

# タンデム惑星形成

戎崎俊一  
今枝祐輔  
理研

# 太陽系形成研究史

- **第一期:1960-1970:博物学**
  - 隕石の博物学
  - アポロによる月サンプル
- **第二期:1970-1990:物理・物質モデルの構築**
  - 物質モデル: Ringwood、Smith: 鉱物学
  - 物理モデル: Safronov-Kyoto: 力学、流体力学、熱力学
- **第三期:1990-2010:発見による混乱**
  - 観測
    - 系外惑星の発見→多様な惑星  
ホットジュピター、スーパーアースがある！

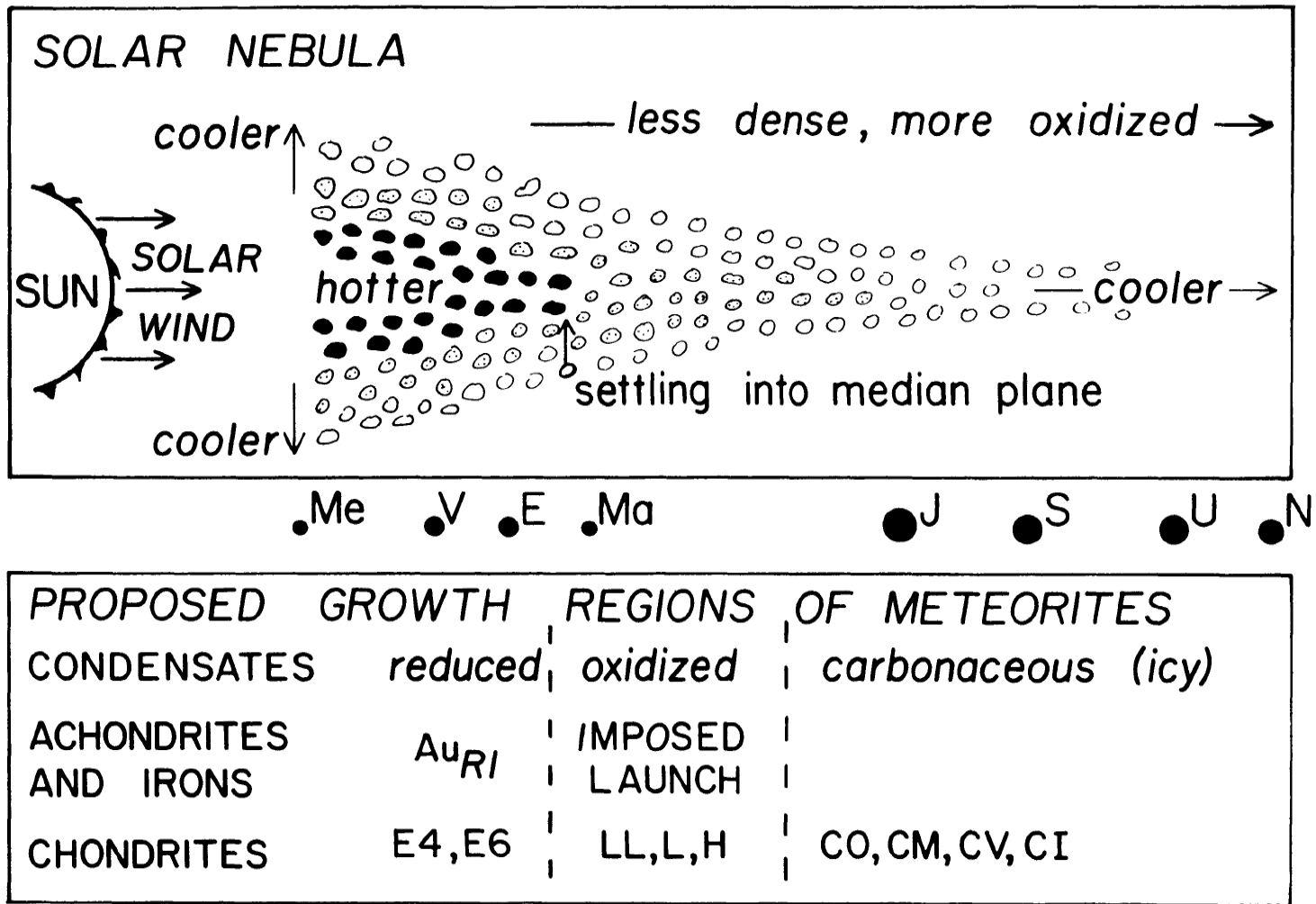
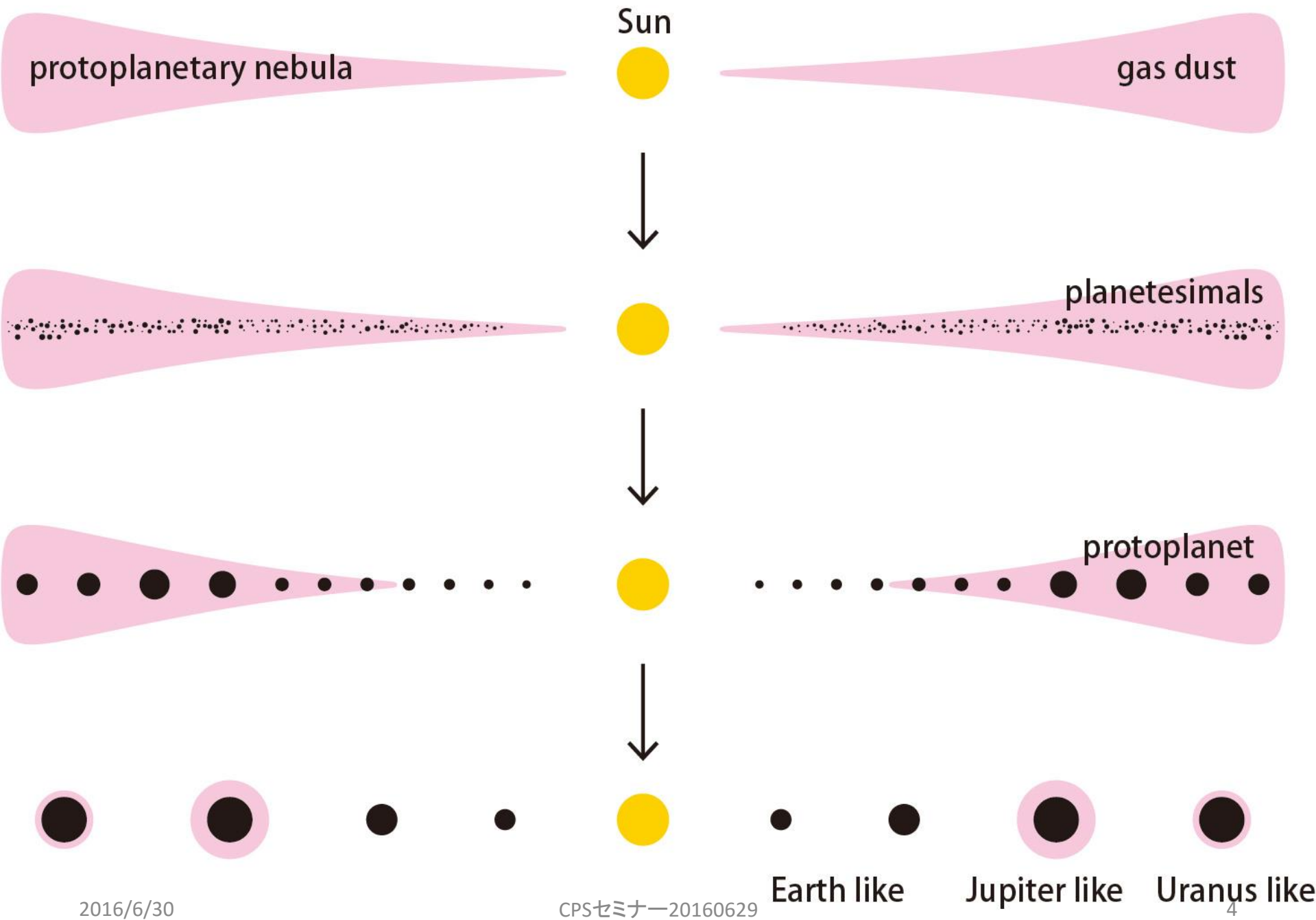
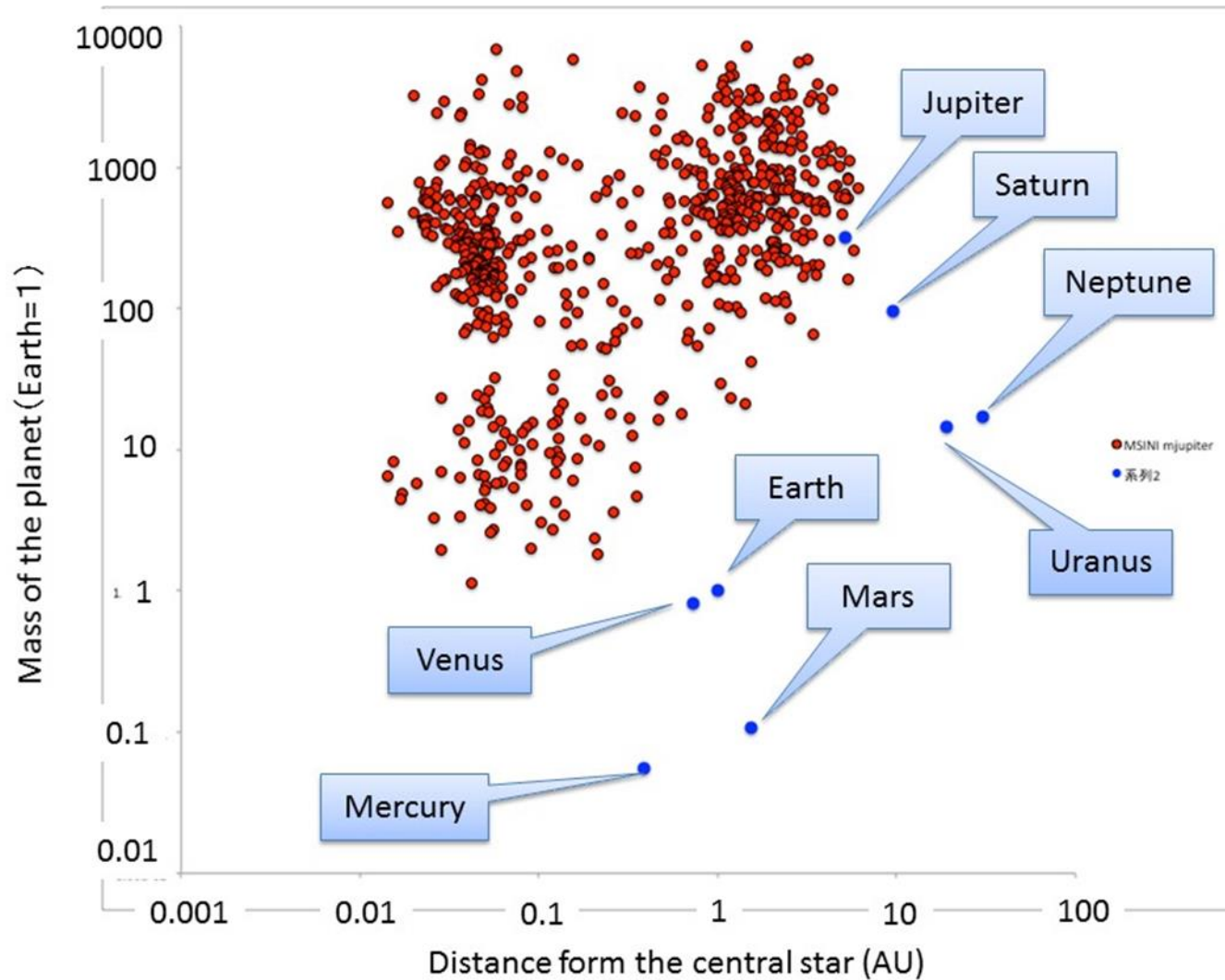


FIG. 4.—Proposed relation of meteorites to a solar nebula with monotonic variation of temperature and oxidation state. Meteorite symbols: Au aubrite, RI reduced iron (i.e., Si alloyed with Fe); OI oxidized iron (i.e., no Si dissolved in Fe), M mesosiderite, P pallasite, S shergottite, E eucrite, D diogenite, L lodranite, A angrite, U ureilite, N nakhlite, C chassignite, H howardite. Chondrite nomenclature from Wasson and Wetherill (1979, table 1).



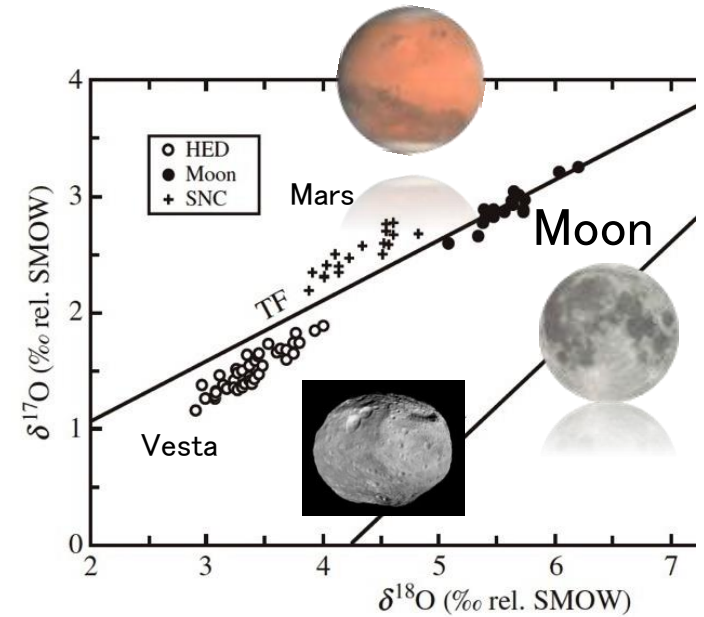
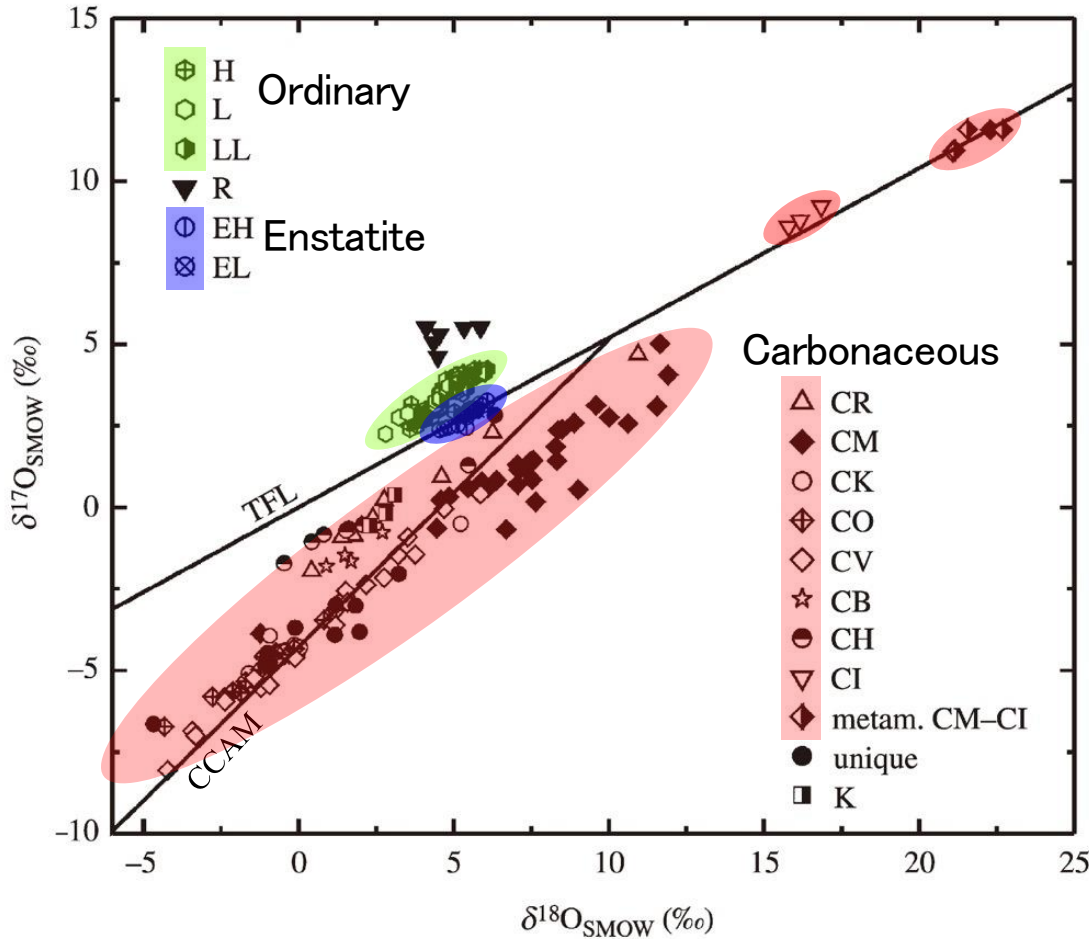
# 系外惑星の分布



# 太陽系形成研究史

- **第一期:1960-1970:博物学**
  - 隕石の博物学
  - アポロによる月サンプル
- **第二期:1970-1990:物理・物質モデルの構築**
  - 物質モデル: Ringwood, Smith 1982 : 鉱物学
  - 物理モデル: Safronov-Kyoto : 力学と熱力学
- **第三期:1990-2010:発見による混乱**
  - 観測
    - 系外惑星の発見→多様な惑星  
ホットジュピター、スーパーアースがある！
    - 大量の隕石超微量分析同位体データ  
→どう整理して理解したらいいのか？

# Oxygen isotope fractionation



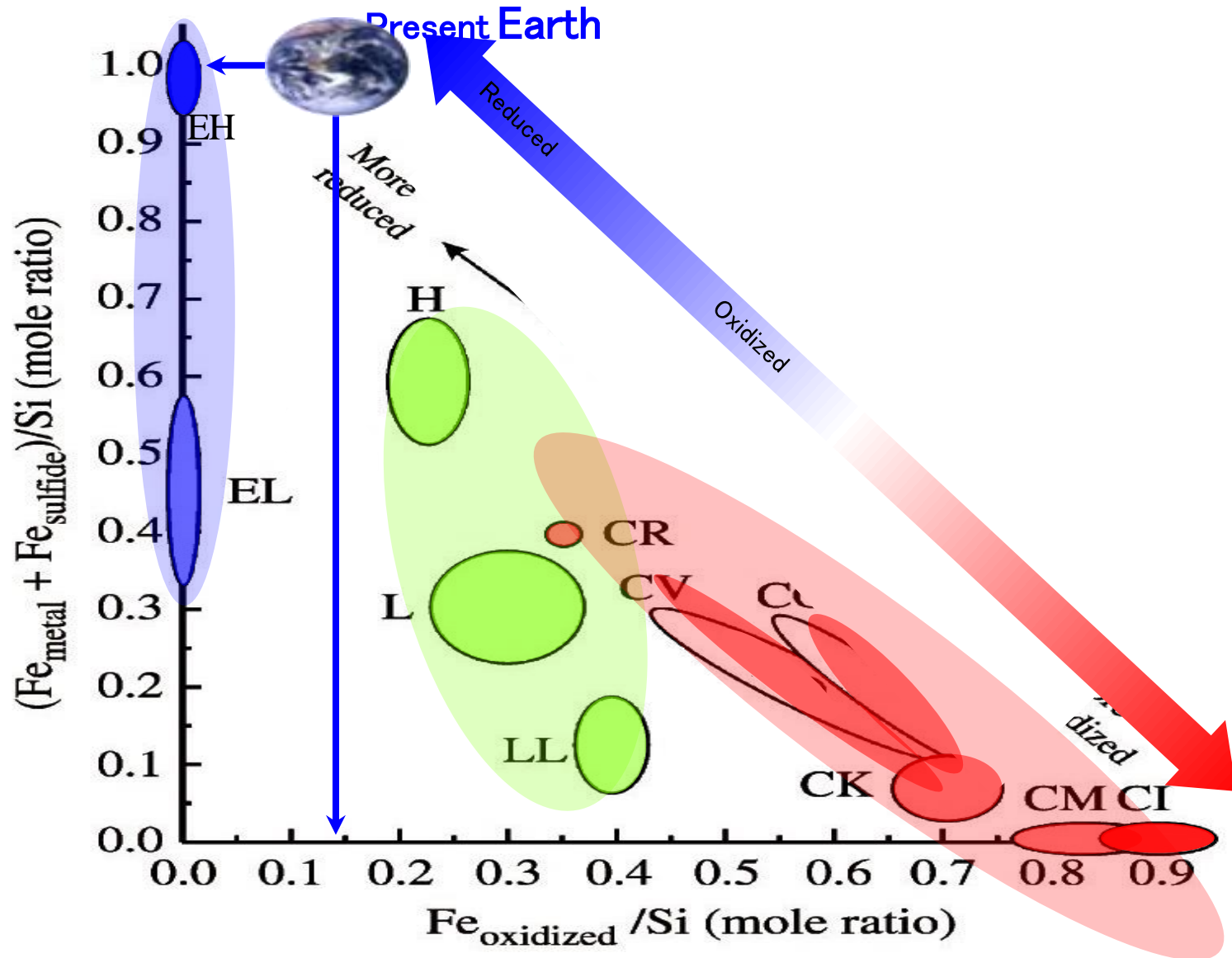
Chondrites

ass →	Carbonaceous							Ordinary			Enstatite		
Group →	CI	CM	CO	CR	CB	CH	CV	CK	H	L	LL	EH	EL
Petr. type →	1	1-2	3-4	1-2	3	3	3-4	3-6	3-6			3-6	
Subgroup →					CB <sub>a</sub> CB <sub>b</sub>		CV <sub>A</sub> CV <sub>B</sub> CV <sub>red</sub>						

Krot et al., in *Treatise on Geochemistry* 1.05, 83 (2005)

Clayton, in *Treatise on Geochemistry* 1.06 129 (2005)

# Dry and highly reduced Earth



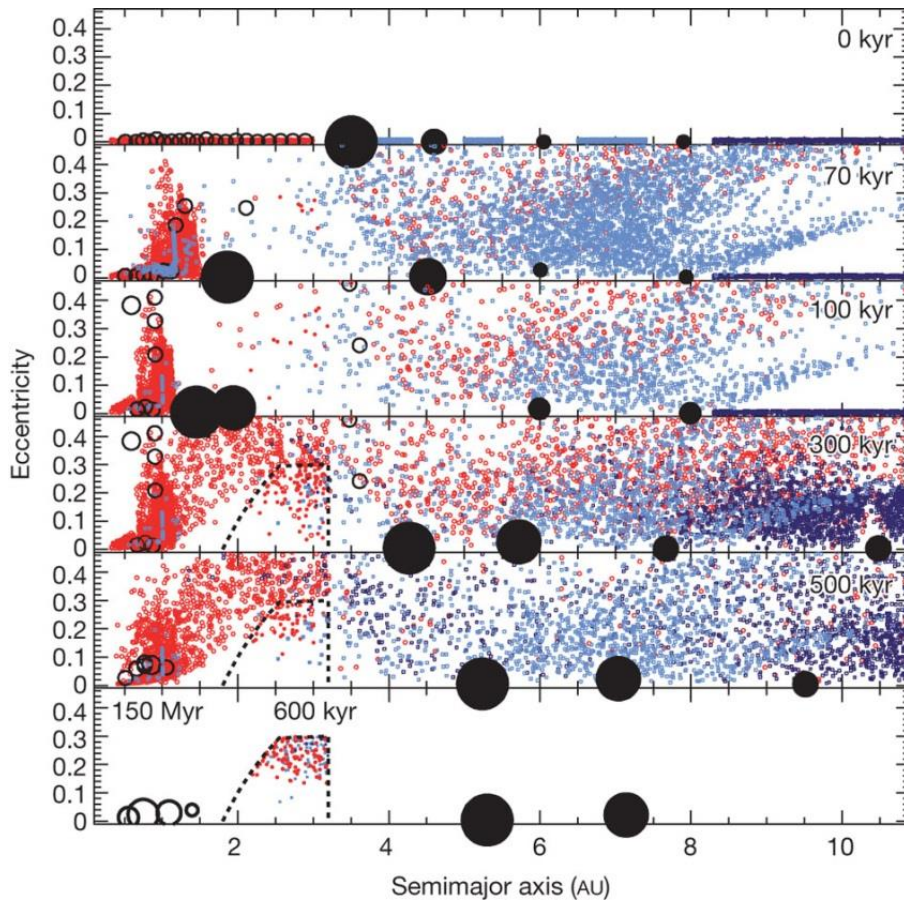


# 太陽系形成研究史

- **第一期:1960-1970:博物学**
  - 隕石の博物学
  - アポロによる月サンプル
- **第二期:1970-1990:物理・物質モデルの構築**
  - 物質モデル: Ringwood-Smith: 鉱物学
  - 物理モデル: Safronov-Kyoto: 力学と熱力学
- **第三期:1990-2010:発見による混乱**
  - 観測
    - 系外惑星の発見→多様な惑星系がある？
    - 大量の隕石超微量分析同位体データ  
→どう整理して理解したらいいのか？
  - 理論
    - 重力多体計算→Grand Tack; ad hoc初期状態の問題

# Grand tack model

## 間隙を作る



- 木星ができて落下  
~1AUが粒子を集める
- 粒子成長を加速する
- 土星が落下して二つの  
星が共鳴
- 二つの星が共鳴→外に  
戻る

# 太陽系形成研究史

- **第一期:1960-1970:博物学**

- 隕石の博物学
- アポロによる月サンプル

- **第二期:1970-1990:物理・物質モデルの構築**

- 物質モデル: Ringwood-Smith: 鉱物学
- 物理モデル: Safronov-Kyoto: 力学と熱力学

- **第三期:1990-2010:発見による混乱**

- 観測

- 系外惑星の発見→多様な惑星系がある
- 大量の隕石超微量分析同位体データ  
→どう整理して理解したらいいのか？

合理的に多様な初期条件

合理的なデータ整理指針

- 理論

- 重力多体計算→Grand Tack: ad hoc初期状態
- 磁気回転不安定→多次元MHD計算で理解進む  
→固体粒子への影響？

合理的な初期条件設定

# 新しい惑星形成モデルの構築

➤ 多次元の一気通貫シミュレーションはまだ無理

**多数の物理過程が複雑に絡み合い**

丁寧にまず解きほぐす

**円盤全体を統一的に扱う**

➤ **一次元・定常・降着円盤モデル：磁気乱流**

– 磁気回転不安定

– 粒子成分の成長と移動：ガス（乱流）との相互作用

– 多孔性粒子集積

– 重力不安定

**重力多体シミュレーションに合理的な初期状態**

# 式と仮定：ミニマルエッセンシャル

## • 1D 降着円盤

- 定常状態 ガス降着率  $\dot{M}$  一定

$$\dot{M} = 6\pi r^{1/2} \frac{\partial}{\partial r} (\Sigma \nu r^{1/2}) \quad \nu = \alpha c_s H$$

- 自己加熱:  $T_m^4 = \frac{3\dot{M}\Omega_K}{8\pi\sigma} \left( \frac{3}{4}\tau + \frac{\sqrt{3}}{4} \right) + T_r^4$ ,  $\tau = \kappa\Sigma/2$

- 磁気回転不安定

$$\Lambda = \frac{2c_s H}{\eta\Omega_K\beta_z}, \quad \eta = 2.3 \times 10^3 \left( \frac{T}{300 \text{ K}} \right) x^{-1}$$

$$\alpha_{\text{act}} = 0.01 (\Lambda > 1) \quad \alpha_{\text{inact}} = 0.003 (\Lambda < 1)$$

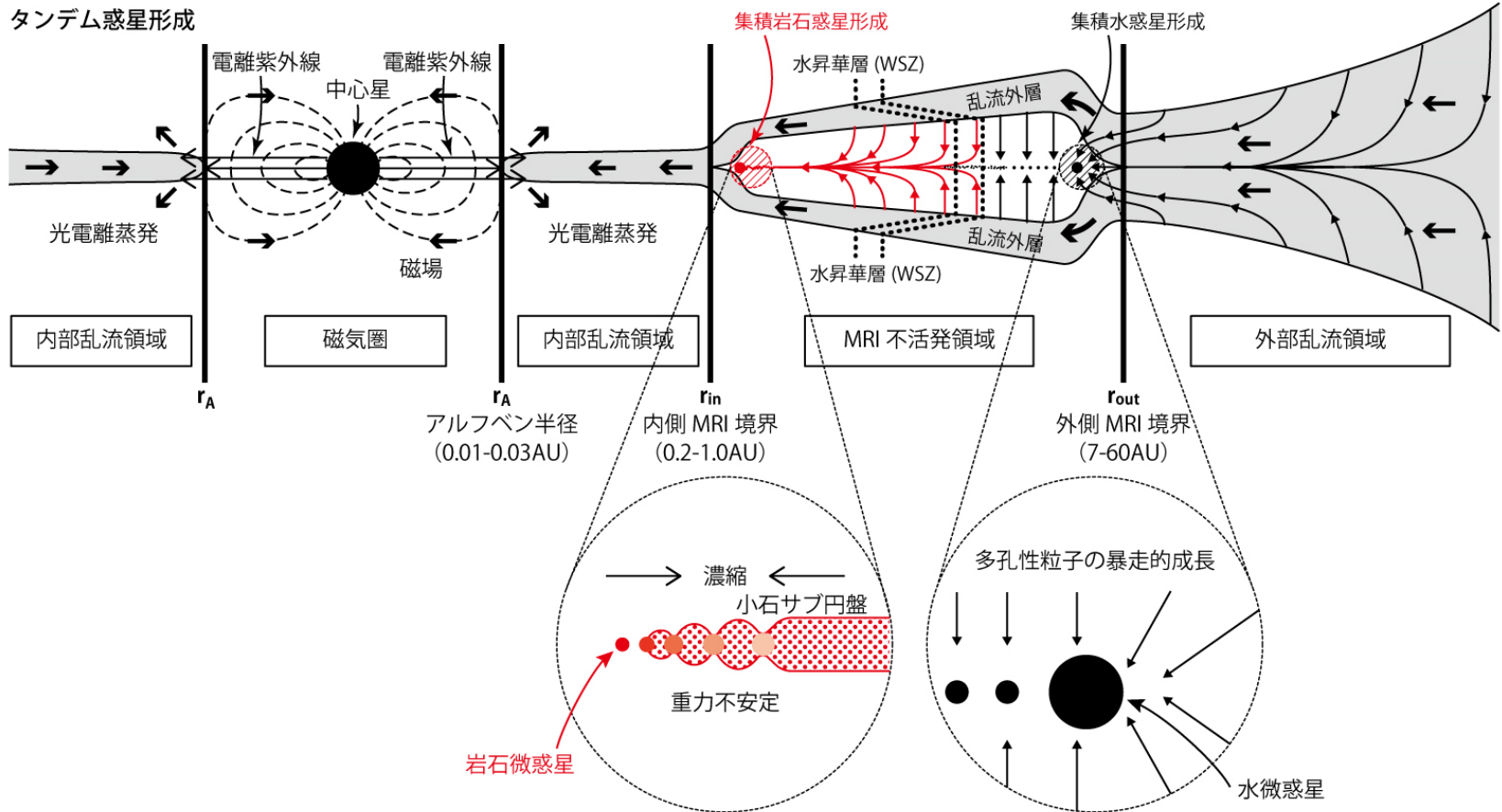
- 電離：銀河宇宙線、恒星宇宙線、放射性元素、熱電離
- 再結合：粒子表面とガス

- 磁場の拡散

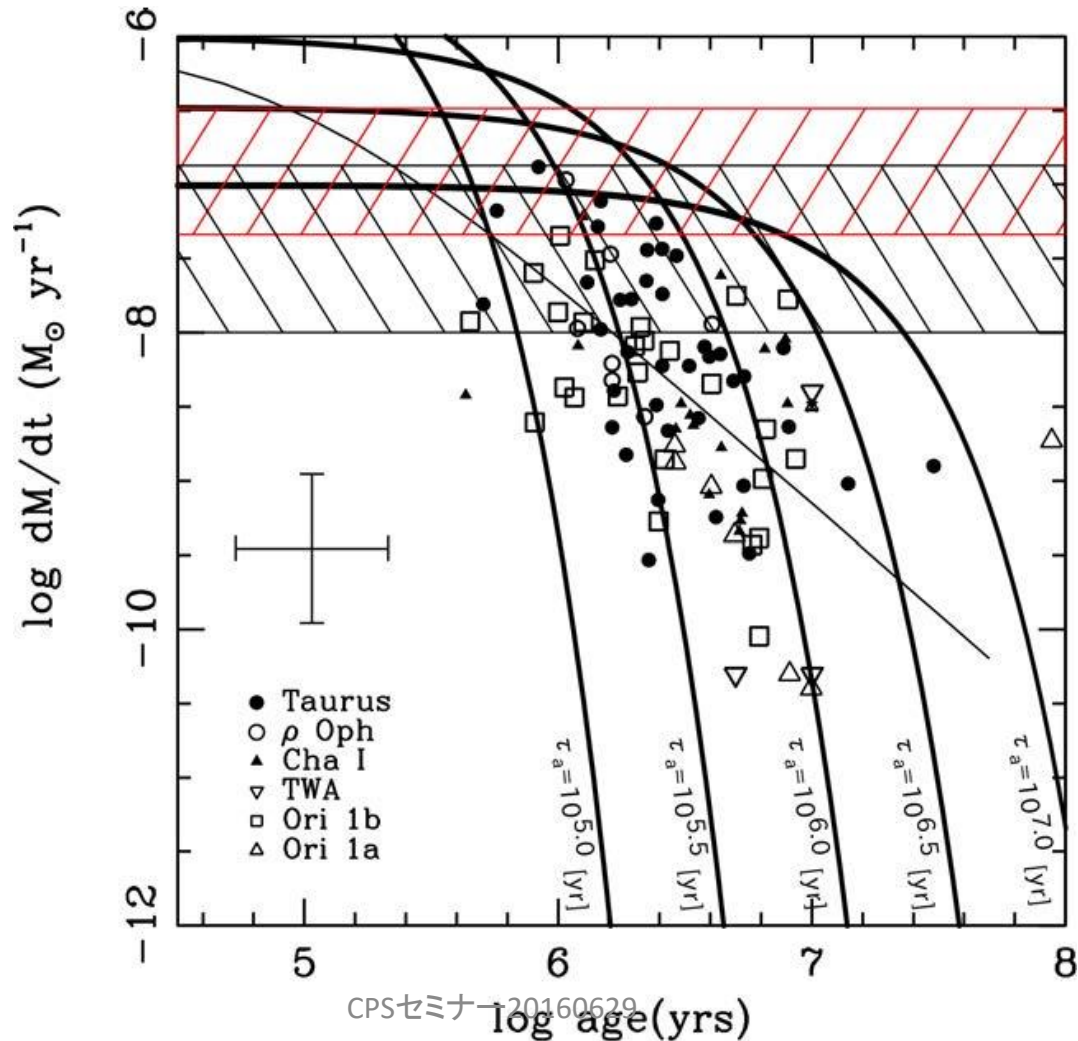
$$d\ln B_z / d\ln r = -2 / (1 + D) \quad D = (8\pi\xi/3)(2/\alpha\beta_z)^{1/2}(r/H)$$

- 恒星磁場によるトランケーション: Alfvén Radius

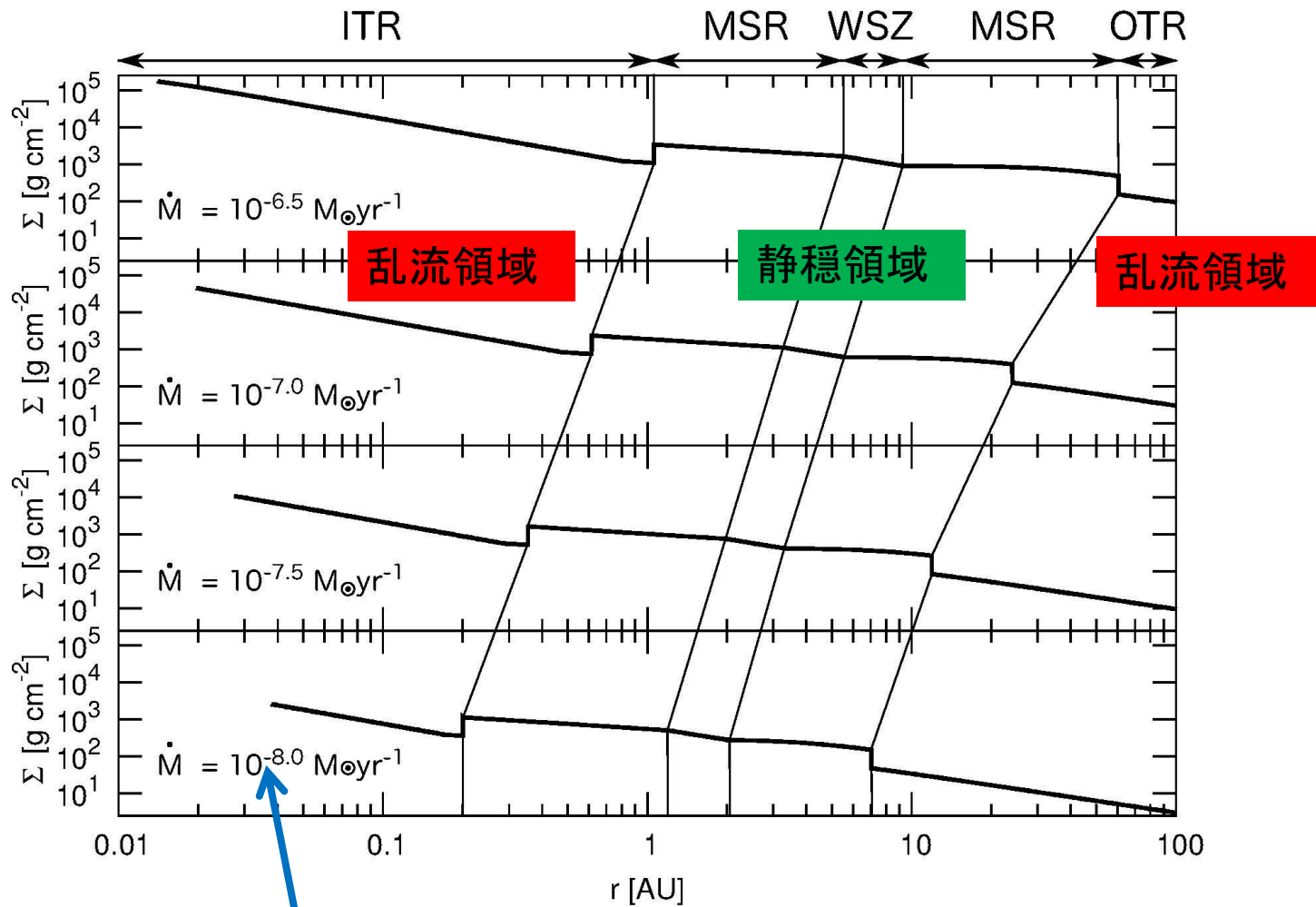
# タンデム惑星形成



# 原始星の年齢と降着率



# 結果：柱密度分布

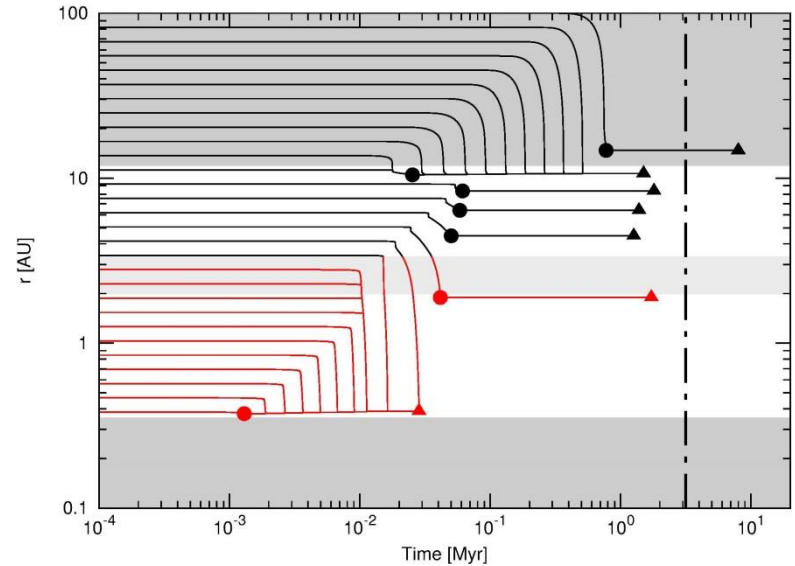
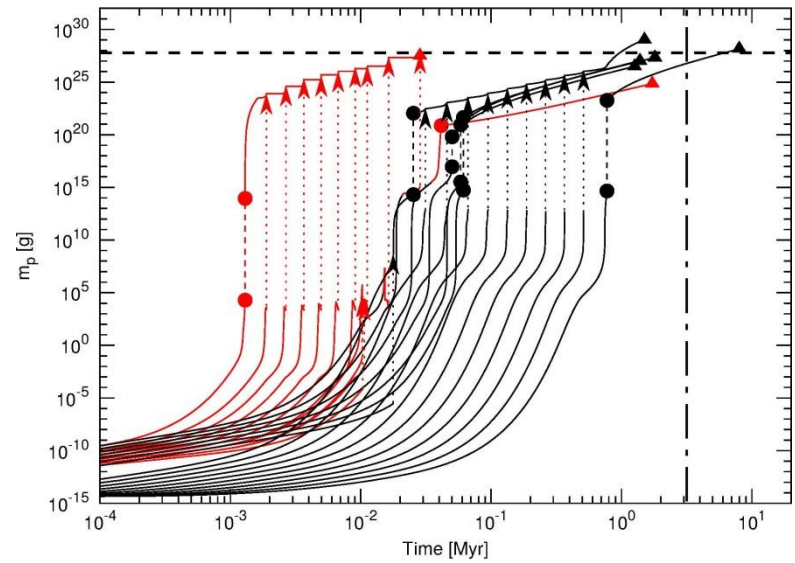
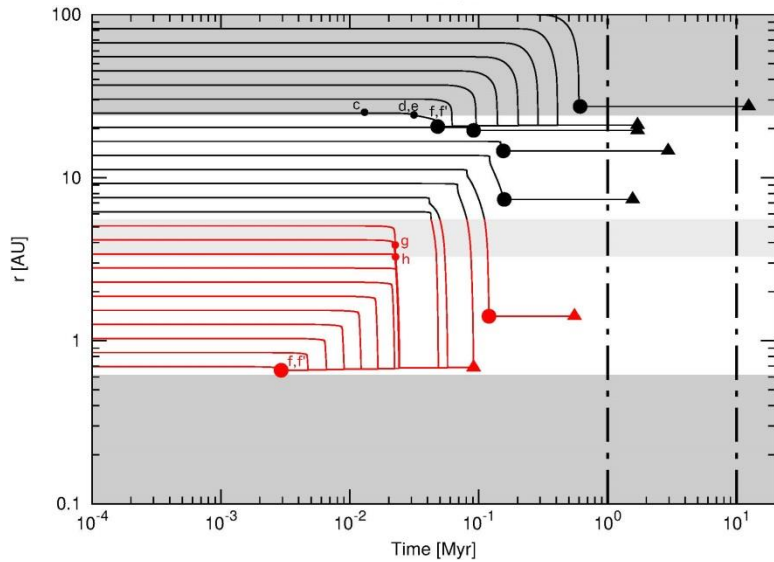
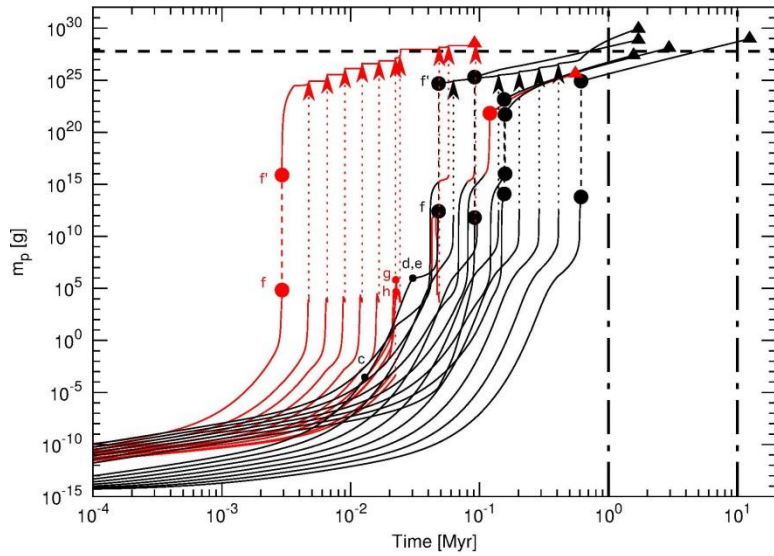




# 円盤における粒子の成長と移動

- ラグランジュ超粒子による記述
  - 一質量近似: 平均質量の粒子で代表する
  - 衝突による付着成長と破壊
    - 氷領域においては多孔性粒子成長
  - 半径方向( $r$ )と垂直方向( $z$ )への移動
    - ガスとの相互作用: ドリフトと沈降
  - 乱流による粒子の巻き上がり
    - MRI乱流
    - 小石サブ円盤におけるシア不安定
  - 小石サブ円盤の重力不安定 → 微惑星
  - 微惑星の成長
    - 小石降着

# タンデム円盤内の粒子成長



2016/6/30

$$\dot{M} = 10^{-7.0} \text{ Ms/yr}$$

CPSセミナー20160629

$$\dot{M} = 10^{-7.5} \text{ Ms/yr}$$

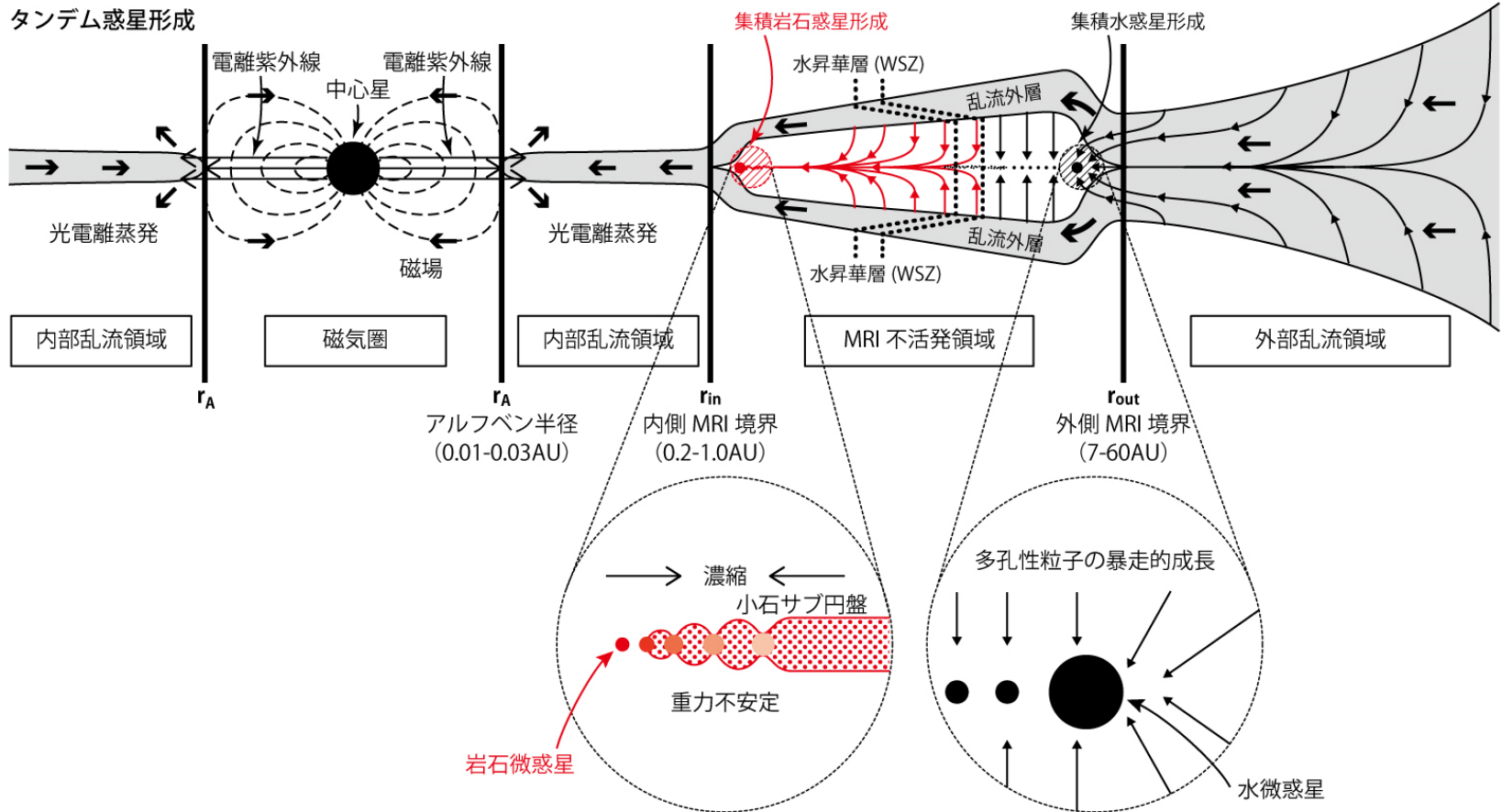
## 外側の境界~5-30AU

- 水の昇華領域の外
- 多孔性氷粒子  
低密度 $\sim 10^{-5}-10^{-4} \text{ g cm}^{-3}$
- 非常に低速の衝突  
→メートルサイズの困難解消
- 粒子がガスとデカップル
- サブ円盤の重力不安定  
→氷微惑星

## 内側の境界 (0.3-1AU)

- 円盤の自己加熱  
 $T \sim 1300\text{K}$   
←Na、Kの電離
- 岩石粒子の集積  
動径ドリフト速度 $\sim 0$
- 粒子がガスとデカップル
- サブ円盤の重力不安定  
→岩石微惑星

# タンデム惑星形成



# どんな惑星系ができそうか？

## 1. 2-5AUに**粒子成分の間隙**

- 二つの惑星形成領域
- 氷微惑星と岩石惑星が**完全に分離**  
系外惑星の分布に間隙

## 2. **大きな少数の惑星**を作る

- 惑星形成に**小石が定常的に供給**→速い成長
- 巨大衝突は抑制的

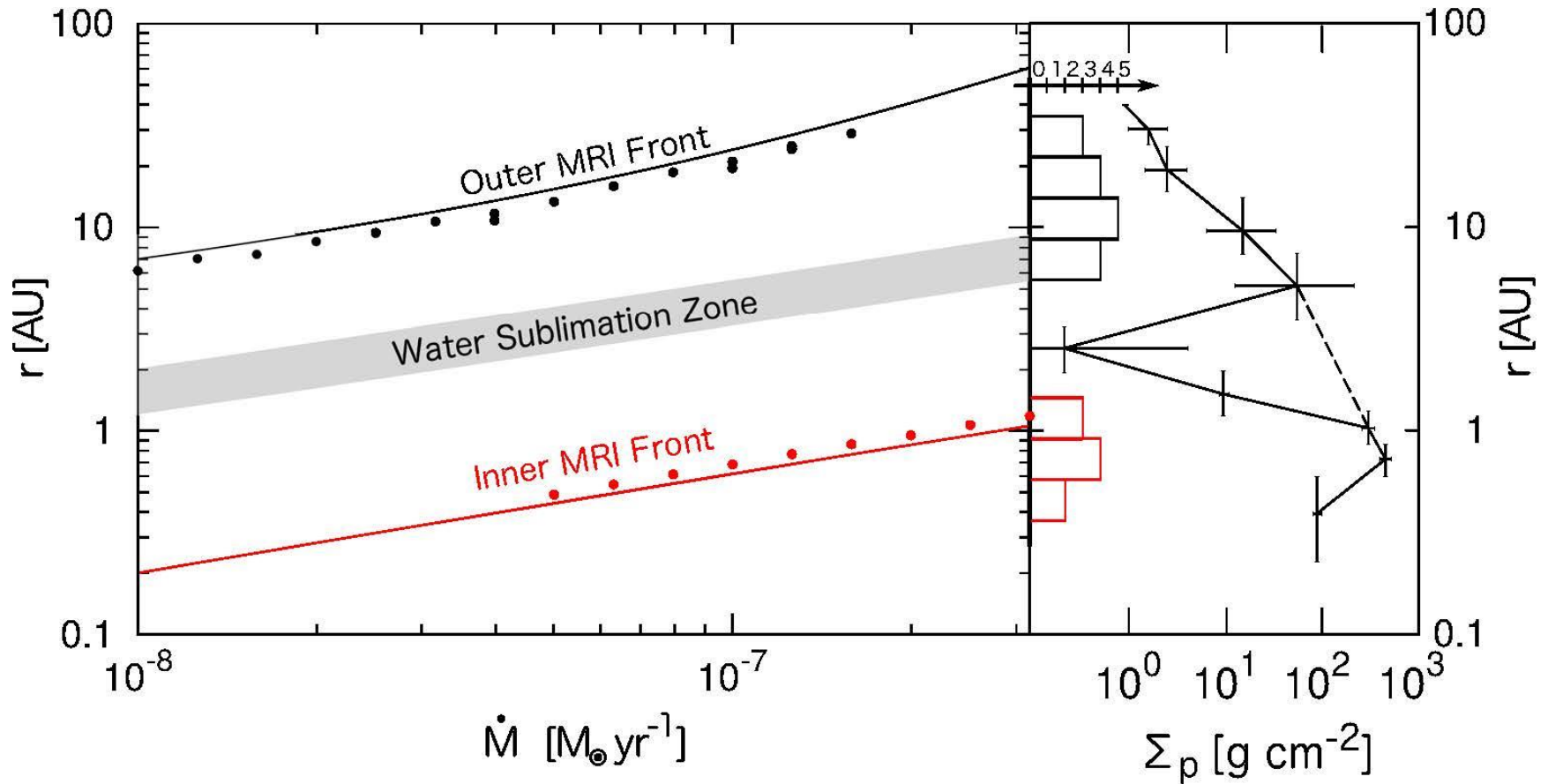
## 3. 惑星形成期

- 岩石惑星： $\dot{M} = 10^{-6.5} - 10^{-7.5} \text{ Ms/yr}$  (1Myr-10Myr)
- 氷惑星： $\dot{M} = 10^{-7.0} - 10^{-8.0} \text{ Ms/yr}$  (3Myr-30Myr)

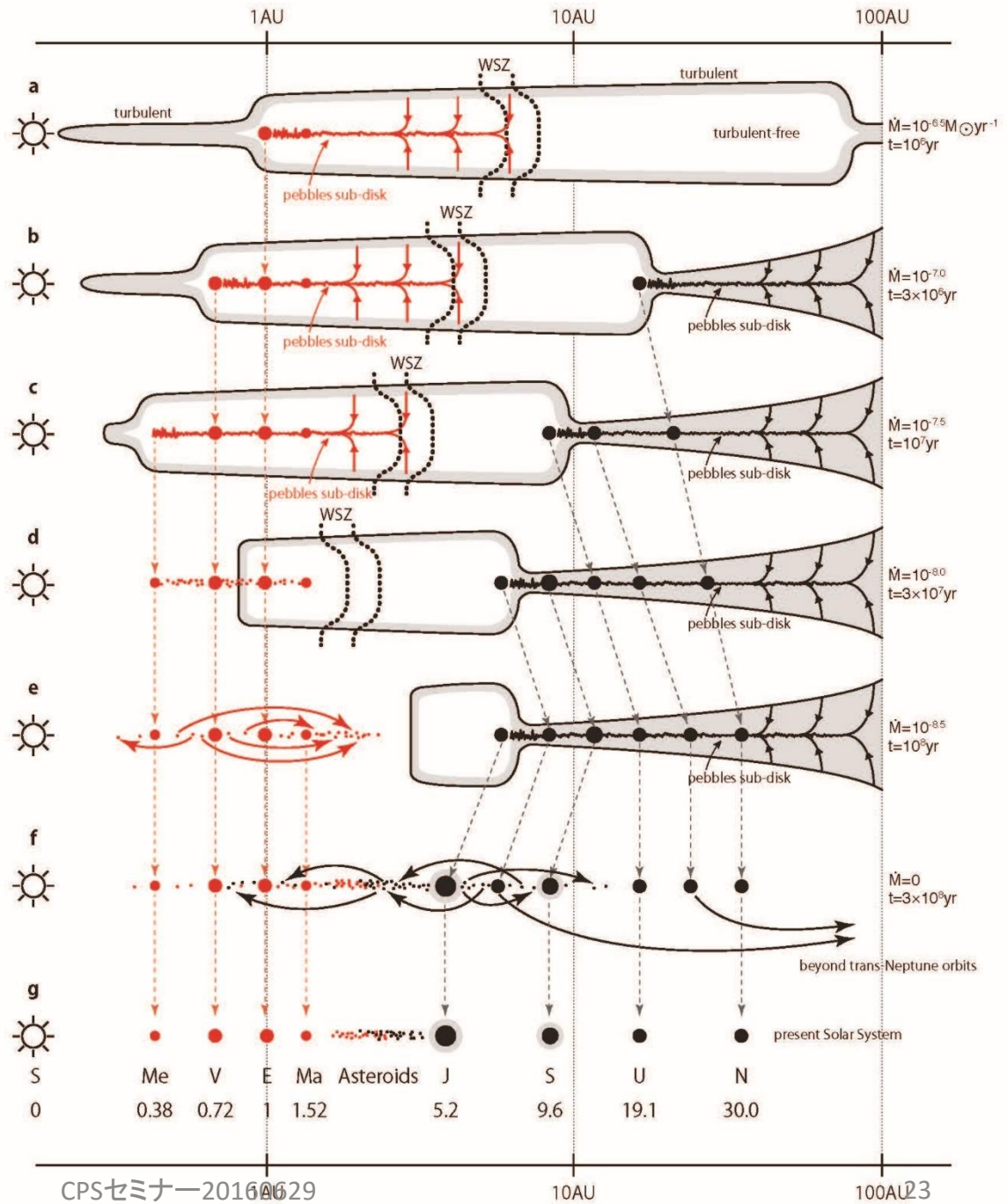
## 4. 岩石惑星形成領域：T $\sim$ 1300 K

- **揮発成分を完全に失う**
  - 岩石惑星は大気・海洋成分なしで誕生
  - 水は後から補給しなければならない

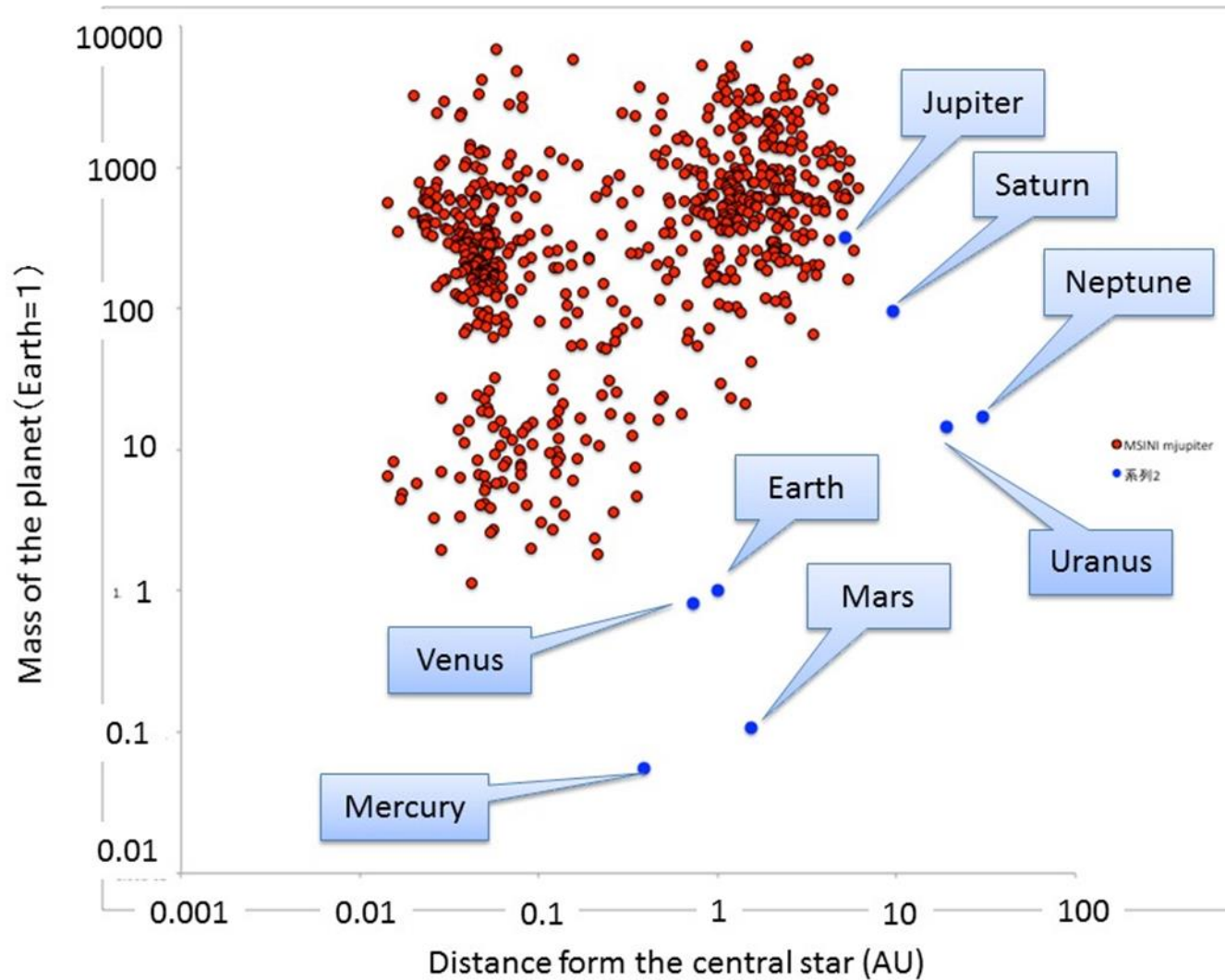
# タンデム惑星形成



# 惑星形成シナリオ

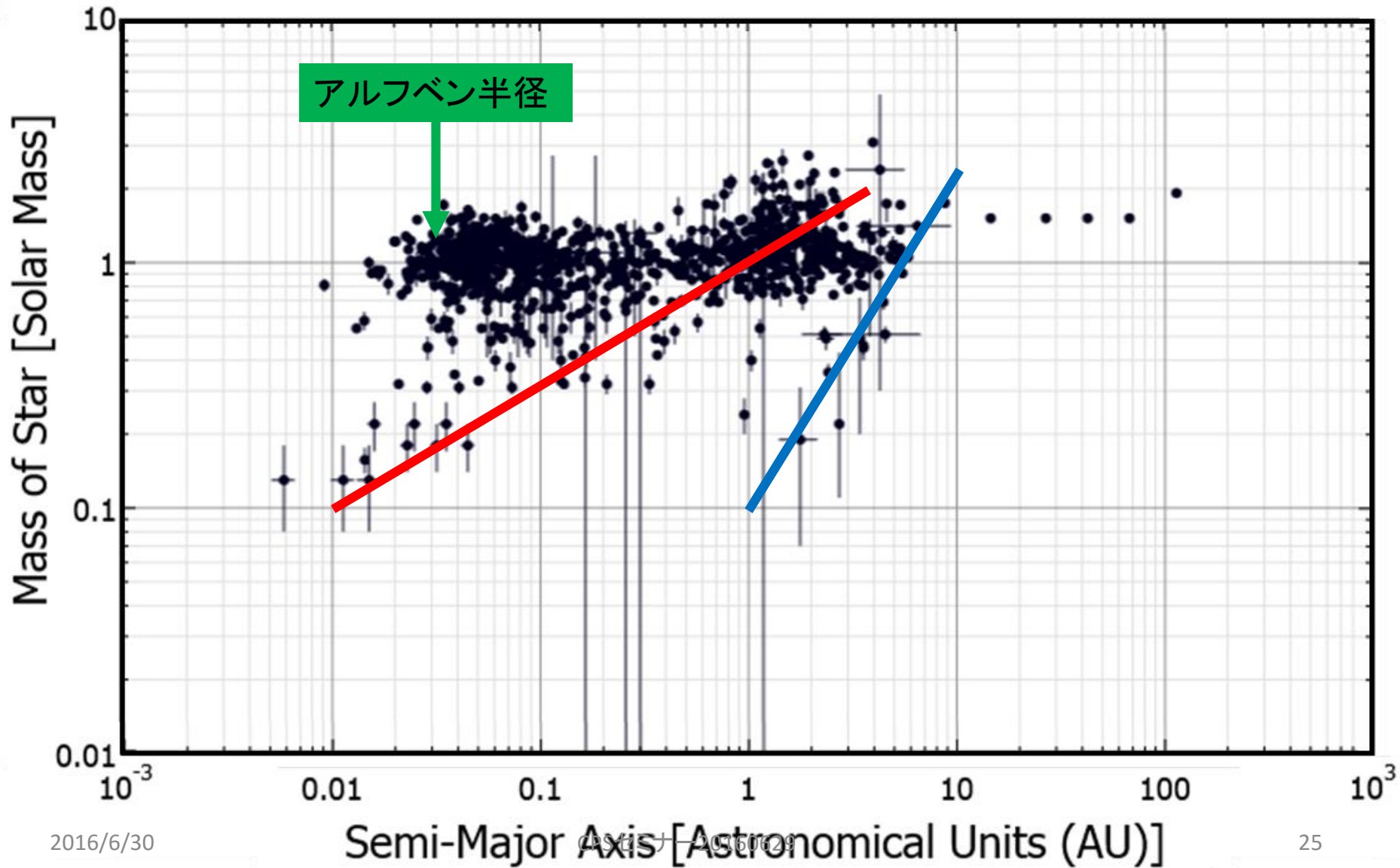


# 系外惑星の分布





# 系外惑星分布



# 結論

- **標準モデルに新物理を導入**

磁気回転不安定 多孔質粒子理論 固体粒子の移動

- 降着率をパラメータとして定常降着円盤全体を解く

- **微惑星・惑星のタンDEM形成**

- 外側の境界で氷微惑星

- 内側の境界で岩石微惑星

- 大気・海洋なしで生まれる

地球型惑星の揮発成分欠乏と整合的(Albarede et al. 2009)

→表面固化後、大気・海洋成分を付加する必要がある

- 惑星分布に間隙：小惑星帯

- 外部領域からの「小石」の定常供給

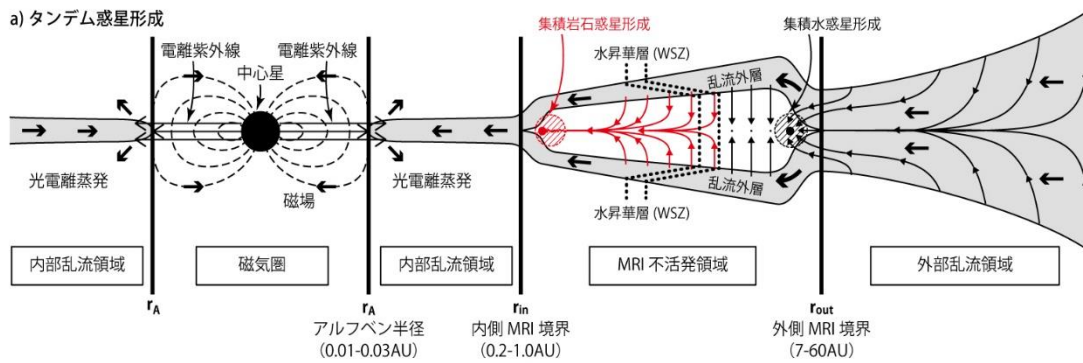
- **系外惑星の多様性**

- タンDEM惑星形成→太陽系

- 分散惑星形成（弱い磁場）→高離心率惑星

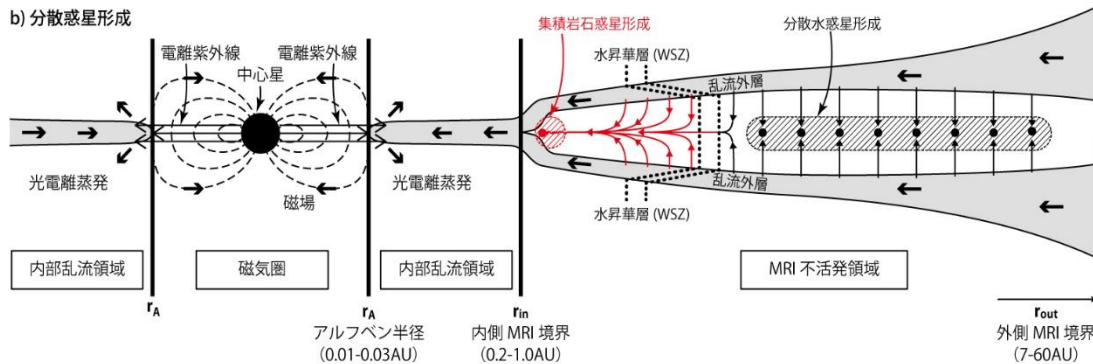
- シングル惑星形成（高電離率）→ホットジュピター、スーパーアース

a) タンデム惑星形成



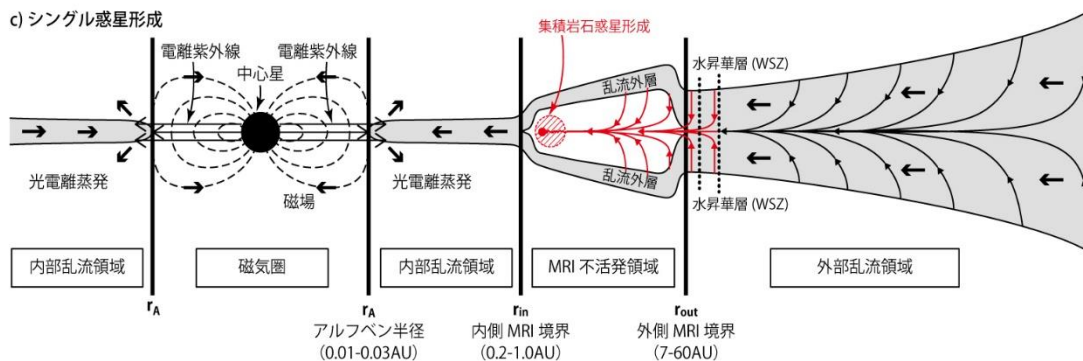
# タンデム惑星形成 太陽系

b) 分散惑星形成



# 分散惑星形成 弱い磁場 高離心率惑星

c) シングル惑星形成



# シングル惑星形成 強い宇宙線 Hot Jupiters Super Earths

← ガスの流れ  
← 固体粒子の動き

# 今後

- **大規模シミュレーションへの準備**

- 粒子の成長と移動 小石サブ円盤の重力不安定 惑星移動と成長
- N体計算への**合理的 (ad hocでない) 初期条件**  
→**世界最大規模のシミュレーションの実行**

- **物質科学的な証拠との突合せによる検証**

- コンドリュールとCAIの形成
  - **岩石惑星形成の副産物**
- 惑星・隕石の化学組成と同位体比の議論
- 太陽系・小惑星帯の**化学組成累帯構造**→小惑星観測と探査へ
- **ABEL仮説**
  - 岩石惑星は大気・海洋成分なしで誕生(45.6億年)
  - 後にCIコンドライト爆撃で大気・海洋が  
ゆっくり (43.7-42.0億年前) 誕生

- **生命誕生モデルに対する初期条件**

- CIコンドライトの**ABEL爆撃**：1.5億年継続  
大気・海洋の誕生→**冥王代大気・海洋の進化**
- U、Th、P、Kの表面地殻への濃集
- 自然原子炉→**原子炉間欠泉での生命誕生**
- 初期海洋の成分：**強酸・高塩分濃度の海**
  - 生命初期進化を規定

→**生命の発生条件**

# 大規模シミュレーション

- 多孔質性粒子の衝突
  - 大きな粒子の極限で臨界速度？
- 粒子円盤の重力不安定→微惑星
- 重力多体計算
  - 円盤ガスとの相互作用トルク→惑星移動
  - 粒子集積、特に小粒子→ガスとの相互作用
- 微惑星・原始惑星同士の衝突
  - 普通インパクト、ジャイアントインパクト

# バックアップ

# 惑星移動トルク

