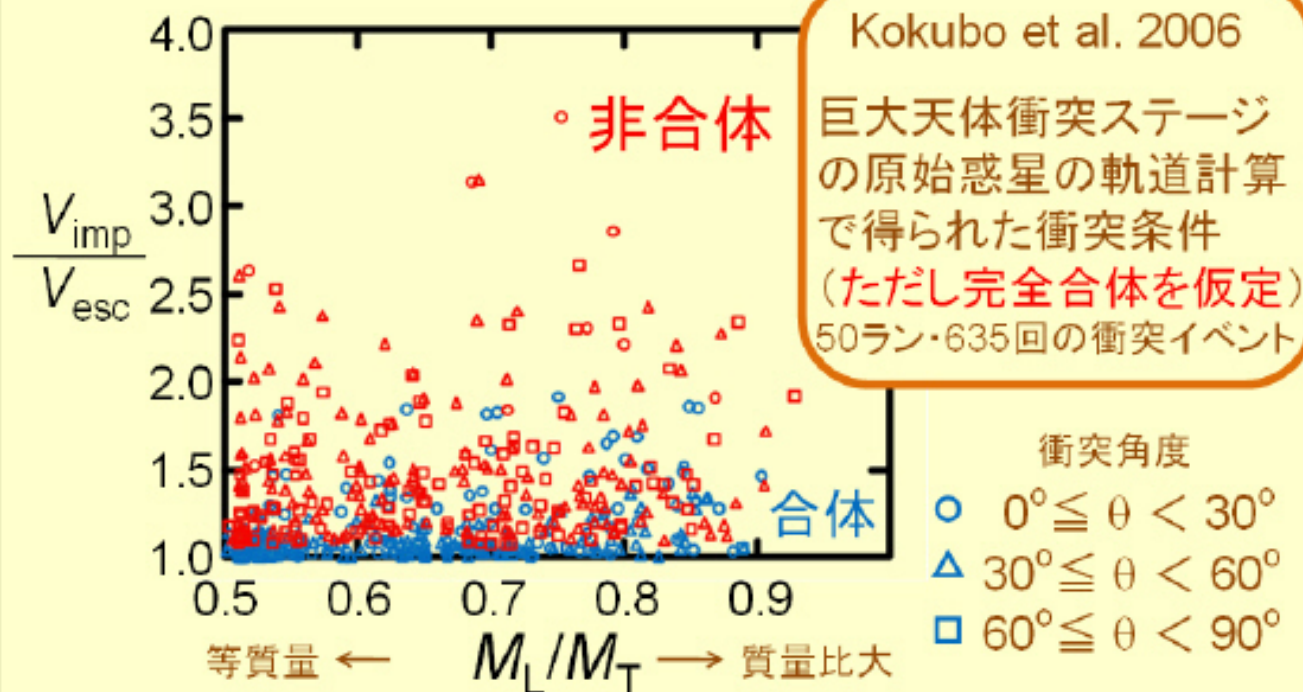
衝突角度

- $0^\circ \leq \theta < 30^\circ$
- △ $30^\circ \leq \theta < 60^\circ$
- $60^\circ \leq \theta < 90^\circ$

合体の確率



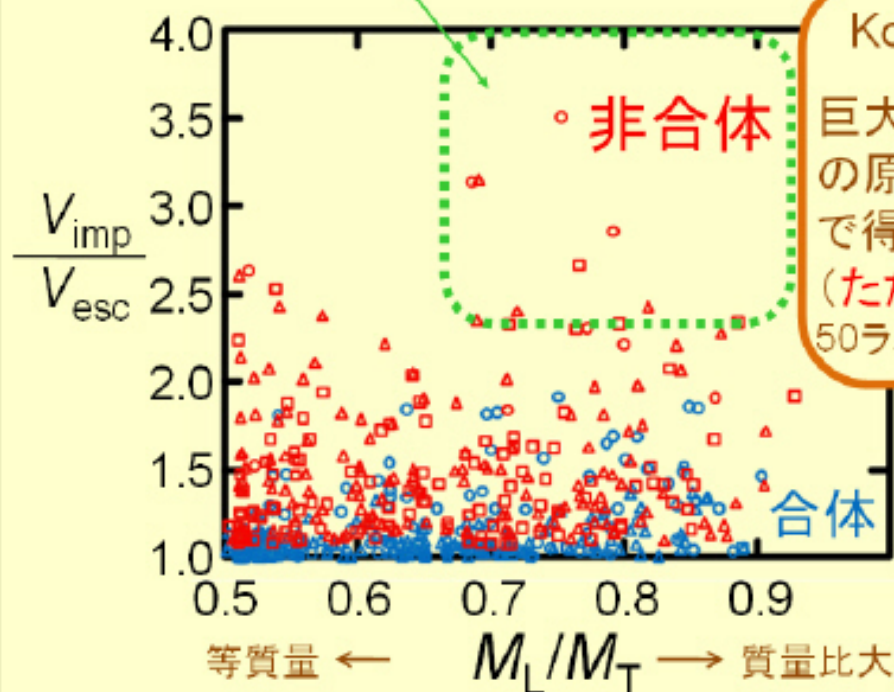
合体の確率



約41%の衝突イベントが、非合体

合体の確率

金属コアの
割合が上昇



Kokubo et al. 2006

巨大天体衝突ステージ
の原始惑星の軌道計算
で得られた衝突条件
(ただし完全合体を仮定)
50ラン・635回の衝突イベント

衝突角度

- $0^\circ \leq \theta < 30^\circ$
- △ $30^\circ \leq \theta < 60^\circ$
- $60^\circ \leq \theta < 90^\circ$

約41%の衝突イベントが、非合体

まとめ

- ▶ 衝突条件を様々に変えて(1000通り以上) 原始惑星の衝突をSPH法でシミュレーションした。
- ▶ 原始惑星の衝突合体条件を定式化した。
- ▶ 巨大天体衝突ステージで起こる 約41%の衝突イベントは合体しない。

今後

- ▶ 合体条件を用いて、巨大天体衝突ステージにおける原始惑星の軌道進化を追う。
- ▶ 衝突前後の自転、コア・マントル比などの解析。

