

# マグマオーションを持った原始地球への巨大衝突の数値計算

Natsuki Hosono (JAMSTEC/RCCS)

Shun-ichiro Karato (Yale Uni.)

Junichiro Makino (Kobe Uni./RCCS)

Takayuki R. Saitoh (Kobe Uni.)

# はじめるまえに

◆ どうでもいい苦労話(時間があれば)とかsocial impactとか

# はじめに：月

◆地球の唯一の自然衛星。

他の地球型惑星はどれもこの様な巨大な衛星は持ち合わせていない。



← 6,400 km →

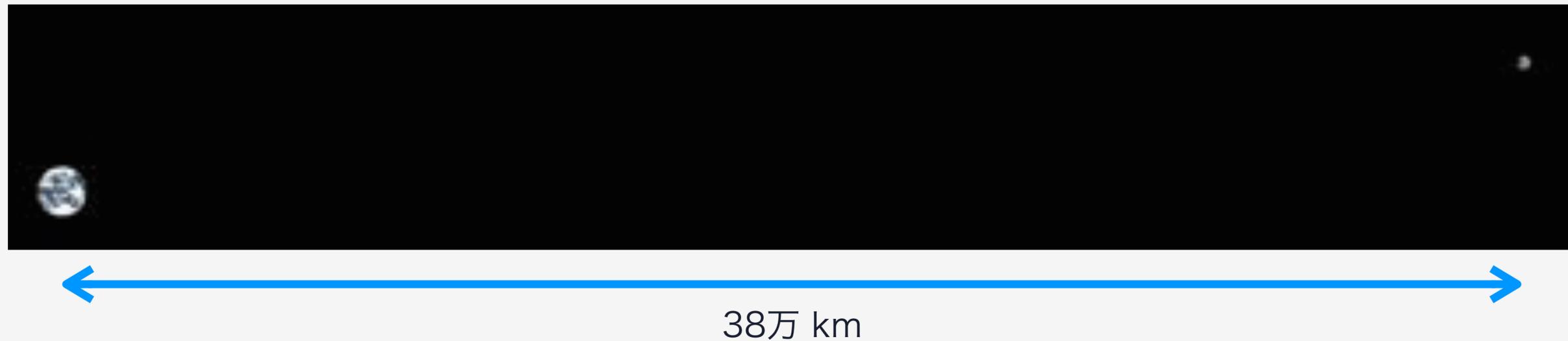
$$R_M \simeq R_E/4$$

$$M_M \simeq 0.01M_E$$

# はじめに：月

◆地球の唯一の自然衛星。

他の地球型惑星はどれもこの様な巨大な衛星は持ち合わせていない。



# 地球・月系

- ◆大きさだけでなく、他にも色々と奇妙な点が多い。
  - ・他の系に比べて、大きな(比)角運動量
  - ・月の低い密度(コアが小さい?) (Hood & Zuber, 2000)
  - ・高エネルギー現象を経験した可能性 (Warren, 1985; Jones & Palme, 2000)
  - ・同位体比が同じ(地球と月は同じもの?) (e.g., Wiechert+, 2001)
  
- ◆なので、何か特殊な事が起きてこの様な系が出来たはず。  
何が起きてこの様な奇妙な系ができたのか?  
これは惑星の多様性にも関わる重要な話はず…。

# 月の起源

◆色々出てきた。が、そのどれにも説明出来ない特徴があった。

- ・ 分裂説：高速回転する原始地球から月がちぎれた  
月がちぎれてできるまで高速回転した場合、  
その角運動量を現在の角運動量まで減速する必要がある。  
その機構はあまり自明ではない。
- ・ 捕獲説：たまたま通りがかった小さい天体を捕獲した  
低密度、高エネルギーの証拠などが満たせない。
- ・ 同時形成説：地球が形成した際に月も横に出来た  
通常、同じ軌道上にできる巨大な天体は1つのみ。

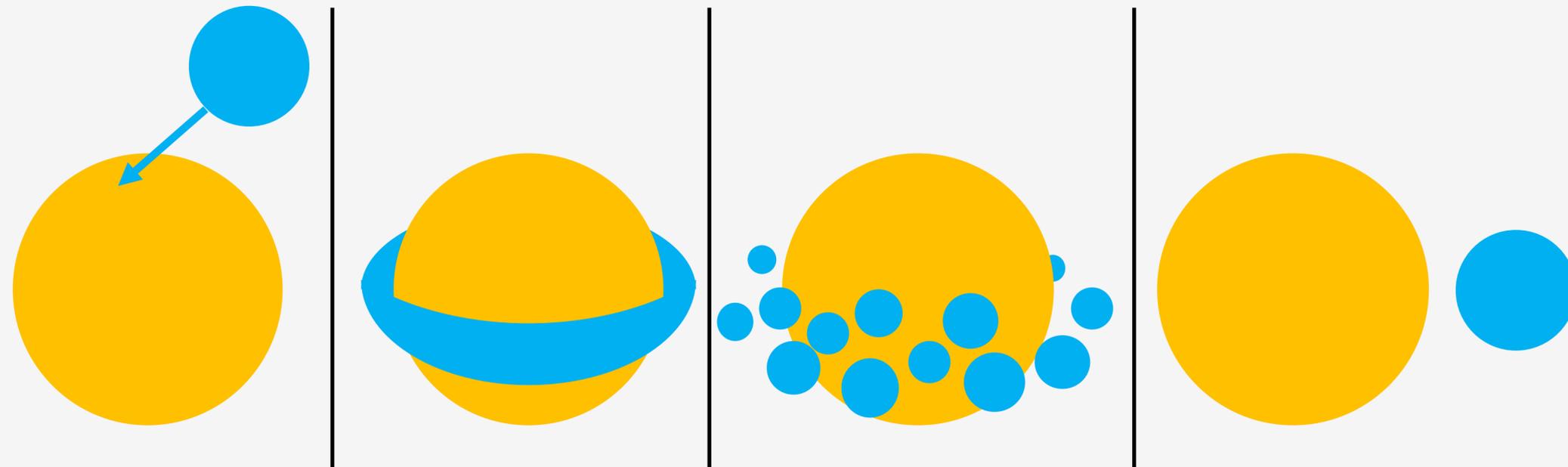
# 月の起源：巨大衝突説

- ◆巨大衝突仮説 (Giant Impact; Hartman & Davis, 1975; Cameron & Ward, 1976)  
地球の形成後期に起こったとされる、2つの天体同士の衝突。



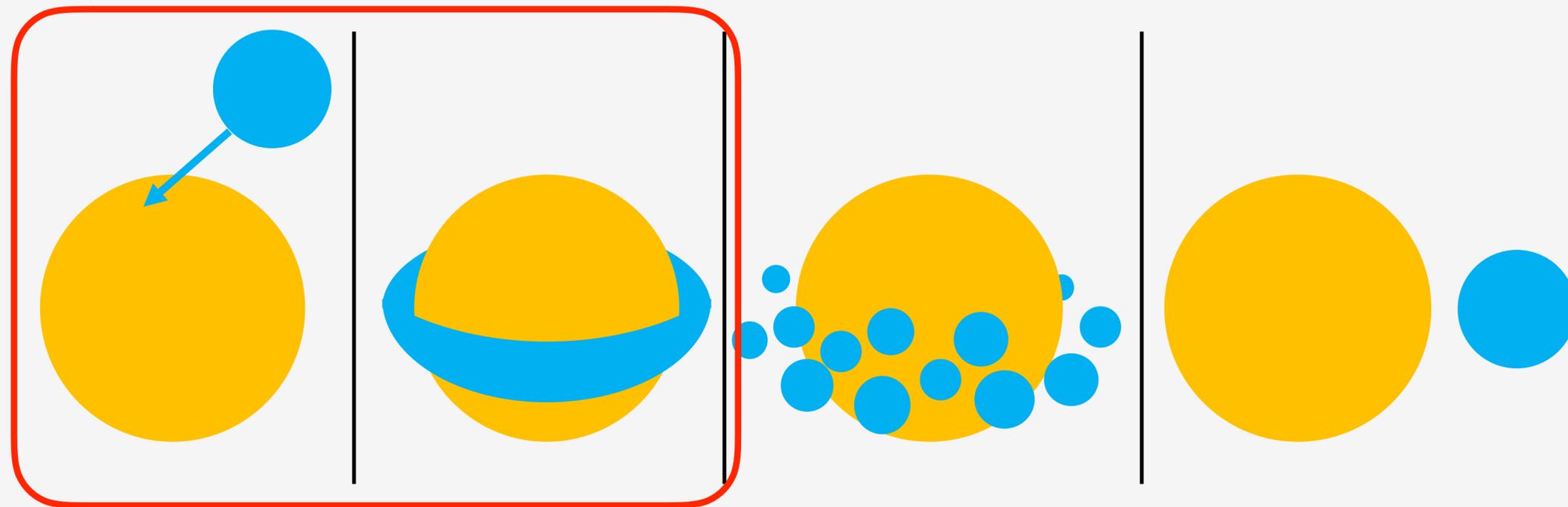
# 月の起源：巨大衝突説

- ◆46億年程度前の原始地球に、火星サイズ程度の天体が斜めに衝突。  
衝突後、地球の周りに岩石蒸気/液体の周地球円盤が形成される。  
それが最終的に冷え固まって月となった。



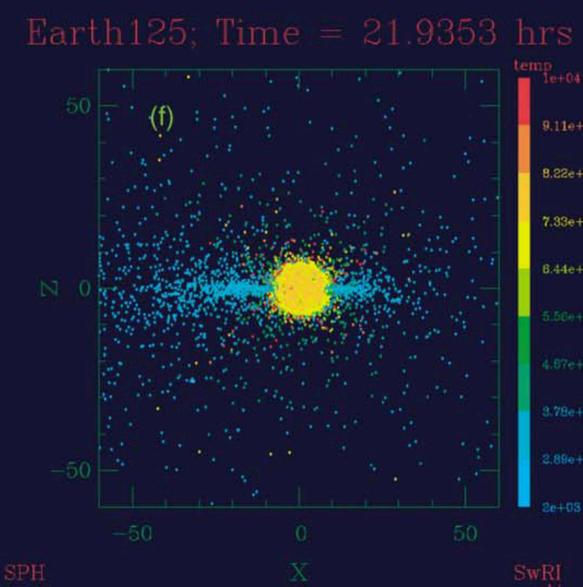
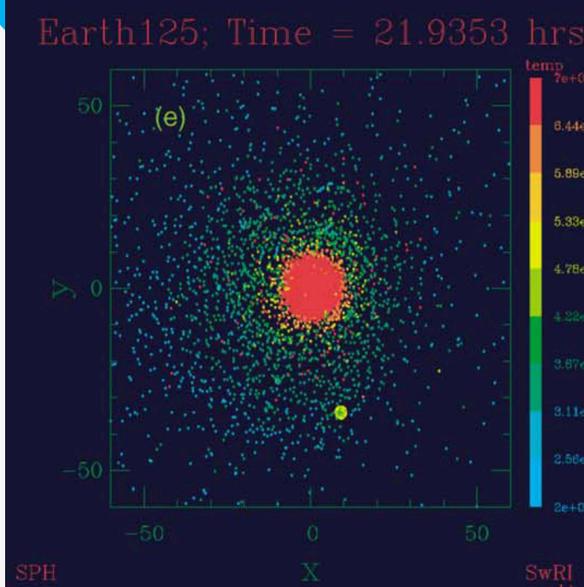
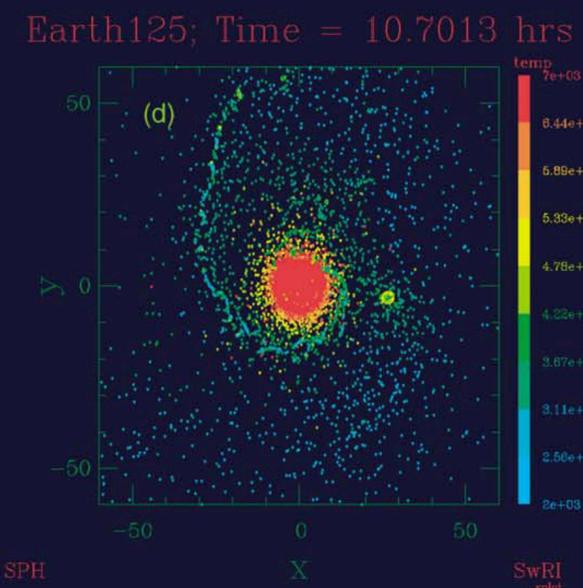
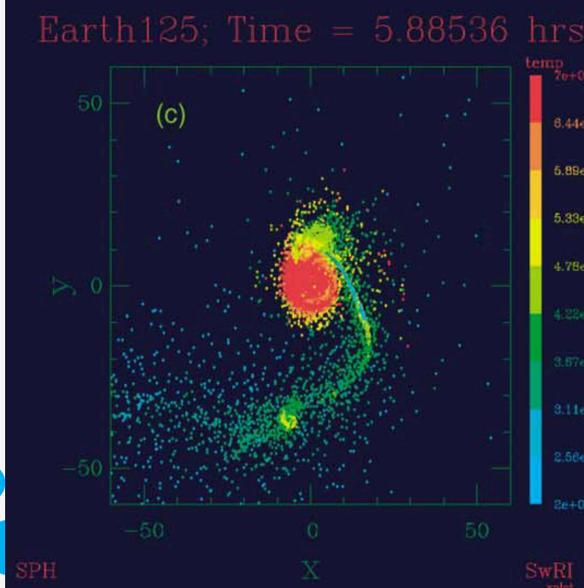
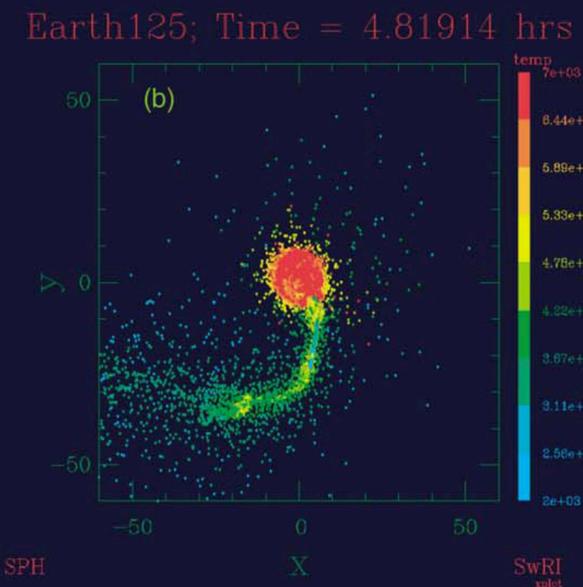
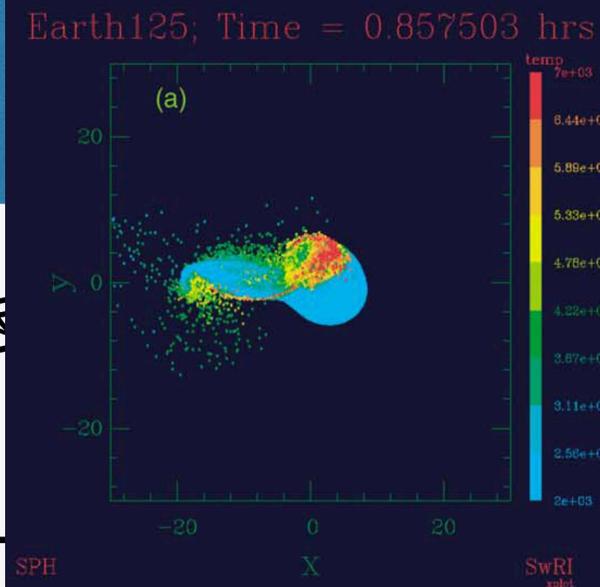
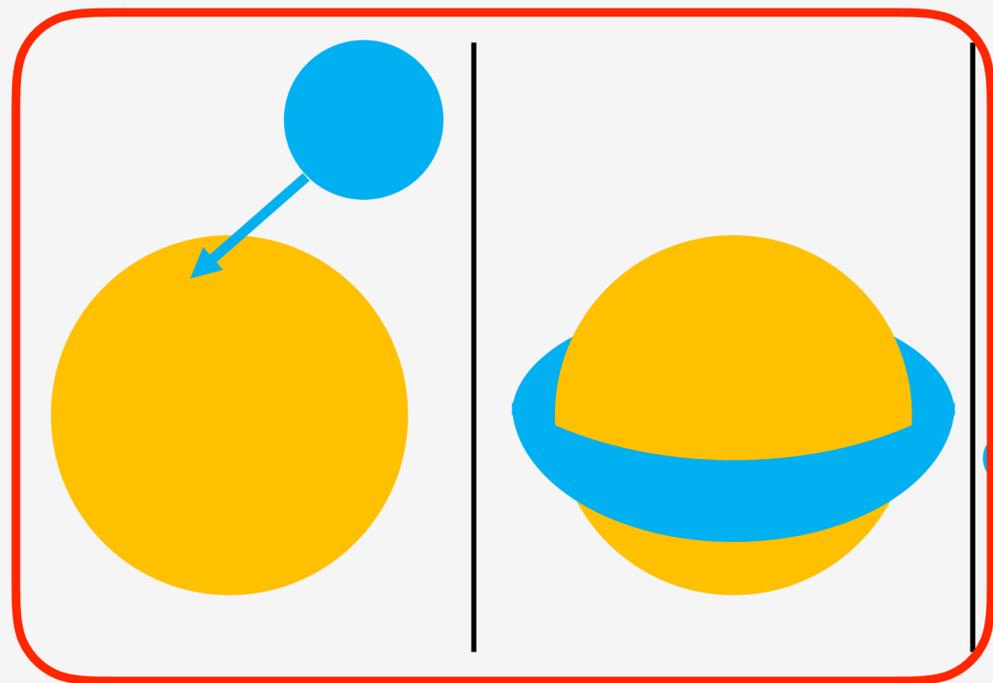
# 月の起源：巨大衝突説

- ◆巨大衝突説が実際に現在の地球・月系を再現できるか確かめるため、色々な数値計算が行われてきた。  
特に、衝突フェイズは主にSmoothed Particle Hydrodynamics法と呼ばれる手法で検証されてきた(Canup, 2004など)。



# 月の起源：巨大衝突説

- ◆巨大衝突説が実際に現在の地球・月系を再現でき  
色々な数値計算が行われてきた。  
特に、衝突フェイズは主にSmoothed Particle H  
検証されてきた(Canup, 2004など)。

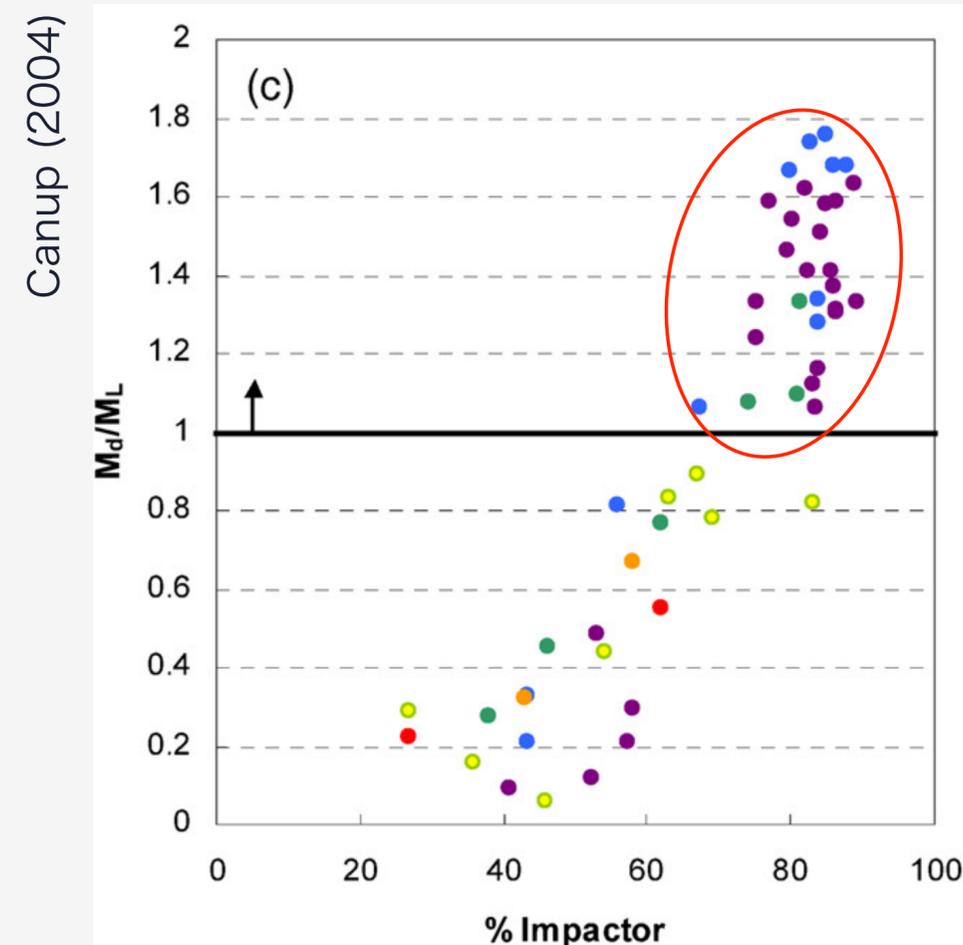
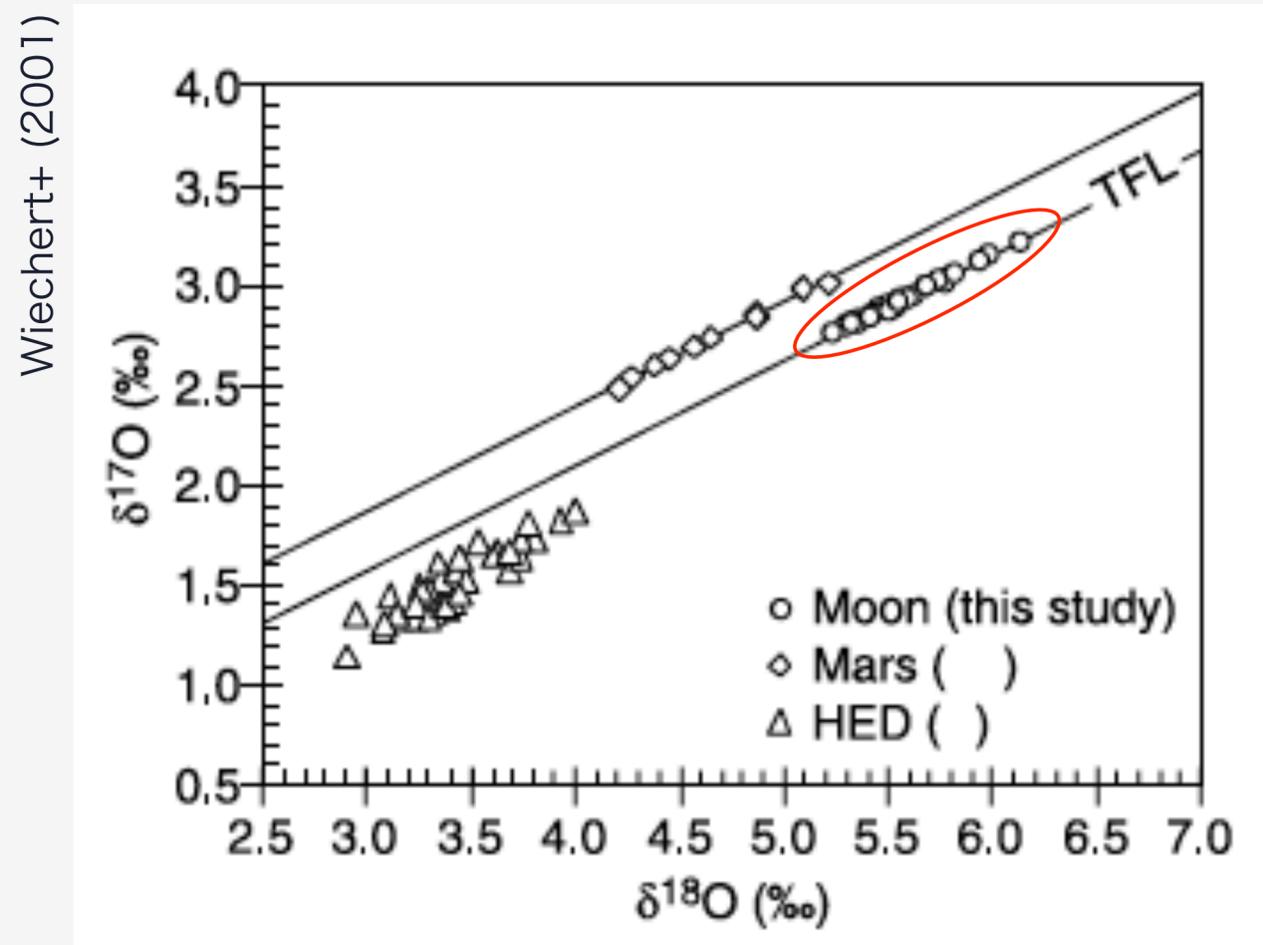


# 数値計算からわかったこと

- ◆ ・ 他の系に比べて、大きな(比)角運動量  
衝突天体の角運動量が現在の地球・月系と同程度で衝突した場合、現在の月の質量を超える円盤が形成する事が可能である。
  - ・ 月の低い密度  
原始月円盤はほぼ岩石からなるので、出来上がる天体は鉄コアが小さくなる。
  - ・ 高エネルギー現象を経験した可能性  
巨大衝突は天体同士の衝突なので高エネルギー現象。
- 
- ◆ 月の起源は巨大衝突でほぼ決定状態に

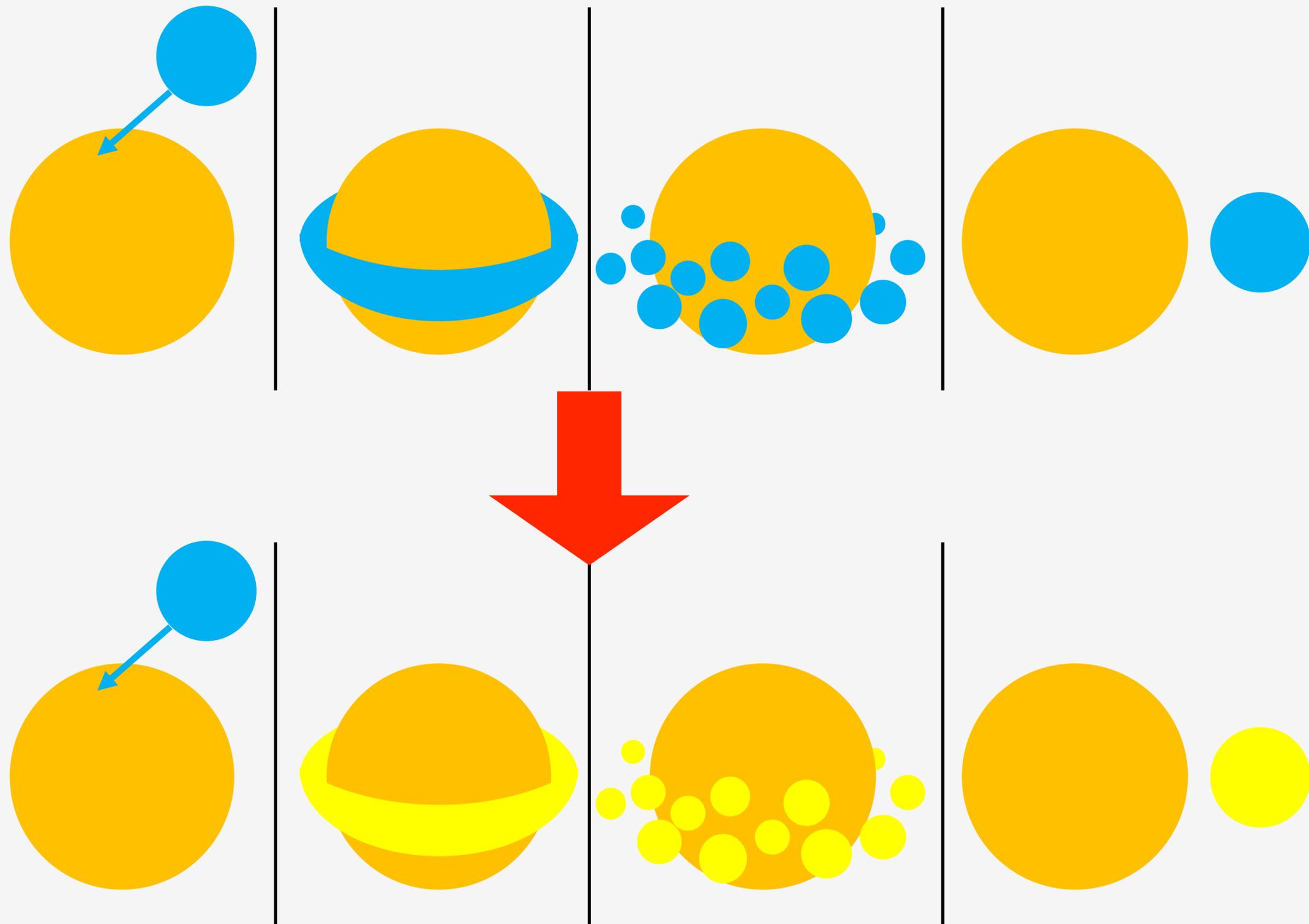
# 同位体比問題

- ◆が、この巨大衝突説だと説明できない現象が出てきた(e.g., Wiechert+, 2001)  
地球の岩石とアポロ計画で持ち帰ってきた月の岩石同位体比が、極めて高い精度で一致した。  
これは単純には、月は衝突の際に原始地球側から軌道に飛び出た物質からできた事になる。
- ◆が、数値計算の結果によると、月はほぼ衝突したインパクターの側からできる。



# 同位体比問題

◆本当はこう？

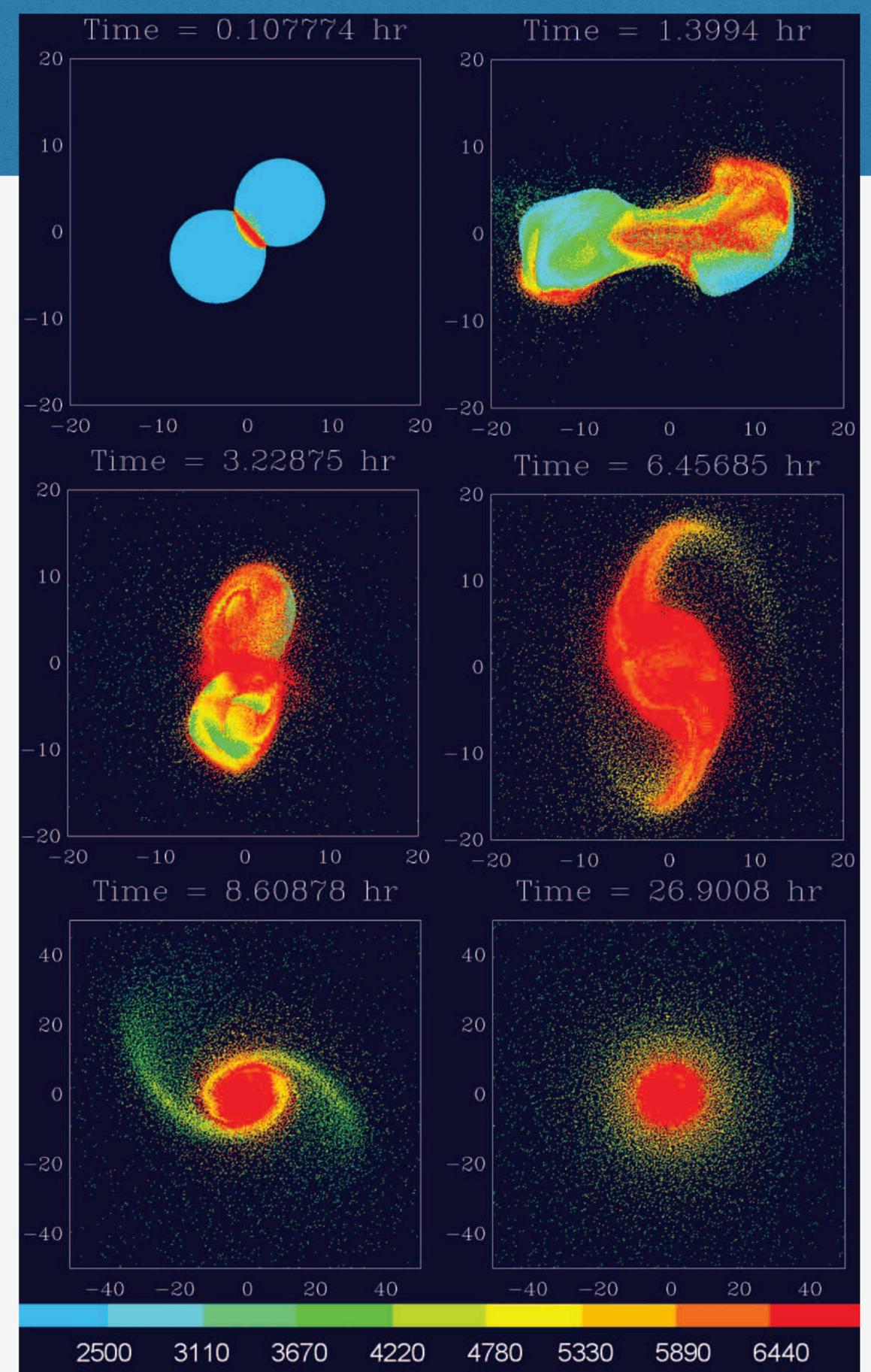


# 非標準巨大衝突

- ◆この問題を解決するために、巨大衝突の亜種が提案された。
  - 同じ質量の天体が2つぶつかった (Canup, 2012)
  - 高速で自転していた原始地球に小さい天体がぶつかった (Cuk & Stewart, 2012)
  - 衝突天体は原始地球に衝突したのち、どこかへ逃げていった (Reufer+, 2012)
  - 小さな天体が何回もぶつかってできた (Rufu+, 2017)
  - Synestia (Lock & Stewart, 2017)

# Twins collision

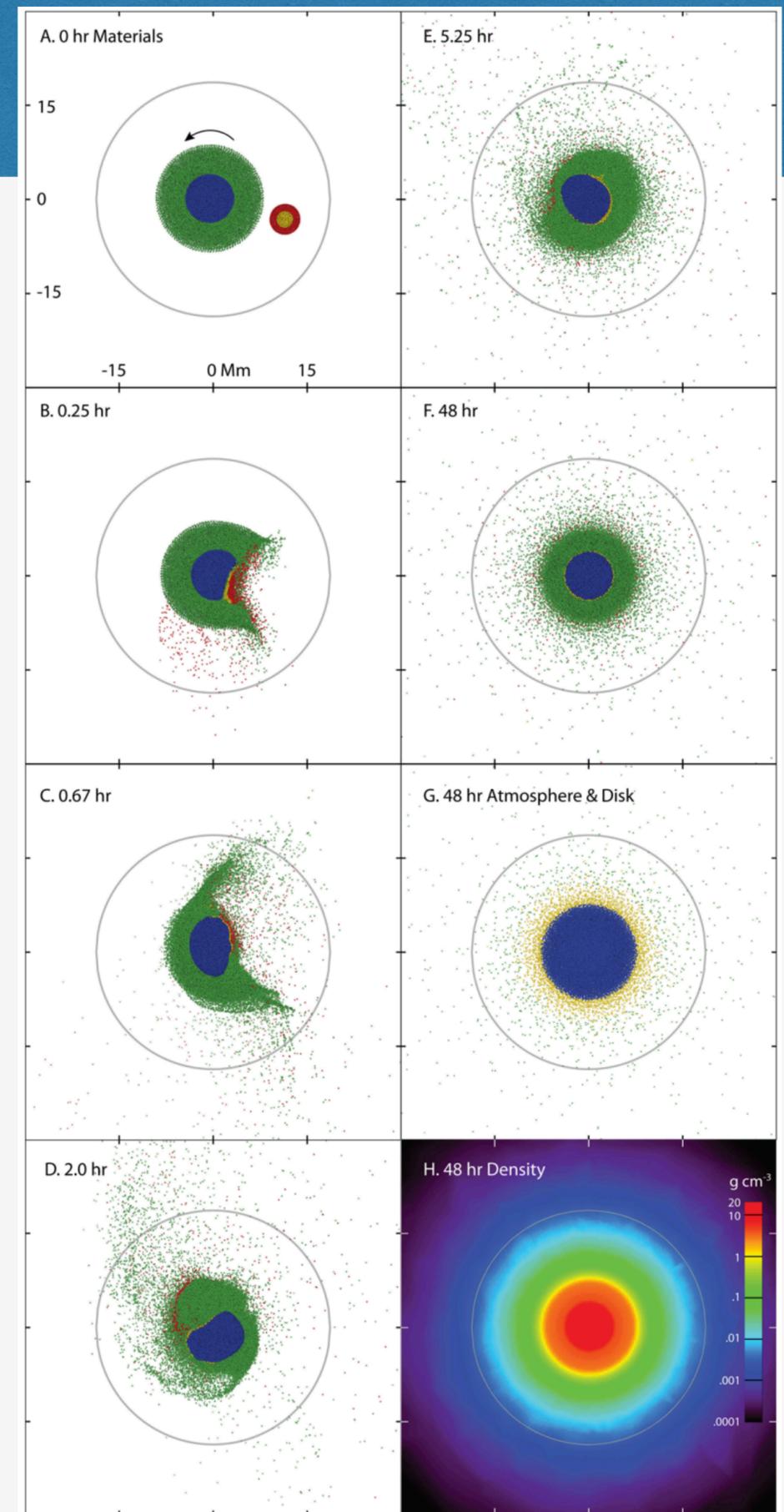
- ◆同じ質量の天体が2つぶつかった (Canup, 2012)  
ただし、現在の地球にはNeやXeの不均一があるため、あまり高エネルギーすぎて何もかも混ざられると困る。  
(Mukhopadhyay, 2012)



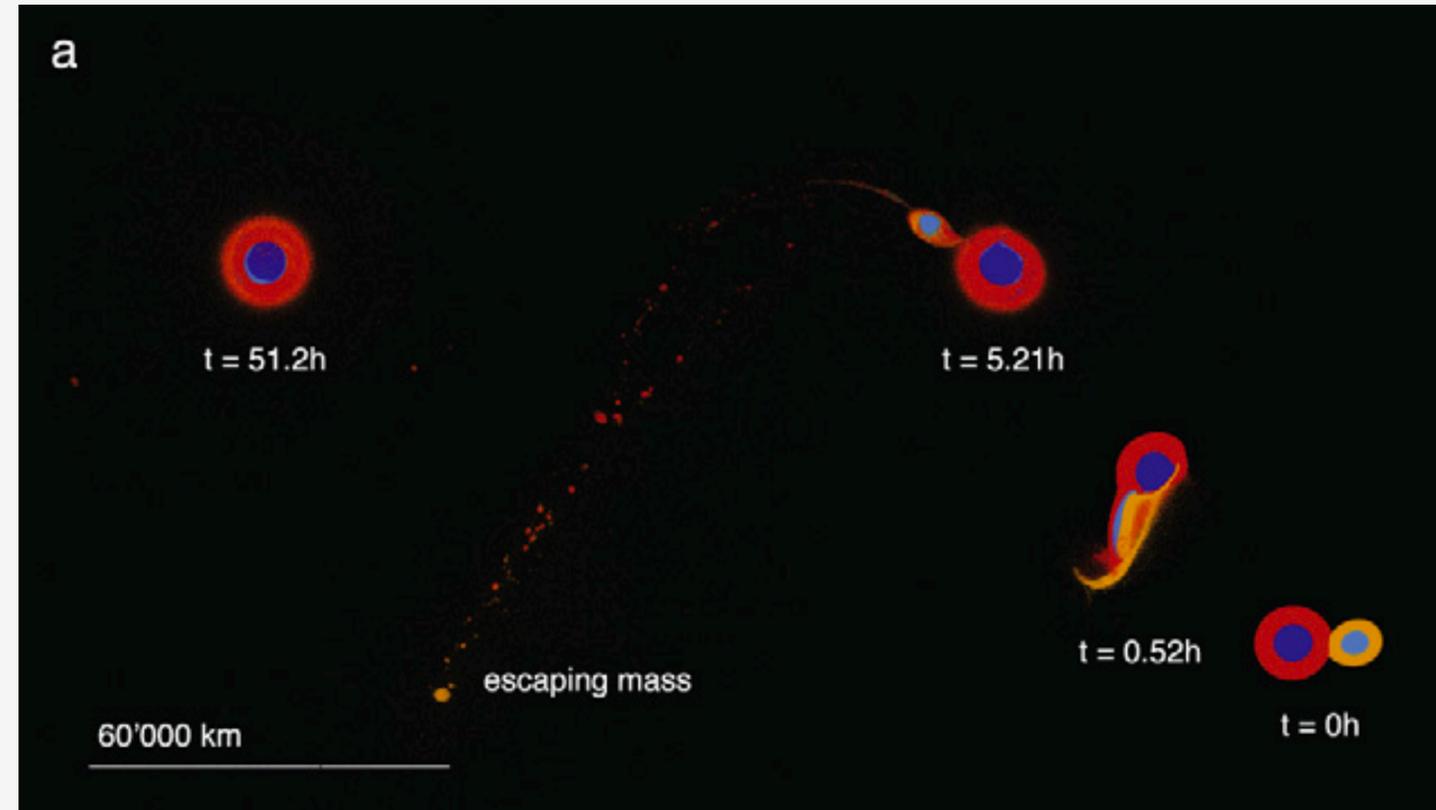
# Rapid rotating proto-Earth

◆高速で自転していた原始地球に小さい天体がぶつかった  
(Cuk & Stewart, 2012)

ただし、角運動量を現在の値まで落とす機構が不明瞭。



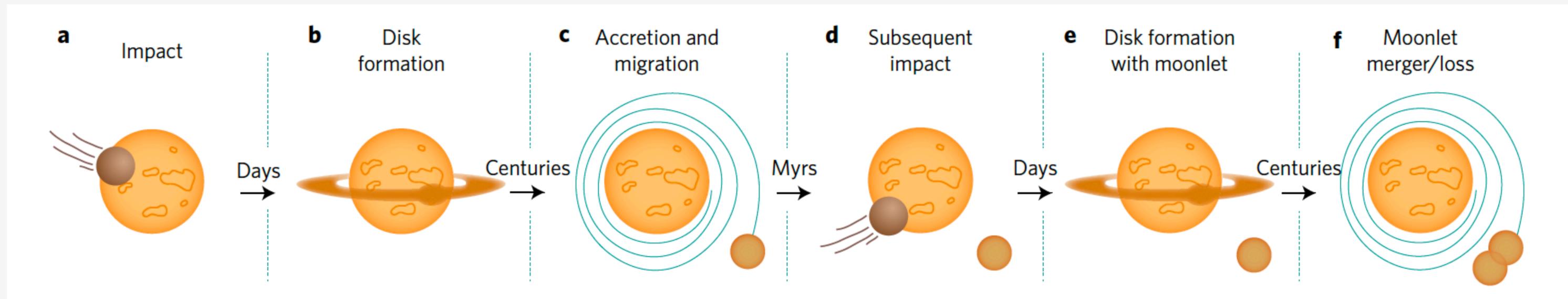
◆衝突天体は原始地球に衝突したのち、どこかへ逃げていった (Reufer+, 2012)



ただし、高速での衝突は確率的に極めて稀(Kaib and Cowan, 2012)。

# Multiple impacts

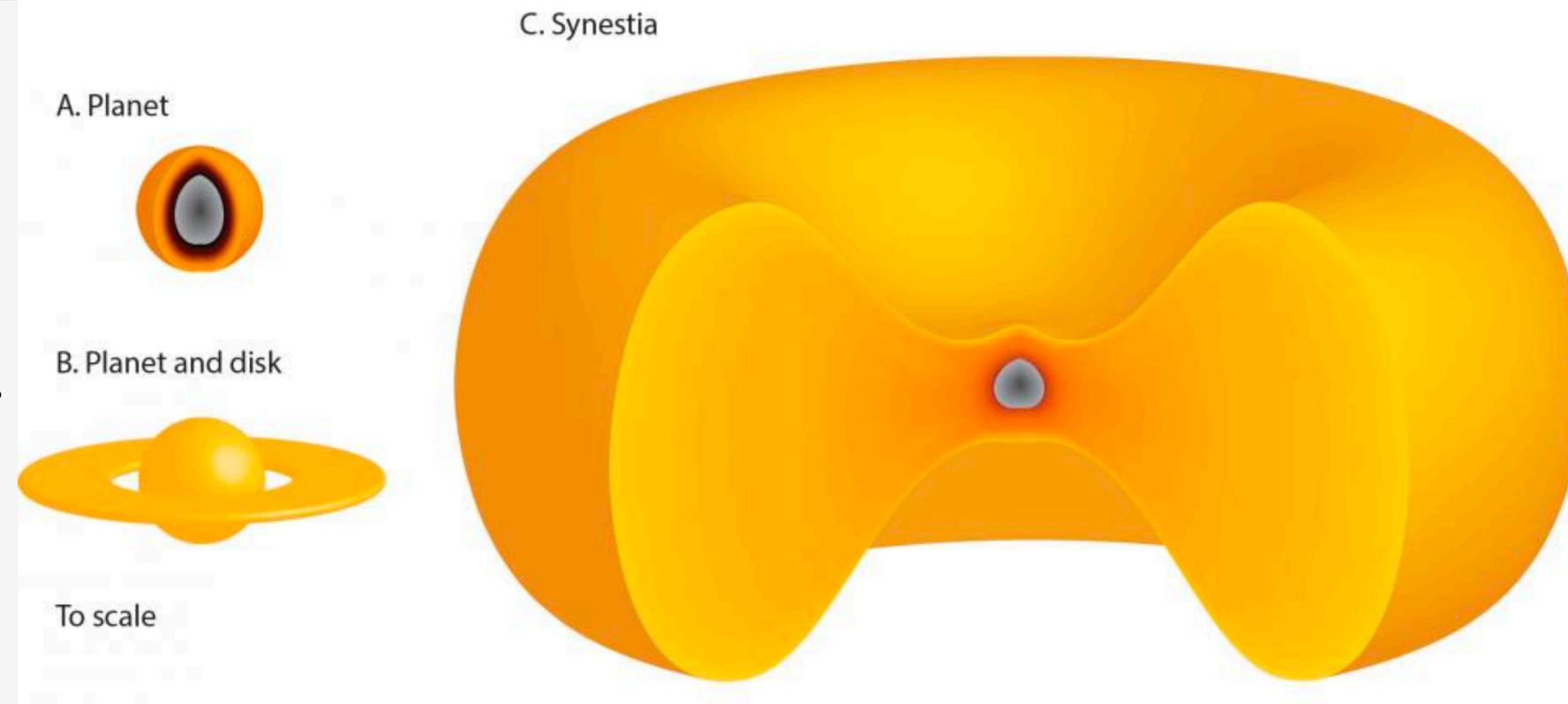
## ◆小さな天体が何回もぶつかってできた (Rufu+, 2017)



出来上がったmoonlet同士がうまく合体してくれることは極めて稀。  
普通は地球に落ちるか、はじき出されるか。

# Synestia impacts

- ◆Synestia (Lock & Stewart, 2017)  
超高エネルギーの衝突により、  
何もかも溶けた/蒸発したような天体。  
ただし余り何もかも混ざられると困る…



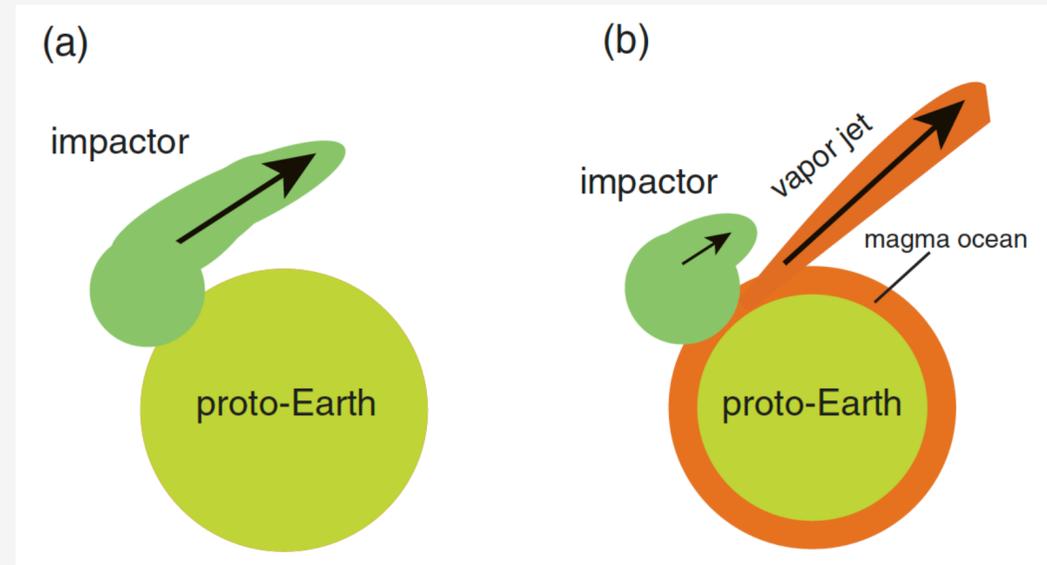
# 非標準巨大衝突

- ◆この問題を解決するために、巨大衝突の亜種が提案された。
  - 同じ質量の天体が2つぶつかった (Canup, 2012)
  - 高速で自転していた原始地球に小さい天体がぶつかった (Cuk & Stewart, 2012)
  - 衝突天体は原始地球に衝突したのち、どこかへ逃げていった (Reufer+, 2012)
  - 小さな天体が何回もぶつかってできた (Rufu+, 2017)
  - Synestia (Lock & Stewart, 2017)
- ◆どれも反証が出てきた。

なんかもうわけがわからなくなってきた

# マグマオーシャン仮説

◆Karato (2014)により、マグマオーシャンモデルが提唱される。



巨大衝突時の原始地球は、マグマの海で覆われていたというもの。  
液体の岩石は衝突加熱などに固体より敏感なため、急激な膨張をし、  
結果としてより多くの原始地球由来の物質が軌道に飛び出す可能性がある、というもの。

◆このモデルは力学的な条件を変えないため、標準巨大衝突モデルと衝突条件は変わらない。  
ただし当時は数値計算によるチェックは行われていなかった。

# マグマオーシャン仮説の数値計算

◆というわけで、MO仮説の数値計算をする必要がある。  
が、すぐできるほど簡単なものでもない…。

(1) Density Independent SPH (DISPH; e.g., Saitoh & Makino, 2013)

普通のSPHだと密度ジャンプ(コアマントル境界/マントルMO境界)が正しく扱えない。  
ので、DISPHというそれを修正した物を使う必要があった。

(2) 液体岩石の状態方程式 Jing and Karato (2011)

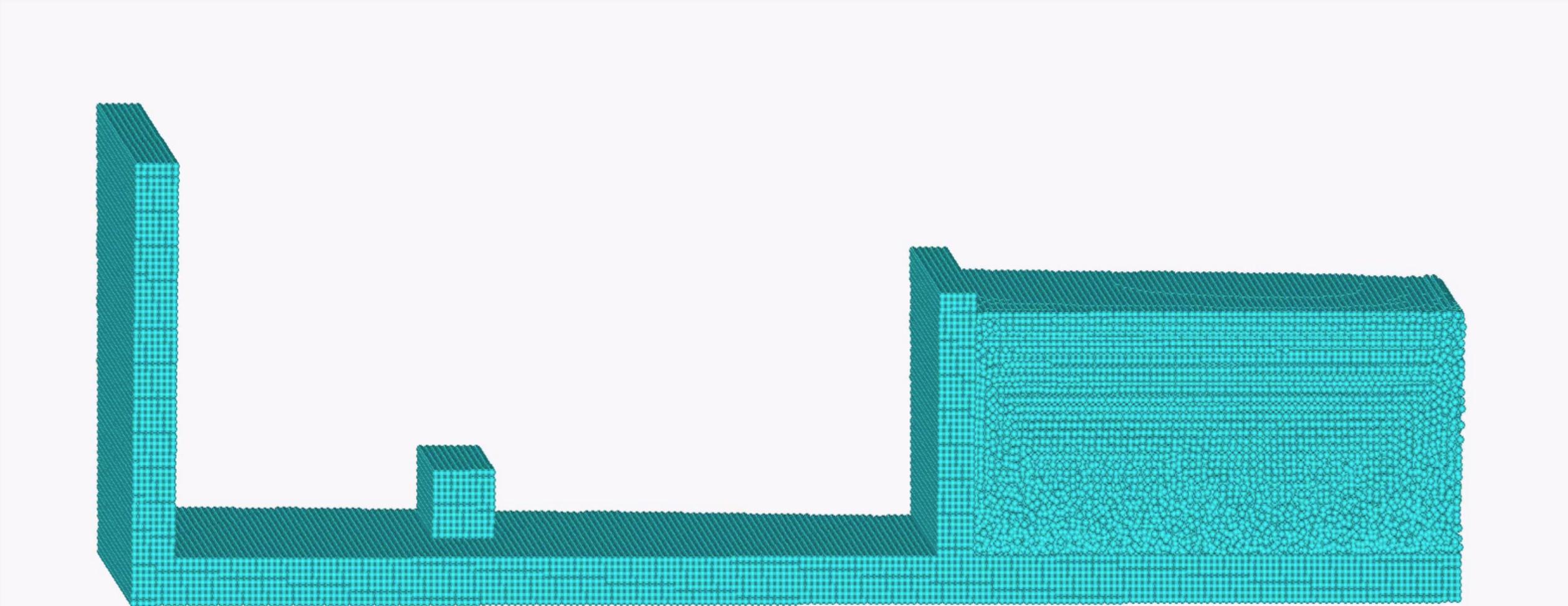
これは $p$ - $V$ - $T$ 形式で与えられているので、 $p$ - $\rho$ - $u$ 形式に変換する必要があった。

(3) FDPS (Iwasawa+, 2015)

色々な衝突条件を試すために並列計算をする必要があった。

# SPHとは

- ◆Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH; Lucy, 1977; Gingold and Monaghan, 1977)とは、粒子的流体数値計算手法である。  
SPH法では、流体はSPH粒子と呼ばれる仮想の粒子の集まりとして表現される。

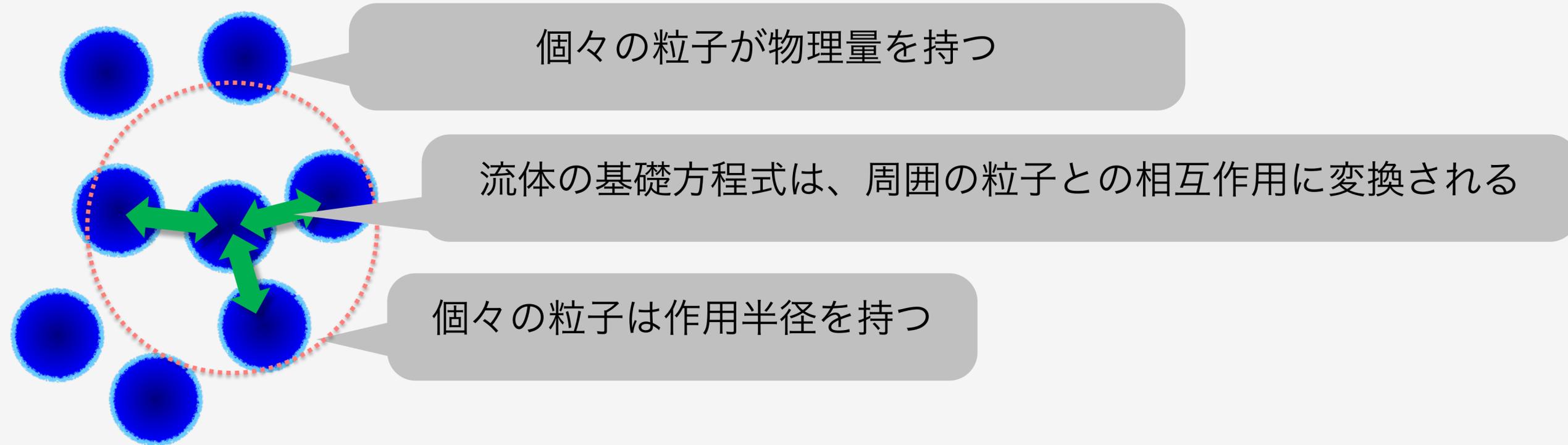


# SPHとは

◆Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH; Lucy, 1977; Gingold and Monaghan, 1977)

とは、粒子的流体数値計算手法である。

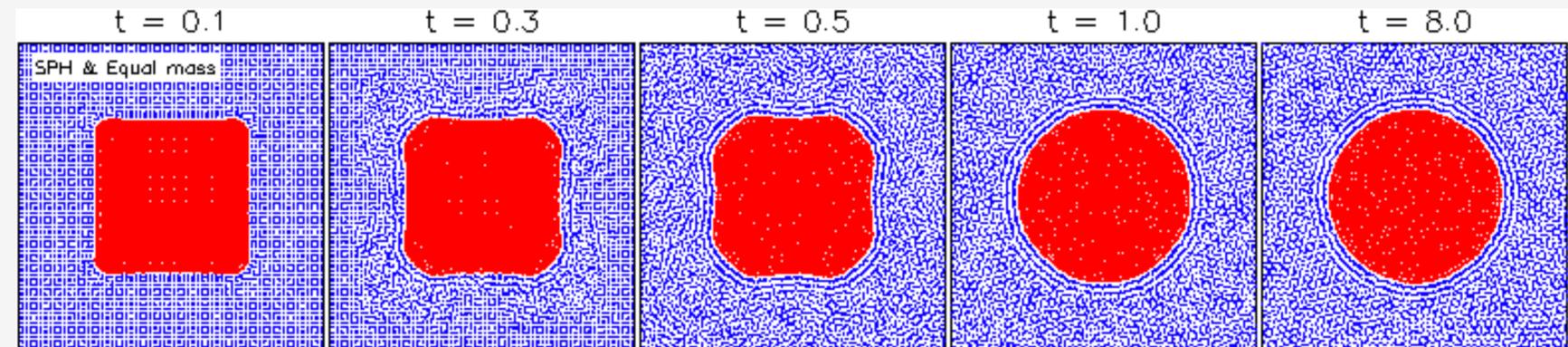
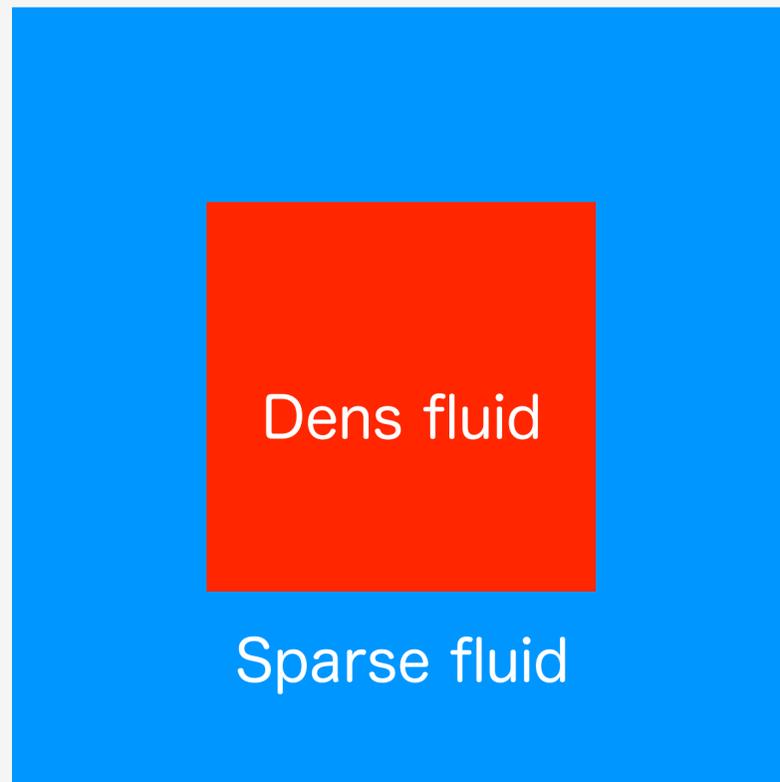
SPH法では、流体はSPH粒子と呼ばれる仮想の粒子の集まりとして表現される。



$$\frac{d\vec{v}}{dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla p \quad \longrightarrow \quad \frac{\Delta \vec{v}_i}{\Delta t} = - \sum_j m_j \left( \frac{p_i}{\rho_i^2} + \frac{p_j}{\rho_j^2} \right) \nabla W_{ij}$$

# SPHの問題点

◆ただし、標準的なSPH法の実装では、密度ジャンプが扱えない(e.g., Agertz+, 2007)。

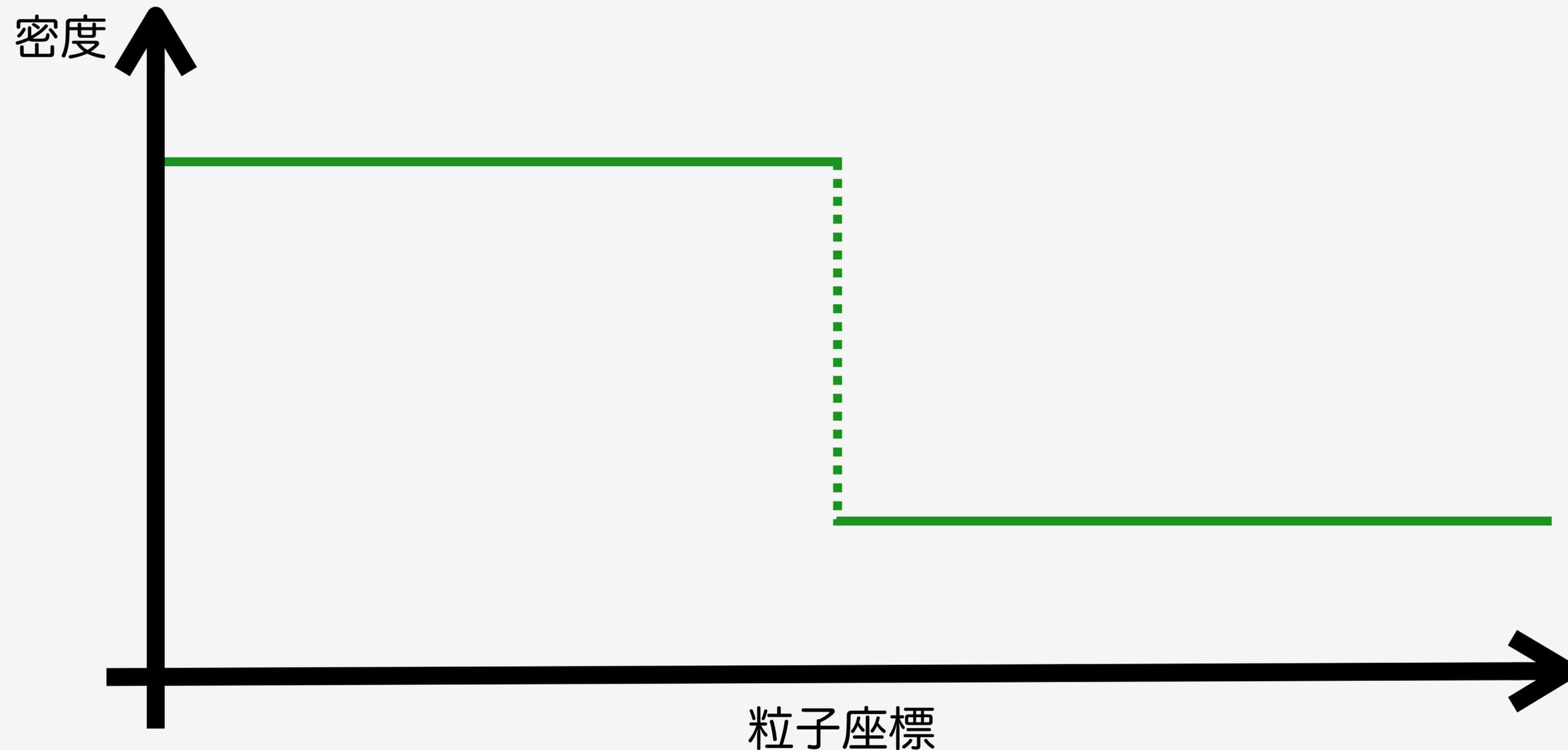


Saitoh and Makino (2013)

本来densな■は、その形状を保つはずであるが、すぐに●に変形する。

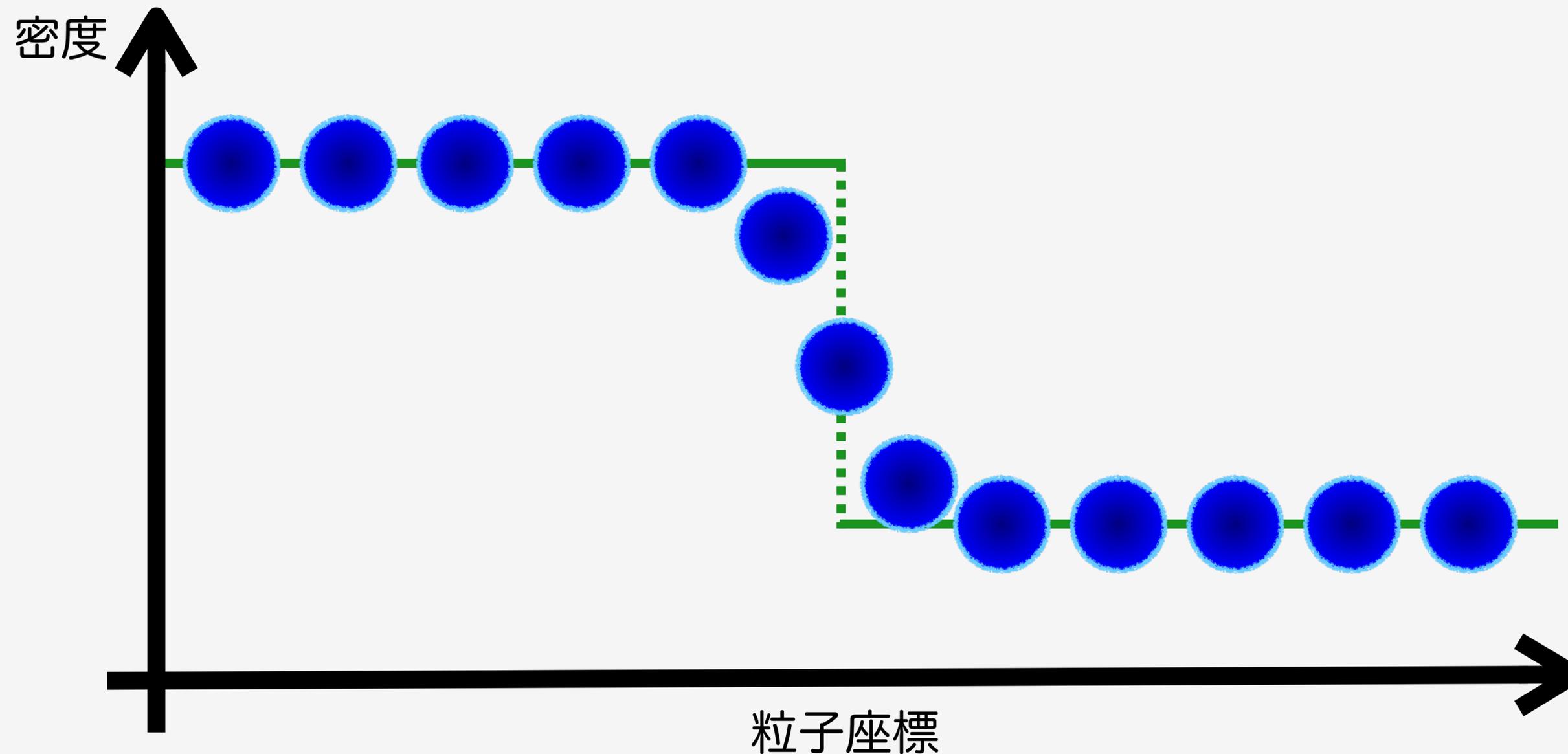
# SPHの問題点

- ◆なぜこの様な悲劇が起こるかと言うと、標準SPH法では、密度を連続になますからである。密度不連続の前後でも無理矢理密度をなまして連続にしようとするため、大きな誤差が発生。これは巨大衝突であっても、コアマントル境界やマントルMO境界などで問題になる。



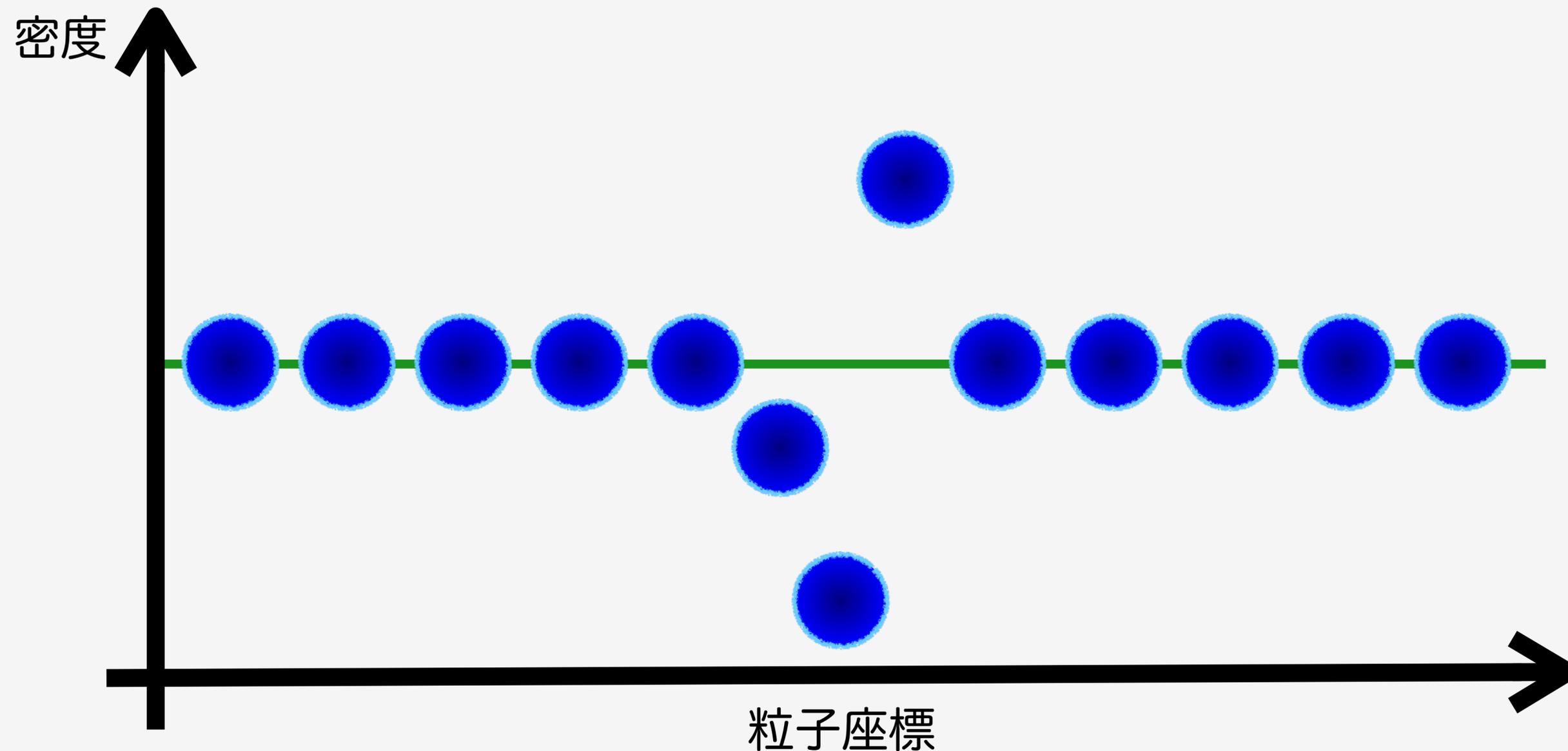
# SPHの問題点

- ◆なぜこのような悲劇が起こるかと言うと、標準SPH法では、密度を連続になますからである。密度不連続の前後でも無理矢理密度をなまして連続にしようとするため、大きな誤差が発生。これは巨大衝突であっても、コアマントル境界やマントルMO境界などで問題になる。



# SPHの問題点

- ◆なぜこのような悲劇が起こるかと言うと、標準SPH法では、密度を連続になますからである。密度不連続の前後でも無理矢理密度をなまして連続にしようとするため、大きな誤差が発生。これは巨大衝突であっても、コアマントル境界やマントルMO境界などで問題になる。

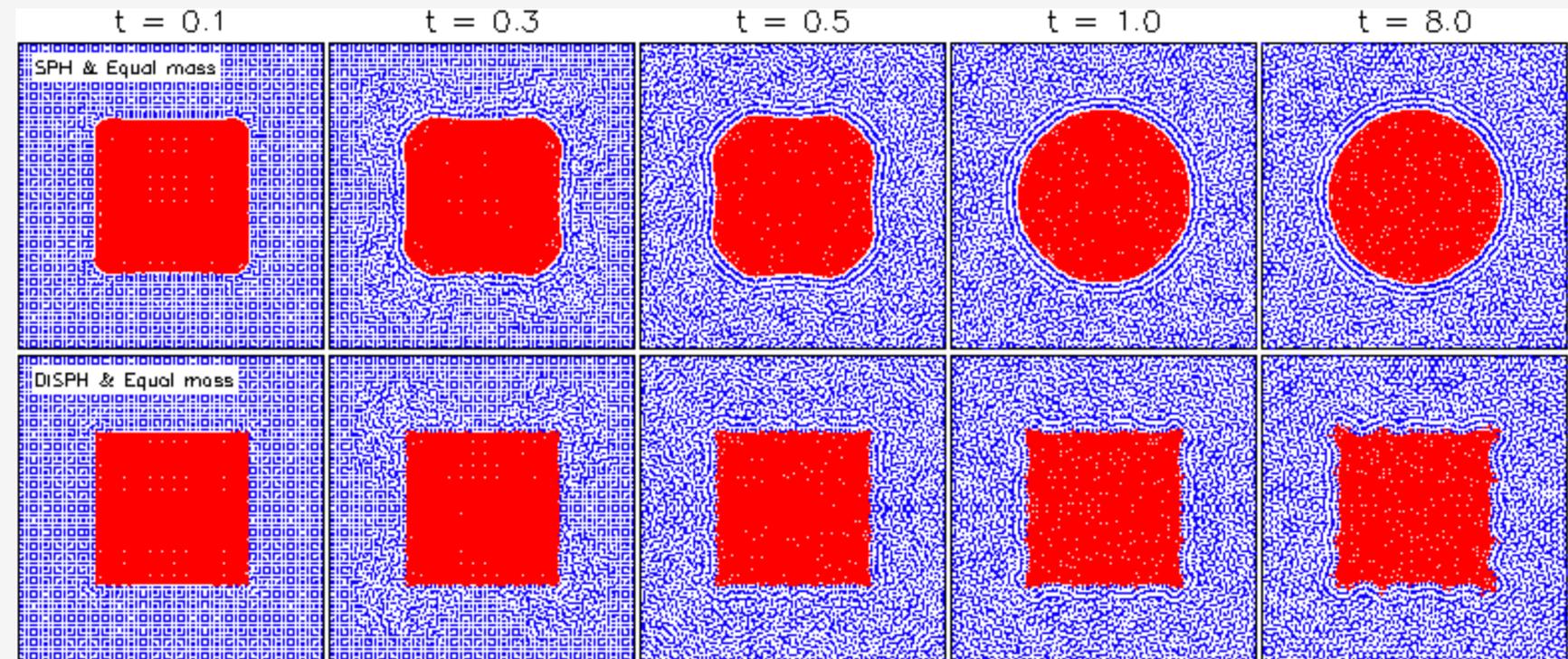
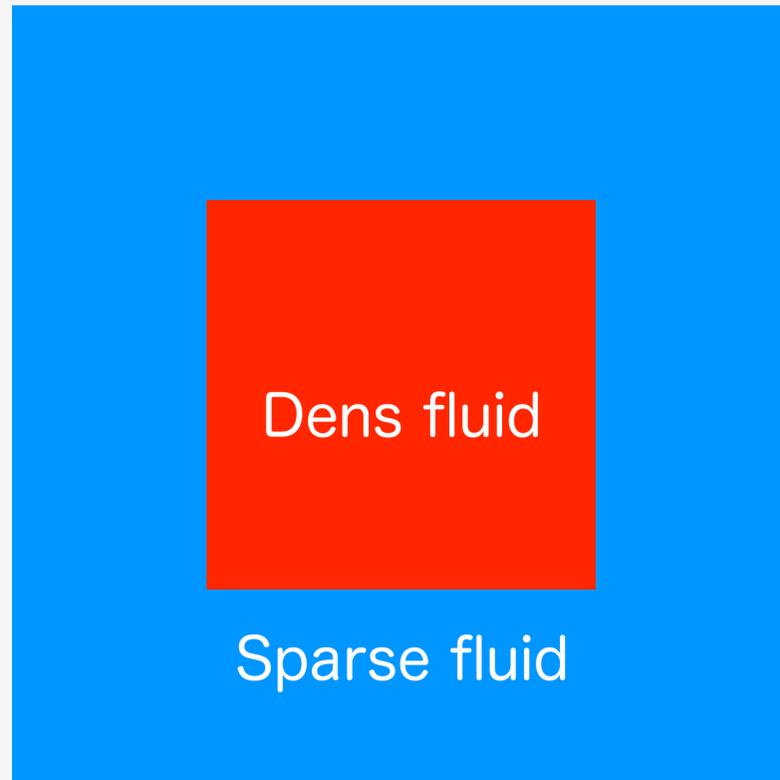


# SPHの問題点

- ◆よくよく考えてみると、そもそも別になますのが密度である必要性は全く無い。  
接触不連続面で物理的に連続な物をなませばよいのでは？  
→圧力をなますDensity Independent SPH (Saitoh & Makino, 2013; Hopkins, 2013)

# SPHの問題点

◆実際にこの方式で■testを行うと…



Saitoh and Makino (2013)

# 状態方程式

- ◆状態方程式 (Equation of State; EoS)は、圧力と体積/密度と温度/内部エネルギーの関係。過去の巨大衝突では、Tillotson EoSや、ANEOSと呼ばれるEoSが使われてきた。ただし、これらのEoSには正しい液体のEoSが入っていないため、MOを正しく取り扱うことが出来ない。
- ◆そこで、Jing and Karato (2011)で検証された液体岩石のEoSをSPHに繰り込む事にした。このEoSは、液体岩石の分子の挙動を、自由運動をする排除体積付きの粒子であると考える。JK11により、このEoSは液体岩石の性質をよく表す事ができる事が知られていた。
- ◆ただし、JK11では圧力が体積と温度の関数で表される、 $p$ - $V$ - $T$ 形式になっていた。流体の場合は $p$ - $\rho$ - $u$ 形式がほしいので、読み替える必要があった。

# 状態方程式

◆統計力学的に  $p$ - $\rho$ - $u \leftrightarrow p$ - $V$ - $T$  を行う。

まず、 $N$ 個の相互作用する粒子(=分子)の集合を考える。

$H = K + \Phi \cdots$  ハミルトニアン = 運動エネルギー + ポテンシャルエネルギー

$$Z(V, \beta) = \frac{1}{N! h^{3N}} \int \exp(-\beta H) d\vec{P} d\vec{r} \cdots \text{分配関数}$$

$$F(V, \beta) = -\frac{1}{\beta} \ln Z(V, \beta) \cdots \text{ヘルムホルツエネルギー}$$

$$p(V, \beta) = -\frac{\partial F(V, \beta)}{\partial V}, \quad U = \frac{\partial(\beta F(V, \beta))}{\partial \beta} \cdots \text{圧力と内部エネルギー}$$

他エントロピーや音速、比熱なども微分操作で導出可能。

# 状態方程式

◆液体の岩石におけるKとΦがわかればよい。

JK11では、液体岩石は排除体積を持って自由運動をする粒子としてモデル化されている。

そこで、分子間ポテンシャルΦの中を運動量Pで自由運動する粒子を考える。

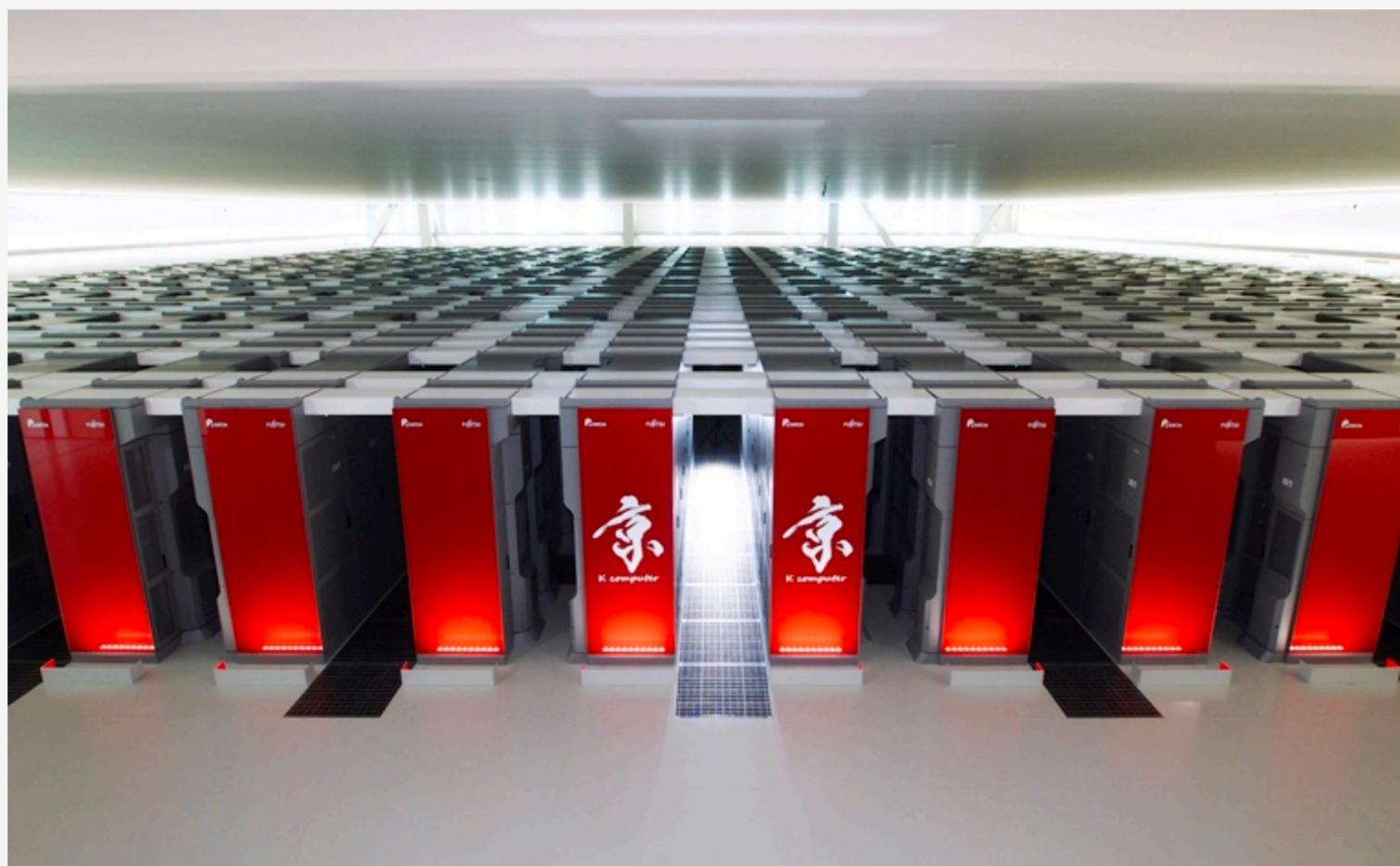
$$H = \sum_i \left( \frac{\vec{P}_i^2}{2m_i} + \sum_{j<i} \Phi(\vec{r}_{ij}) \right) \quad \Phi \text{は今回はHard sphere potential.}$$

：(途中式変形は省略…)

$$p = \frac{N}{\beta V} \Psi(f), \quad U = \frac{3N}{\beta} \left[ \frac{1}{2} + \eta (\Psi(f) - 1) \right], \quad f = \frac{\pi \sigma^3 N}{6V}, \quad \Psi(f) = \frac{1 + f + f^2}{(1 - f)^3}$$

$$\sigma = \sigma_0 \left( \frac{\beta}{\beta_0} \right)^{-\eta}$$

- ◆巨大衝突はパラメーターが多いため、多数の計算が必要になる。  
そのため、汎用粒子法並列計算フレームワーク  
Framework or Developing Particle Simulator (Iwasawa+, 2015; Hosono+, 2016)  
を用いて、京で計算した。

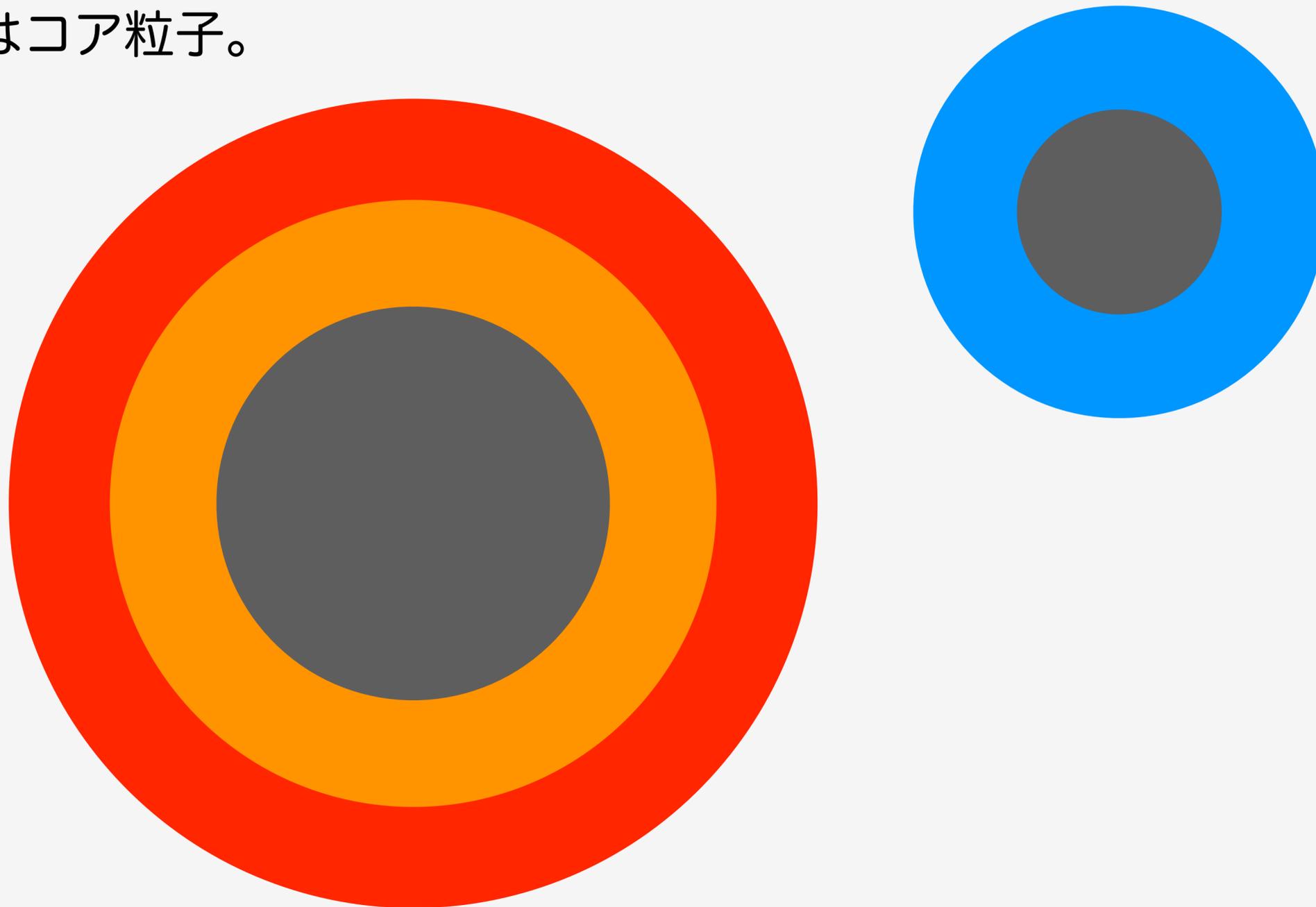


# 数値計算のセットアップ

◆2つの天体をSPH粒子で作る。

赤、オレンジは原始地球のマントル、青は衝突天体のマントル。

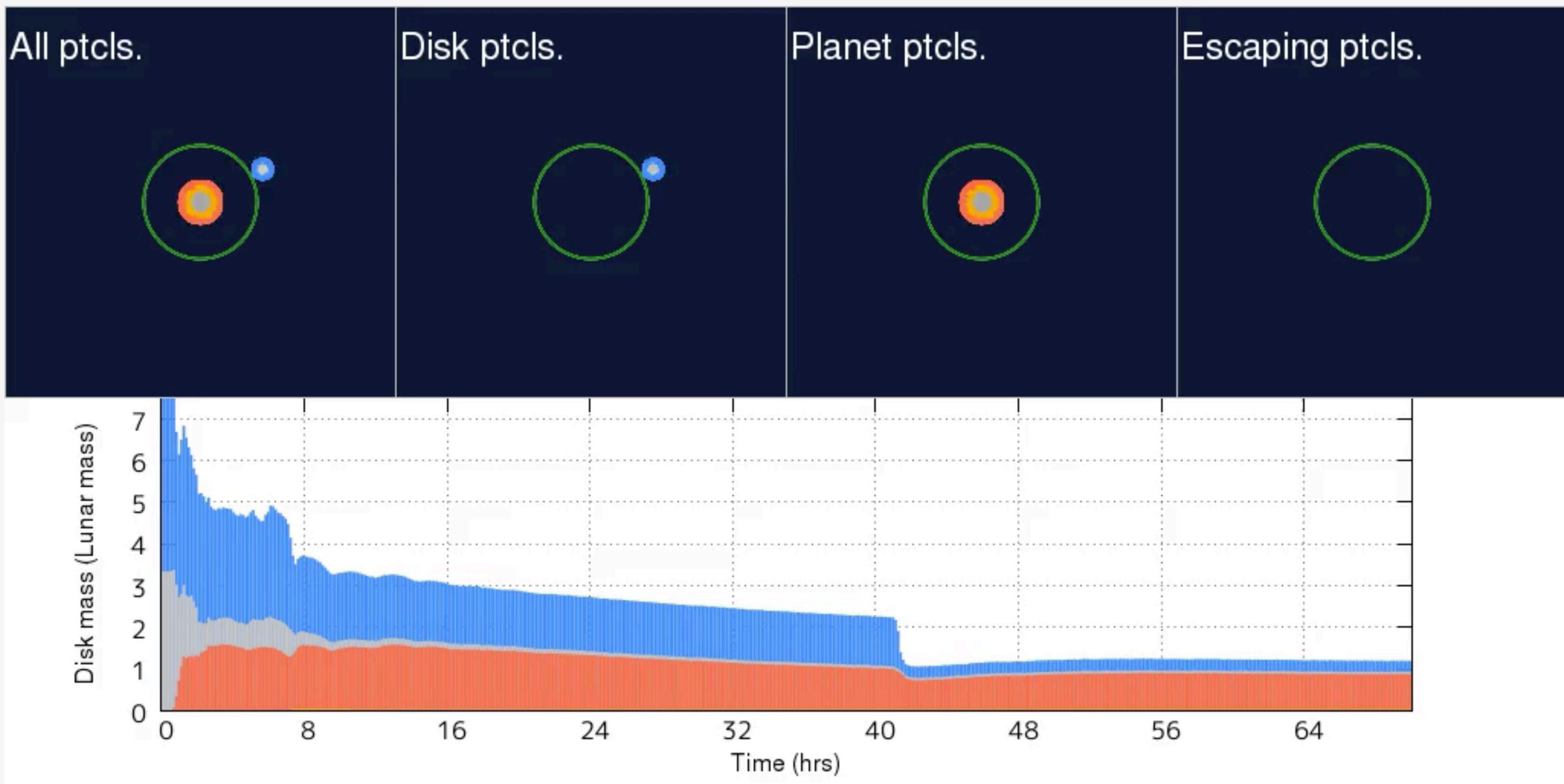
グレーはコア粒子。



## ◆4D2U可視化プロジェクトによる可視化結果

(c)2019 Natsuki Hosono, Hirotaka Nakayama, 4D2U Project, NAOJ

# 数值計算結果



# 数値計算結果

◆この様な計算を、種々の角運動量及び衝突速度で行う。

◆個々のrunから、「月形成可能」かどうかを見積もる。

(1)円盤質量が現在の月質量を超えている

(2)原始地球から飛び出た円盤質量の割合が0.7以上

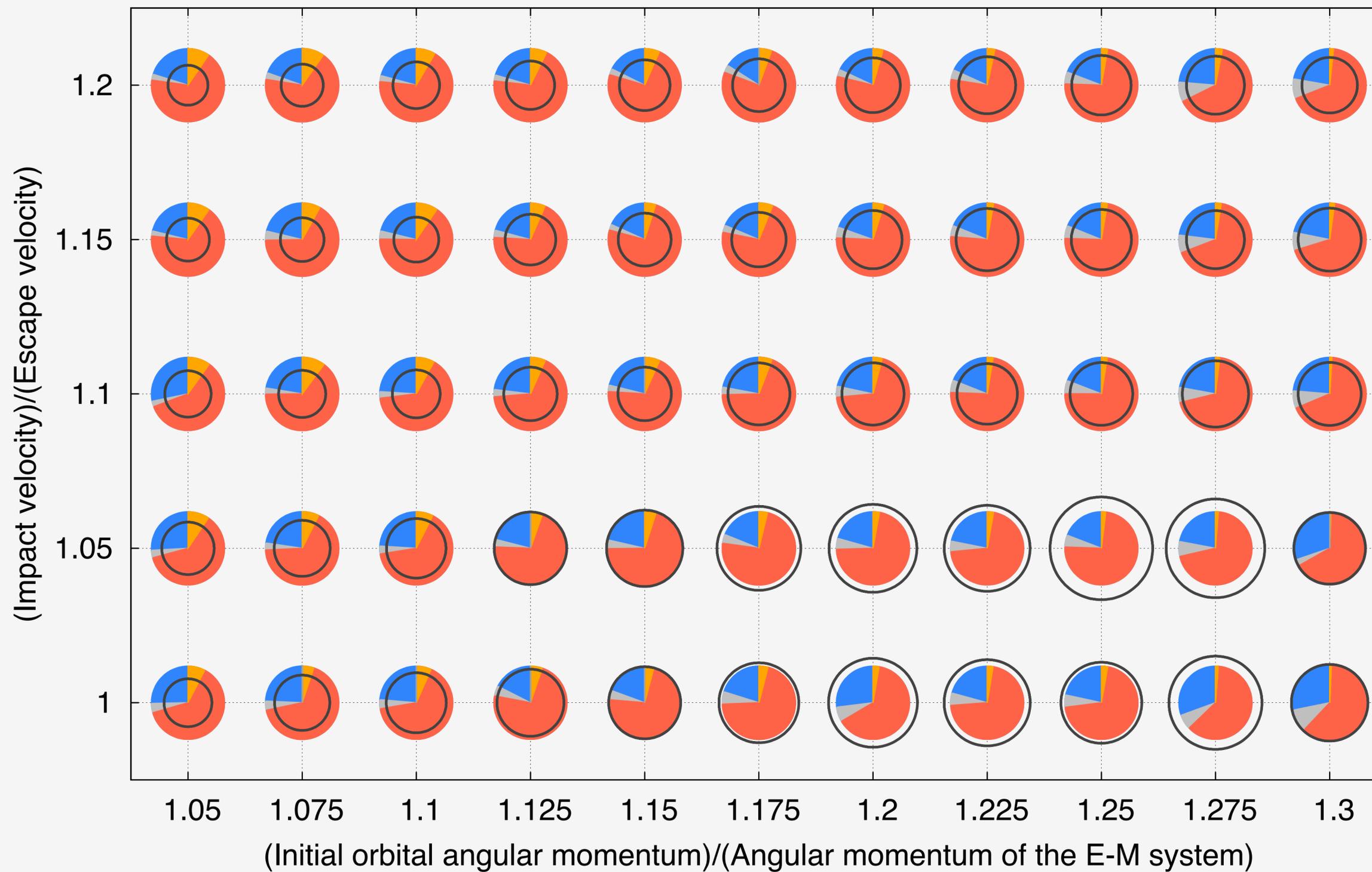
(3)MOから飛び出た円盤質量の割合が高い

(4)角運動量が現在の地球-月系とほぼ同じ

(5)円盤中の鉄の質量比が0.1以下

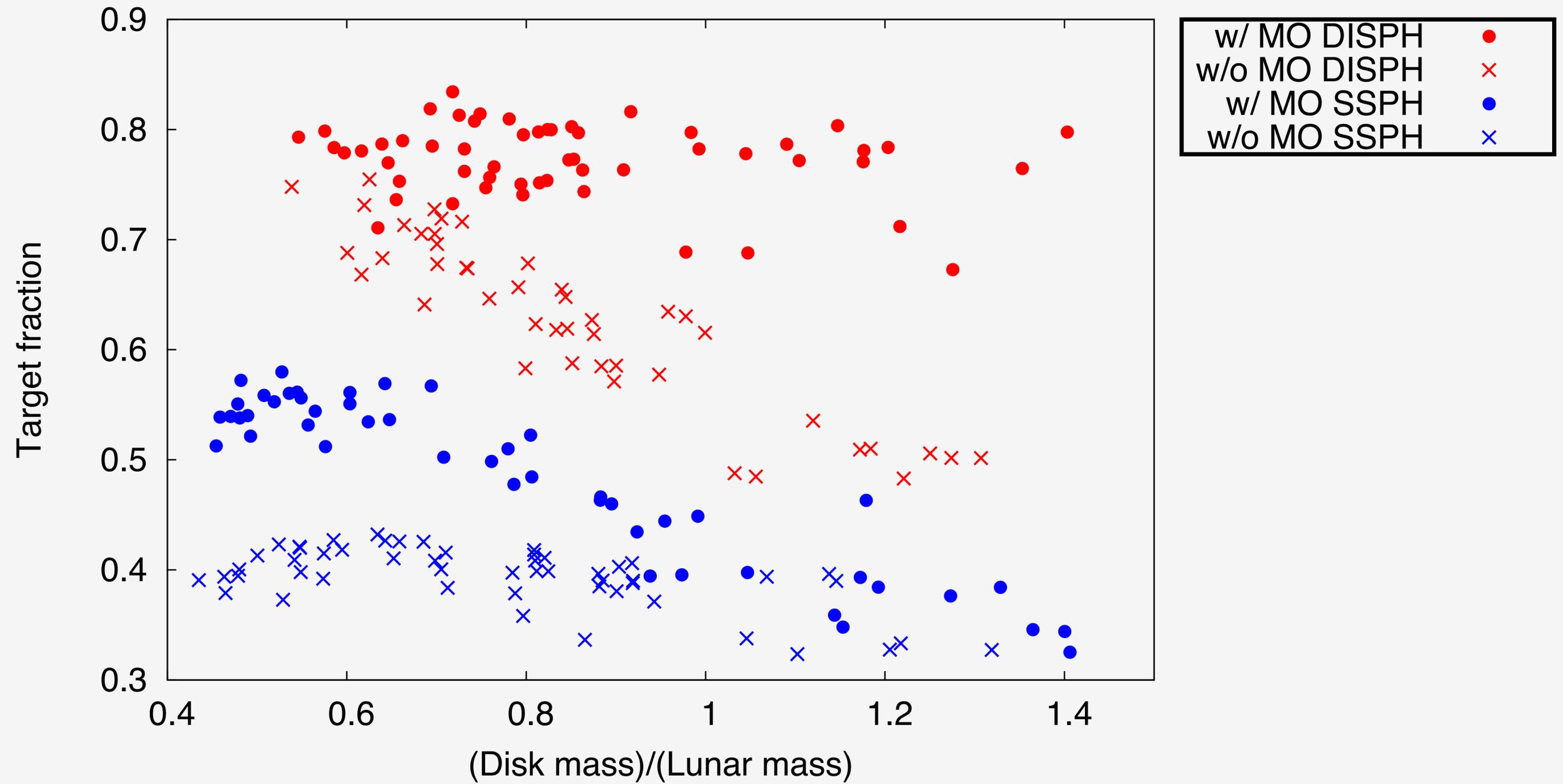
この内、(3)-(5)は全runで満たされていたので、(1)と(2)を同時に満たすかを見ていく。

# 数值計算結果

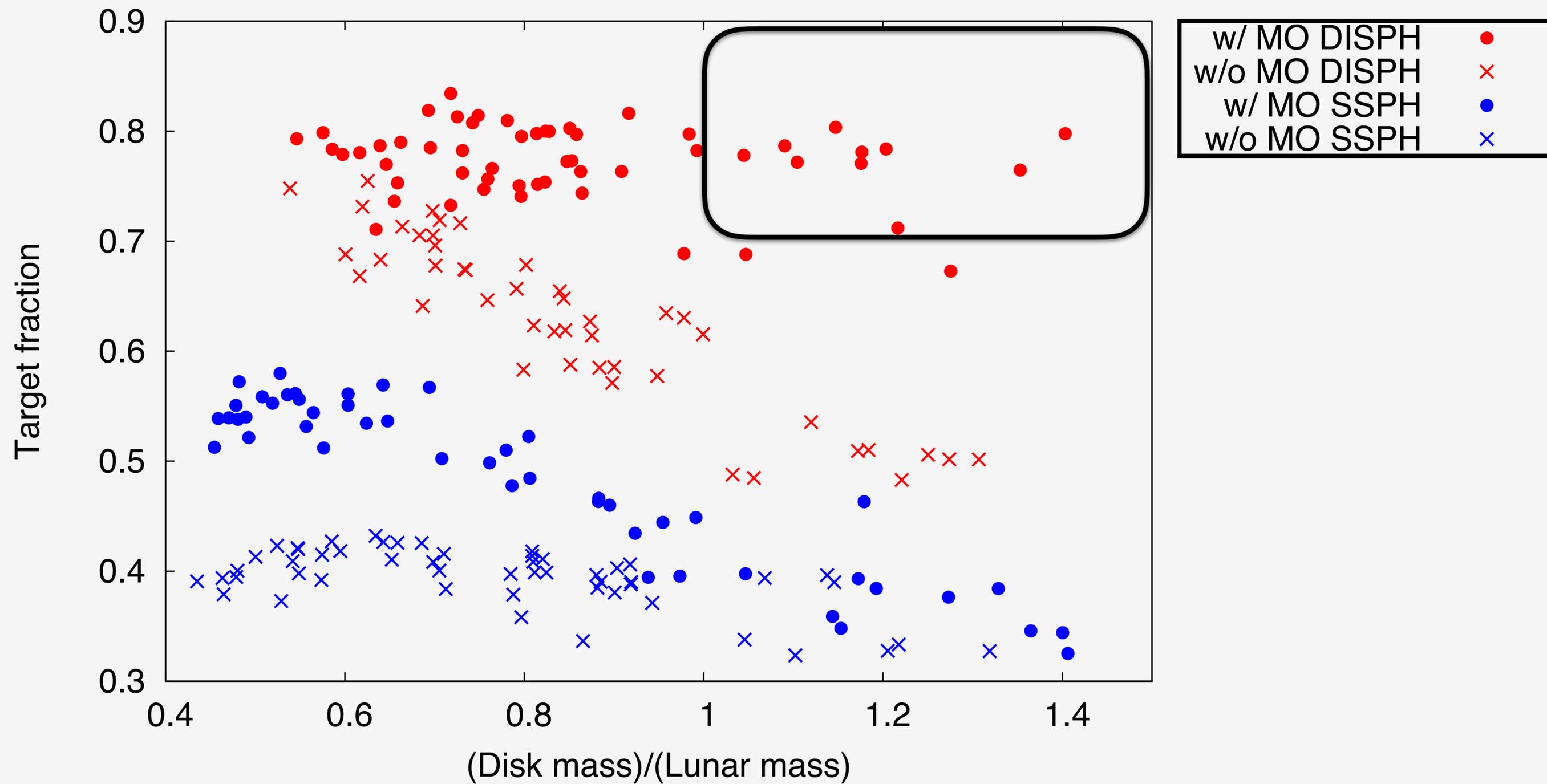




# 数值計算結果



# 数值計算結果



# 結論と今後

- ◆本研究では、マグマオーションを持った原始地球への巨大衝突の数値計算を行った。
- ◆結果、マグマオーションを持った場合と持たない場合では、原始地球からの割合が大きく異なる。力学的には特殊な事は考えていないため、衝突条件に関しては確率的に問題ない。
- ◆今後の課題 (の中からメジャーそうなのをピックアップ)
  - ・ 巨大衝突時にマグマオーションが存在していただける確率  
マグマオーションの寿命はそこまで長くないので、部分溶融などでも大丈夫か検証？
  - ・ 相転移  
M-ANEOSなど？にJK11のEoSを編入
  - ・ より重たい原子月円盤  
1.5-2.0 Moon massくらいの円盤ができると安心度が高い