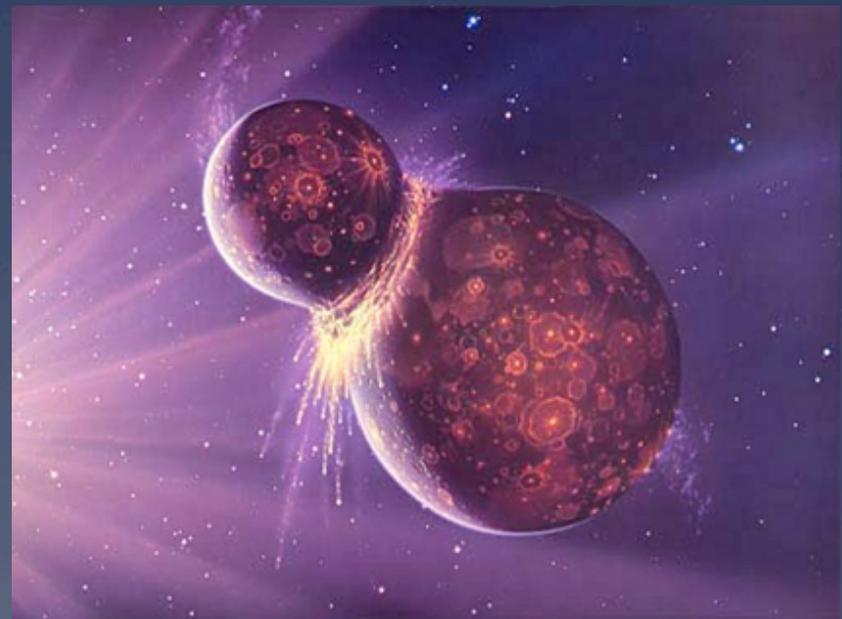


# 衝突勉強会

*「How common are Earth-planetary systems?」*

東大 柏  
杉田研究室 修士2年  
笹森 務仁



(提供: NASA/JPL-Caltech)

# 月の役割

- 地球の自転軸を安定化させる働き



地球の自転軸の傾きの変動は $1.3^{\circ}$ 程度

大きな衛星を持たない火星は自転軸が最大で $10^{\circ}$ も変化する



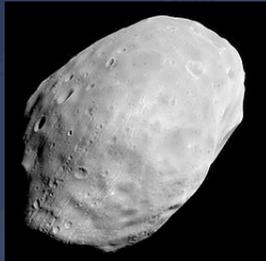
大きな衛星なしでは突発的な気候変動を起こす

# 月の特異性

月は太陽系の中でも、惑星に比べて大きな衛星である



「月」という衛星はレアなのか？



月 (地球)

フォボス (火星)

ガニメデ (木星)

タイタン (土星)

タイタニア (天王星)

トリトン (海王星)

$2.7 \times 10^{-1}$

$6.5 \times 10^{-3}$

$3.7 \times 10^{-2}$

$4.4 \times 10^{-2}$

$3.1 \times 10^{-2}$

$5.5 \times 10^{-2}$

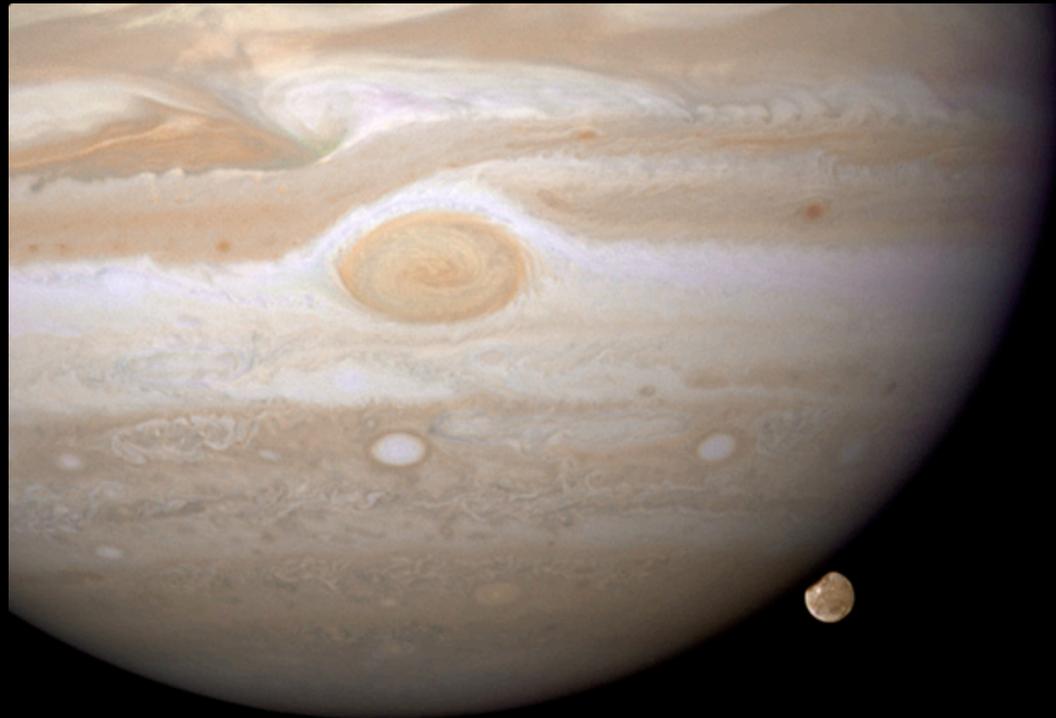
直径の比較



衛星の直径/惑星の直径

# 月の特異性

## ガニメデと木星の比較



## 目的

# 月のような大きな衛星を持つ確率を計算する

衛星の形成において、いくつかの制約を与える

- [1] 衝突パラメーター
- [2] 惑星の潮汐進化 – rotation period
- [3] 惑星の潮汐進化 – 反転軌道
- [4] 衝突 history

# 先行研究

[Morishima et al., 2010]

月-地球系をつくるようなジャイアントインパクトは、どのくらい起こりえるのか？

- ◆ 0.5～4AU区間に2,000個の微惑星を配置。
- ◆ solar nebula と惑星の相互作用、木星・土星からの影響、中心星からの距離における微惑星の個数分布を与える。



64simulation で100回近く起こる

[Morishima et al., 2010] との違い

1. 潮汐進化を考慮
2. 最後のジャイアントインパクト以外の衝突による月形成も考慮

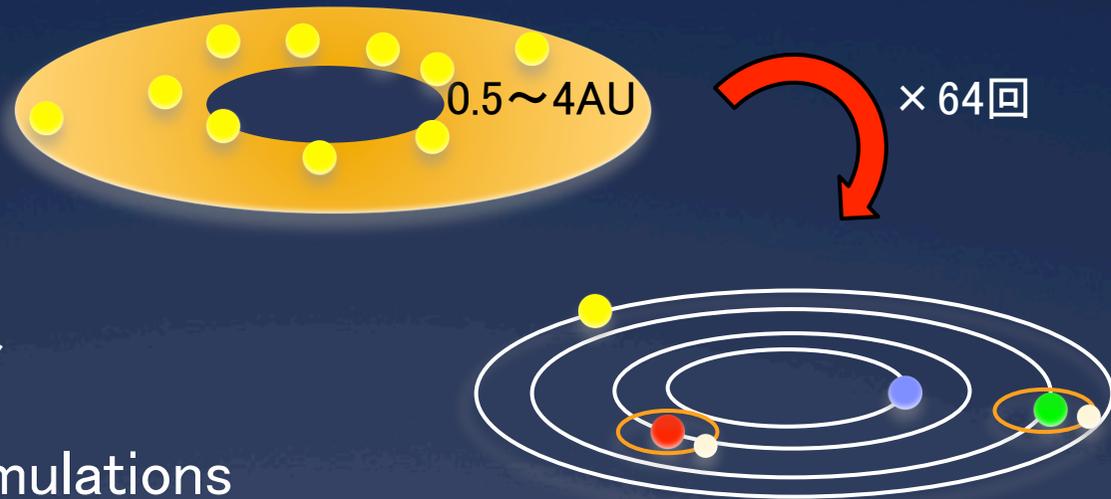
系外惑星まで拡張し、潮汐進化を含めたより現実的なモデルを作成

# 計算内容

N体計算

シンプレクティック積分

64 simulations



- ◆ 0.5~4AU区間に2,000個の微惑星を配置。
- ◆ solar nebula と惑星の相互作用、木星・土星からの影響、中心星からの距離における微惑星の個数分布を与える。

based on [Morishima et al., 2010]

## 初期パラメータ

- ◆ 微惑星の初期質量の合計は 5 or 10 地球質量
- ◆ 微惑星の数密度  $\Sigma$  とガス密度は中心星からの半径に依存:  $\Sigma \propto r^{-p}$  ( $p=1$  or  $2$ )
- ◆ ガス円盤は時間とともに指数的に散逸 (ガス散逸時間  $\tau_{\text{gas}}=1,2,3$  or  $5$  Myr)

# 計算内容2

個々の衝突においては……

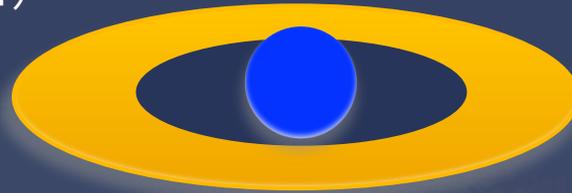


$$\frac{m_{\text{disk}}}{m_{\text{tot}}} \sim C_{\gamma} \left( \frac{m_{\text{pass}}}{m_{\text{tot}}} \right)^2 \quad (1)$$

[This study]

impact parameter

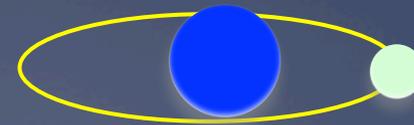
$(b, m_i, m_t)$



$(m_s, m_p)$

$$M_S \approx 1.9L_d / \sqrt{GM_{\oplus} a_R} - 1.1(M_d) - 1.9M_{\text{esc}}$$

[Canup, 2008]



## 目的

月のような大きな衛星を持つ確率を計算する

衛星の形成において、いくつかの制約を与える

[1] 衝突パラメーター

[2] 惑星の潮汐進化 – rotation period

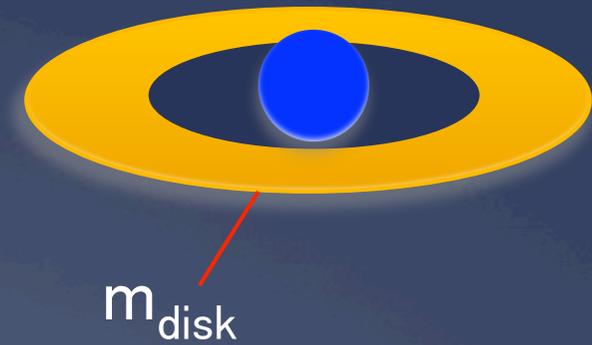
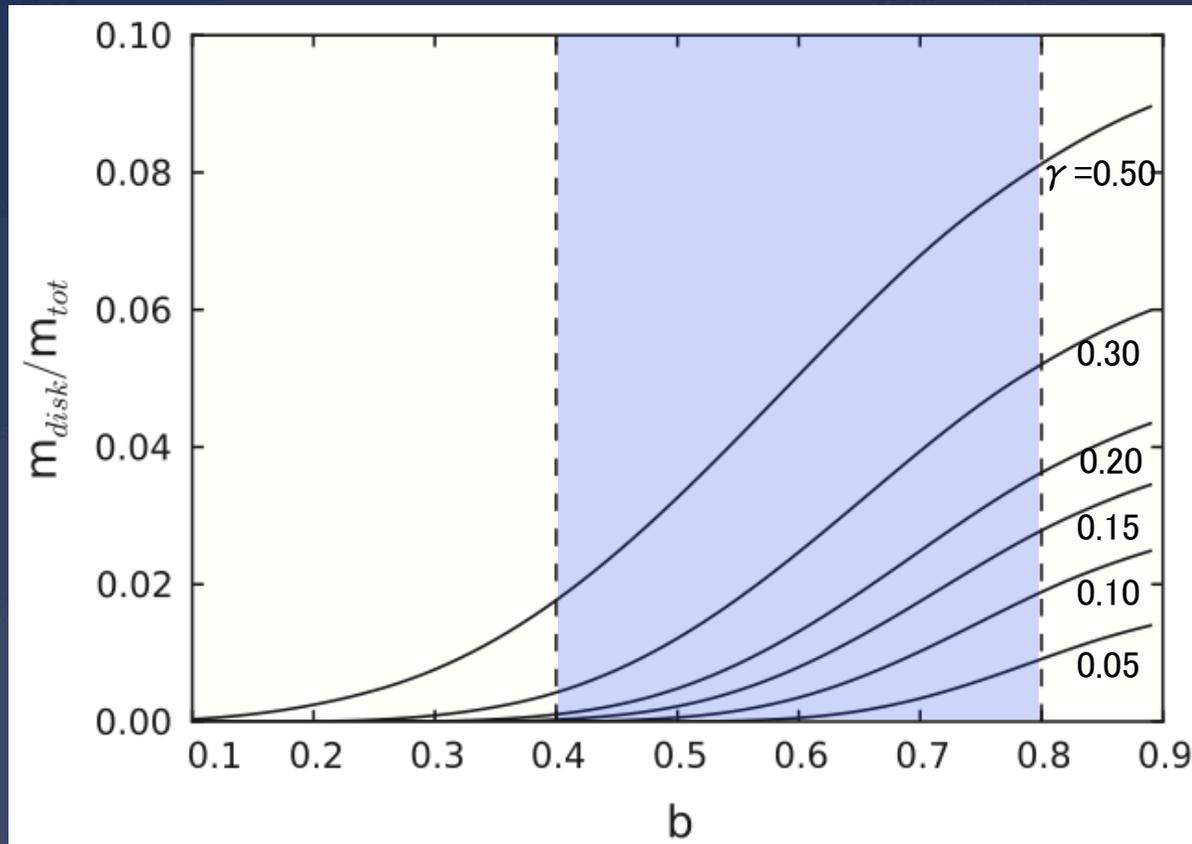
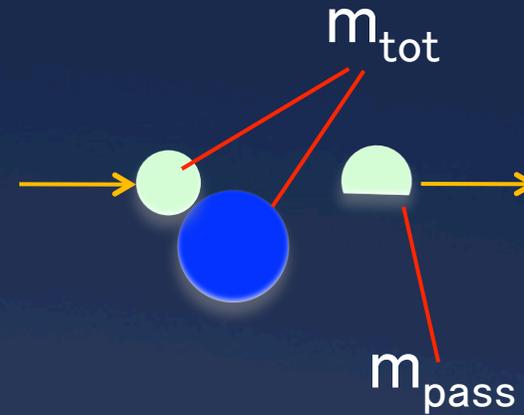
[3] 惑星の潮汐進化 – 反転軌道

[4] 衝突 history

# [1] 衝突パラメーター

$\gamma$  = 質量比  
= Impactor / target

$$\frac{m_{\text{disk}}}{m_{\text{tot}}} \sim C_{\gamma} \left( \frac{m_{\text{pass}}}{m_{\text{tot}}} \right)^2 \quad (1)$$

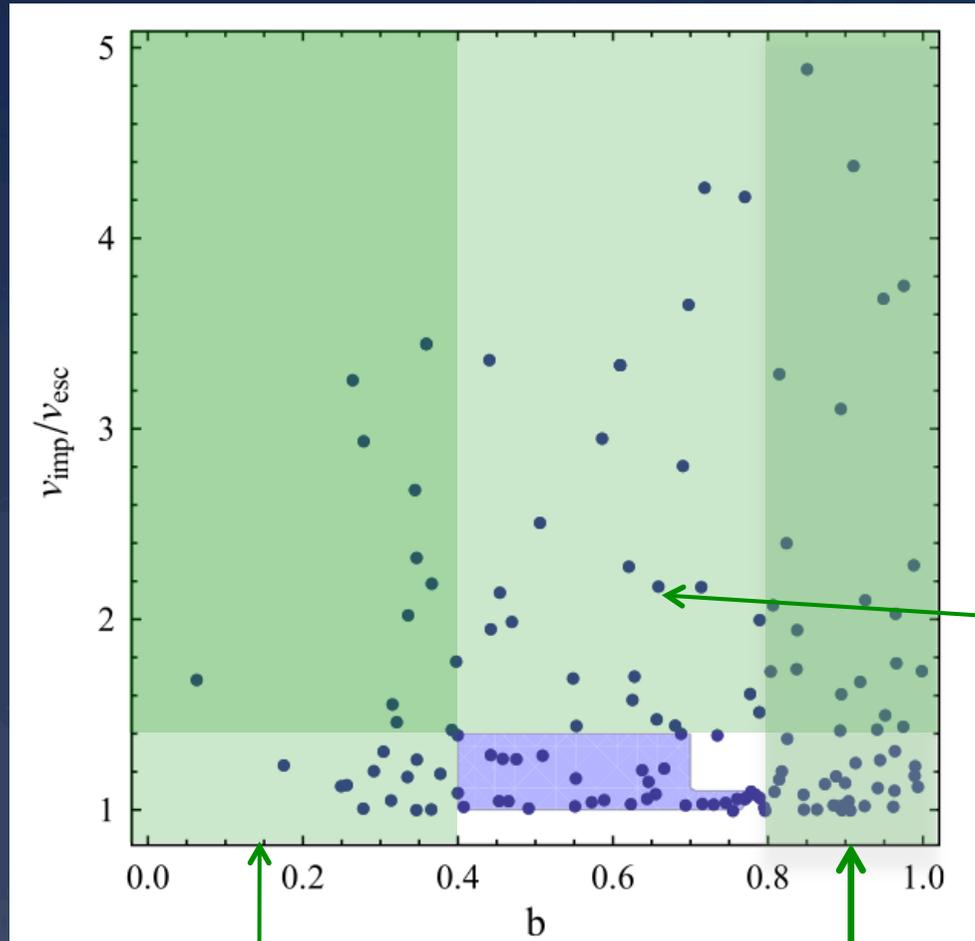


$b$ が小さいほどディスクも小さくなる。

Fig. 2

衛星質量の上限を表す

# [1] 衝突パラメーター



青は月形成のための下限値  
(この枠内に収まっていないとダメ)

$$\frac{m_{\text{disk}}}{m_{\text{tot}}} \sim C_{\gamma} \left( \frac{m_{\text{pass}}}{m_{\text{tot}}} \right)^2 \quad (1)$$

高速で衝突すると十分な物質が軌道上に残らない  
[Canup, 2004, 2008]

(1) 式をfactor2以内で満たすような  
範囲を考えると左グラフの青ゾーンと  
なる

$$(0.4 < b < 0.8), (v < 1.4)$$

正面衝突に近いので月形成軌道上にあまり物質が残らない

角度があるので衝突はかすめる形になる

Fig.6

## 目的

月のような大きな衛星を持つ確率を計算する

衛星の形成において、いくつかの制約を与える

- [1] 衝突パラメーター
- [2] 惑星の潮汐進化 – rotation period
- [3] 惑星の潮汐進化 – 反転軌道
- [4] 衝突 history

## [2] 潮汐進化 — rotation period

潮汐進化とは？

天体の重心に働く重力と各部分に働く重力が食い違うことにより、天体の形状が歪むことを潮汐と言い、変形摩擦によるエネルギー散逸や歪みによるトルクで相手天体との角運動量輸送が起こる。これを潮汐進化と言う。

衛星が安定的に存在するためには、衛星の軌道長半径が重要

巨大衛星ができるための  
ジャイアントインパクト直後の惑星の軌道長半径はどのくらいか？

# 同期半径

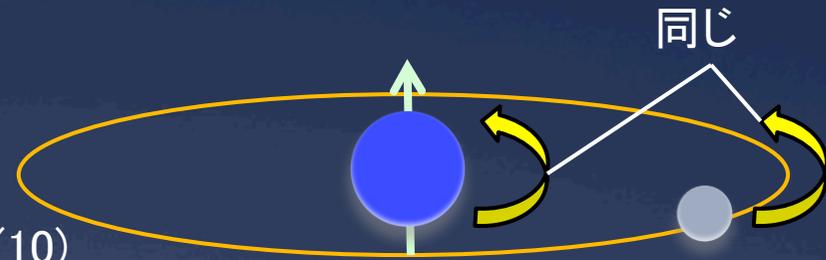
主星の重力によって落ちずに近づく限界の半径

重力 = 遠心力



同期半径

$$r_{\text{sync}} = (Gm_p)^{\frac{1}{3}} \omega_p^{-\frac{2}{3}} \quad (10)$$



ex) 静止人工衛星

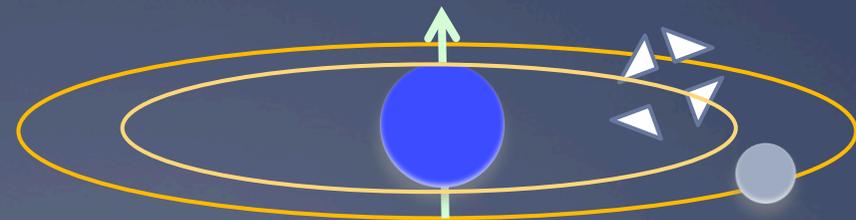
# ロッシュ半径

潮汐によって破壊されずに主星に近づく限界の半径

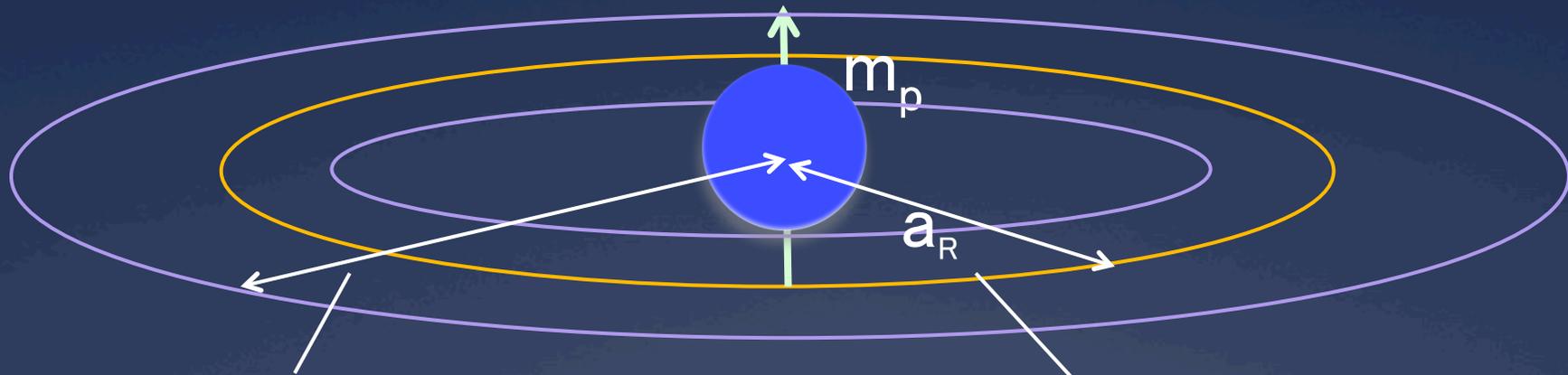
$$a_R = r_s \left( \frac{3m_p}{m_s} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (7)$$

$$a_R = \left( \frac{3}{2} \right)^{\frac{2}{3}} \left( \frac{m_p}{\pi \rho_p} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (8)$$

惑星と衛星が  
同じ密度と仮定  
すると



## [2] 潮汐進化 — rotation period



$\omega$  が小さいときの  $r_{\text{sync}}$

ロッシュ半径

$r_{\text{sync}} = a_R$  となるときが  $\omega$  の最大値

$$a_R = \left(\frac{3}{2}\right)^{\frac{2}{3}} \left(\frac{m_p}{\pi\rho_p}\right)^{\frac{1}{3}} \quad (8)$$

$\omega = 0.00043 \text{ /s}$



自転周期 = 4.05 h/day

$\omega$  ↑ 小  
 ↓ 大  
 $r$  ↑ 大  
 ↓ 小

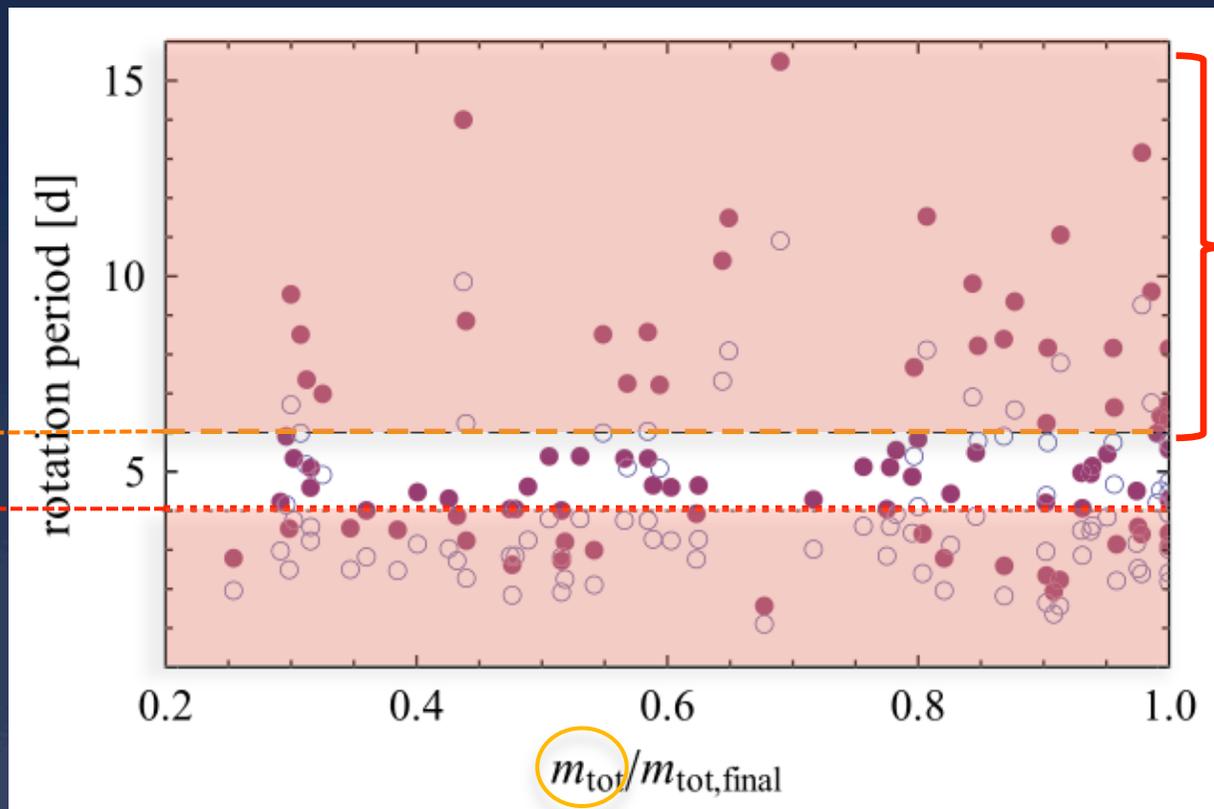
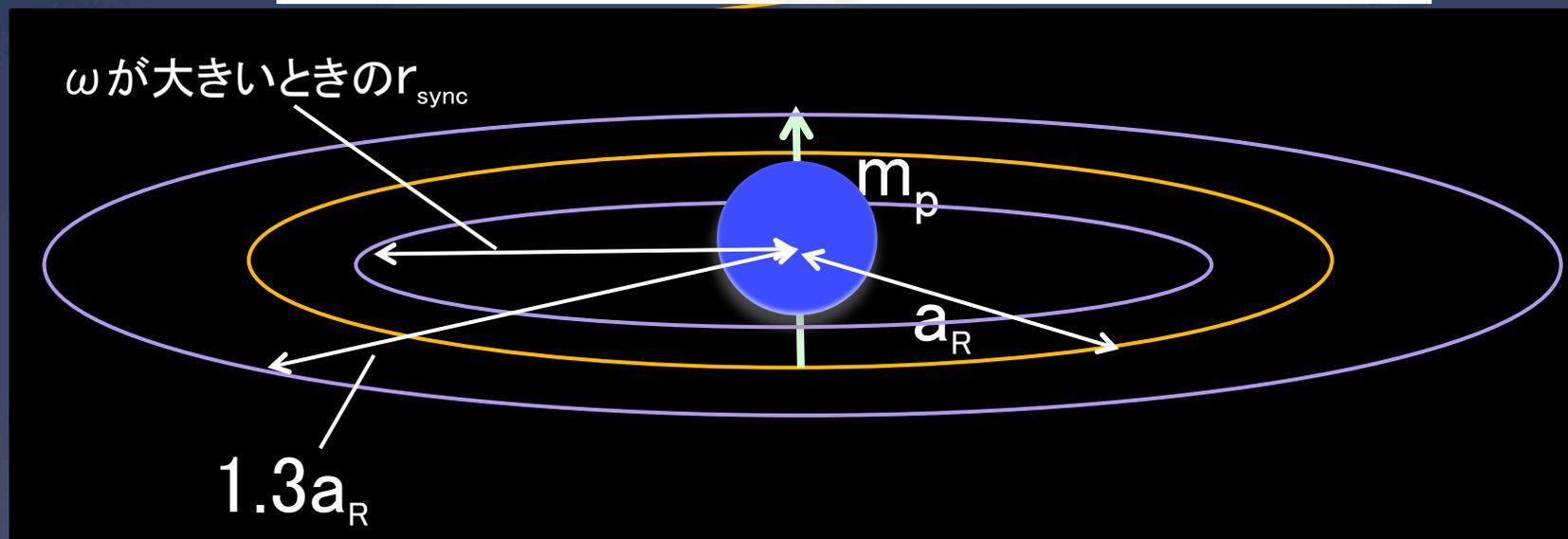


Fig.3



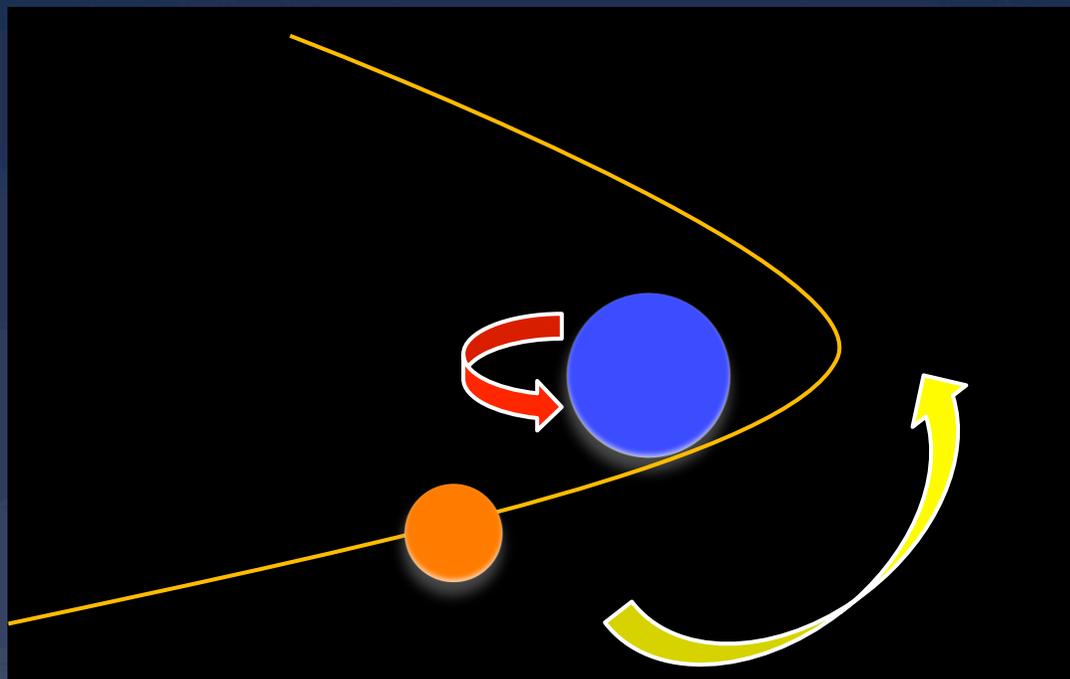
## 目的

月のような大きな衛星を持つ確率を計算する

衛星の形成において、いくつかの制約を与える

- [1] 衝突パラメーター
- [2] 惑星の潮汐進化 – rotation period
- [3] 惑星の潮汐進化 – 反転軌道
- [4] 衝突 history

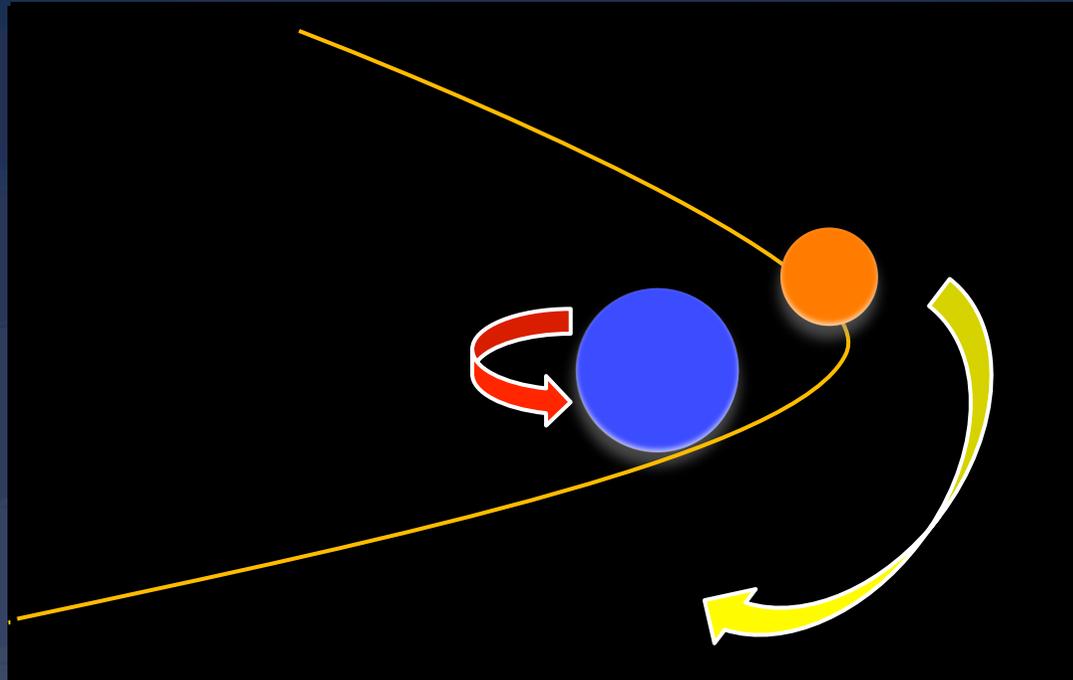
### [3] 潮汐進化 — 逆回転



その後の惑星の自転方向とディスクの回転方向

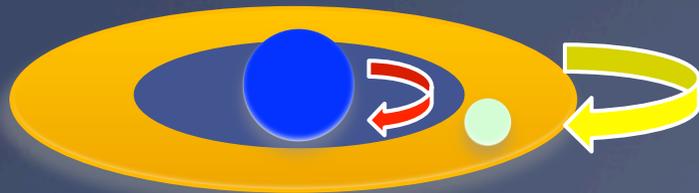


### [3] 潮汐進化 — 逆回転

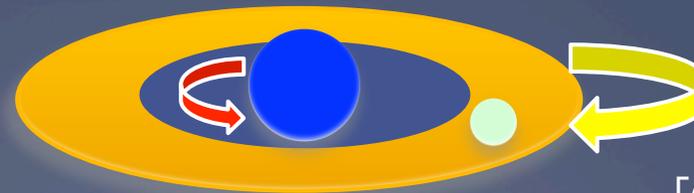


衝突したときの角運動量が

大きいとき

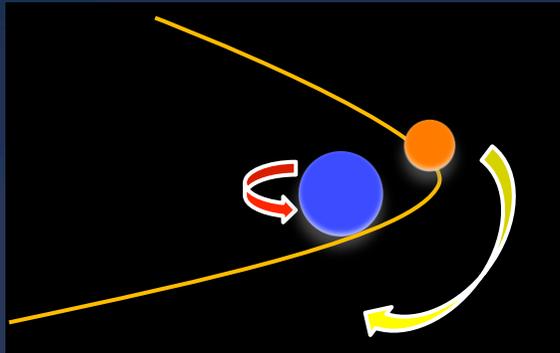


小さいとき

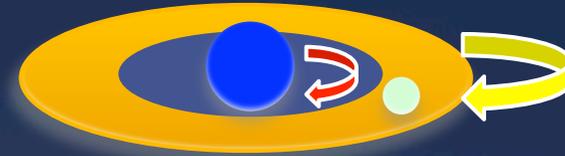


[Canup, 2008]

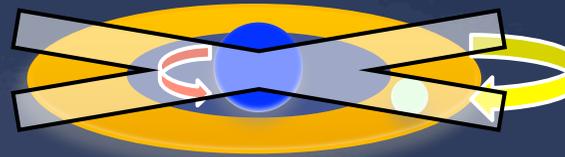
### [3] 潮汐進化 — 逆回転



衛星の角運動量 大



衛星の角運動量 小



潮汐が過剰に働いてしまい、結果としてこの状態では長く持たない

ディスクの回転方向が逆行しない  
衝突天体の角運動量の条件は？

$$L_{\text{orbit}} = m_s (Gm_p)^{\frac{1}{2}} \left( \frac{3}{2\pi} \frac{1}{\rho_p} m_p \right)^{\frac{1}{6}} \quad (17) > L$$

(ロッシュ半径を代入)

## 目的

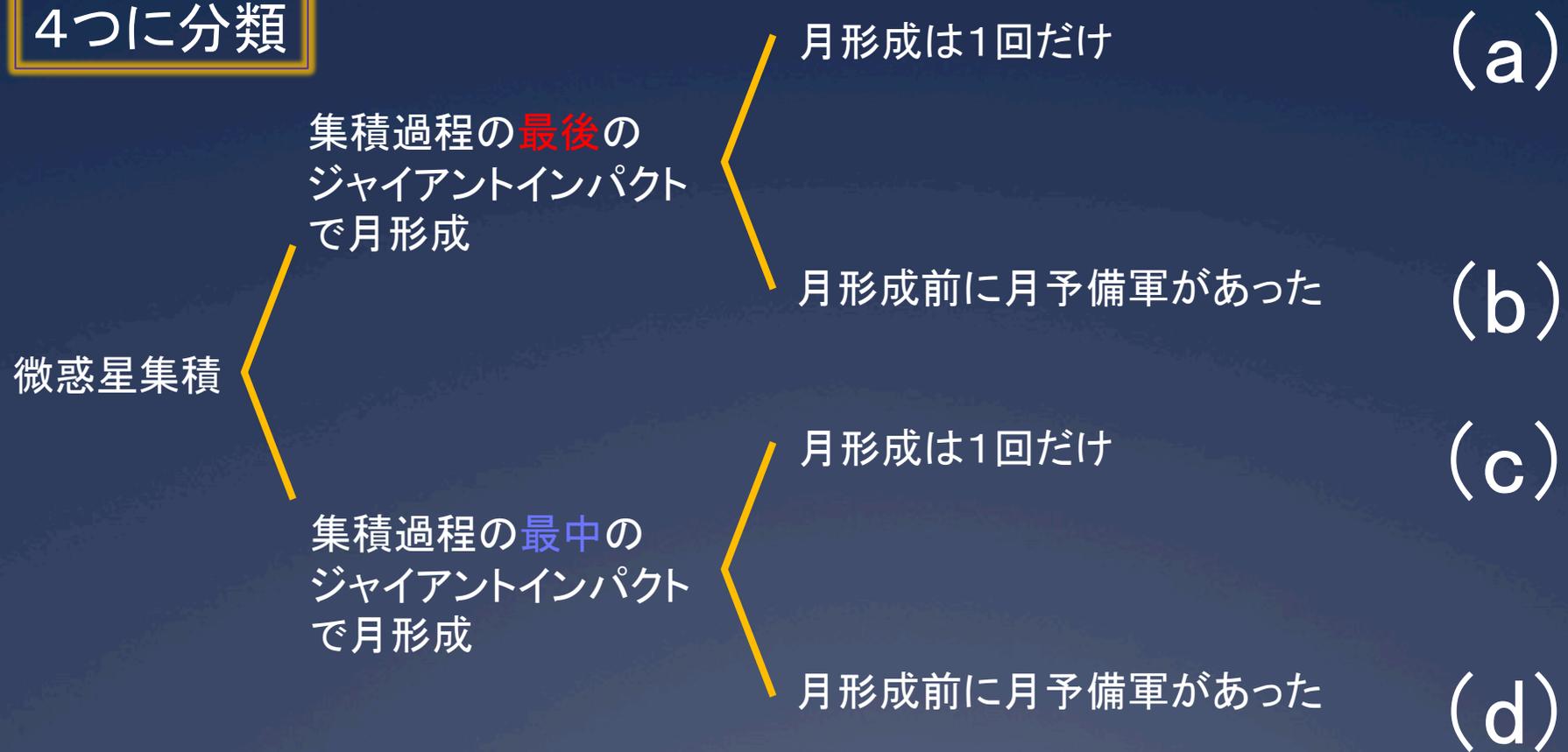
# 月のような大きな衛星を持つ確率を計算する

衛星の形成において、いくつかの制約を与える

- [1] 衝突パラメーター
- [2] 惑星の潮汐進化 – rotation period
- [3] 惑星の潮汐進化 – 反転軌道
- [4] 衝突 history

## [4] 衝突 history

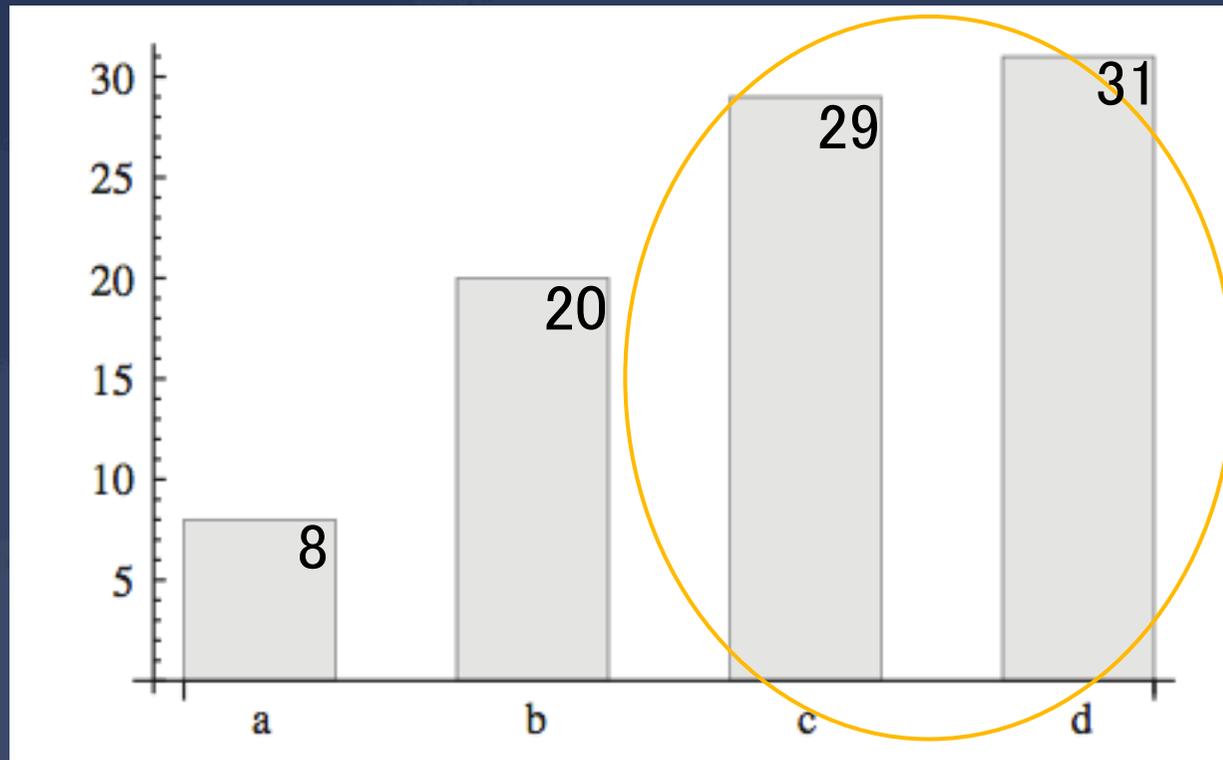
### 4つに分類



## [4] 衝突 history

月形成を起こすような衝突物体の質量  $> 5m_{\text{planetesimal}}$

cとdは全衛星の2/3を占める数



全計算で衛星ができた総数 88



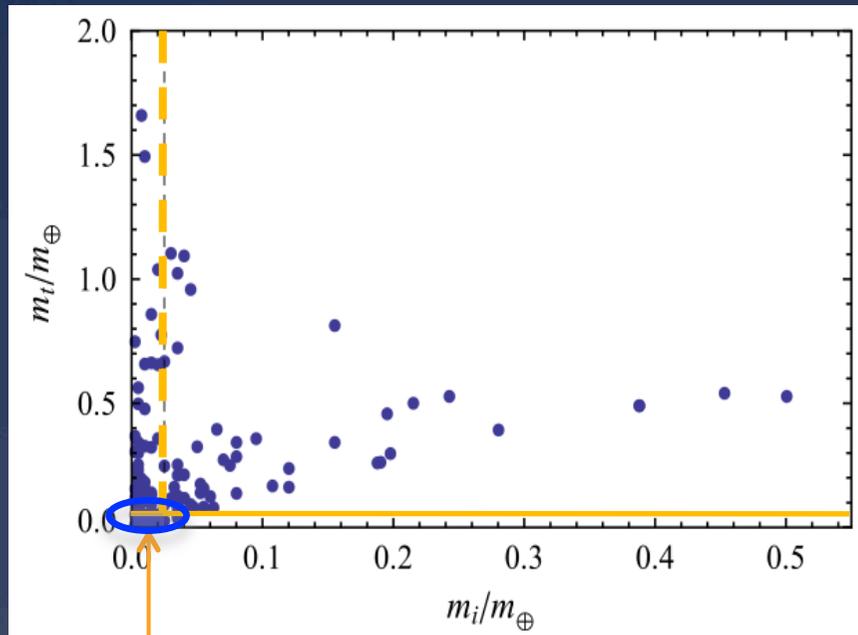
4つにグループ分け

Fig.4

## [4] 衝突 history

質量の小さなもの同士の衝突の扱い

あまりに小さい質量の衝突までも計算に含めると、**計算精度の低下**を招く



0.0025

そこで、

$m_i, m_t < 0.0025$ 地球質量の衝突を排除



衛星全体の数は減るが、大きな質量を持った衛星の数が増える

Fig.5

※ 実際の衛星の数を過小評価するほどの影響は無い

# 不確定性1

## [衛星質量 - ディスク質量]

$$\frac{m_{\text{disk}}}{m_{\text{tot}}} \sim C_{\gamma} \left( \frac{m_{\text{pass}}}{m_{\text{tot}}} \right)^2 \quad (1)$$

$$\left. \begin{array}{l} 1 < v_{\text{imp}}/v_{\text{esc}} < 1.1 \\ 1 < v_{\text{imp}}/v_{\text{esc}} < 1.4 \end{array} \right\}$$

2倍程度の差



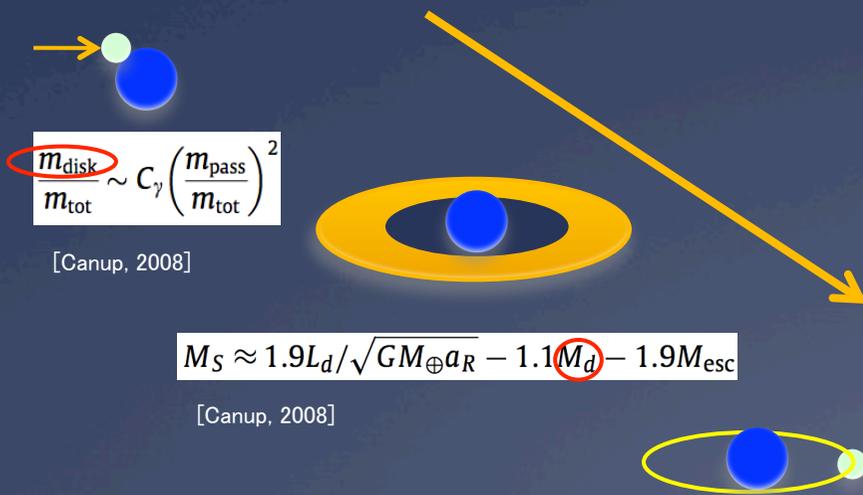
[速度の情報が無い]

砕け方に違いが出るはず



不確定性 0.5-2

## [衛星質量 - 集積効率]



$$\frac{m_{\text{disk}}}{m_{\text{tot}}} \sim C_{\gamma} \left( \frac{m_{\text{pass}}}{m_{\text{tot}}} \right)^2$$

[Canup, 2008]

$$M_S \approx 1.9L_d / \sqrt{GM_{\oplus} a_R} - 1.1M_d - 1.9M_{\text{esc}}$$

[Canup, 2008]

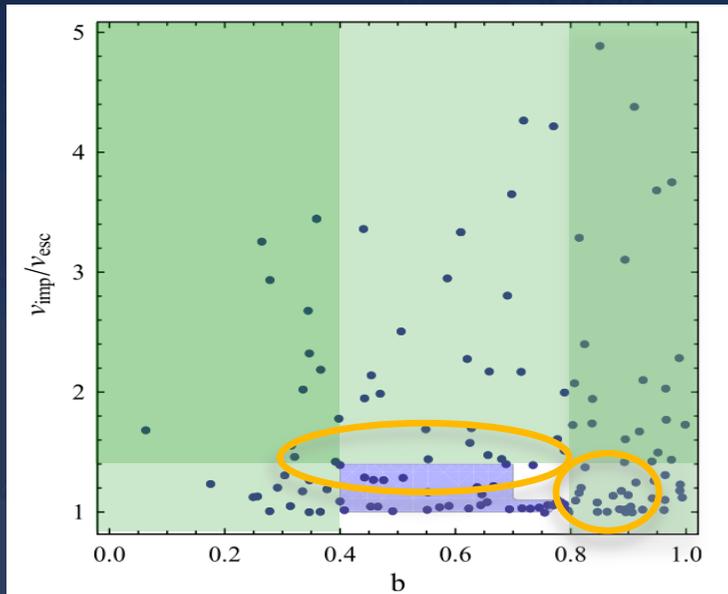
与えられる  $m_{\text{disk}}$  の10~55%を2つ目の計算式に組み込む

[Kokubo et al., 2000]



不確定性 0.2-1

## 不確定性2



### [衝突パラメータ]

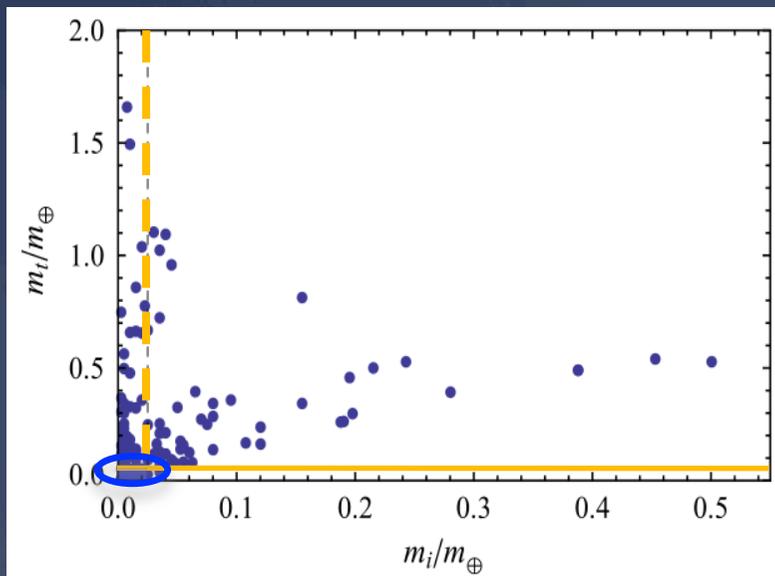
角度が増えるほど系から脱出する質量が急激に増える

$v > 1.4$  や  $b > 0.8$  での領域は曖昧さを持たせた。

Fig.6



不確定性 1-1.5



### [衝突 history]

小さい物体同士も同じ計算式を使うことで誤差が生じる

Fig.5



不確定性 0.5-1

# 不確定性3

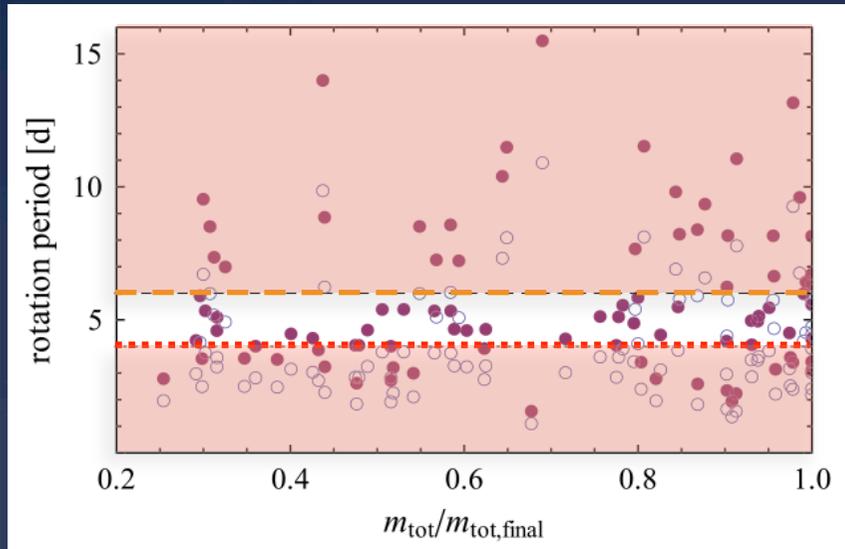


Fig.3

## [潮汐進化 - rotation period]

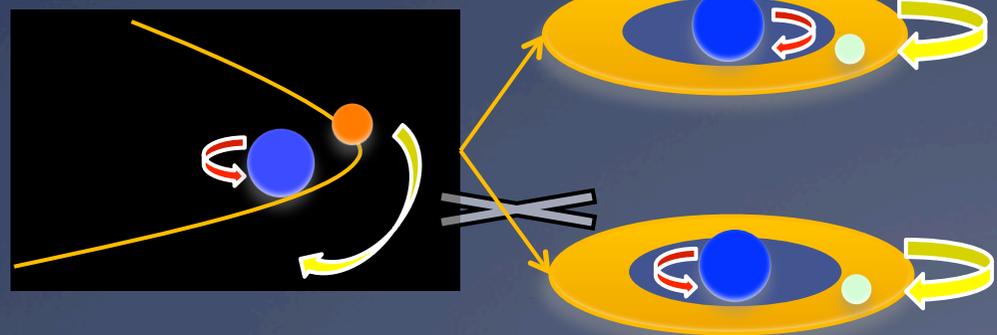
衛星の軌道長半径  $a_R \sim 1.3a_R$  (自転時間4~6h) 且つ、角運動量のロス30%を考慮した衝突 (full-circle)

境界線の扱い



不確定性 0.5-2

## [潮汐進化 - 逆行]



ほとんどが惑星の自転方向を逆転させるほどの角運動量で衝突する



不確定性 ~1

## 5. Discussion and results

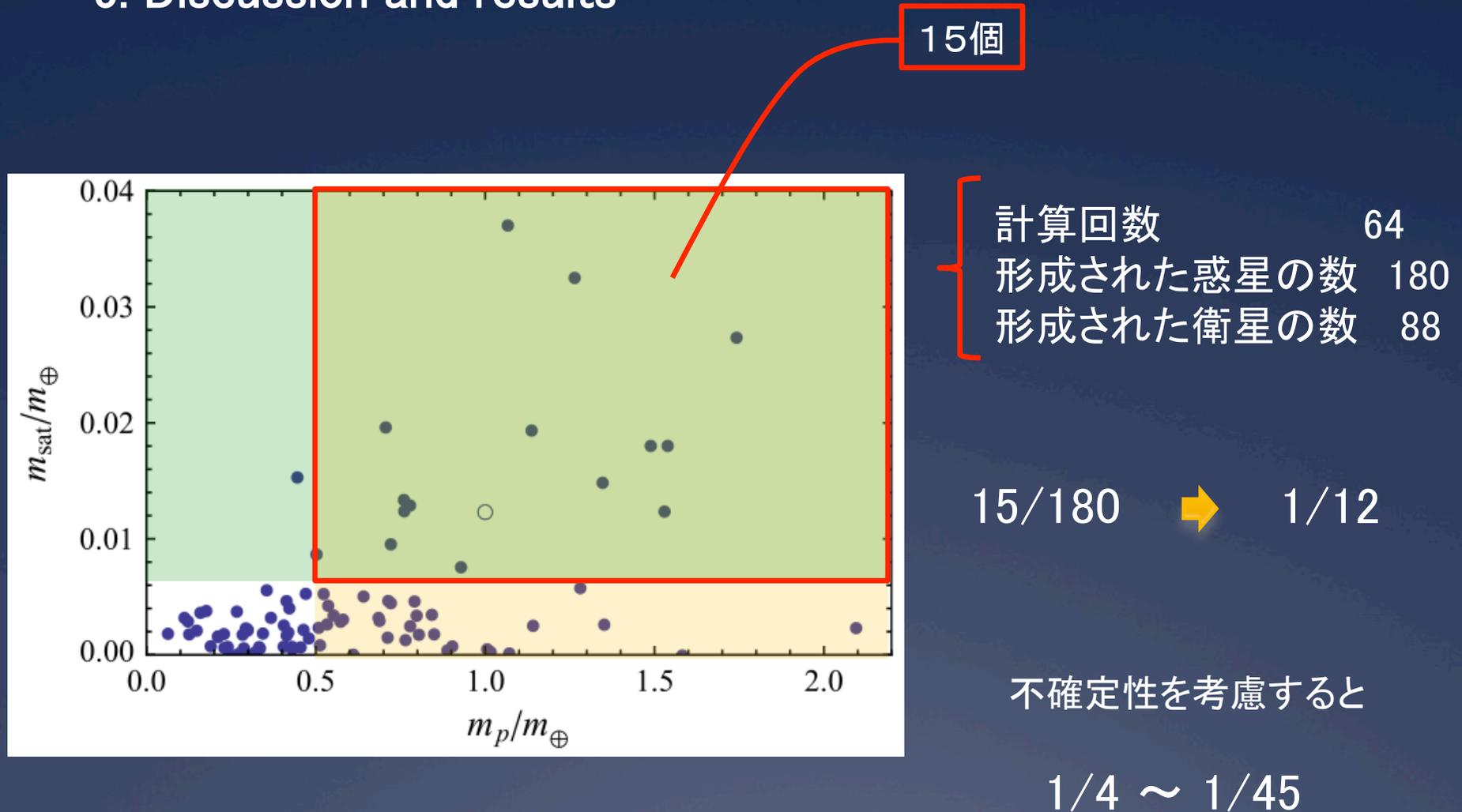


Fig.7

不確定性を考慮するとドットが増えたり減ったり

## 本論文の内容に近い論文との比較 (N体計算)

[Agnor et al., 1999]

1AU付近で22-50個の微惑星集積を計算



重力相互作用あり

地球 - 月系を超える角運動量を持った系では、月形成が平均で2回起こる。  
(初期微惑星の設定に多少影響される)

[O' Brien et al., 2006]

0.3~4.0AUの間に1000個(火星サイズ)で微惑星集積を計算



重力相互作用なし

月を形成するようなジャイアントインパクトは頻繁に起こる

[Raymond et al., 2009]

0.005~0.1地球質量を90個を微惑星中(5地球質量/1000)に散りばめて微惑星集積を計算



重力相互作用なし

月はレアケースだが、月形成の制約次第でできる

4%しかCanupの条件を満たさなかった

## 結論

惑星が月のような大きな衛星を持つ確率は  $1/12$

不確定性を考慮すると  $1/4 \sim 1/45$

巨大な質量を持つ衛星は惑星に大きな影響を与える。  
もし、巨大質量の月が無ければ、突然の気候変動などを起こすため、  
生命が存在することはできないだろう。  
今回の計算は、ハビタブルゾーンに通じるものがある。