ガス惑星本体の形成過程と内部組成

堀　安範

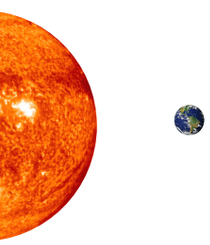
国立天文台　理論研究部

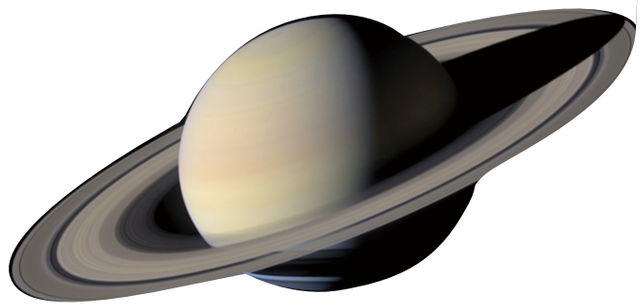
2012/8/22-24 衛星系形成小研究会@小樽

太陽系のガス惑星：木星・土星

■ **ガス惑星** (巨大ガス惑星，木星型惑星)

水素(~70%)・ヘリウム(~20%)を主成分とする重いガスの惑星

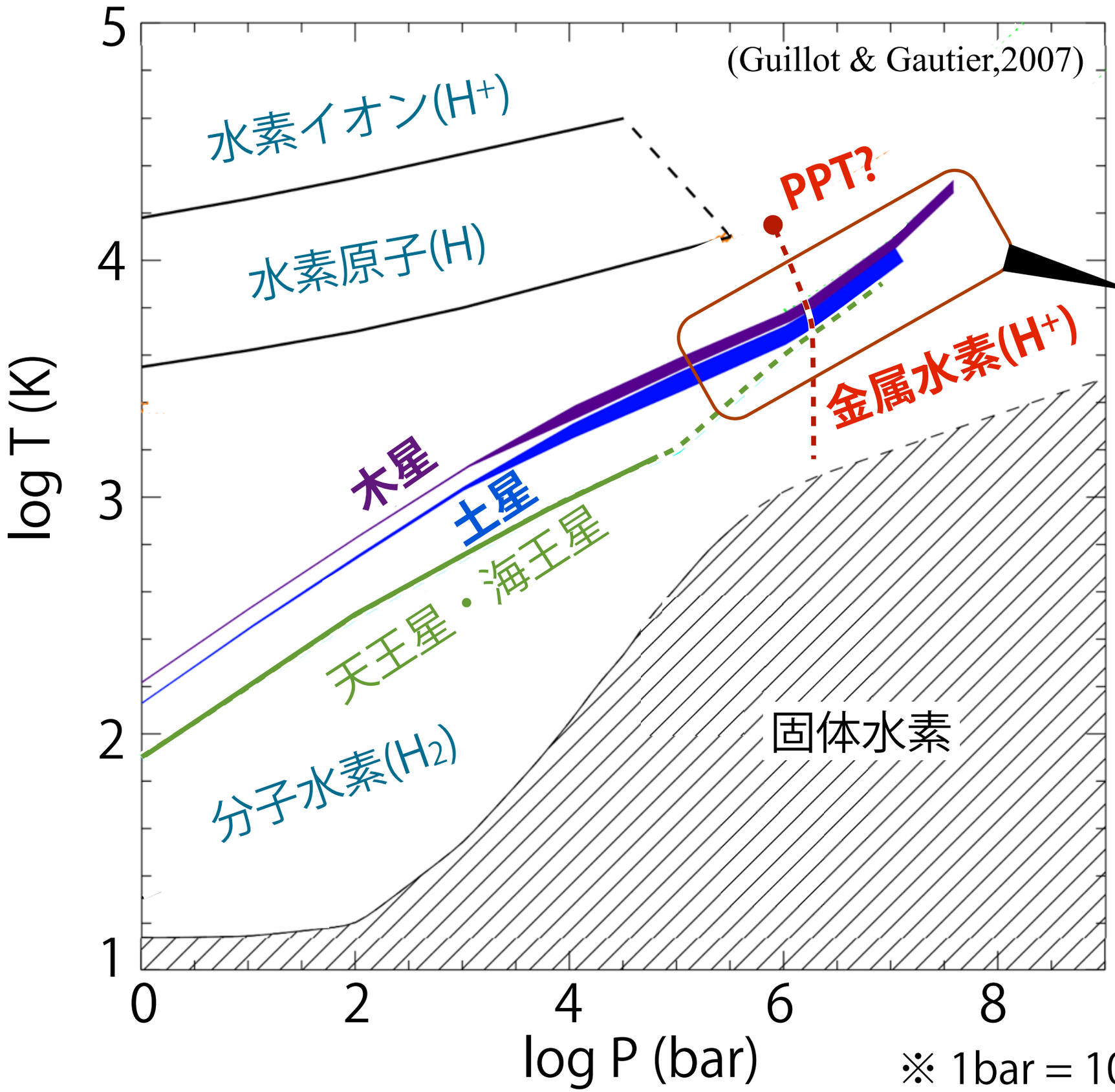




木星：$\sim 317 M_\oplus$(地球質量)@5.2AU

土星：$\sim 95 M_\oplus$ @9.5AU

巨大惑星の内部と水素の相図



ガス惑星の内部
→ **高圧物性**が鍵

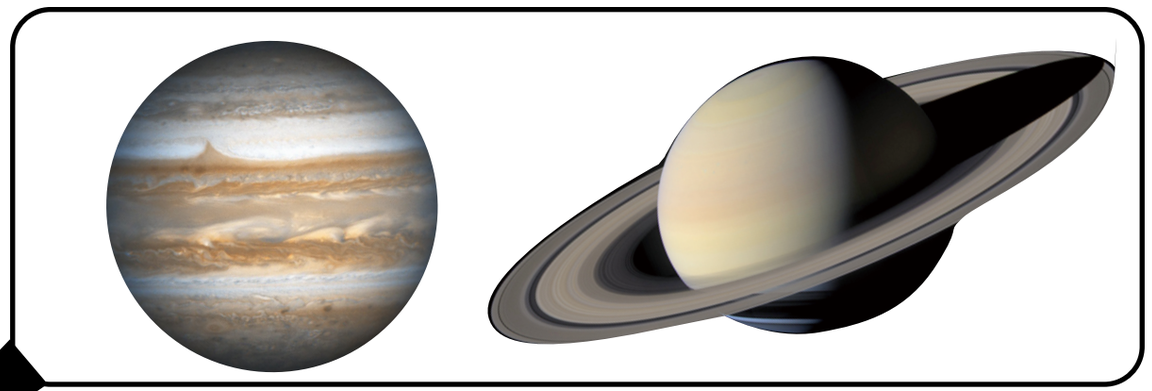
P ≧ 0.1Mbar(10GPa)
T ≧ 4000K

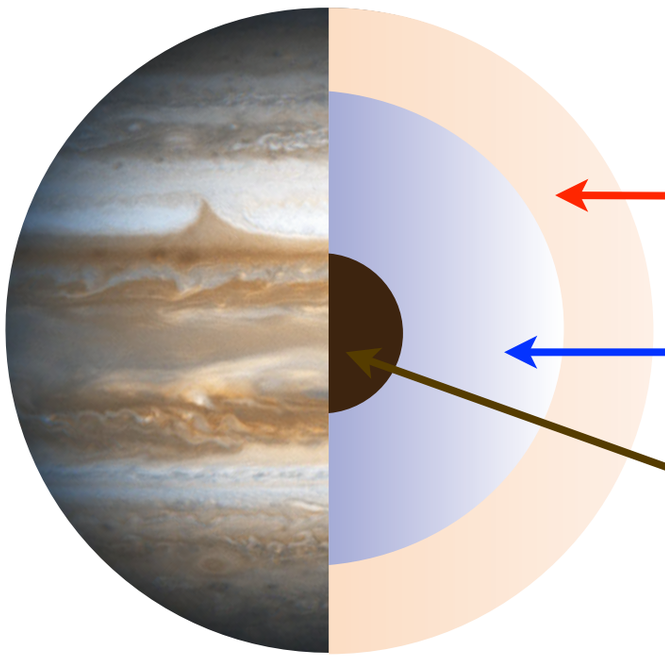
※ 1bar = 10^5Pa

太陽系のガス惑星：三層構造

■ **ガス惑星 (巨大ガス惑星，木星型惑星)**

水素(~70%)・ヘリウム(~20%)を主成分とする重いガスの惑星





エンベロープ(外層)

分子水素層

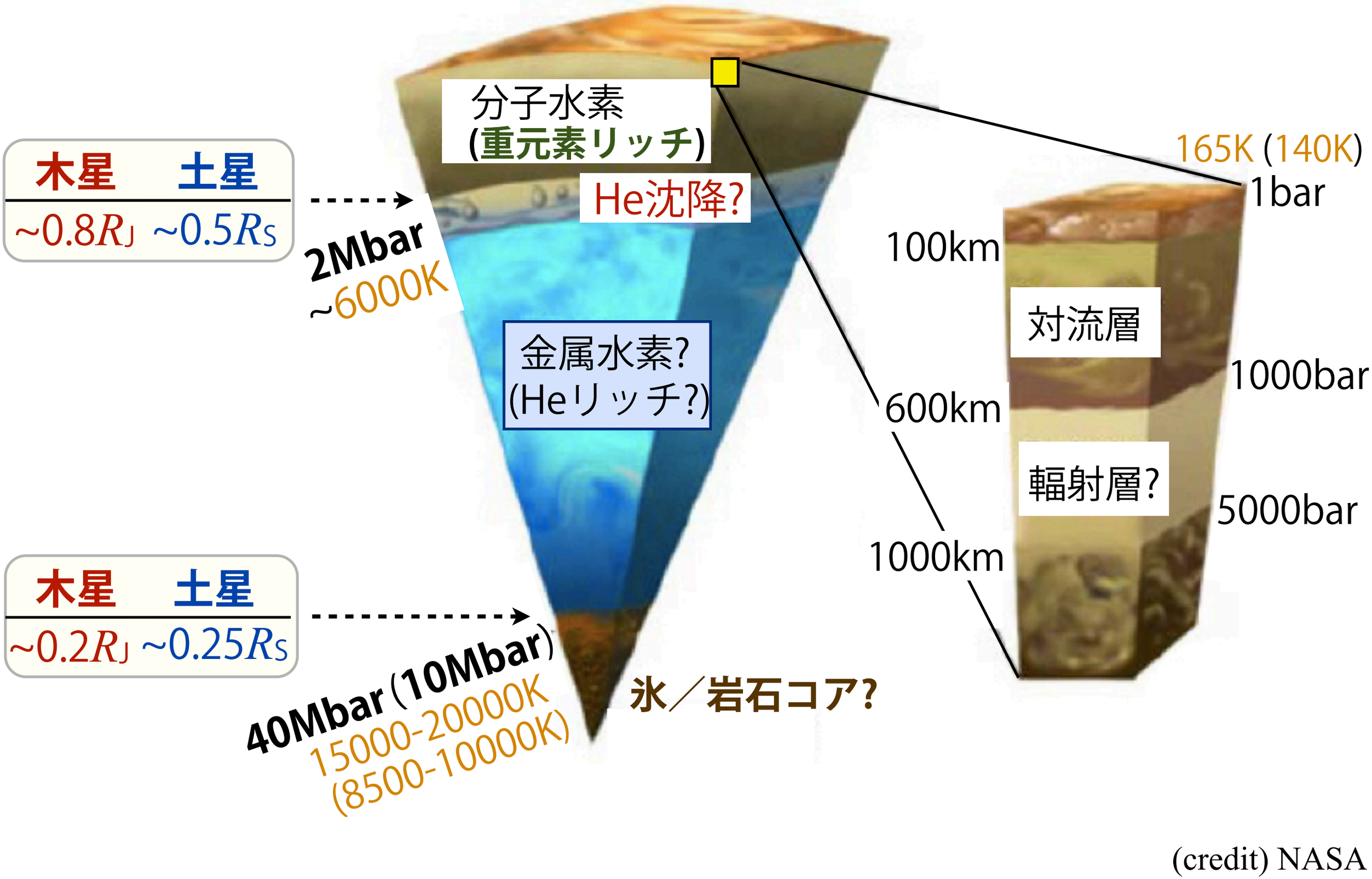
100-200GPa?

金属水素層

コア 「岩石」 (SiO_2,FeO,MgO, FeS)

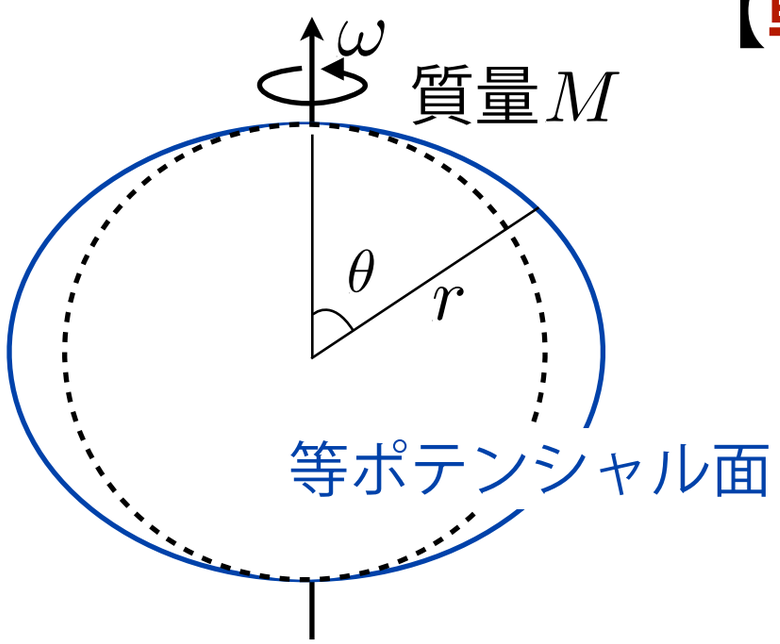
「氷」 (H_2O,CO_2, NH_3, CH_4)

巨大惑星の内部構造：最近の描像



(credit) NASA

ガス惑星の内部構造の推定



【**軸対称**な**剛体回転**天体の静水圧平衡】

(Zharkov & Trubitsyn,1978)

$$\frac{1}{\rho}\nabla P = \nabla(\underbrace{V}_{\text{重力}} + \underbrace{Q}_{\text{遠心力}})$$

$$V(r,\theta) = \frac{GM}{r}\left[1 - \sum_{n=1}^{\infty}\left(\frac{R_{\rm eq}}{r}\right)^{2n} \boxed{J_{2n}} P_{2n}(\cos\theta)\right]$$

密度分布の効果

↓ 惑星モデル --- (例) 三層構造

表面(圧力で定義)での**惑星の形状＋密度分布**

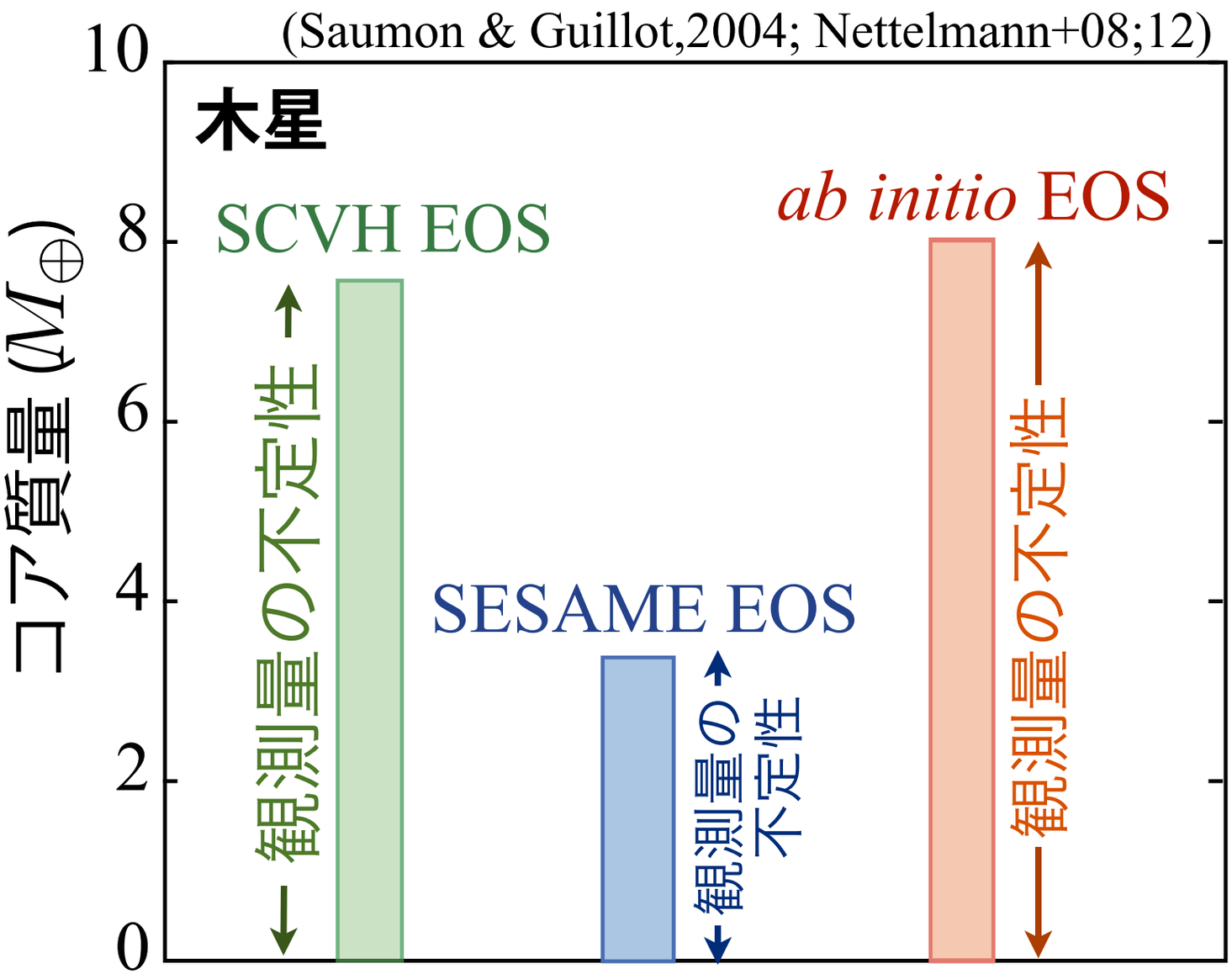
↕

※ 木星：~10hr, 扁平率6%
土星：~10.5hr, 扁平率10%
(地球：扁平率0.3%)

【観測量】 **重力場**(J_{2n}), **赤道半径** ($R_{\rm eq}$)・**極半径**

Pioneer 10,11 (Null,1976;Null+81)
Voyager 1,2 (Campbell & Synnott,1985; Campbell & Anderson,1989)
Ulysses, Galileo probe, Cassini (Jacobson,2003;Jacobson+04,06)

ガス惑星のコア：木星

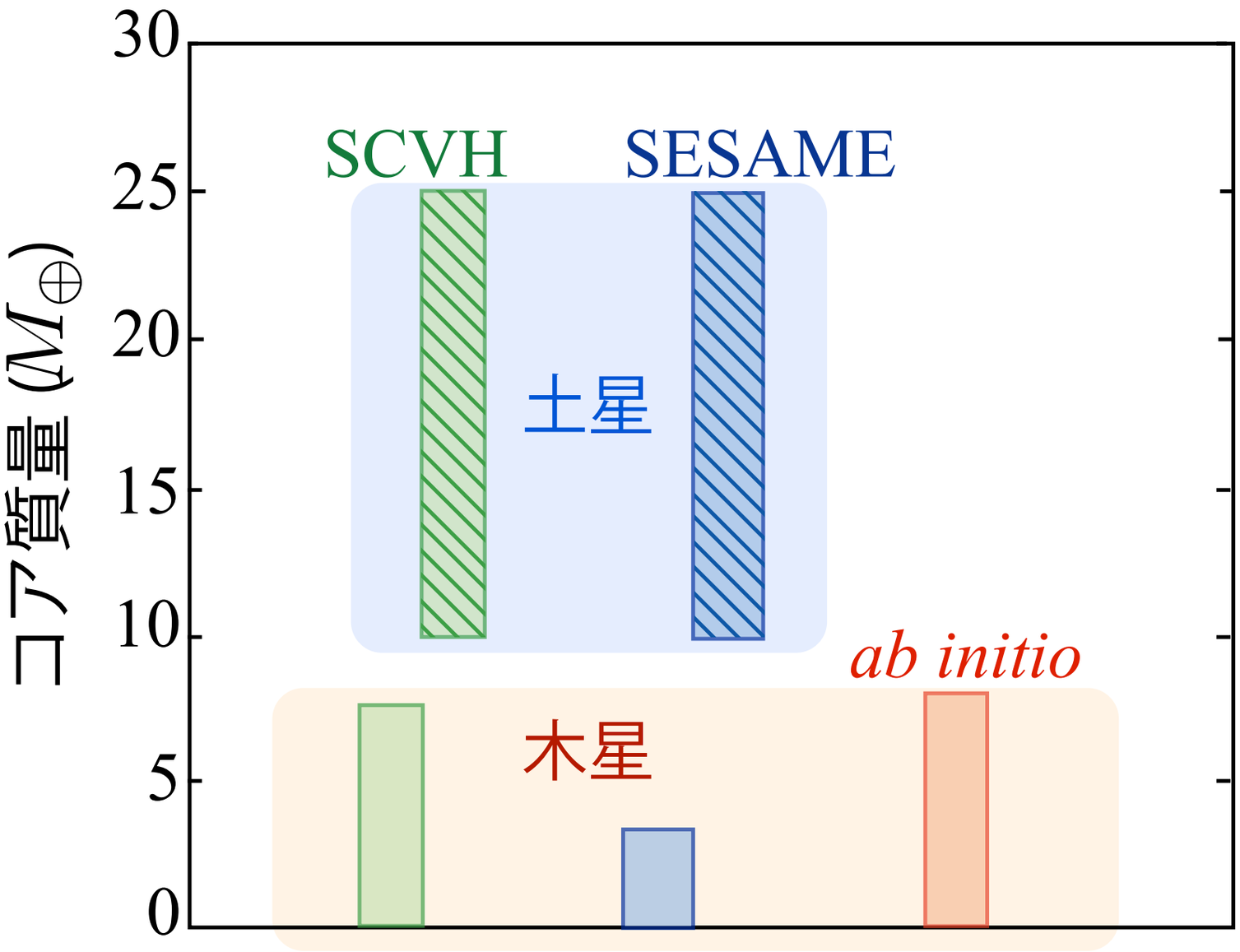


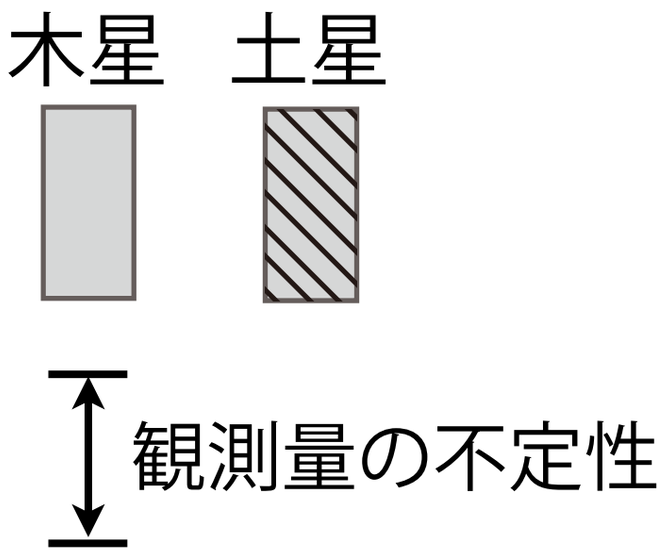
EOSモデル

- SCVH EOS (Saumon & Chabrier,1995)
- SESAME EOS (Kerley,2003;2004)
- 第一原理計算 (Holst+08;Kietzmann+07; French+09; Nettelmann+12)

※ 観測量：重力モーメント(J_{2n})
半径, 質量, 表面温度

ガス惑星のコア：木星・土星





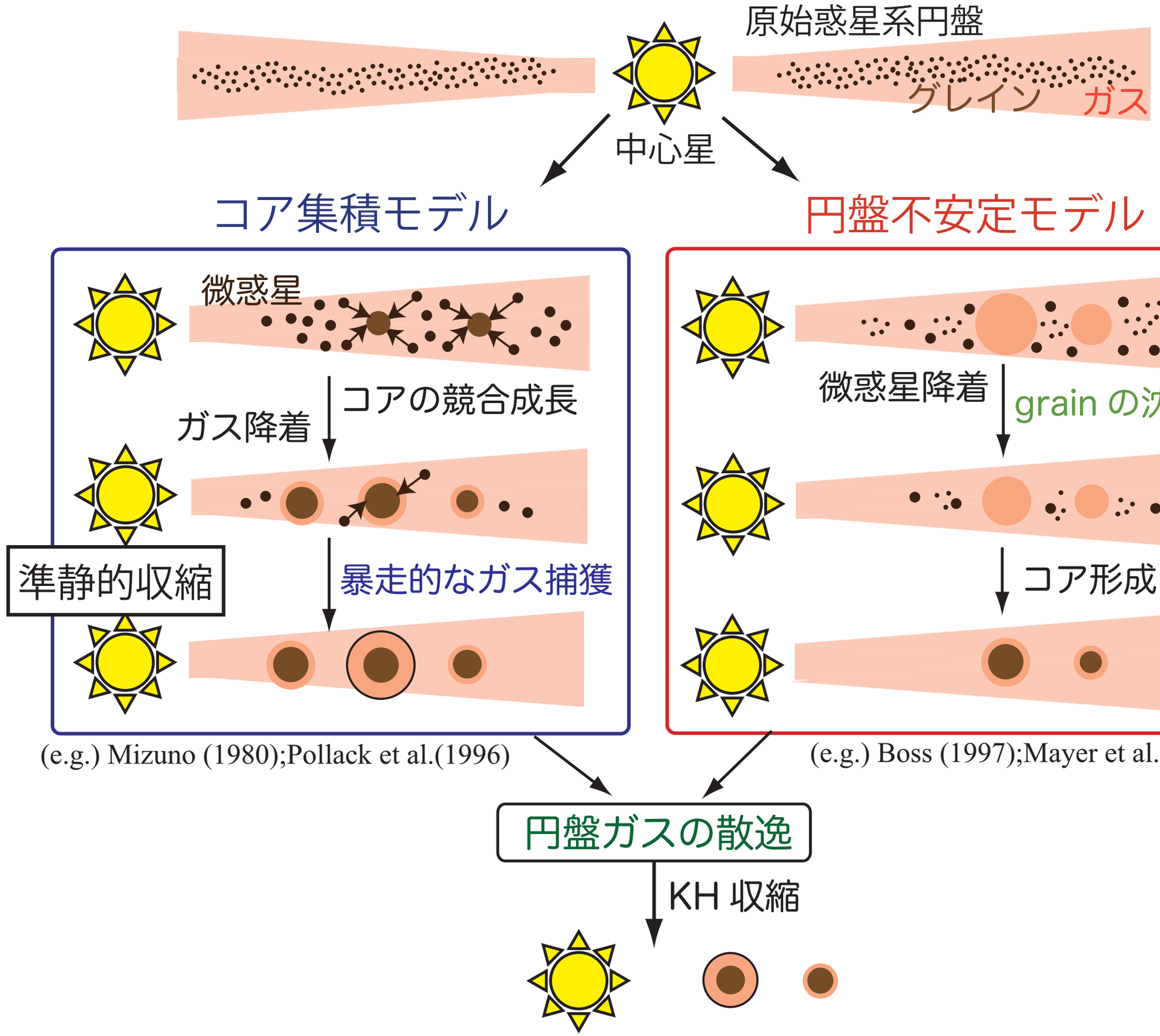
・色の違い：**EOSモデル**

木星のコア： $0-8M_\oplus$ (Nettelmann+08;12)

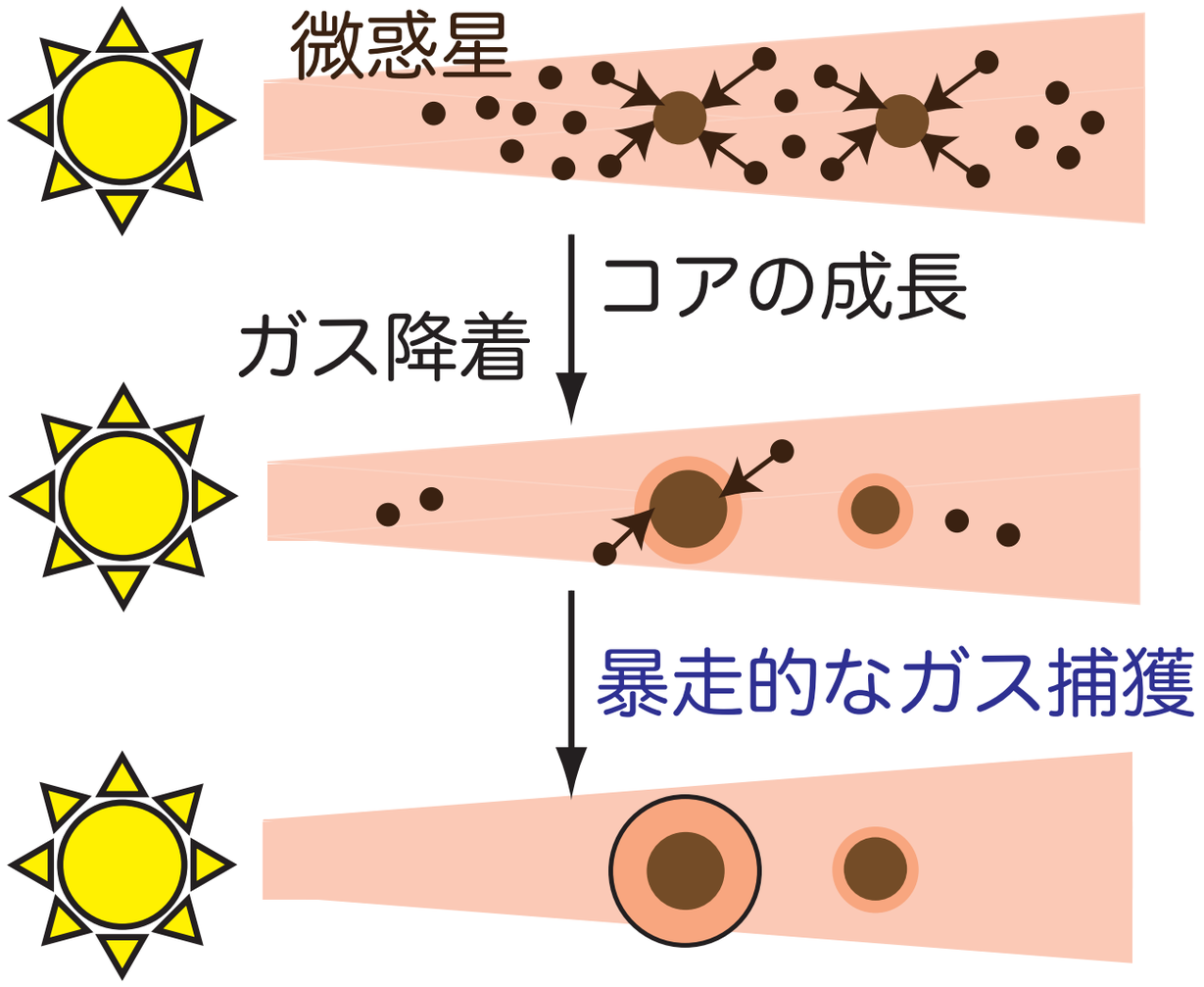
土星のコア：$10-25M_\oplus$ (Saumon & Guillot,2004)

→ 土星のコア ＞ 木星のコア

ガス惑星コアと形成モデル

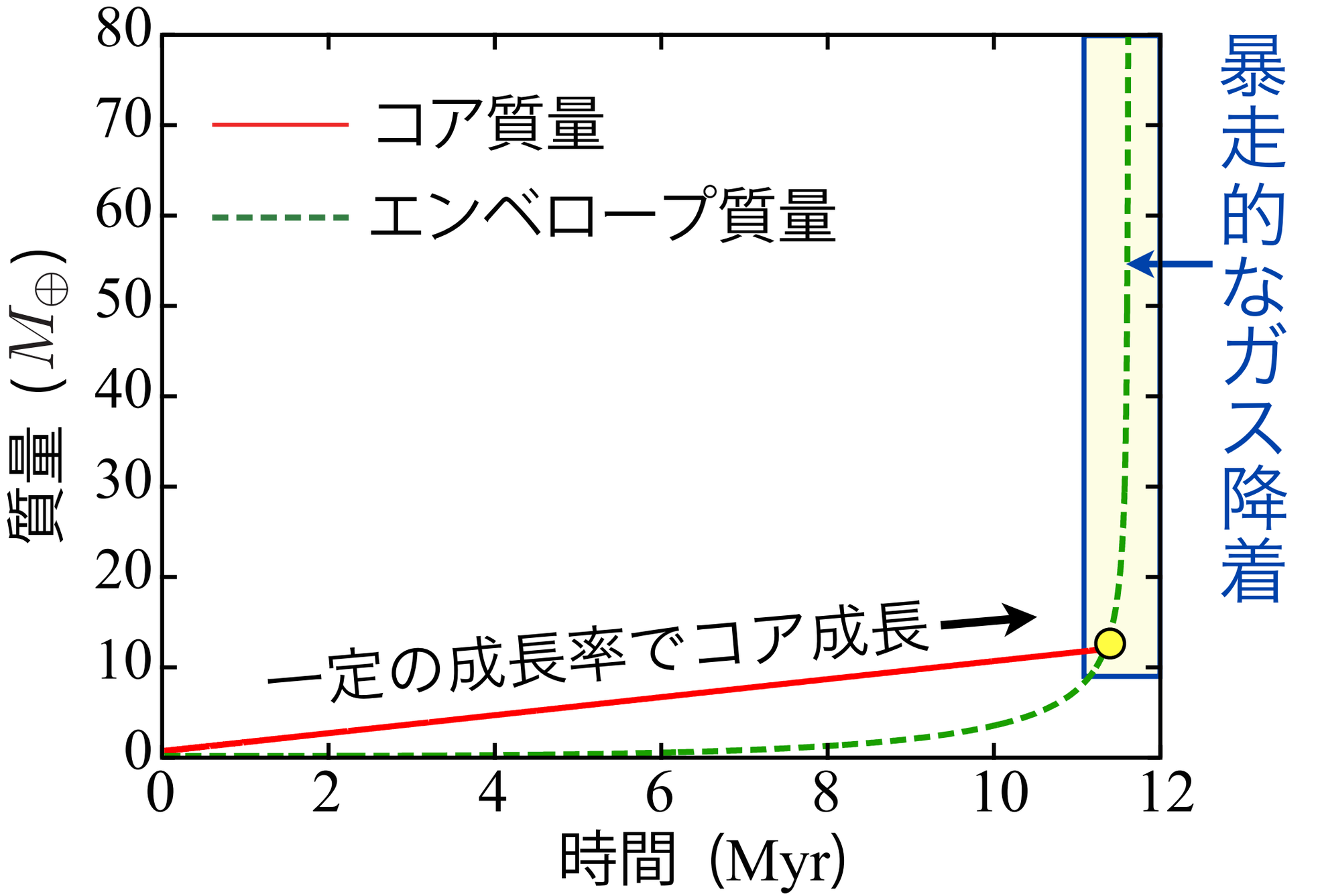


ガス惑星形成：コア集積モデル



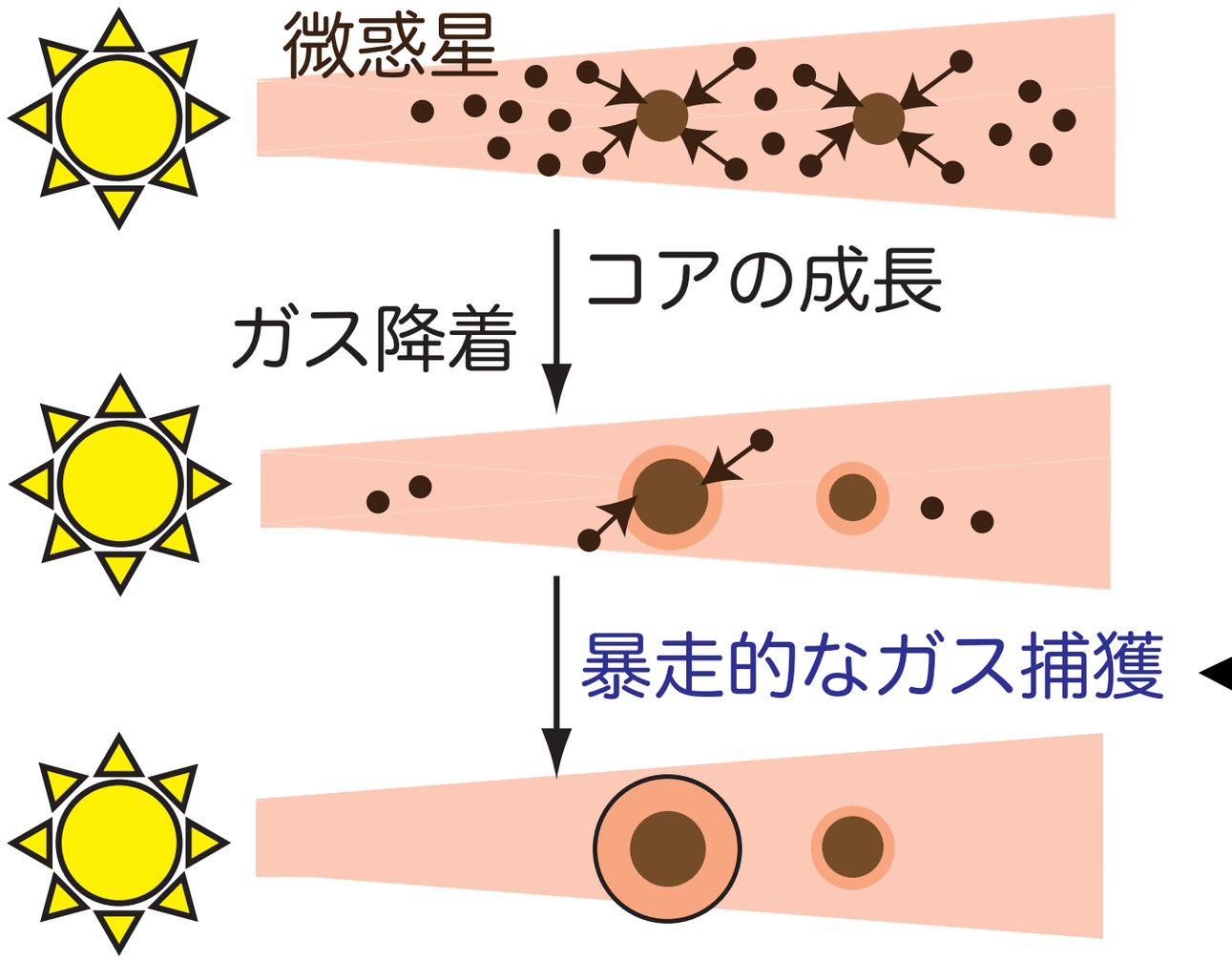
(e.g., Bodenheimer & Pollack,1986; Pollack *et al*.1996)

臨界コア質量と暴走ガス捕獲



コアがある質量(**臨界コア質量**)以上
→ **暴走的に円盤ガス**を**捕獲**

ガス惑星形成：コア集積モデル



(e.g., Bodenheimer & Pollack,1986; Pollack+96)

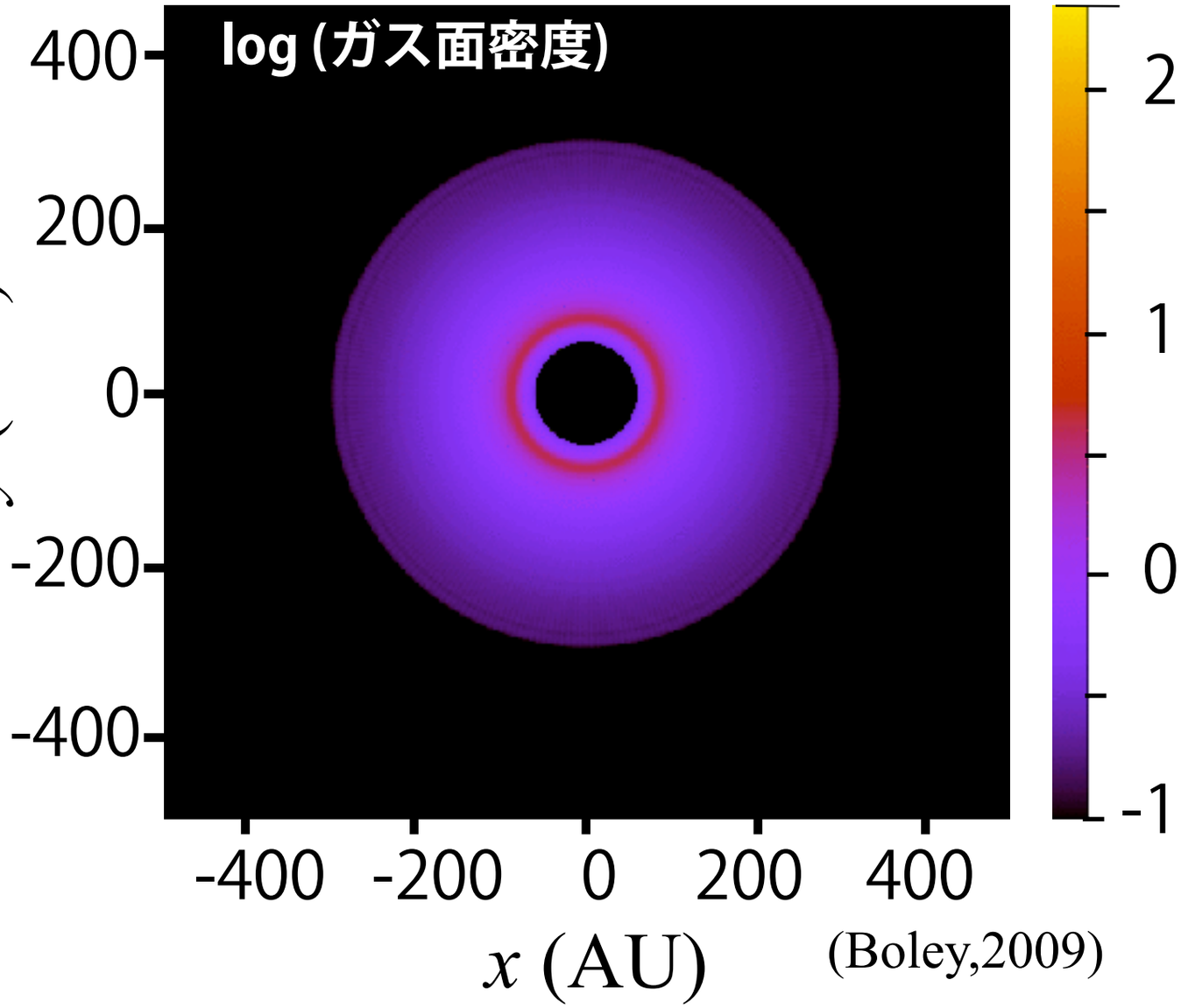
臨界コア質量

コアが臨界質量に到達すると

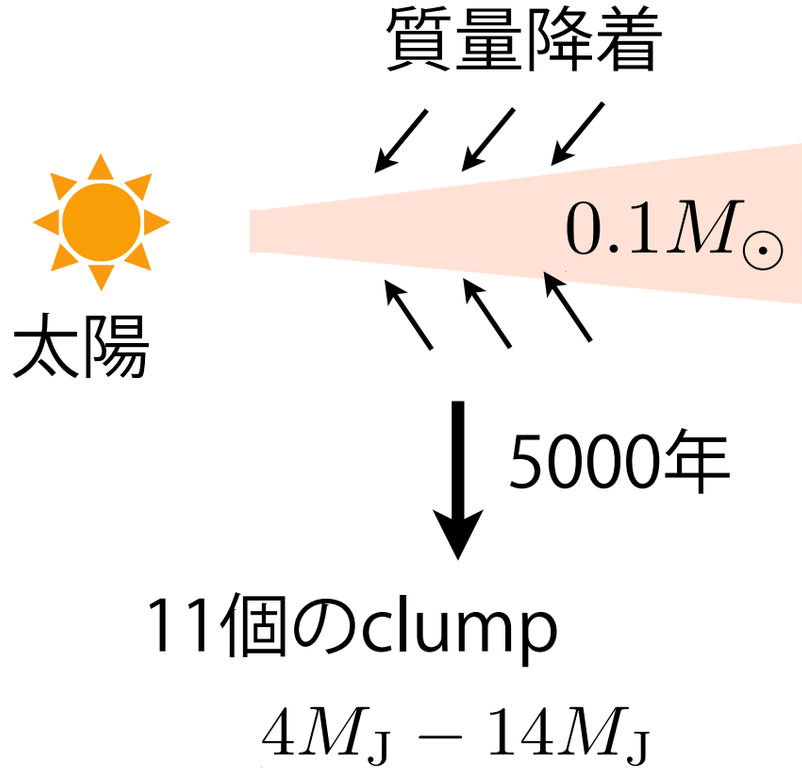
$(\sim 10 M_\oplus)$

(Mizuno,1980; Ikoma+00)

ガス惑星形成：円盤不安定モデル



(Boley,2009)



不安定条件 (Toomre Q) (Toomre,1964)

$$Q \equiv \frac{c_{\rm s}\kappa}{\pi G\Sigma}\left(\sim \frac{c_{\rm s}^2\Sigma}{G\Sigma^2 H^2/H}\right) \leq 1$$

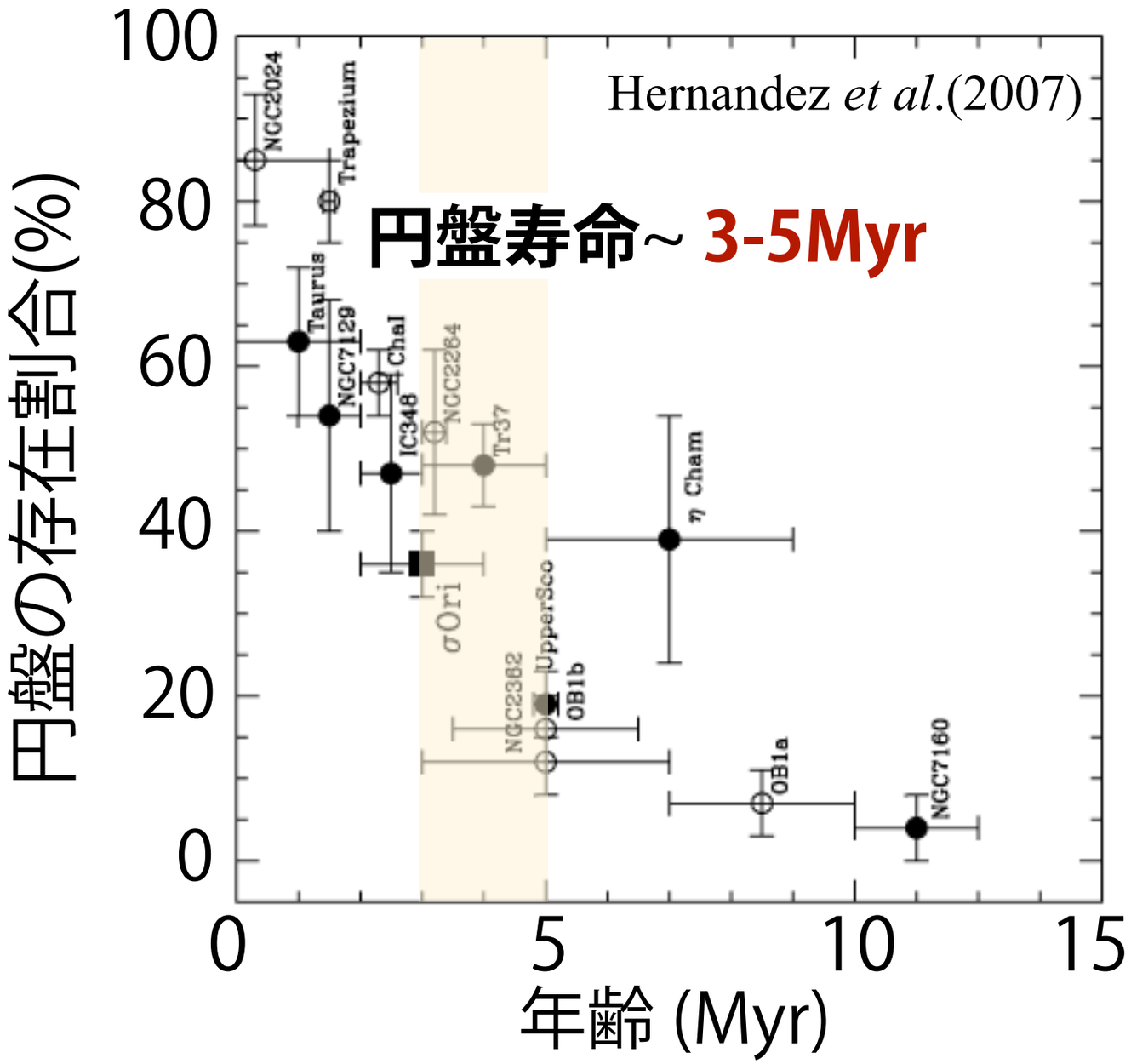
円盤ガスの**エンタルピー**
円盤ガスの**自己重力**ポテンシャル

※ 局所的：ガスの冷却時間 ($t_{\rm cool}$) < 力学的時間($1/\Omega_{\rm K}$) (Gammie,2001)

ガス惑星形成の観測的制約

■ 原始惑星系円盤ガスの寿命

cold dust (outer part)からのsub-mm波 (Andrews & Williams,2005)
warm dust (inner part)からの赤外放射 (Hernandez+07;Haisch+01)



【若い散開星団】

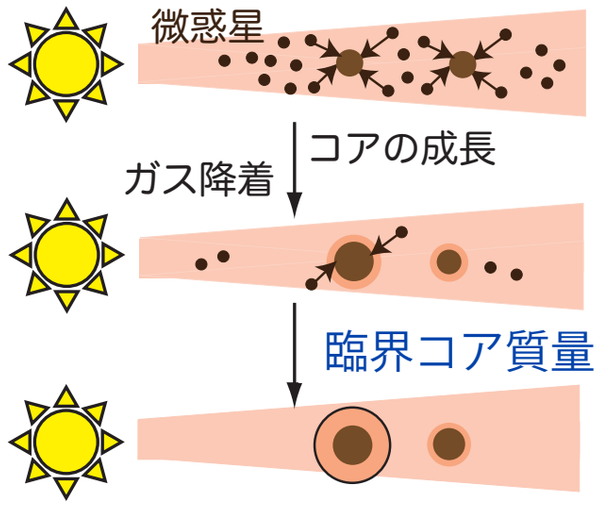
$$\frac{\text{赤外超過(JHKL)ありの恒星数}}{\text{星団内の恒星数}} \times 100$$

＝円盤の存在割合(%)

木星・土星と2つの形成シナリオ

■ コア集積モデルの視点

(1) **臨界コア質量** (→ ガス惑星コア)
(2) **ガス捕獲**(+コア成長) < ガス円盤の寿命

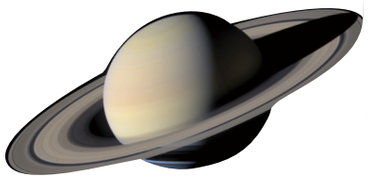


速いガス集積

大きなコア

- コア同士の**衝突合体** (Li+10)
- **高い微惑星降着率**

  高い固体面密度(Dodson-Robinson+08)
  Type I 移動(Alibert+05)
  木星のgapによる圧力バンプ (Kobayashi+12)



土星 ($10-25M_\oplus$)

(大気) **圧力勾配** ↓
(= **小さな**コアもOK)

- **低いgrain opacity** (Ikoma+00;Hubickyj+05)
- **重元素汚染** (Hori & Ikoma,2011)

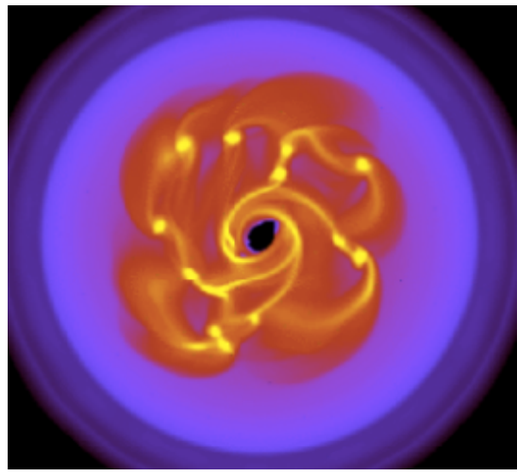
木星 ($0-8M_\oplus$)

※ 外側領域 : 孤立質量(大), but コア成長時間(長) $\propto \dfrac{M_{\rm p}^{1/3}}{\Sigma_{\rm d}\Omega_{\rm K}}$

木星・土星と2つの形成シナリオ

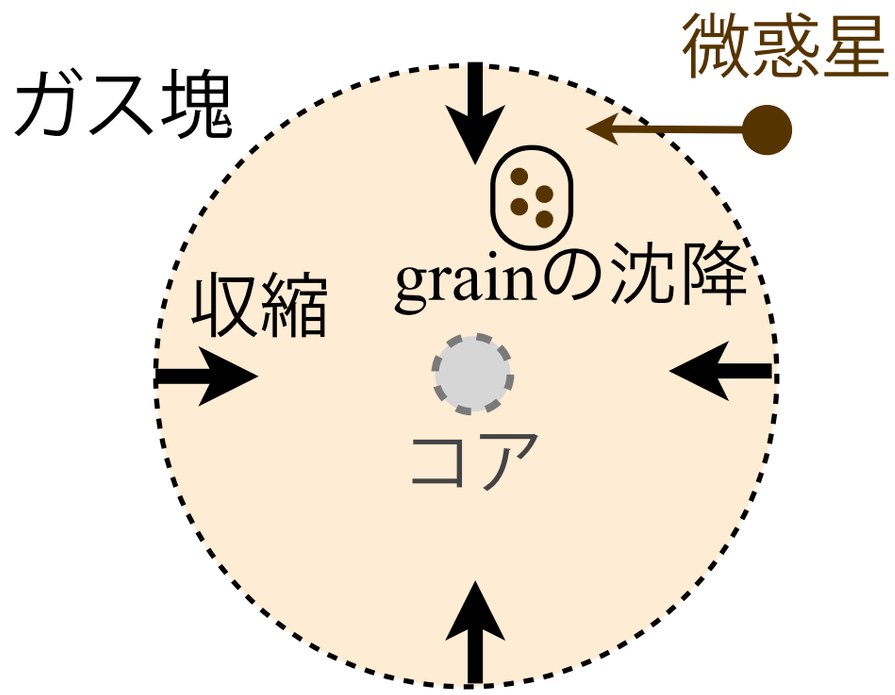
■ **円盤不安定モデル**の視点

(1) (再帰的に)**短期間**(10^3-10^4年)の形成
(2) **外側領域**で分裂が起きやすい



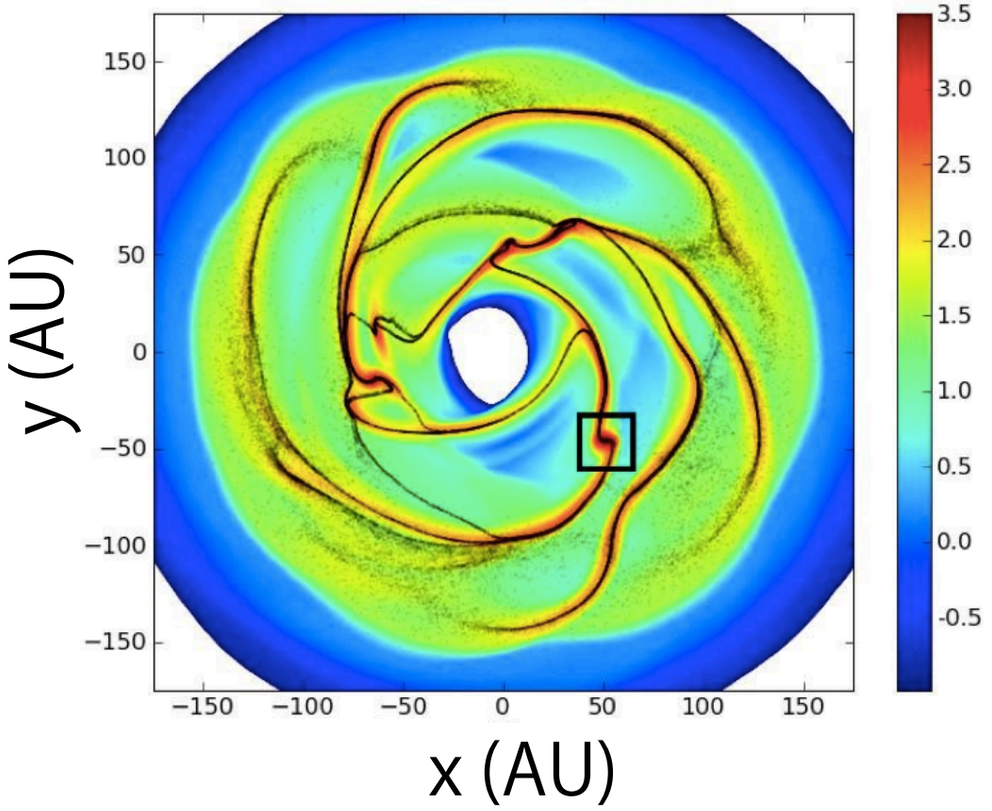
(Q) ガス惑星コアの形成は？

(1) 収縮段階の**微惑星降着**
(e.g. Helled+06,08; Helled & Schubert,2008)



※ 重いガス塊ほど、小さいコア
※ first core → second collapseと類似

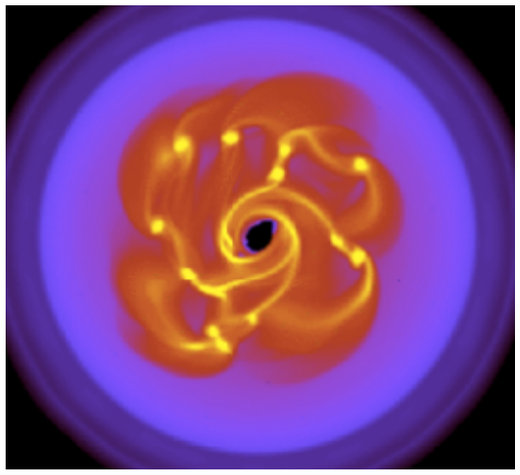
(2) **渦状腕**による掃き集め
(Boley+11)



※ ガス面密度分布 (• 固体粒子)

木星・土星と2つの形成シナリオ

■ 円盤不安定モデルの視点



(Q) 円盤不安定は起きるには？

(1) **[Fe/H], ダストopacity**

相関なし(Boss,2002)　　low [Fe/H]が良い (Cai+06)

(2) **中心星からの距離**

数10AUより内側は起きにくく、r > 100AUで起きる (Boss,2007;Mayer+07)
数10AUより内側は起き、100~200 AU では起きない(Boley+07;Boley,2009)

(3) **熱力学量、エネルギー輸送**

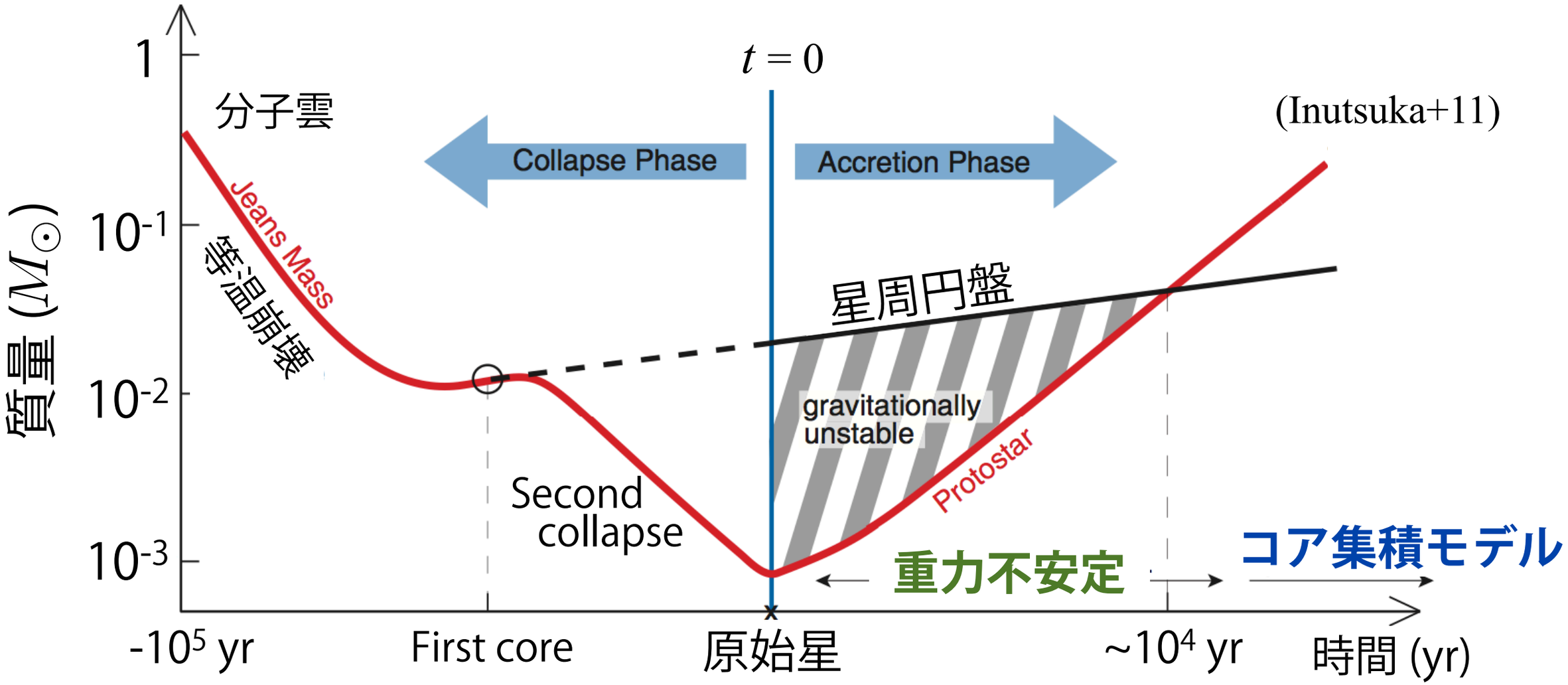
H_2分子の断熱指数(ortho/para比) (Boley+07)
平均分子量(高)と起きやすい (Mayer+08)
中心星輻射は分裂の抑制へ (Mejia,2004)

(4) **円盤質量・円盤への質量降着率** (Mayer+02; Boley, 2009)

(5) **輻射輸送のスキーム・resolution** (Boss,2007; Cai+10)

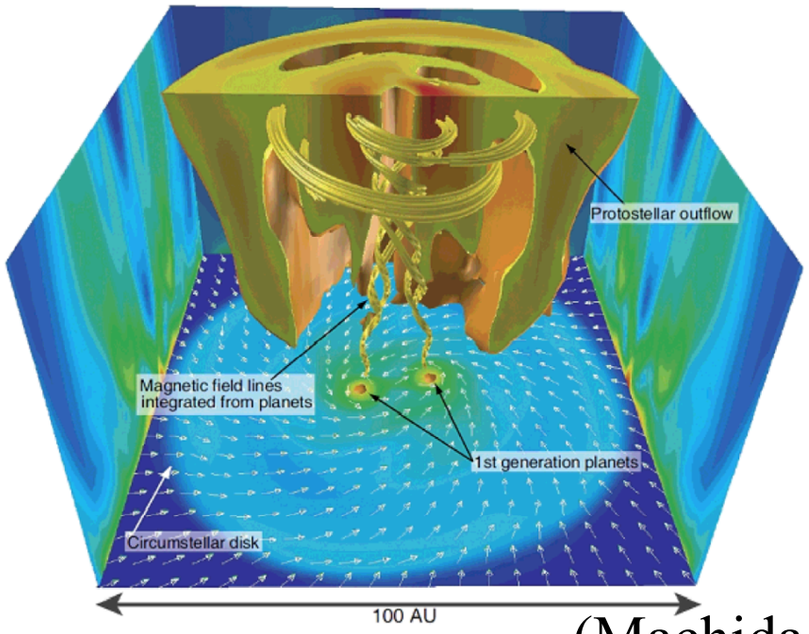
木星・土星と2つの形成シナリオ

■ 円盤不安定モデルの視点

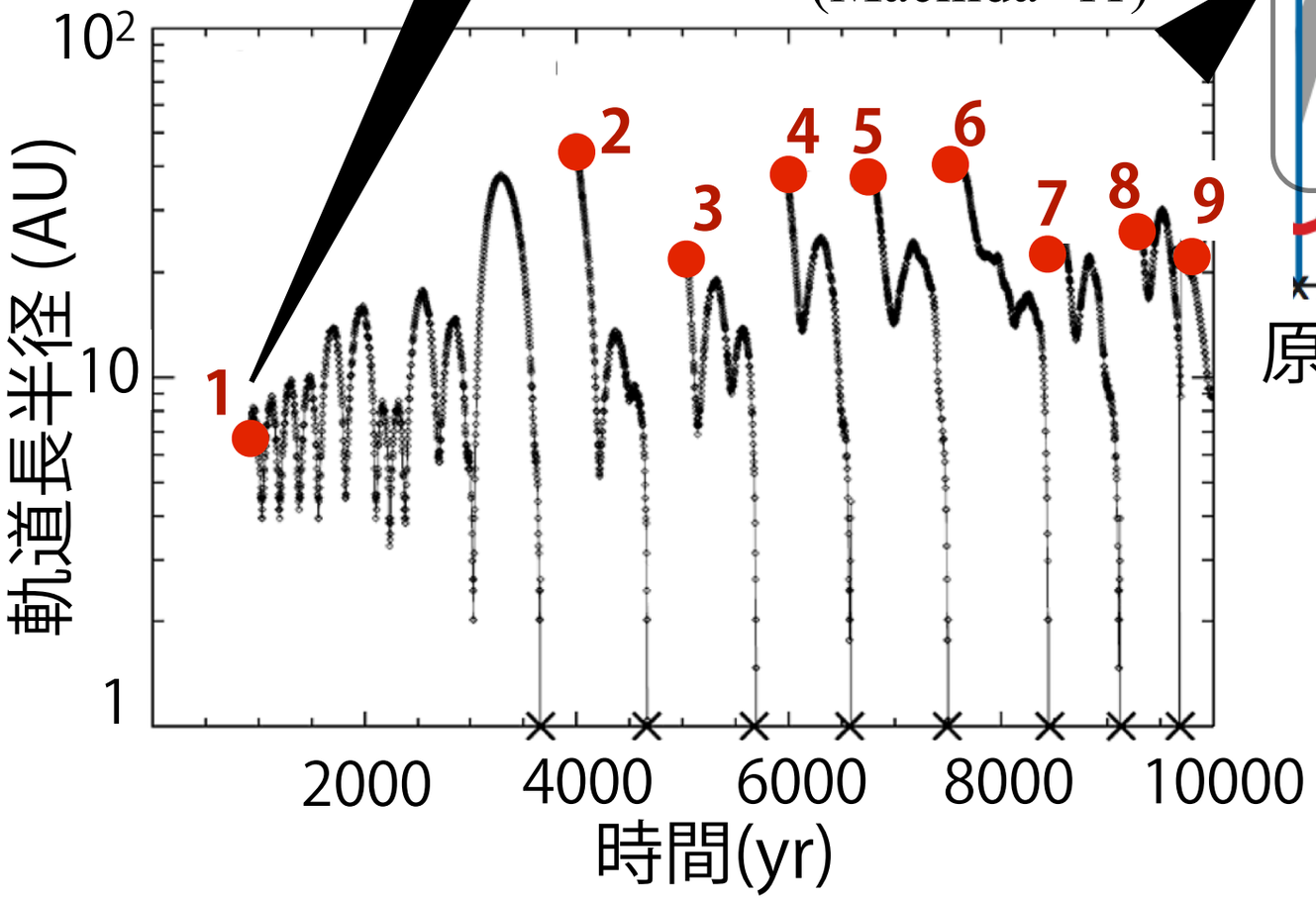


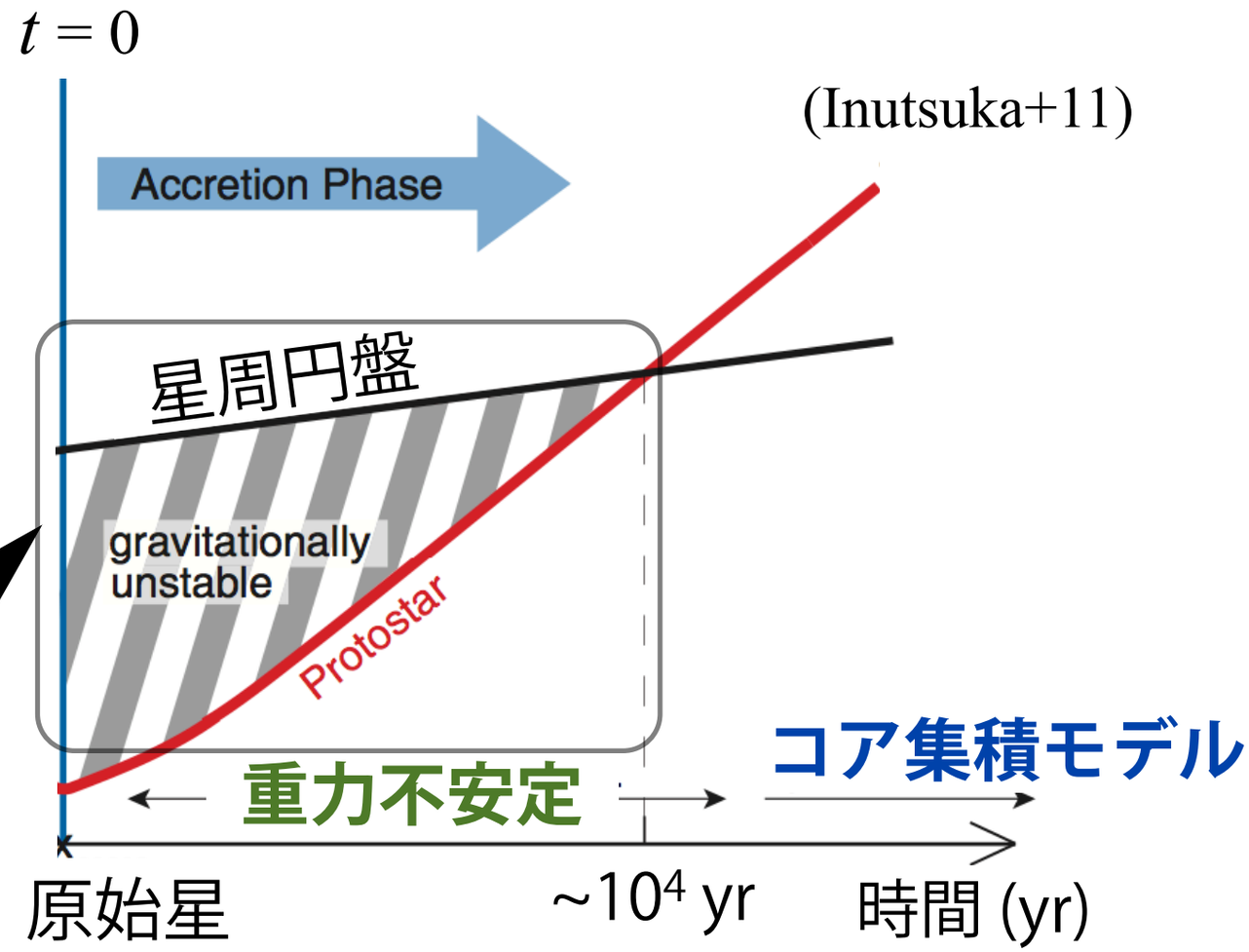
木星・土星と2つの形成シナリオ

■ 円盤不安定モデルの視点



(Machida+11)





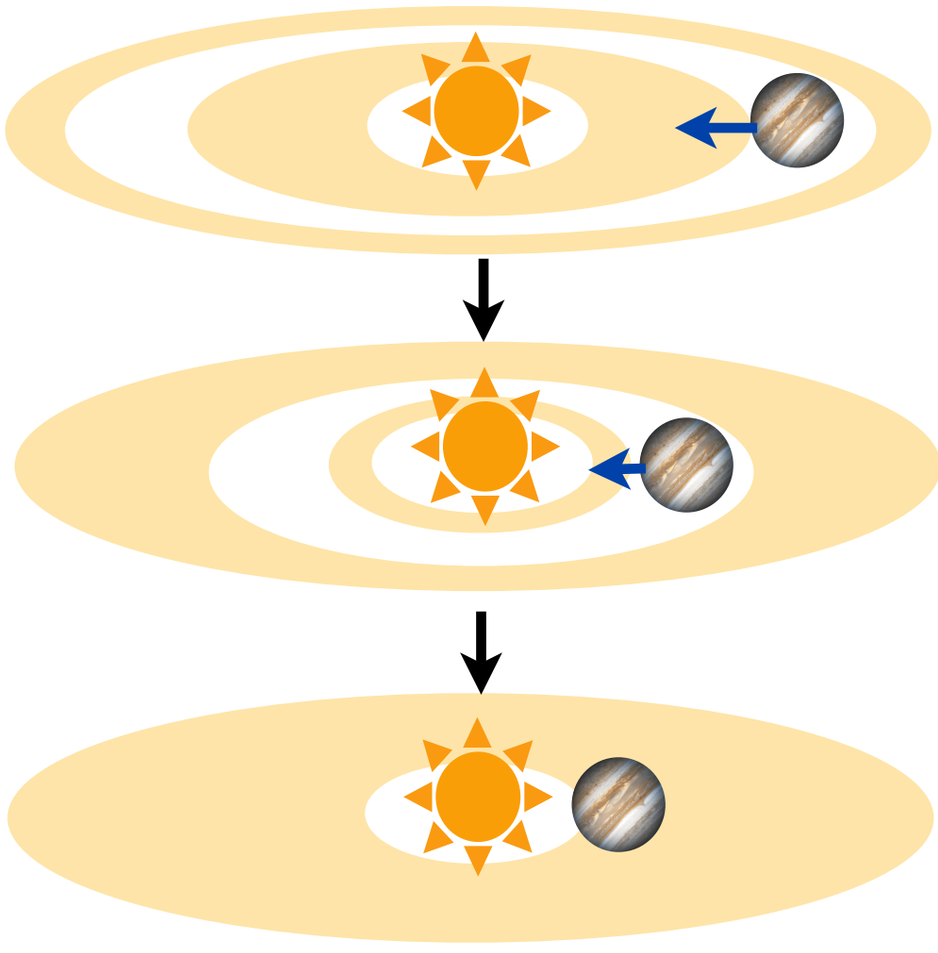
再帰的な**ガス惑星**形成
→ **生き残った**ガス惑星(1,2個)
(+ **コア集積モデル**)

木星・土星：in situ 形成 とNice モデル

(Q) 木星・土星は**現在の位置**で**形成**されたのか？

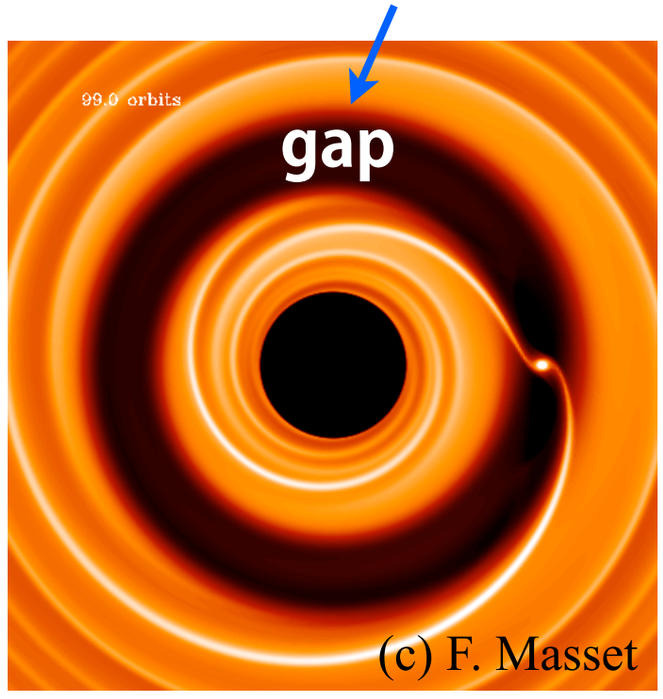
木星：**5.2**AU, 土星：**9.5**AU

■ Type II 移動 (Lin & Papaloizou,1986;Ward,1997)



惑星重力による跳ね飛ばし

> 圧力勾配, 粘性拡散によるガス流入

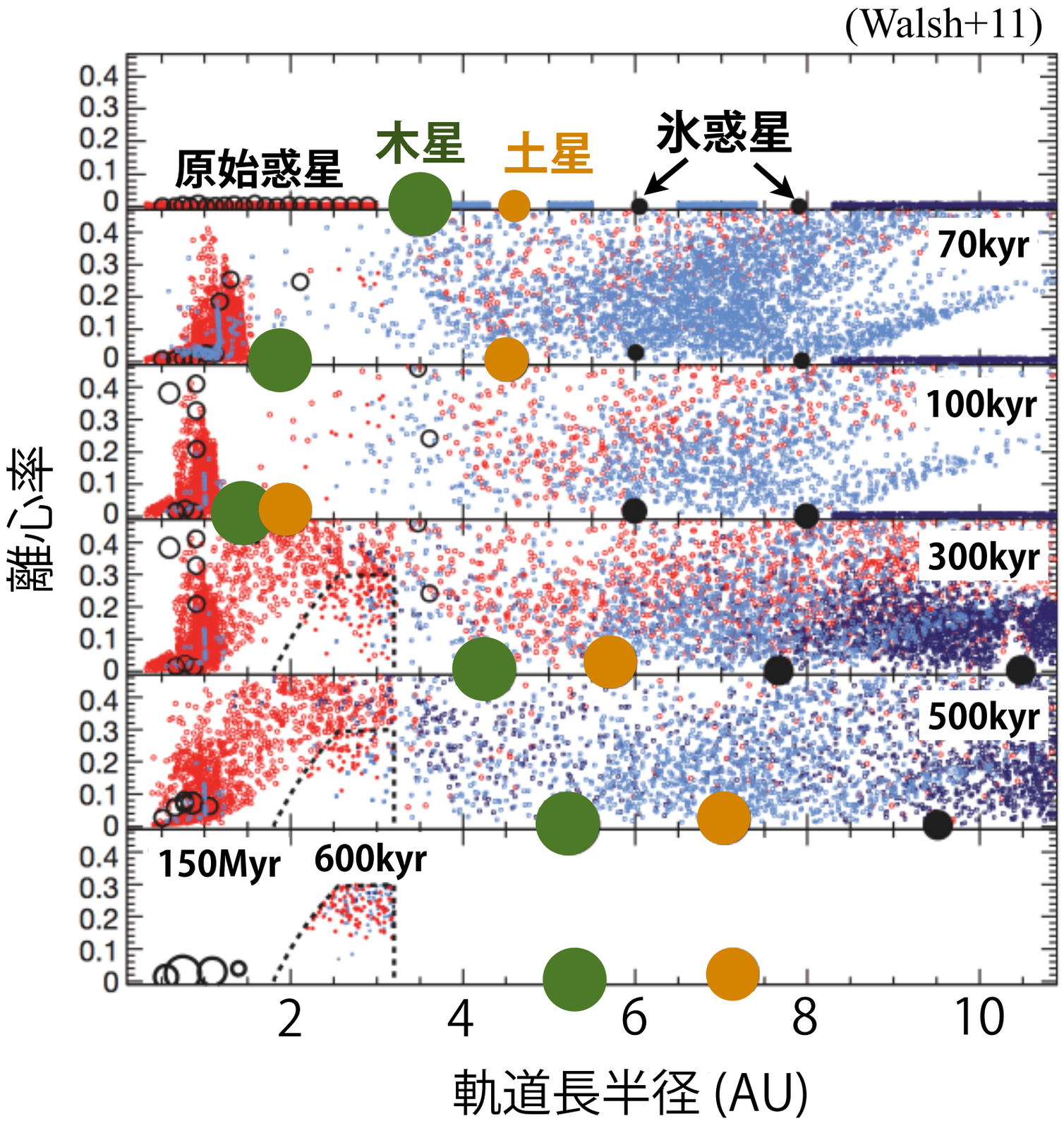


※ 重い円盤(Q = 1-10)＋土星サイズの惑星

→ 部分的なgap形成 : **Type III**移動 (Masset & Papaloizou,2003)

※ 重力不安定下では惑星移動は速い(Type I的)? (Baruteau+11;Michael+11)

Niceモデル：木星・土星の大移動



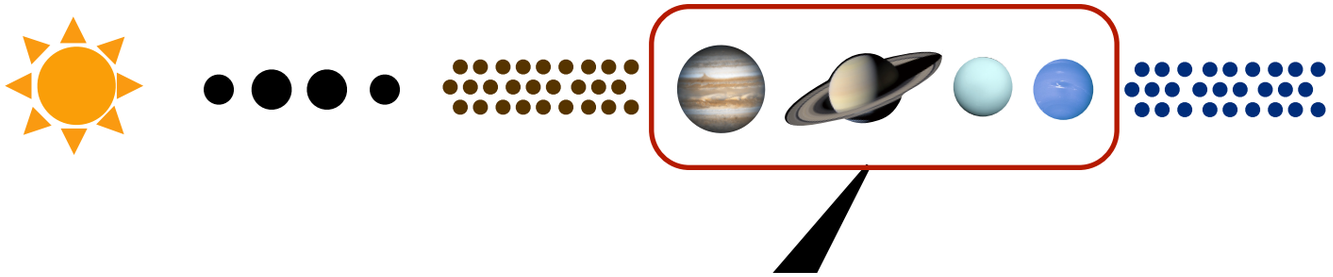
木星(3.5AU) : **内側移動**を開始
土星コア($30M_\oplus$@~4.5AU)

土星が木星(~1.5AU)を捕獲
(**3:2 平均運動共鳴**)

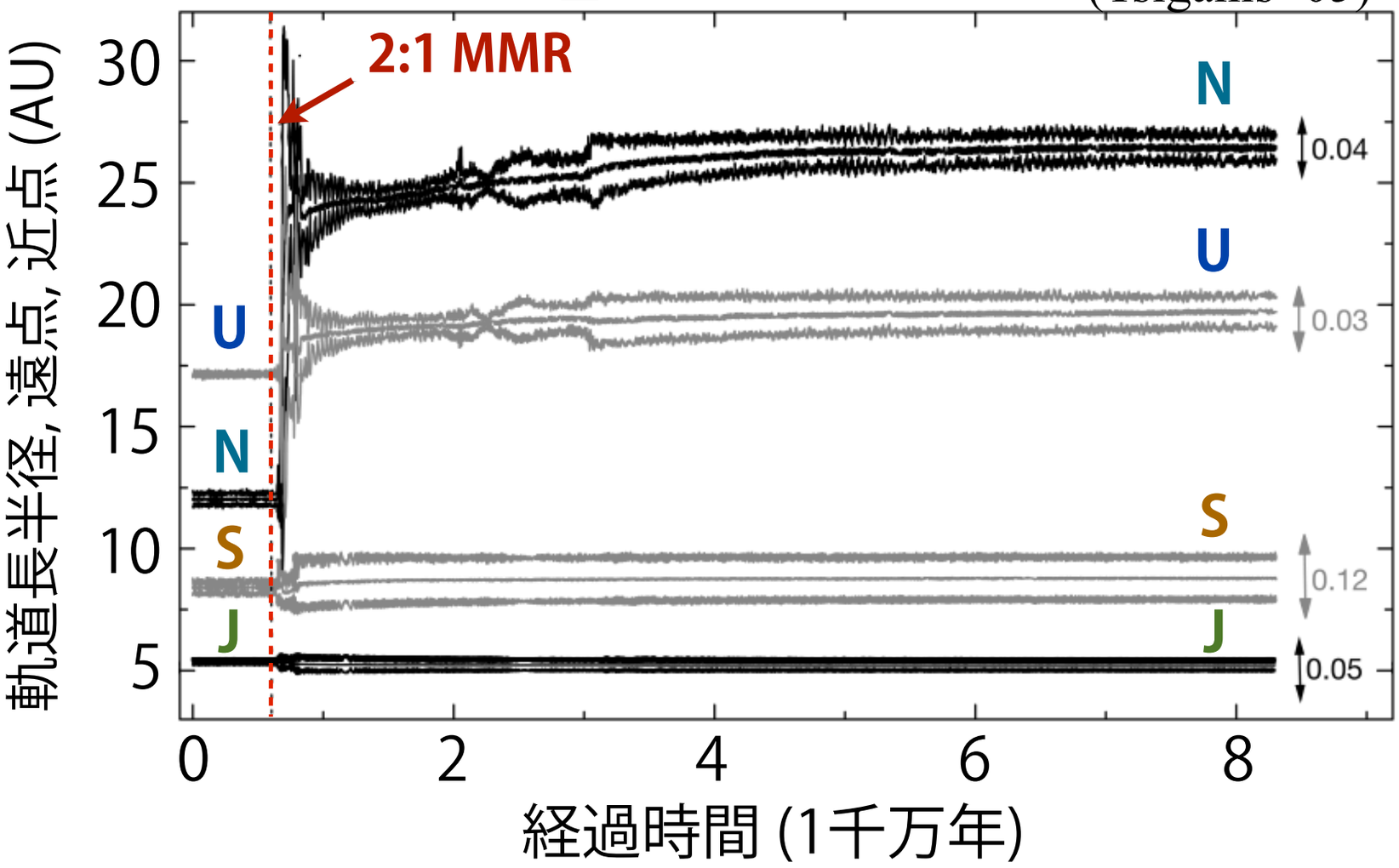
木星・土星ペアの外向き移動

(Masset & Snellgrove,2001;
Morbidelli & Crida,2007;
D'Angelo & Marzari,2012)

Niceモデル：軌道不安定と後期重爆撃



(Tsiganis+05)

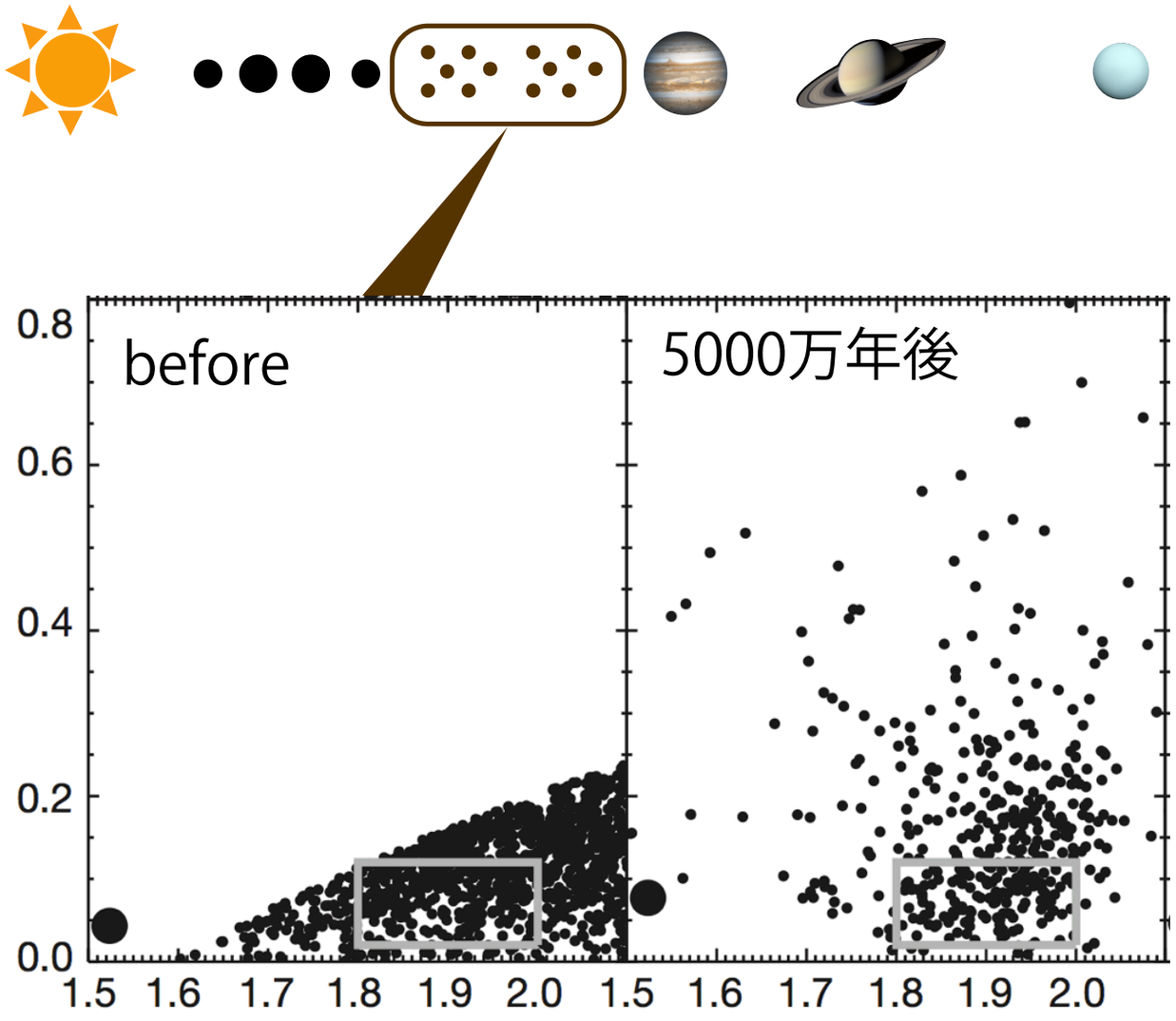


木星と**土星**が **2:1 平均運動共鳴(MMR)**を経験(通過)

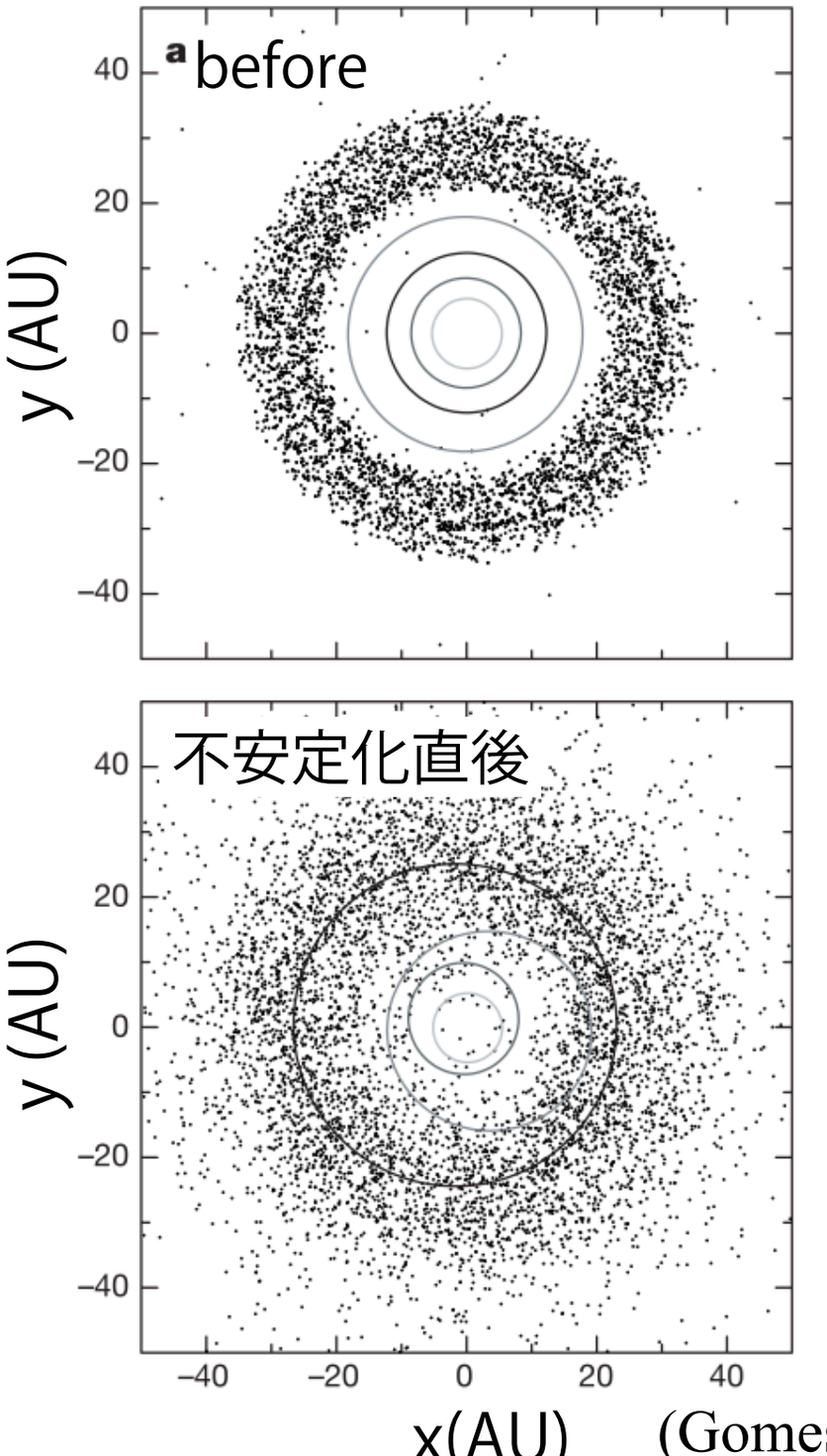
→ **木星**と土星 : eccentricな軌道

→ 4巨大惑星系の**軌道不安定**を誘発

Niceモデル：軌道不安定と後期重爆撃



(Bottke+12)



(Gomes+05)

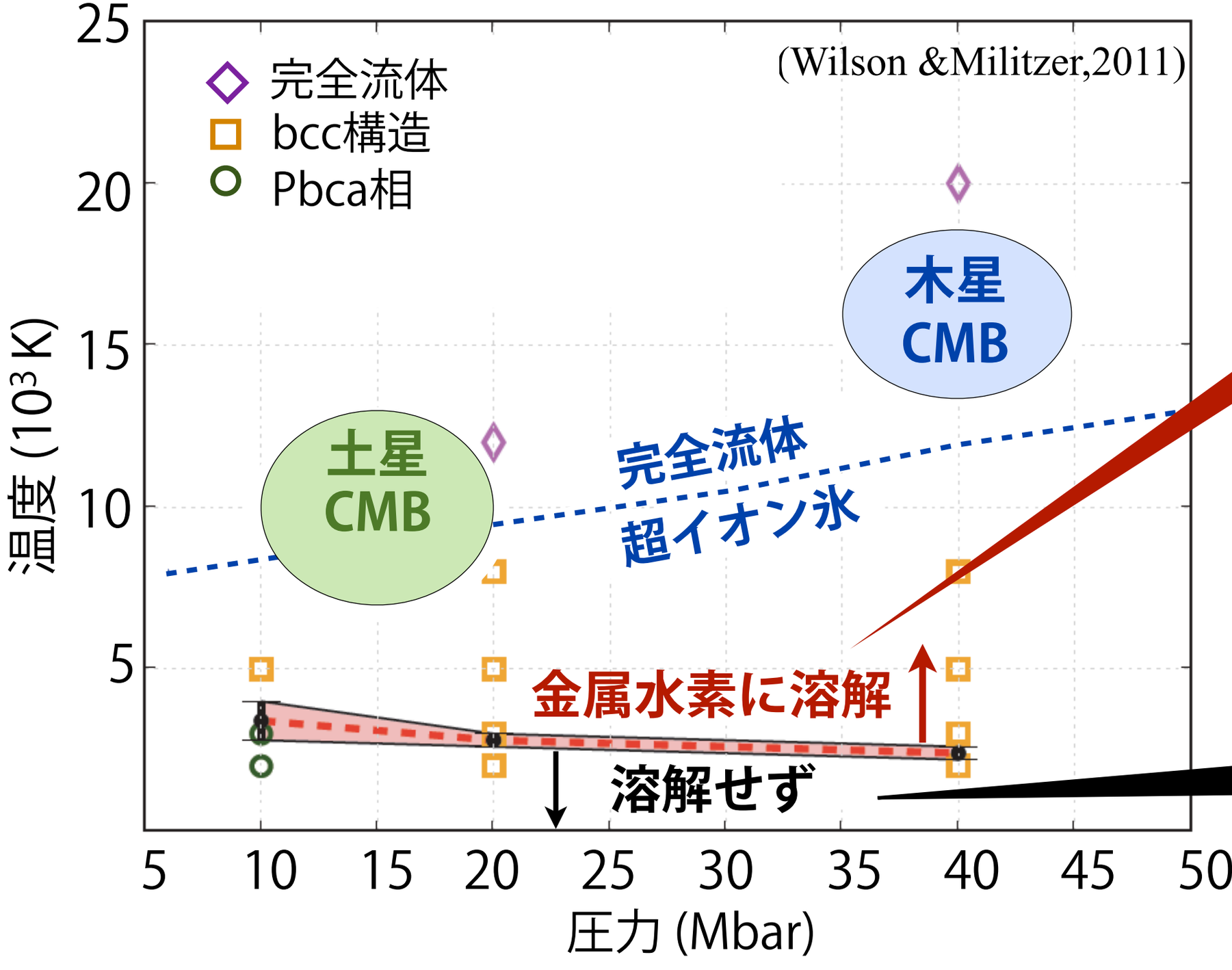
【コンパクトな巨大惑星系の軌道不安定】

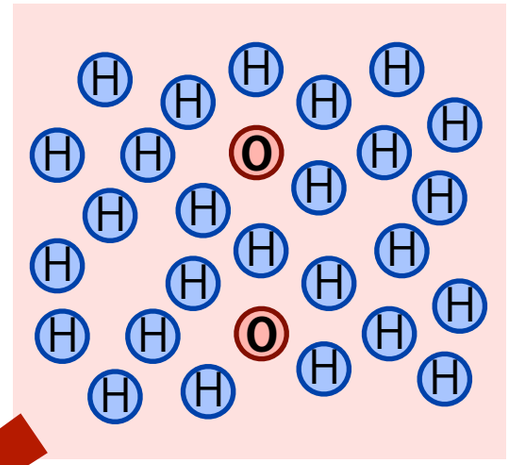
→ 小惑星帯／TNOs領域の天体をかき乱す

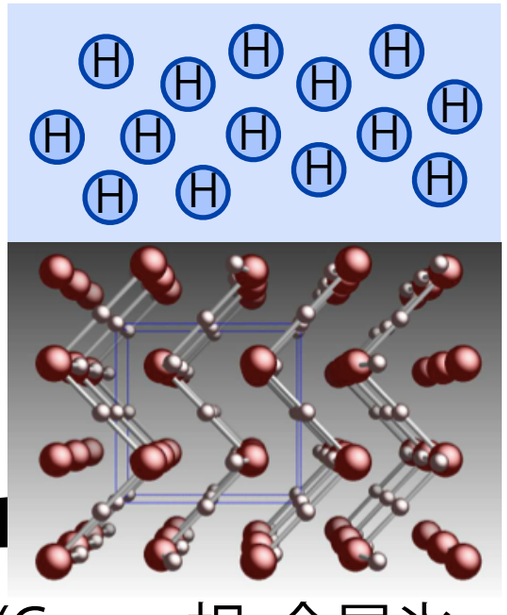
→ 数億年の期間、後期重爆撃

ガス惑星の水氷コアの浸食

水氷のHへの飽和溶解線 (H_2O : H = 1 : 125)



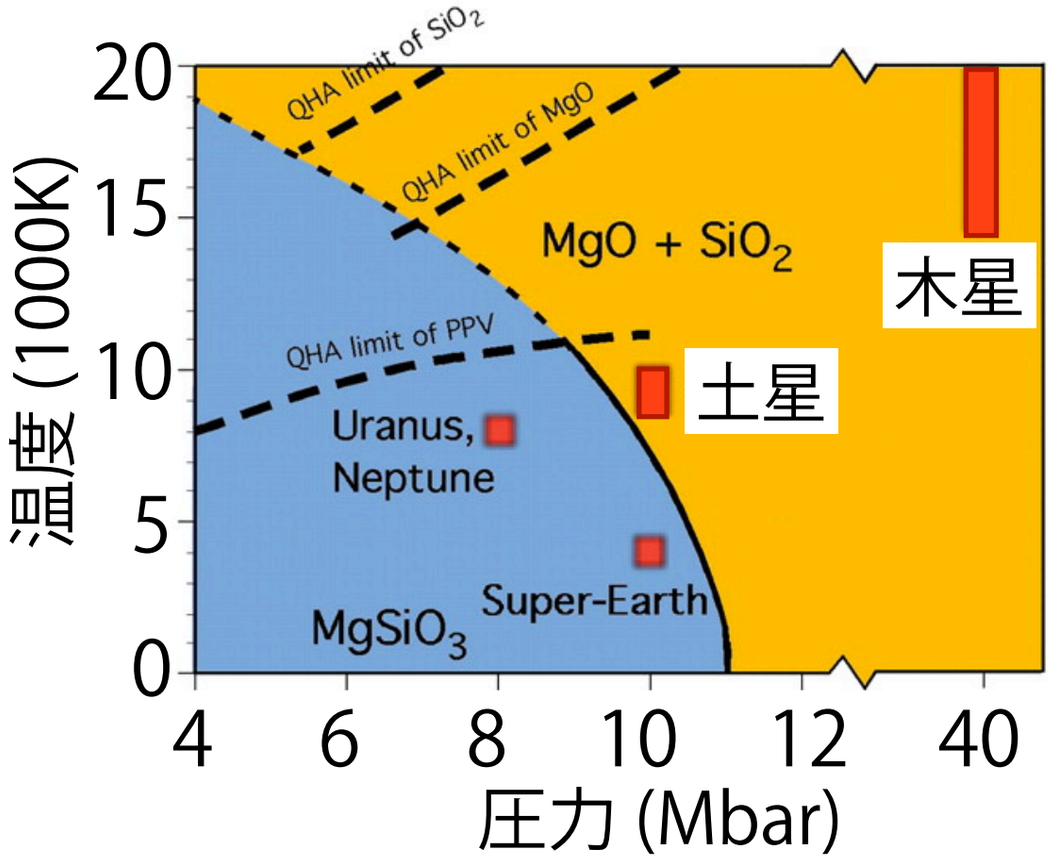




(Cmcm相: 金属氷
@P =15.5Mbar)
(Militzer & Wilson+10)

3000K以上(P=10-40Mbar)では、**water ice**は**H**と**混合**

ガス惑星のシリケイトコアの浸食

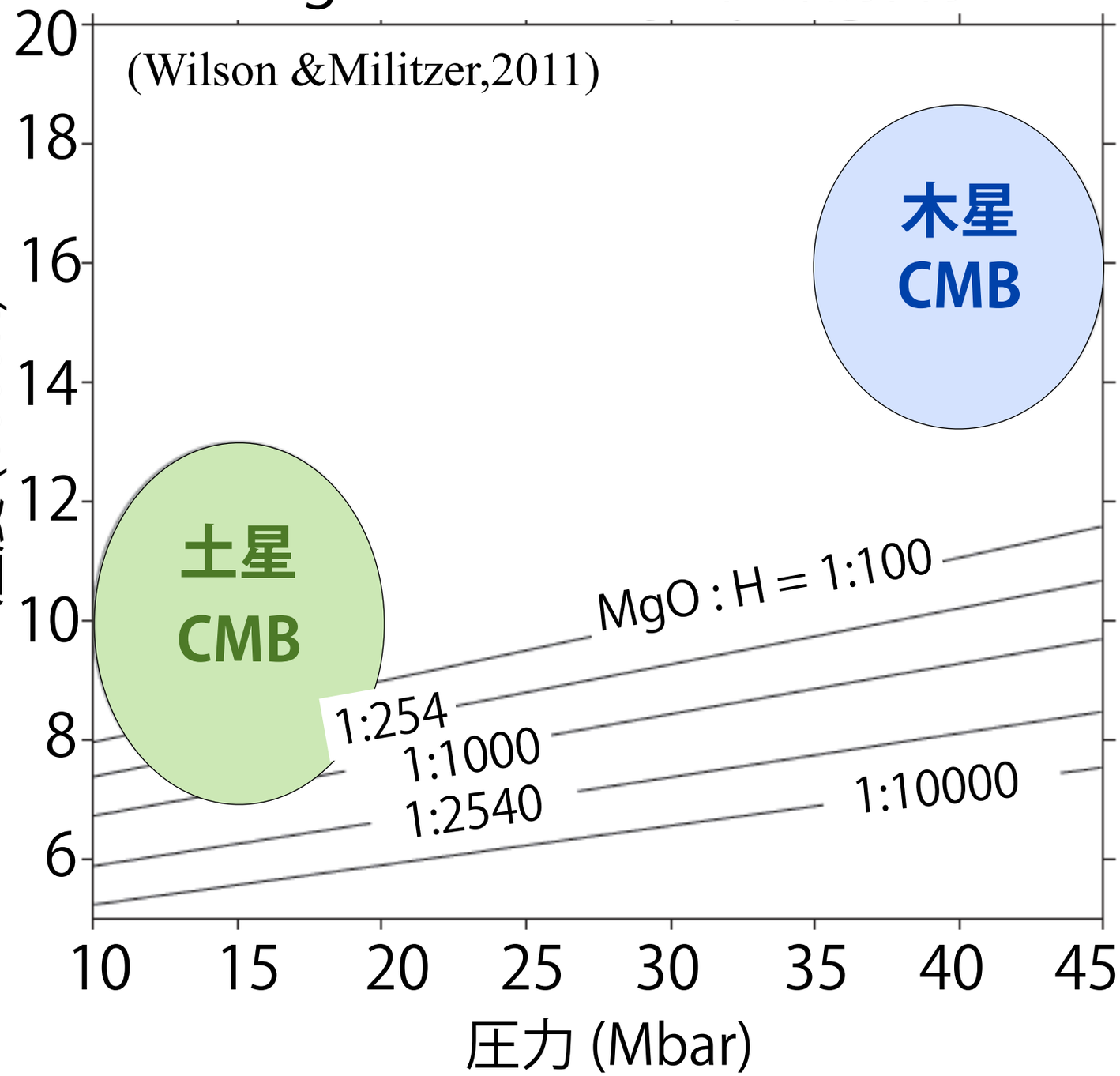


(準)第一原理計算によると、

$MgSiO_3 \rightarrow SiO_2 + MgO$

解離が生じる (~ 11Mbar)

(Umemoto *et al*.,2006)



10000K以上の高温下では、MgOは Hと**混合**

ガス惑星のシリケイトコアの浸食

ガス惑星のコア浸食によるガス惑星形成に対する示唆

【円盤不安定】

grainの**沈降**によるガス惑星の**コア形成**×
→ 大気(エンベロープ)の**重元素供給**

↓

(Q) コア形成するためには？

円盤不安定によるガス塊の形成段階に
kmサイズの**微惑星形成**＋**捕獲**

JUNO missionによる制約

NASA 木星探査機 Juno : 2011/8/5 打ち上げ
2016年7月から木星の周回極軌道 (33周)
(1年間 → 木星へ衝突)

(e.g.Bolton+10)

■ 重力場の高精度測定

- 木星のコアサイズ
- 木星内部の回転パターン
- 木星の内部組成

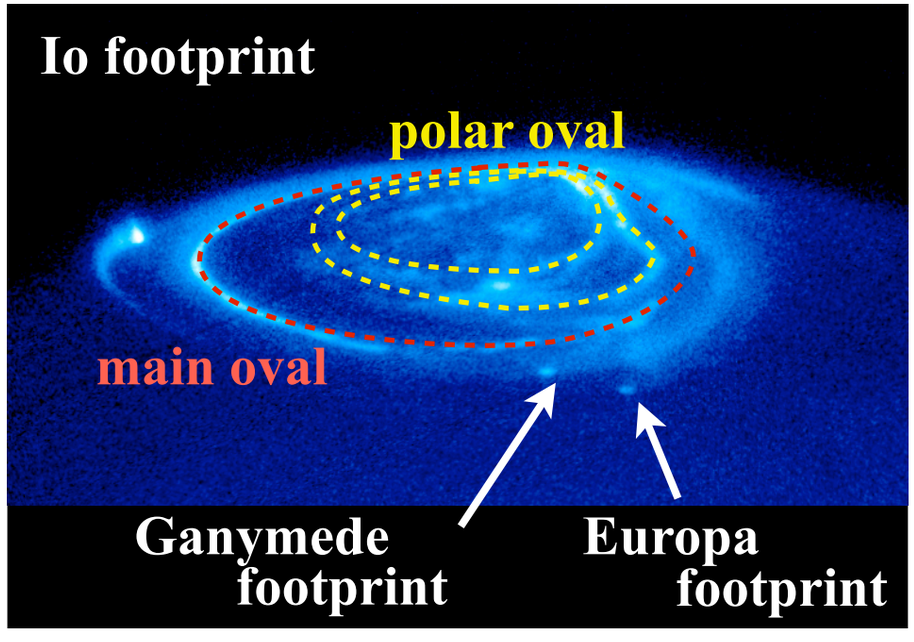
■ 大気深部(深さ数100km)のマイクロ波放射測定

- 大気組成, 大気の運動 (~100bar)
- H_2Oの存在度 (3D map)

■ 磁気圏(磁力計, NIR・UV分光計, 可視撮像)

- 磁場のパターンとダイナモ
- 極域磁気圏の粒子計測 (オーロラ)

木星の北極冠(HST UV)



JUNO missionによる制約 (1)：重力場

JUNO → J_2, J_4, J_6の重力モーメントを高精度決定(最大 J_{12} ?)

木星の重力モーメント (Jacobson,2003)

$J_2 \times 10^6$	$J_4 \times 10^6$	$J_6 \times 10^6$
14696.43±0.21 (**0.0014%**)	-587.14±1.68 (**0.29%**)	34.25±5.22 (**15%**)

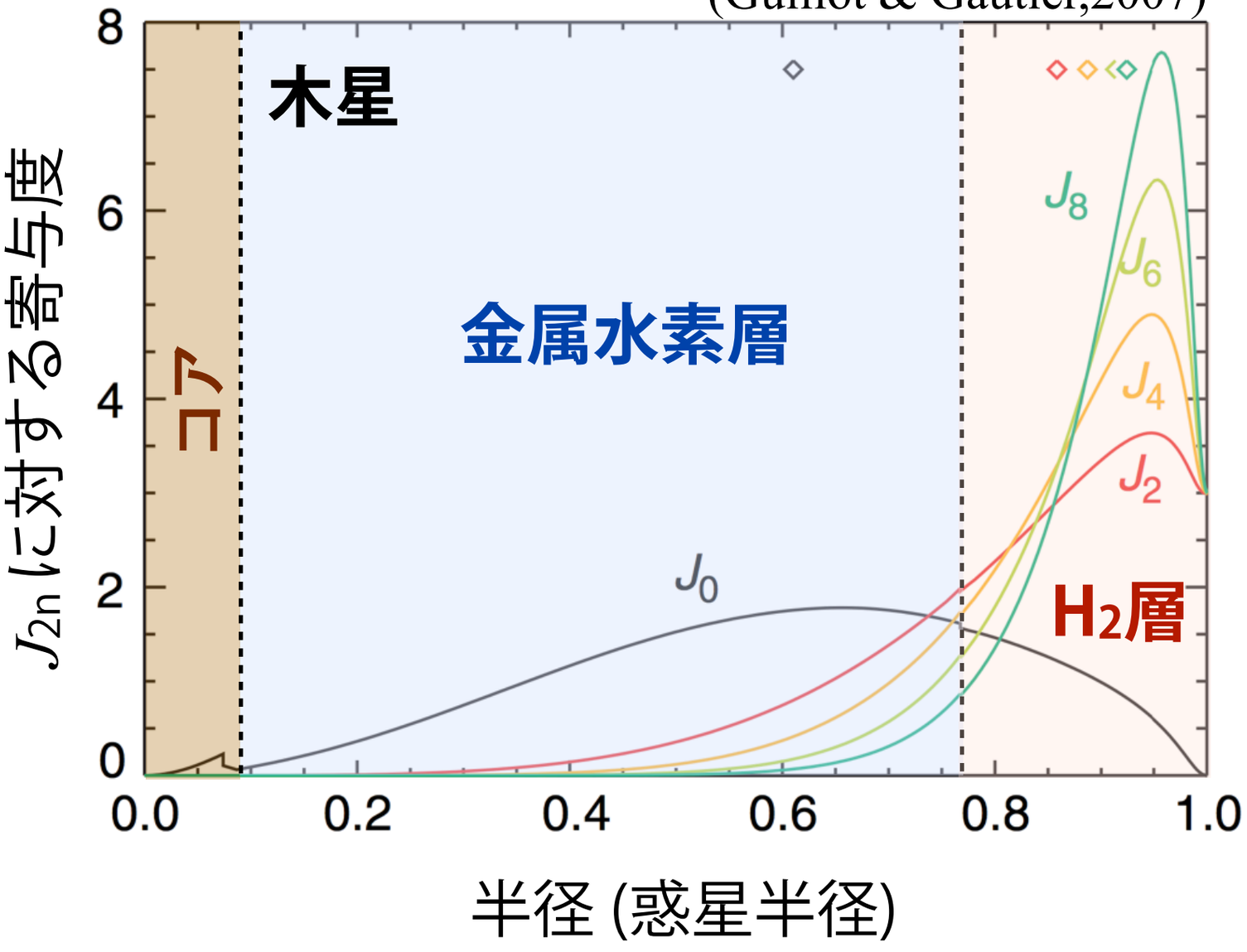
JUNO missionによる制約 (1)：重力場

JUNO → J_2, J_4, J_6の重力モーメントを高精度決定(最大 J_{12} ?)

$$J_{2n} = -\frac{1}{MR_{eq}^2}\int \rho(r) r^{2n} P_{2n}(\cos\theta) dV$$

高次(高いn) --- 外側の密度分布の情報を反映

(Guillot & Gautier,2007)



- 木星のコアサイズの制限
- エンベロープ中の重元素量の制限

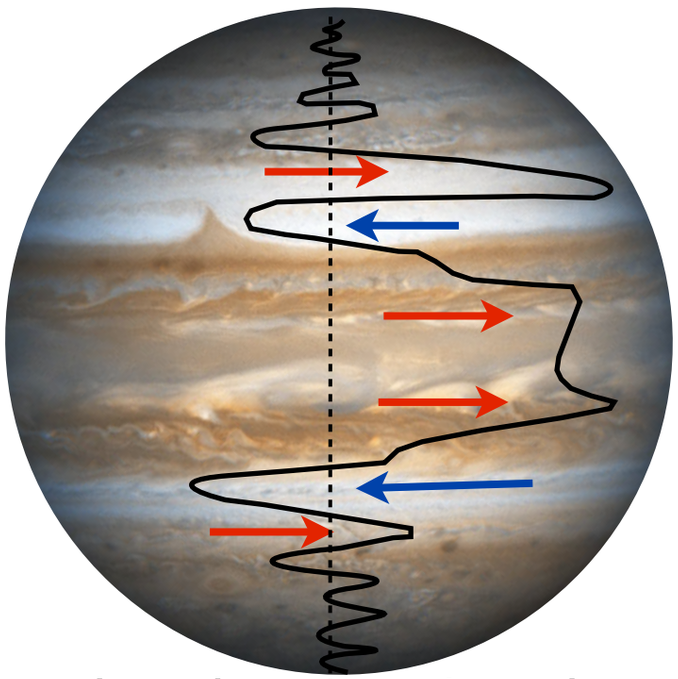
JUNO missionによる制約(1)：重力場

木星に見られる**東西方向**の**帯状風** (赤道のジェット：順行のsuperotation)

帯状風は数年~数10年は安定 (← HST画像 1995-2008)
(Garcia-Melendo & Sanchez-Lavega,2001;Asay-Davis+11)

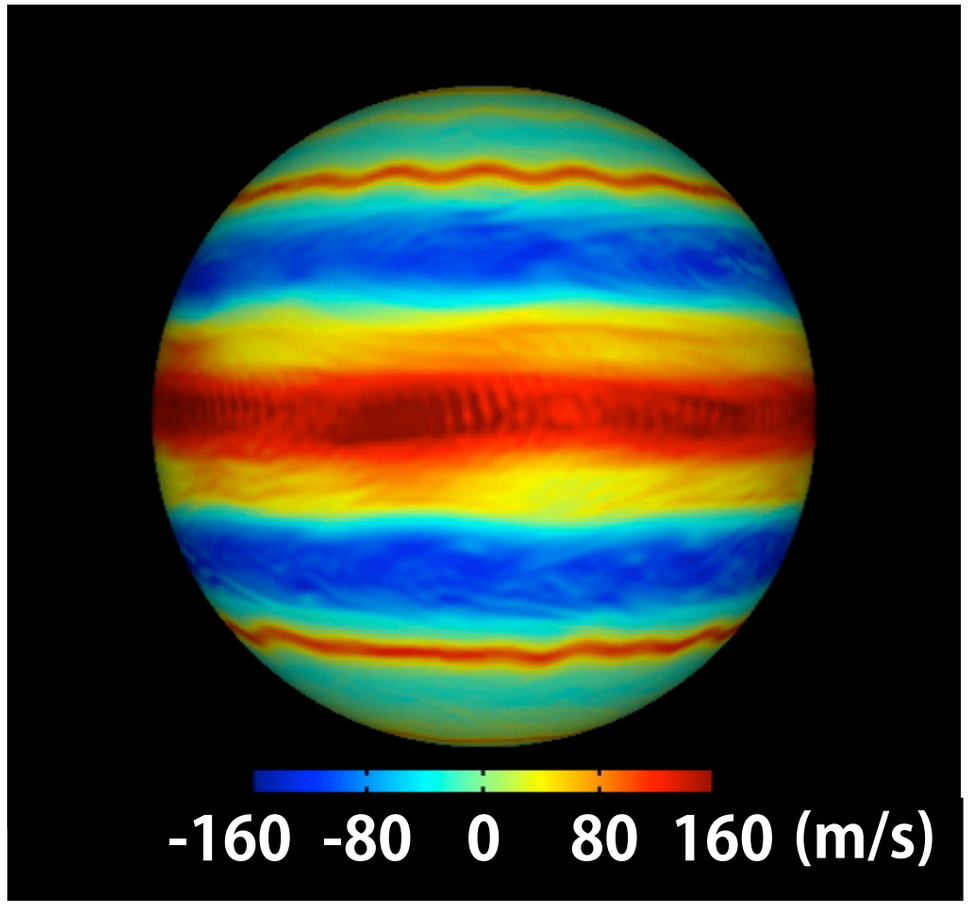
(駆動源) 日射量の差 (自転軸傾斜角~3°)?
内部からの対流による熱流束?

■ Cassini探査機の画像解析
帯状風の緯度方向の速度プロファイル



(Porco+03)

■ 3D GCM simulation (0.75bar)

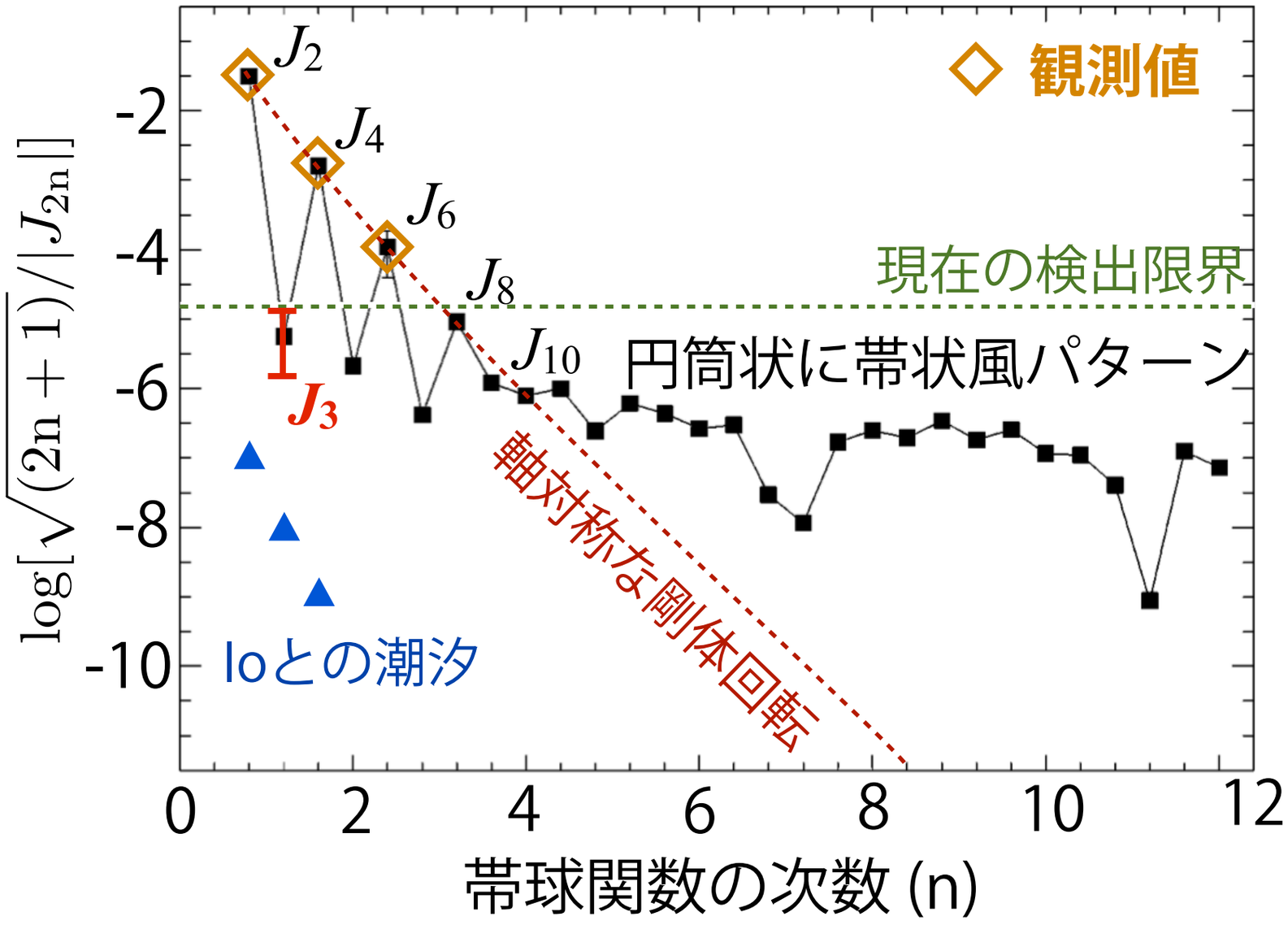


(Liu & Schneider,2010)

JUNO missionによる制約 (1)：重力場

どの深さまで帯状風のパターンが存在するか？

【数値実験】J_{2n} と木星内部の回転パターンの関係 (Hubbard,1999)



$$\frac{1}{\rho}\nabla P = \nabla V - \boldsymbol{v}\cdot\nabla\boldsymbol{v}$$

移流項

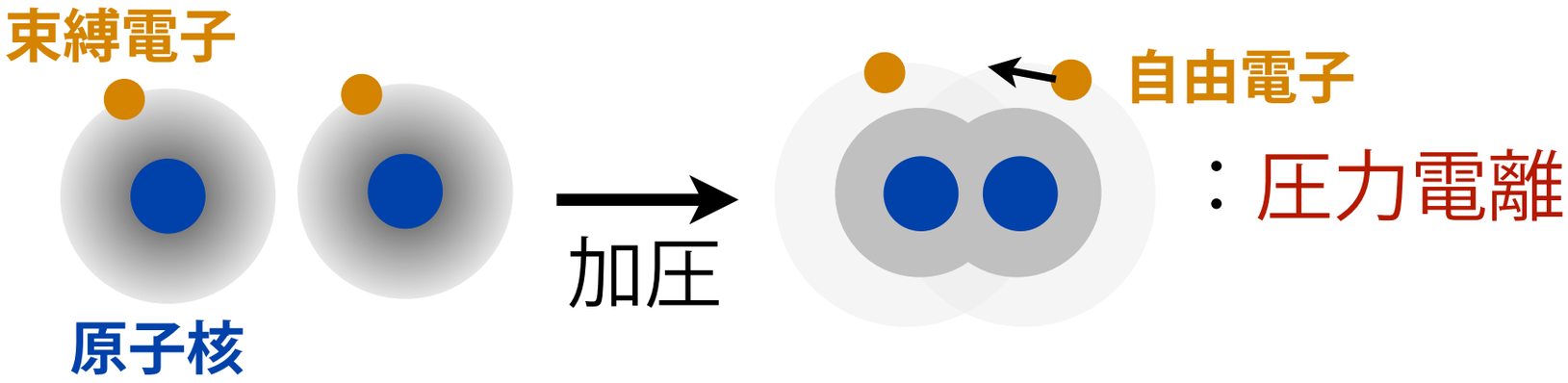
- 木星内部の回転
- 帯状風と深さの関係

<u>高次 (J_{10}以上)</u> or **<u>奇数次</u>**<u>の重力モーメントの決定</u>

※ 木星 $J_3 = -0.64 \pm 0.90 \times 10^{-6}$ (Jacobson,2000)

金属水素層

高圧下では、水素は金属的に振る舞う(**金属化**) (Wigner & Huntington,1935)



(Q1) 水素は**本当に金属化**するのか？
(Q2) 水素が金属化する**温度・圧力条件**？
(Q3) 水素の金属化は**1次相転移** (エントロピー／密度ジャンプあり)？

なぜ、重要？

■ 木星・土星の**磁場** (双極子磁場が卓越)

導電性の流体要素(の**存在**) → **ダイナモ効果**による**磁場生成**

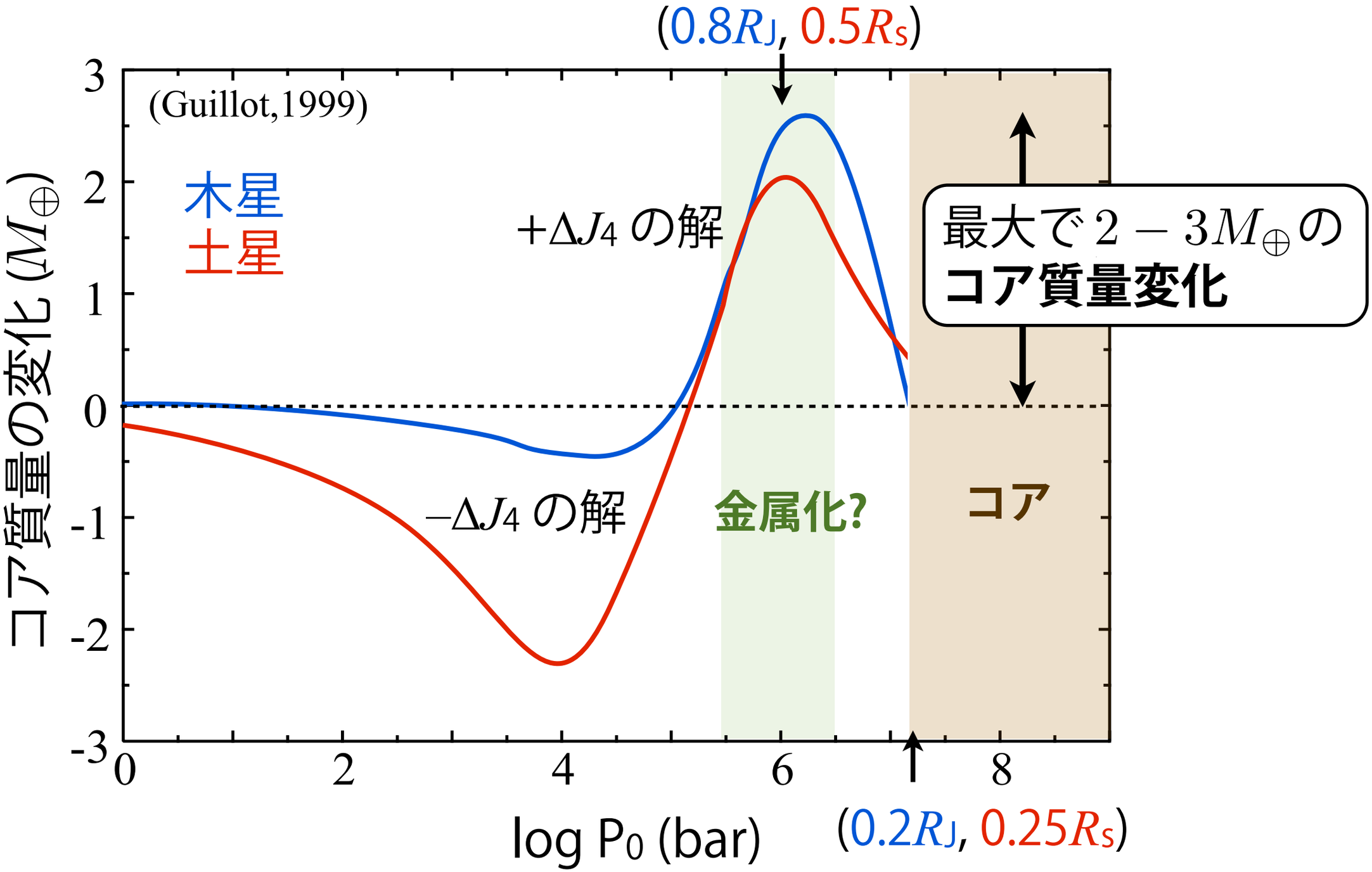
■ 木星・土星の**コアサイズ**

金属化による**密度ジャンプ** → ガス惑星内部の**密度分布**

金属水素層とガス惑星の内部組成

【数値実験】→ ある圧力(log**P₀**)中心の Gauss分布(最大**5%**)

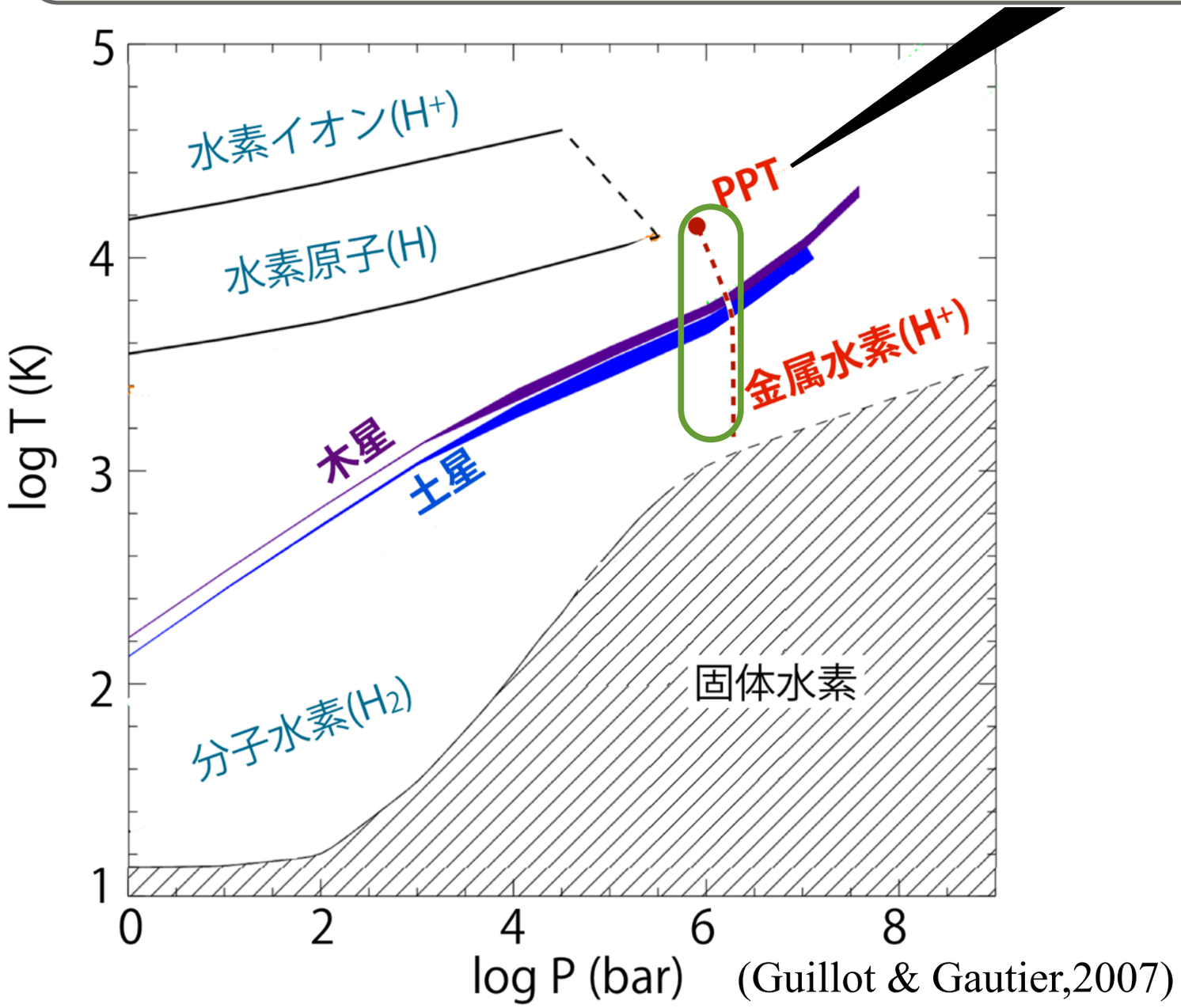
水素の金属化：1次相転移(H_2 → 金属水素)の**密度ジャンプ**
(観測量 J_2, J_4, R_{eq}を再現する内部構造モデル)



金属水素の振る舞い：理論的アプローチ

■ **自由エネルギー最小化法** ※ 原子, 分子, イオンの"各成分"で取り扱う
(Graboske+69; Saumon & Chabrier,1992)

水素の金属化：**1次相転移** (**P**lasma **P**hase **T**ransition)
→ 密度の不連続 (P ~**200GPa**, T ~**3000-10000K**)



(Guillot & Gautier,2007)

金属水素の振る舞い：第一原理計算

■ 第一原理計算　※ Schrödinger 方程式を解く

「**多電子**状態」: 平均場近似 → **一電子近似**

DFT (密度汎関数理論) : **電子密度分布** ←→ **ポテンシャル場** (→ 系のH)

※ (通常) 外場 → 系のH → 全波動関数 → 電子密度分布
※ 電子の交換相関 E : 局所密度 (LDA, LSDA)／非局所性(GGA)

・**Car-Parrinello MD** (= Born-Oppenheimer近似 : 電子と原子核の慣性差を利用)

→ **PPT**あり ($P = $ **125GPa**, $T = $ **1500K**) (Scandalo,03)
($P \sim$ **50GPa**, $T \sim$ **3000K**) (Bonev+04)

↓

・**QMD (量子MD)**／PIMC(経路積分MC) : 電子相関／量子効果

→ **連続的な変化?** ※ Born-Oppenheimer近似 ~ 断熱近似あり
(Militzer & Ceperly,01;Delaney+06;Vorberger+07;Holst+08)

↓

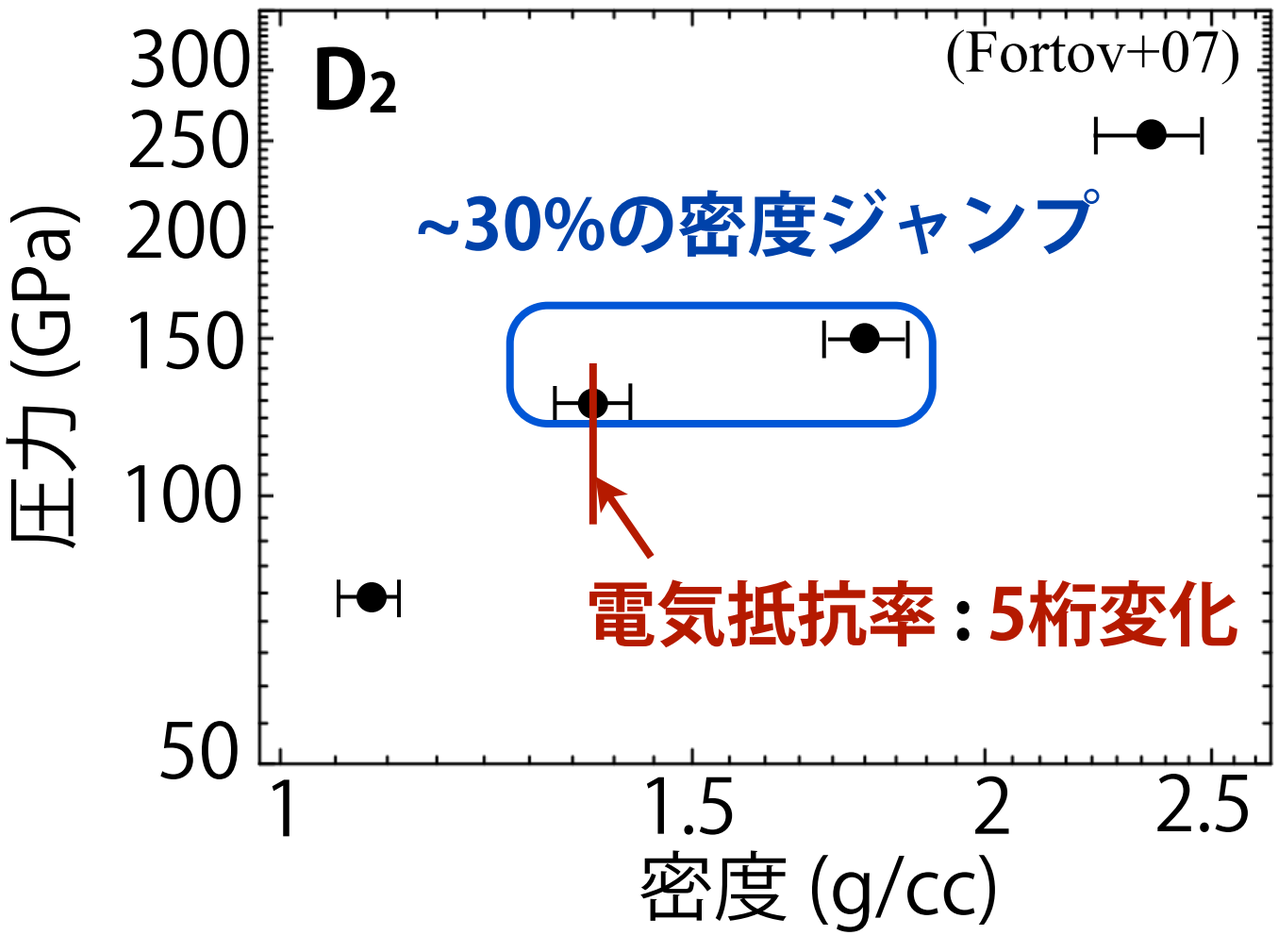
PPTあり? (温度依存性あり) : $P = $ **120-200GPa**, $T <$ **2000K**)
(Morales+09;Lorenzon+11)

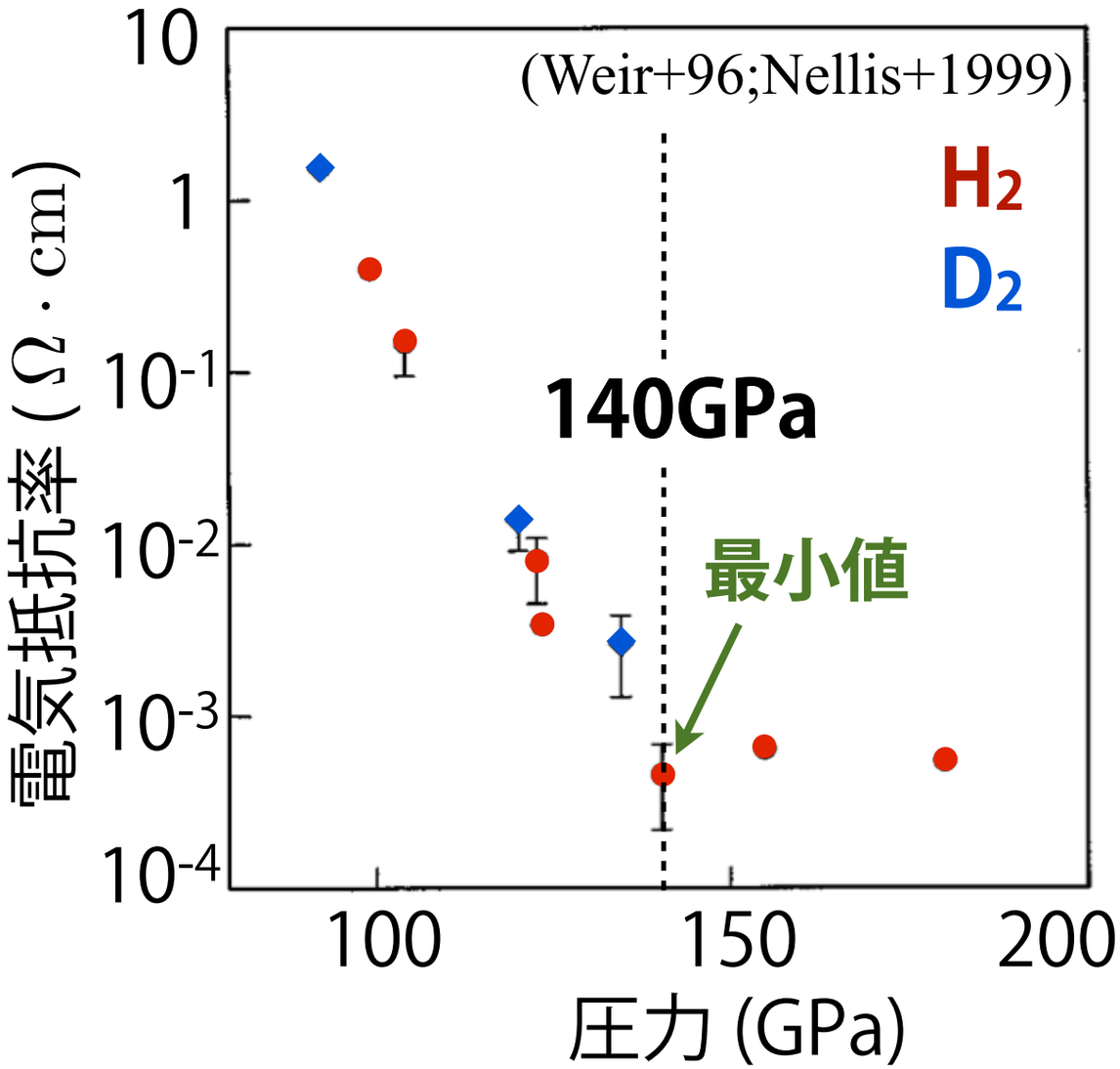
金属水素の存在：高圧実験

【二段ガス銃実験】20Kの液体 H_2, D_2
(P = 93-180 GPa, T = 1810-3090 K)

水素：**半導体** → **金属**状態

- 水素の金属化：**PPT×**
- 金属化の条件：140GPa, 3000K





【爆縮実験】

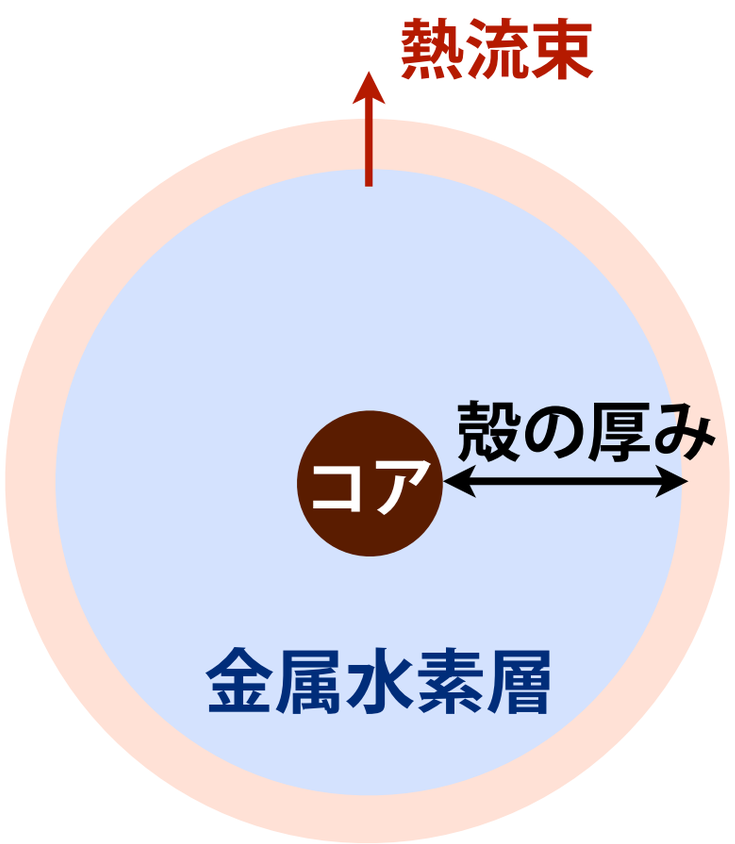
140GPa付近で、

- 密度の不連続
- 電気抵抗率の急激な減少

→ **PPTの兆候**か？

JUNO missionによる制約(2)：磁場とコアサイズ

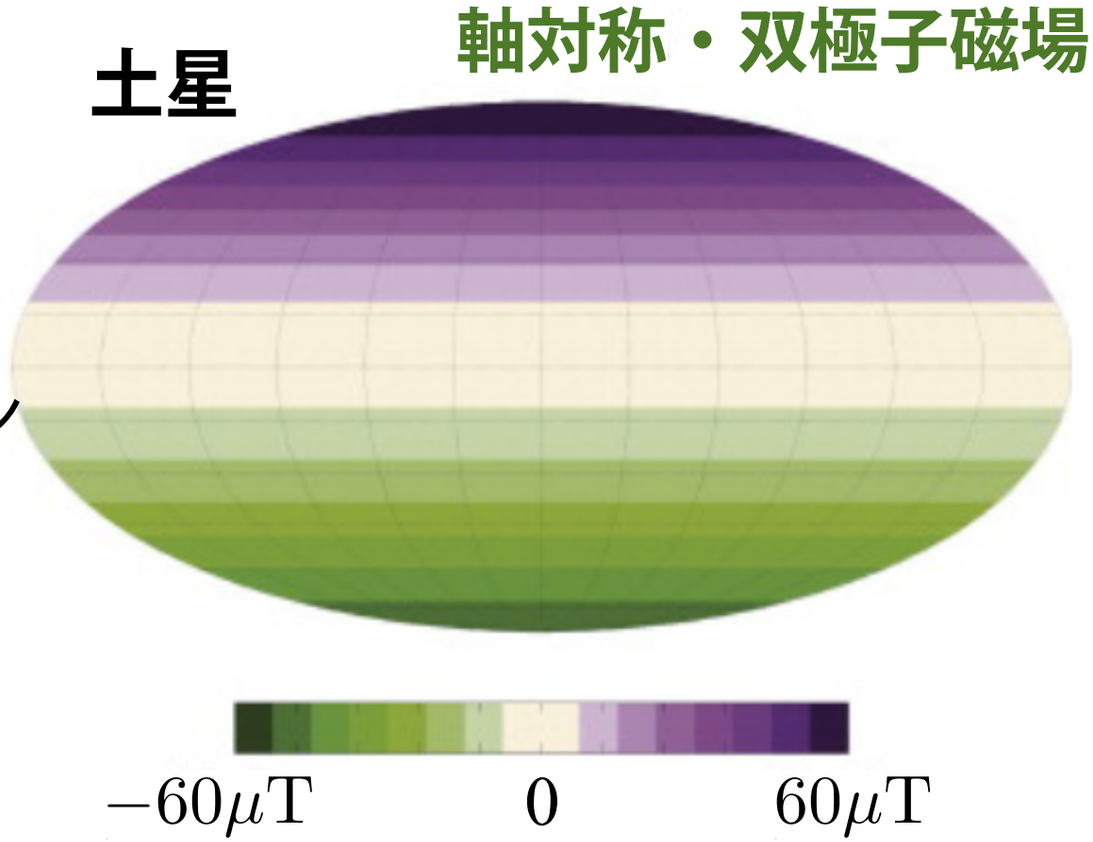
木星 : **双極子磁場**が卓越するが、**四重極やより高次成分**も見られる
土星 : **軸対称**＋**磁軸の傾き~0°**　を持つ**磁場** (双極子磁場が卓越)



ダイナモ計算

磁場パターン

表面磁場の動径成分 (from Cassini)
※ 球面調和関数 $(l, m \leq 3)$



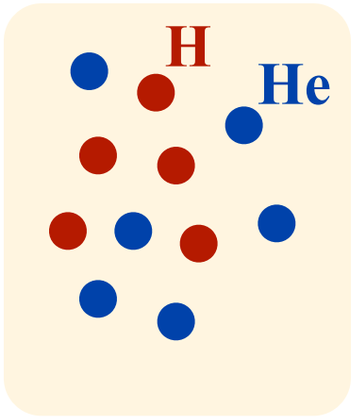
(Schubert & Soderlund,2011)

ガス惑星の**コアサイズ**
(= **金属水素層の厚さ**)

(e.g. Cao+2012, submitted)

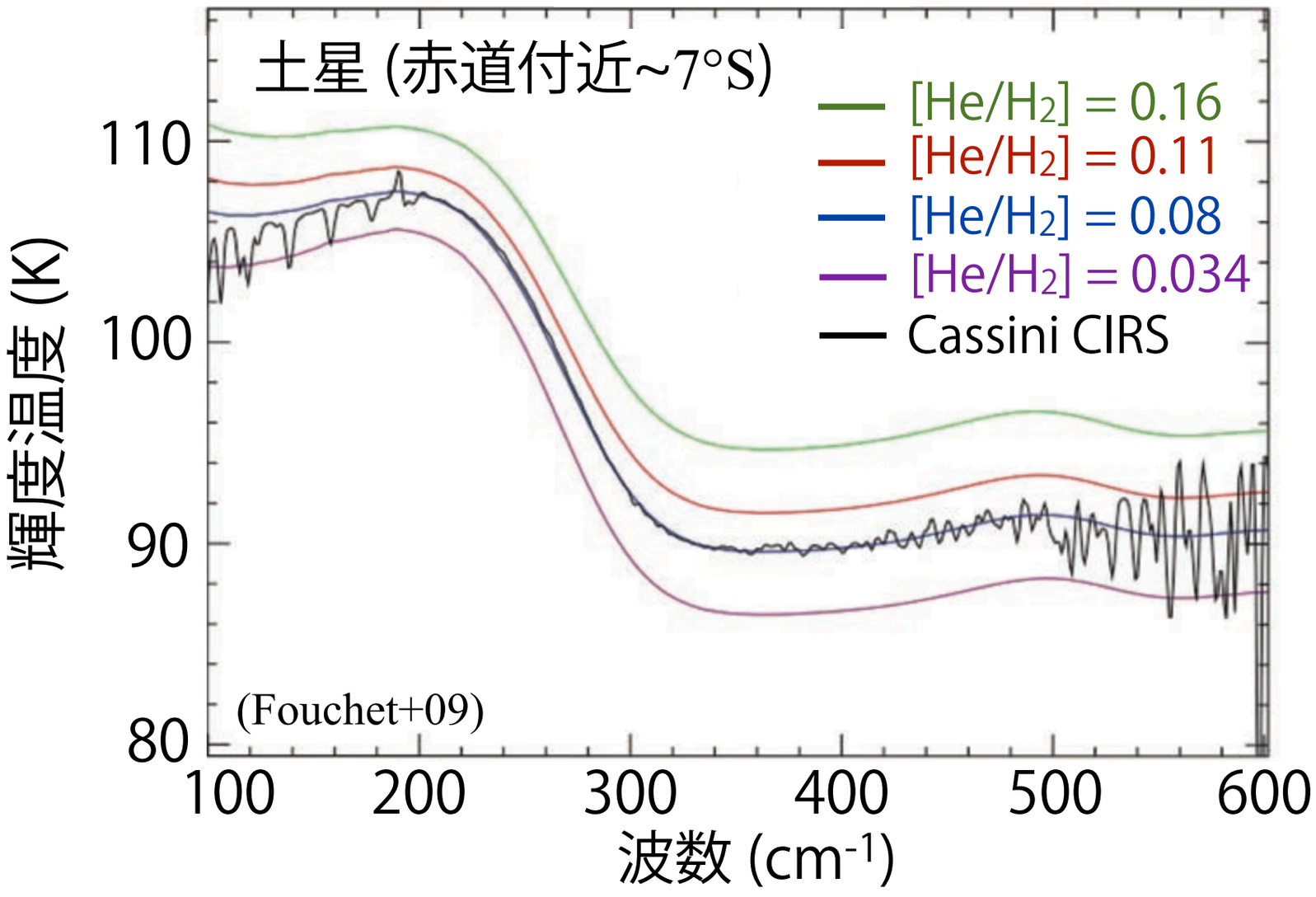
H-Heの分離：大気中のHe含有量

■ H-Heの不混和 (He沈降) (Stevenson & Salpeter,1977)

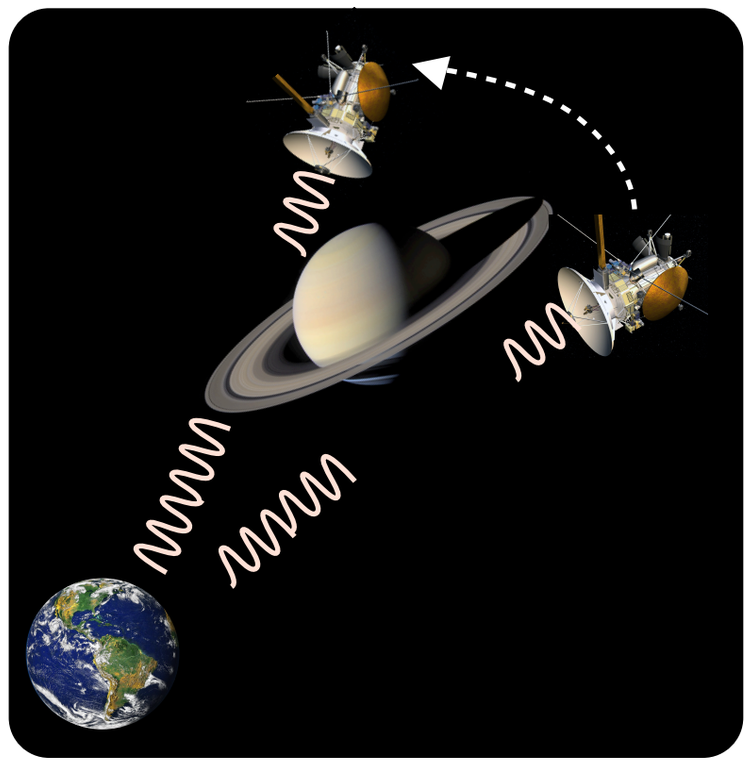


(1) 大気中($P \leqq 10$bar)のHe枯渇 (原始太陽系星雲：$Y = 0.27$)

木星：$Y =$ **0.231** ← Galileo NMS (Von Zahn+00; Niemann+00)
土星：$Y =$ **0.17-0.24** ← Voyager IRIS/RMS (Conrath & Gautier,2000)
$Y =$ **0.13** ← Cassini CIRS (Gautier+06)

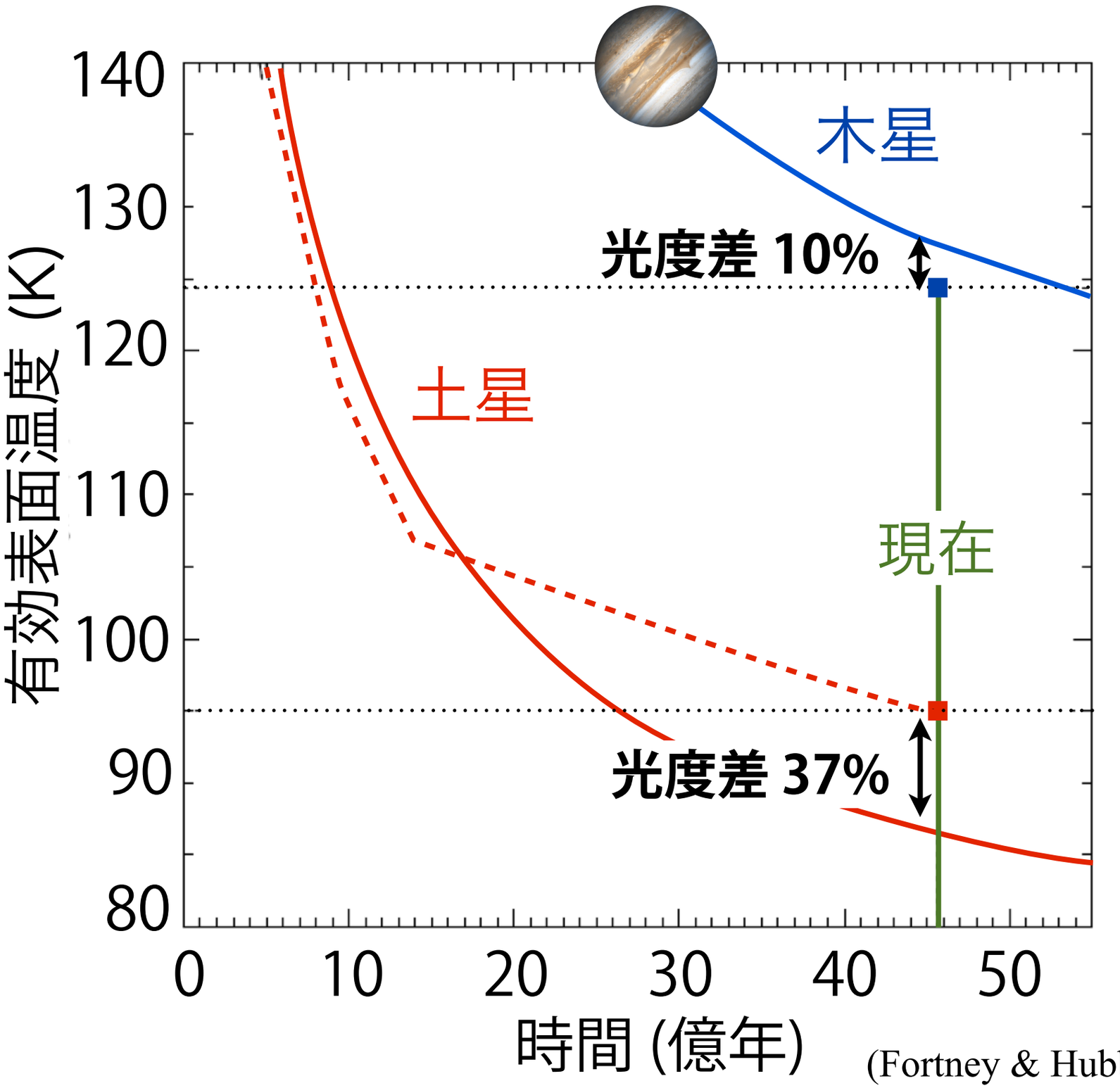


電波掩蔽観測



H-Heの分離：土星の熱進化

(2) 明るすぎる土星の問題：He沈降に伴う重力エネルギーの解放



—— homogeneous

----- H-He分離あり
(CMBまでHe沈降)

※ **遅延時間** (w/ H-He分離)

$$\Delta t \sim \frac{\Delta E_{\mathrm{H-He}}}{L} \sim \frac{\Delta M g \bar{R} \frac{\Delta\rho}{\rho}}{L}$$

分離領域 ~ 土星半径の1/2

$$\rightarrow \Delta t \sim 20 \boxed{\frac{\Delta\rho}{\rho}} \ (\mathrm{Gyr})$$

2相の密度差

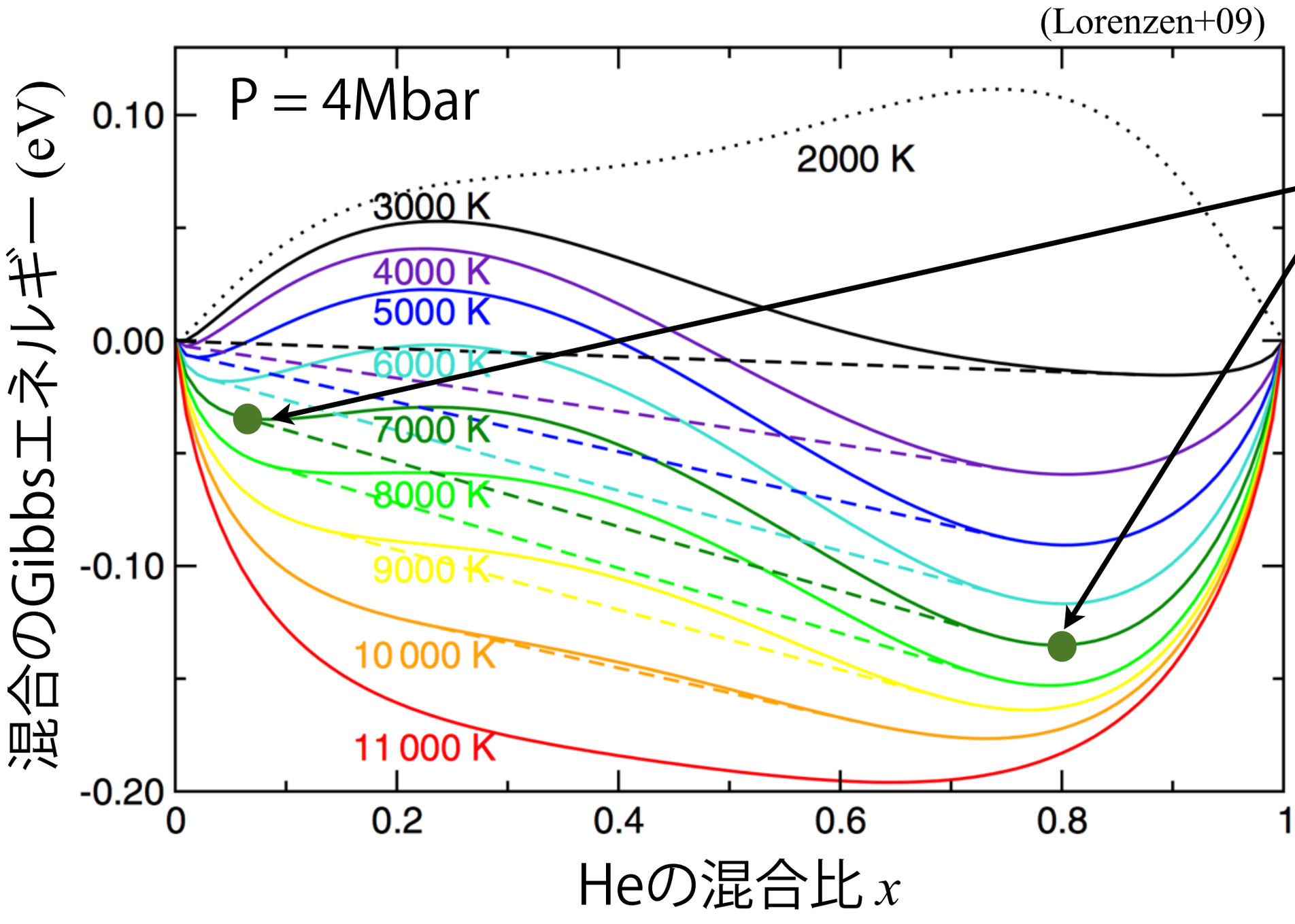
(Fortney & Hubbard,2003;Fortney+11)

H-Heの分離：P-T領域

混合のGibbs エネルギー

$$\Delta G_{\rm mix} = \underbrace{G({\rm H-He})}_{\text{H-He混合}} - x\underbrace{G({\rm He})}_{\text{He層}} - (1-x)\underbrace{G({\rm H})}_{\text{H層}}$$, x : Heの混合比

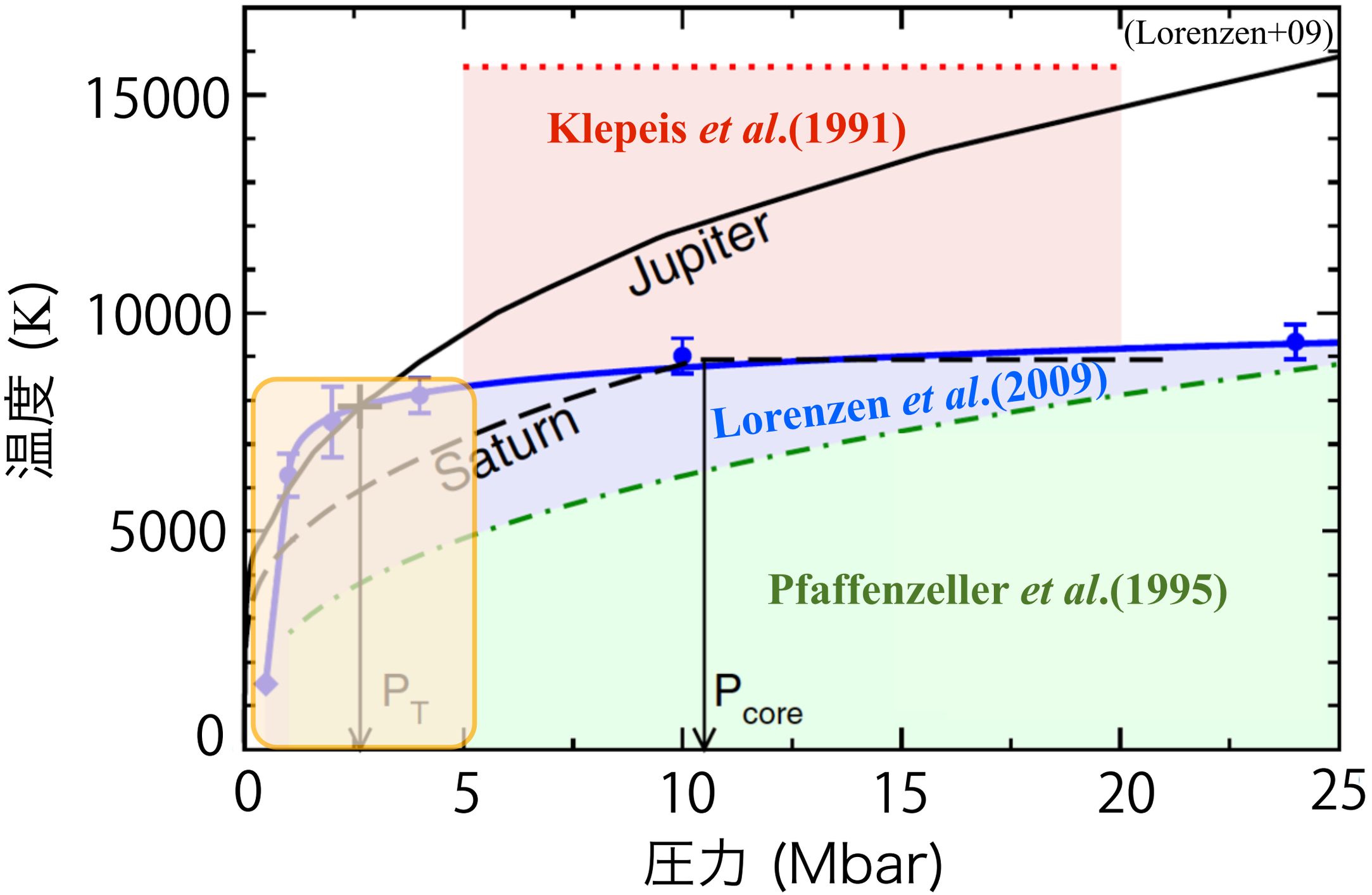
(Lorenzen+09)



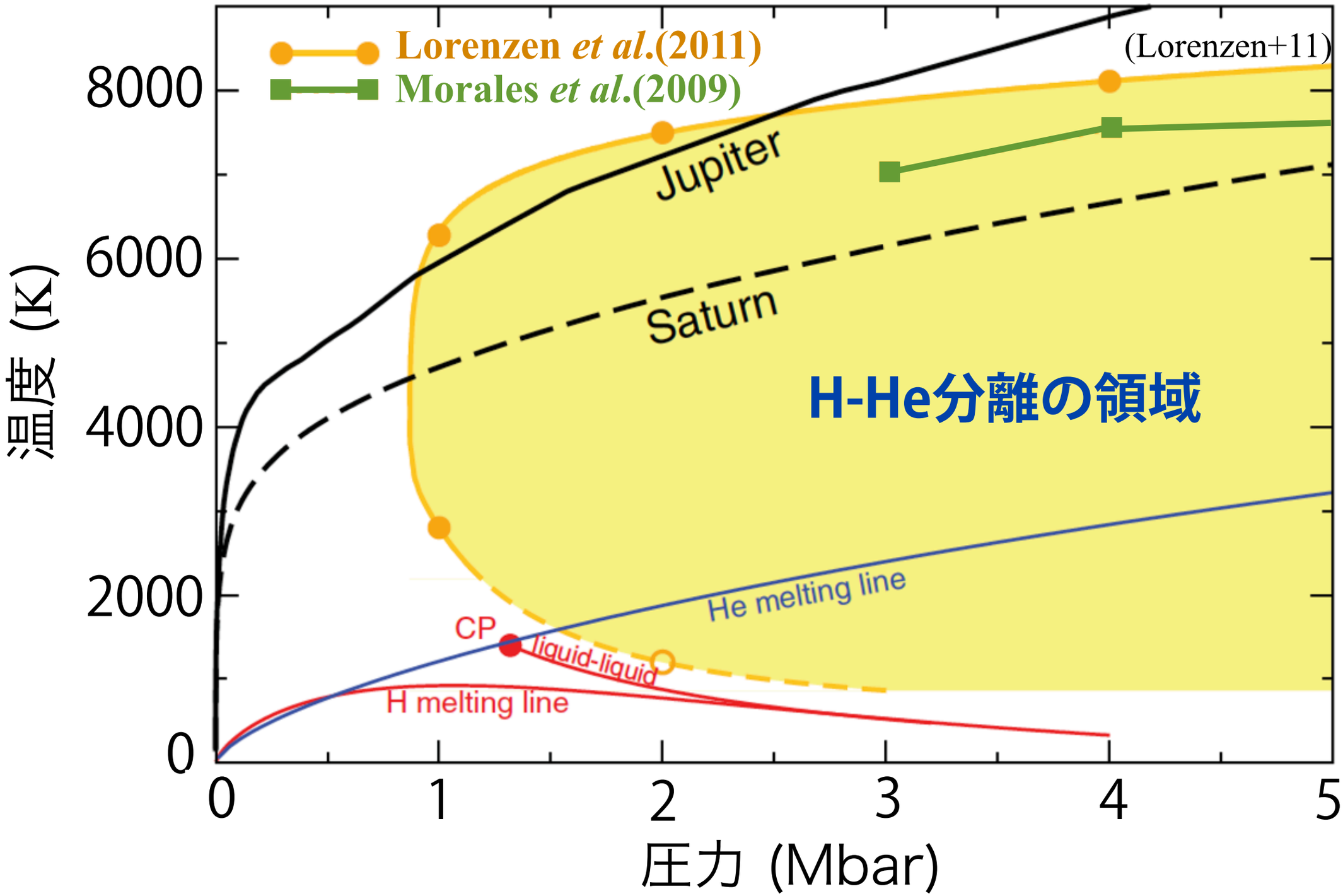
2つの極小
→ 相分離

H-Heの分離：P-T領域 (P≦25Mbar)

木星：非常に限られた領域のみ**H-He分離**
土星：大域的な**H-He分離**



H-Heの分離：P-T領域(P≦5Mbar)



H-He分離：**水素の金属化**と関係している(駆動エンジン)？

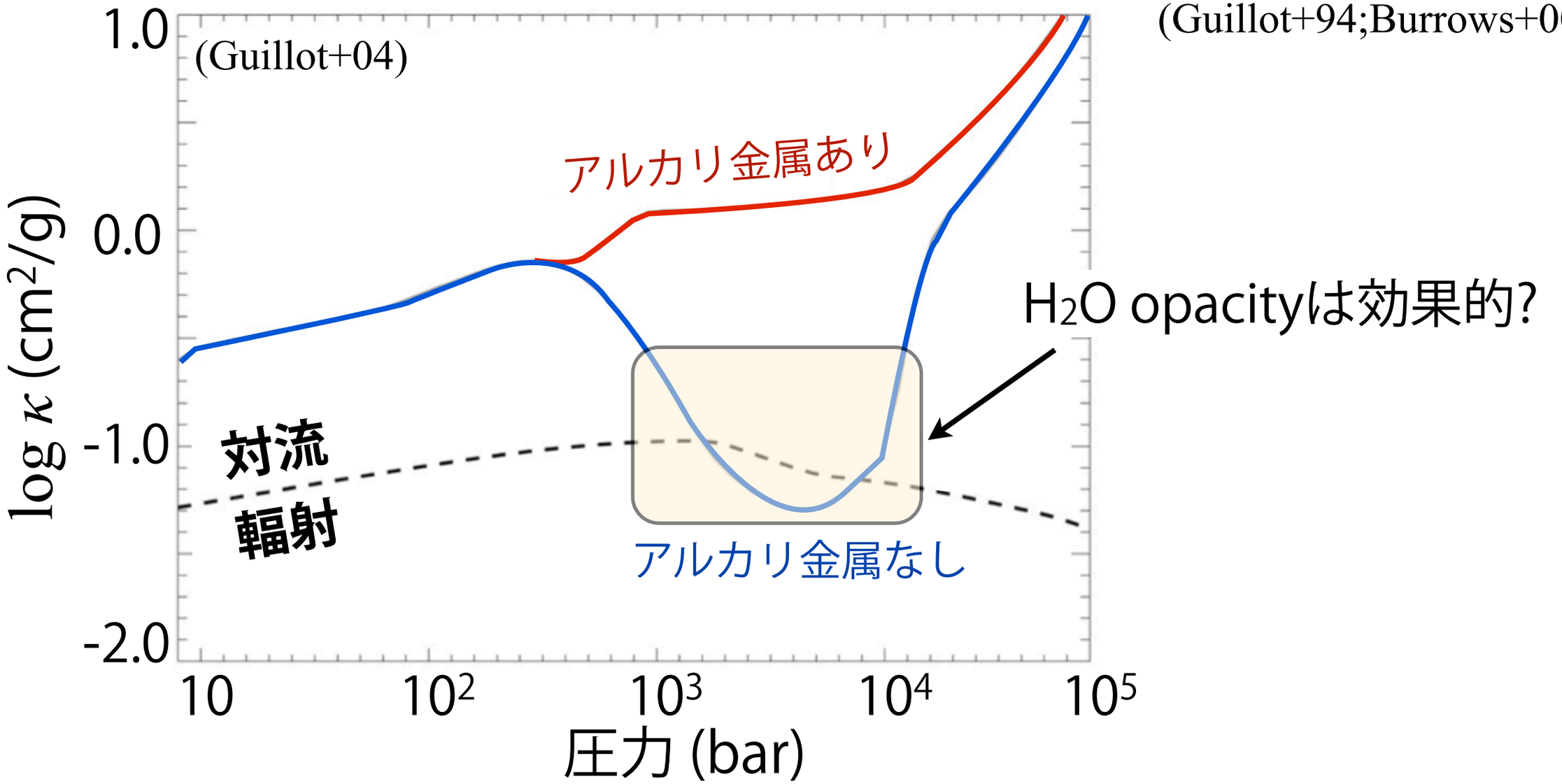
木星・土星の大気：熱輸送

木星・**土星**内部 --- (ほぼ)**全対流** ※ P, Tともに急激なopacity↑

(Q) 木星・土星の大気は？

主たる**opacity源** --- H_2-H_2 CIA, **H_2O**, **CH_4** ($T < 1000$K)
アルカリ金属 (Na, K ...) (T~1200-1500K)
H_2^-, H^-, TiO ($CaTiO_3$) (T ~1500-2000K)

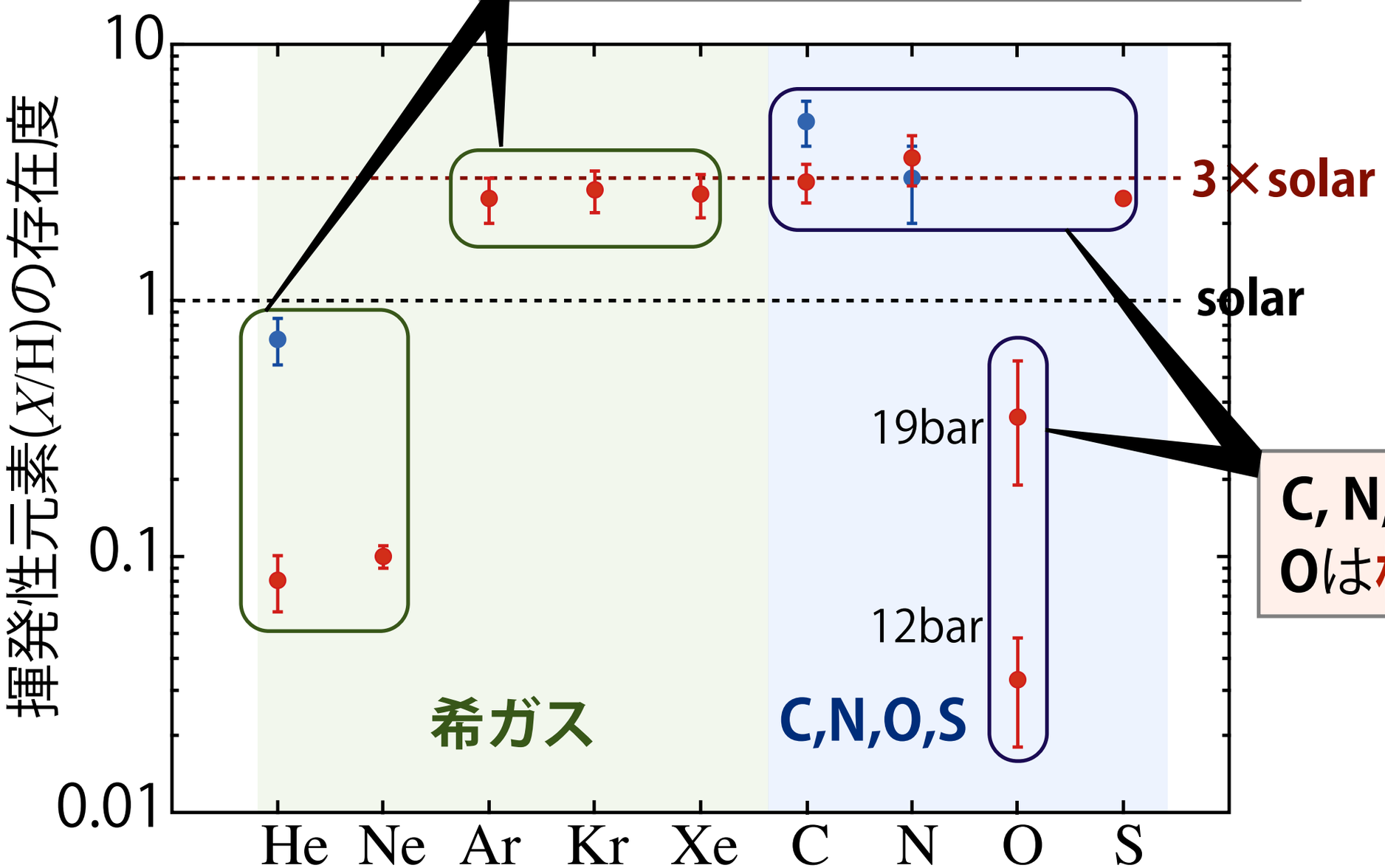
(Guillot+94;Burrows+00)



木星・土星の大気組成：揮発性元素

木星：Voyager, Galileo, Cassiniによる分光観測
土星：IR・電波の地上観測+Cassini　(Niemann+98;Mahaffy+00; Atreya+99,03;Wong+04)

Ar, Kr, Xeに富む(2-3倍)
一方で、**He, Neの枯渇**した大気



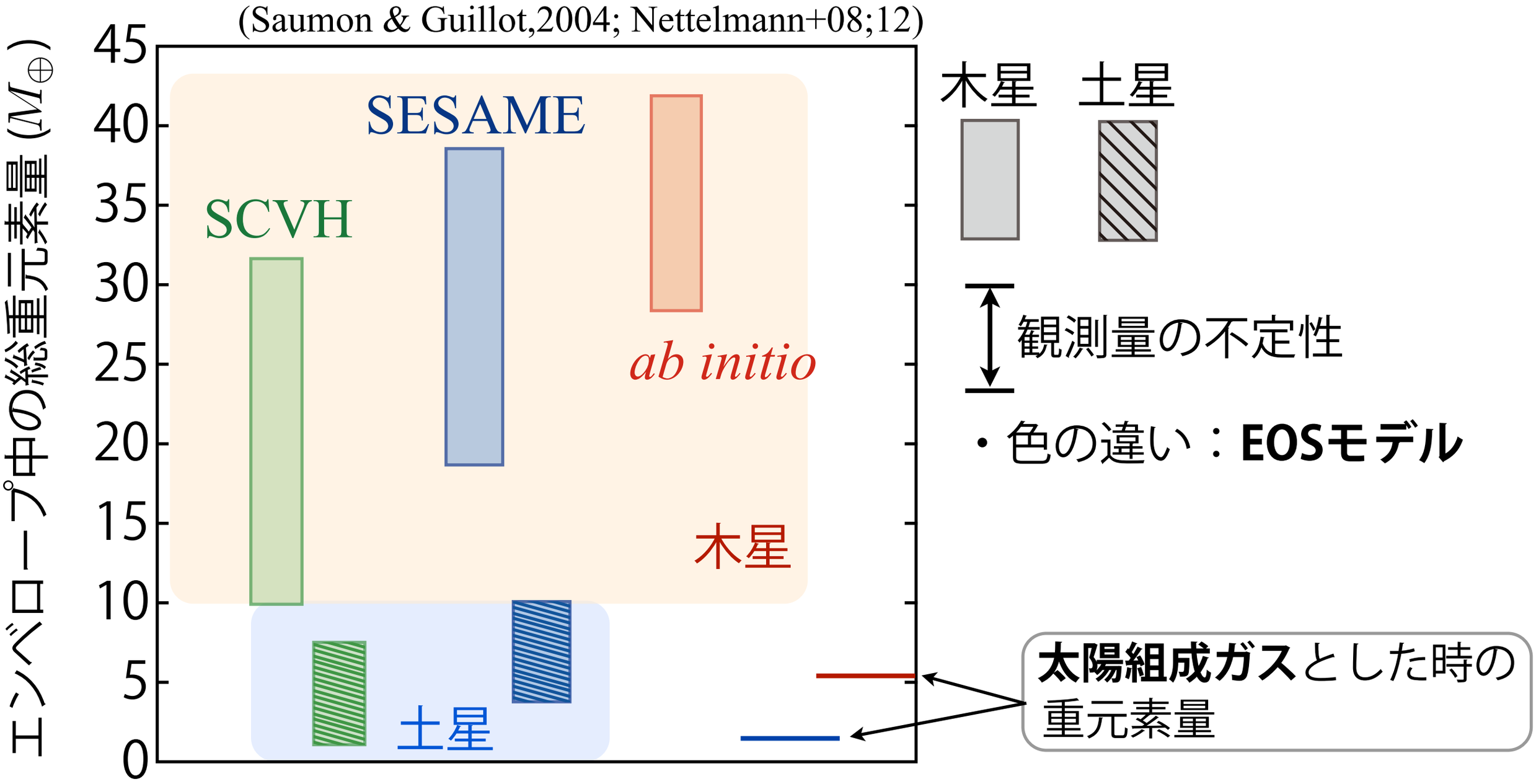
C, N, Sに富む(2-6倍)
Oは枯渇(乾燥)?

(cf) solar abundances from Anders & Grevese (1989)

木星・土星の揮発性元素に富む大気

エンベロープ全体に含まれる**重元素** (**H,He以外**の元素) 量

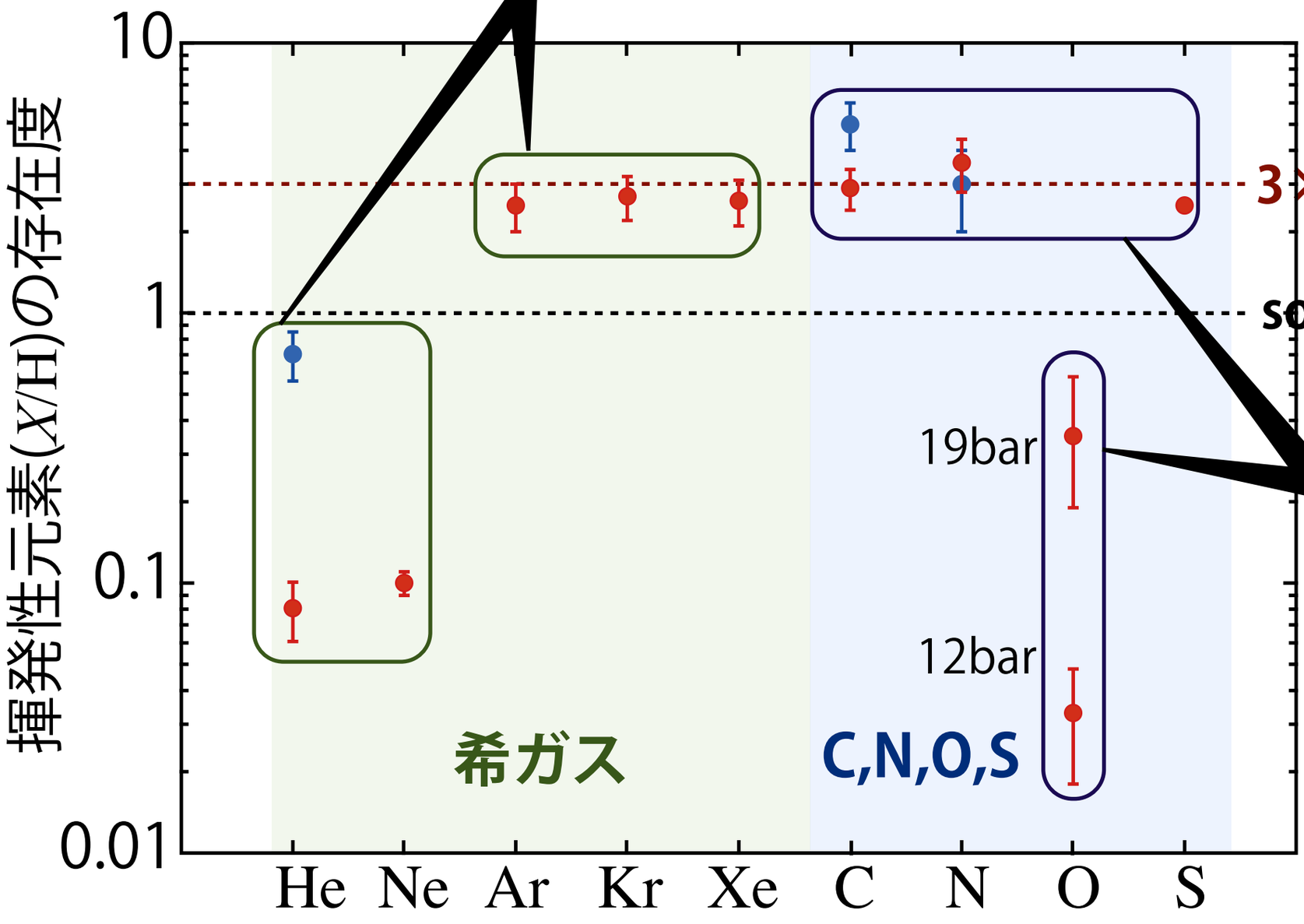
■ **内部構造モデル** → **エンベロープ**全体で**重元素**に富む



木星・土星の大気組成：揮発性元素

木星：Voyager, Galileo, Cassiniによる分光観測
土星：IR・電波の地上観測+Cassini　(Niemann+98;Mahaffy+00; Atreya+99,03;Wong+04)

Ar, Kr, Xeに富む(2-3倍)
一方で、**He, Neの枯渇**した大気



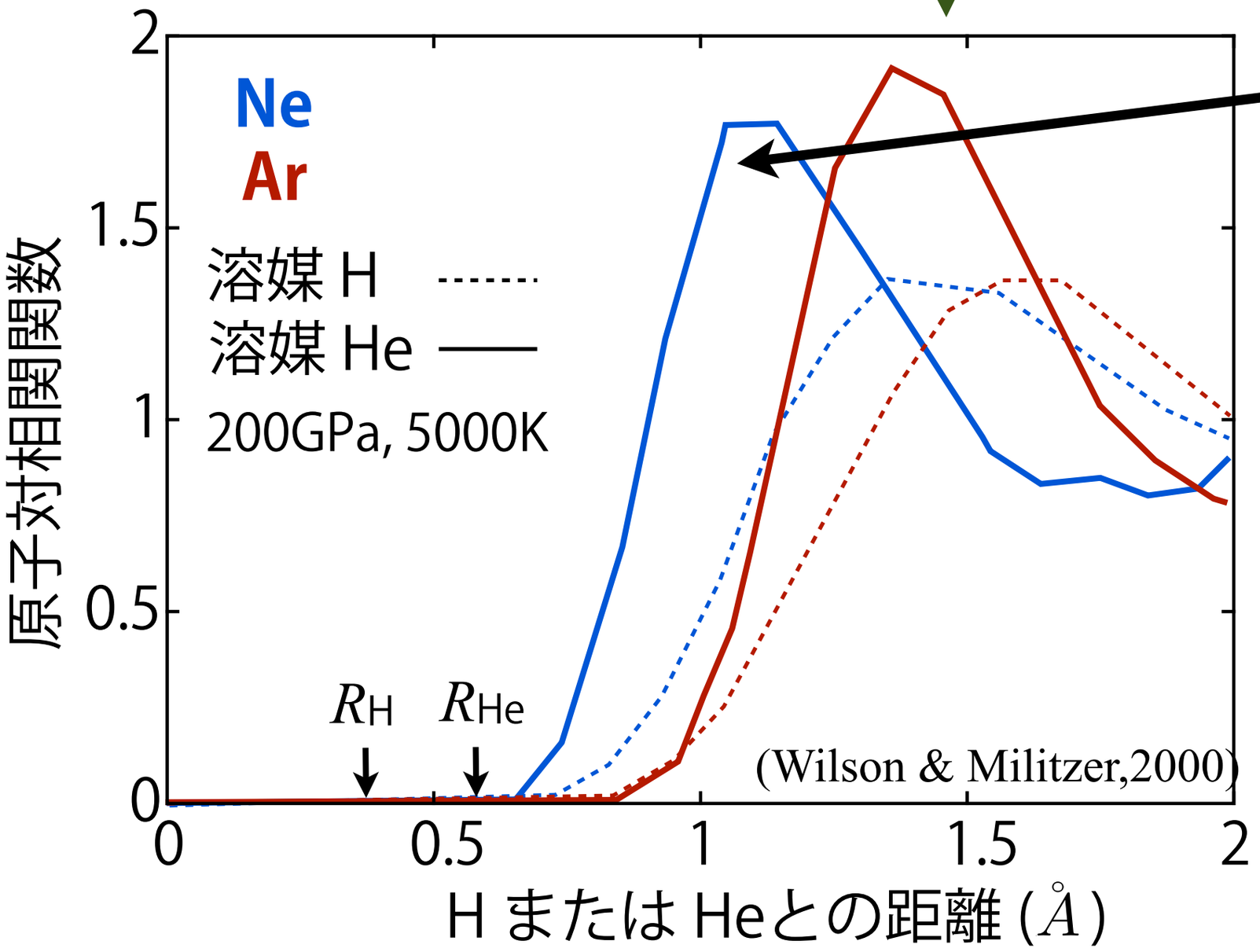
C, N, Sに富む(2-6倍)
Oは枯渇(乾燥)?

木星・土星の大気組成：He, Neの枯渇

Neの**枯渇**：**H-He分離**の間接的証拠

→ 沈降する**He液滴**に**Ne**が選択的に溶解 (Roulston& Stevenson,1995)

第一原理計算：**H-He不混和**領域でのH, Heに対する**Ne, Ar**の溶解度



Ne-He pair
近接距離に多く存在

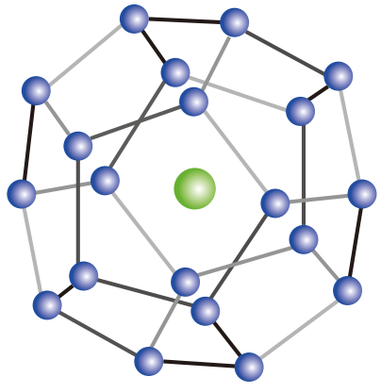
＋

$$\Delta G = G(\mathrm{Ne/Ar + He}) + G(\mathrm{H}) - G(\mathrm{Ne/Ar + H}) - G(\mathrm{He})$$

Ne： $\Delta G < 0$ (He相側)
Ar： $\Delta G > 0$ (H相側)

木星・土星の揮発性元素に富む大気

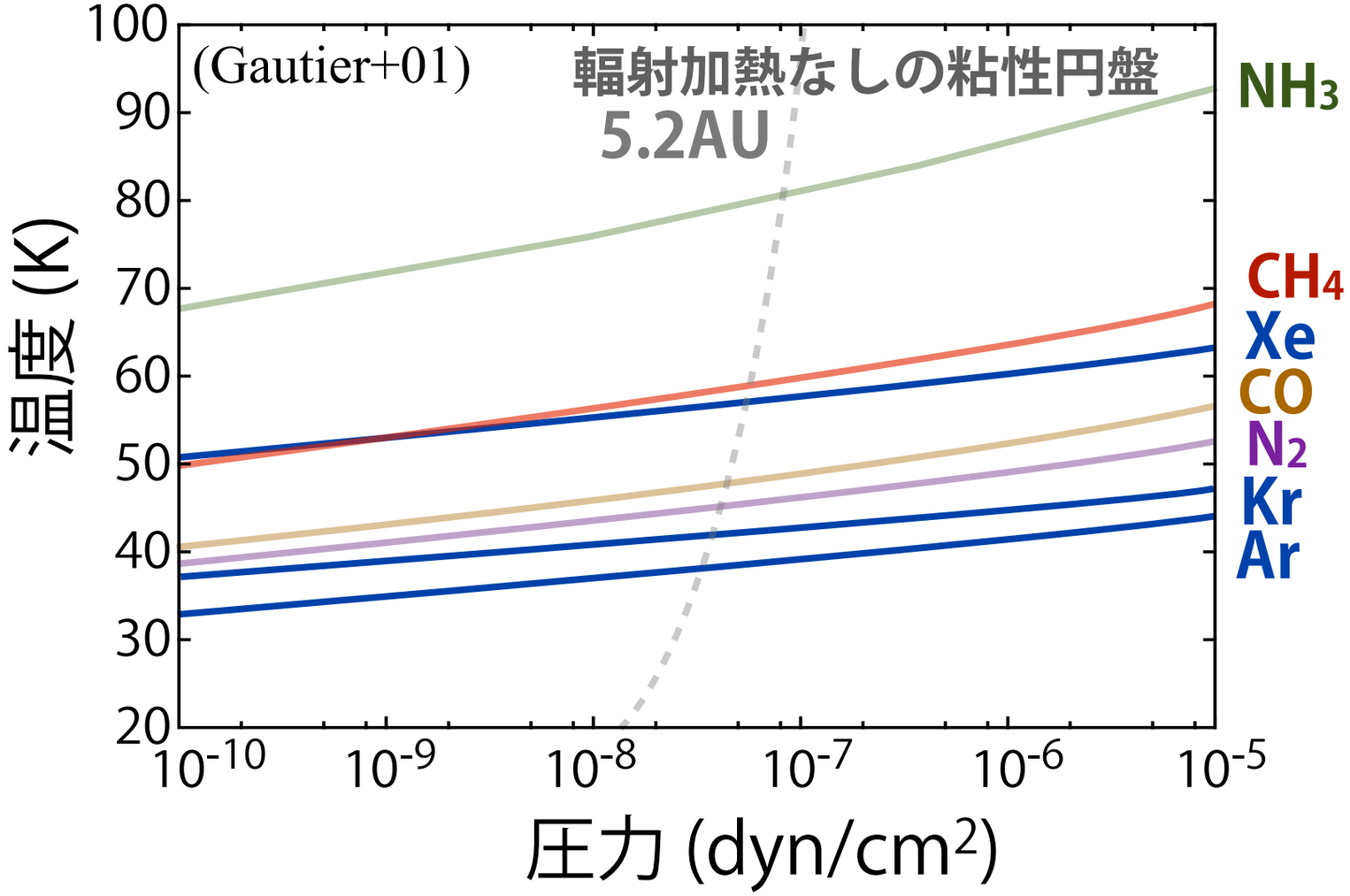
(1) **氷微惑星**が起源：非晶質氷上に凝縮 (Owen *et al.*1999)
結晶質氷によるクラスレート(Gautier+01;Hersant+04)



氷クラスレート・ハイドレートによる
希ガス／**揮発性元素**から成る**気体**の捕獲

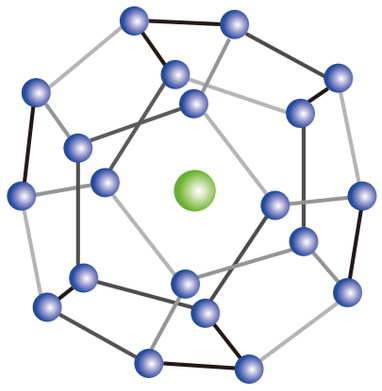
↕

【条件】**低温(< 30K)環境**で生成



木星・土星の揮発性元素に富む大気

(1) **氷微惑星**が起源：非晶質氷上に凝縮 (Owen *et al.*1999)
結晶質氷によるクラスレート(Gautier+01;Hersant+04)

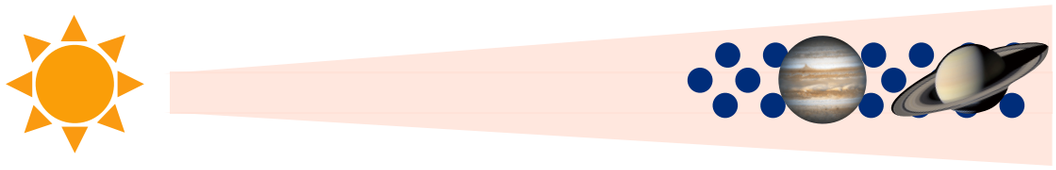


氷クラスレート・ハイドレートによる
希ガス／**揮発性元素**から成る**気体**の捕獲

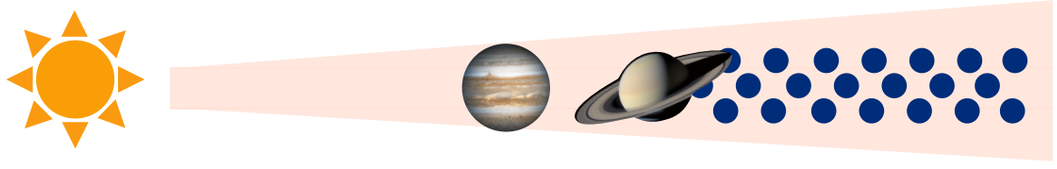
↕

【条件】**低温(< 30K)環境**で生成

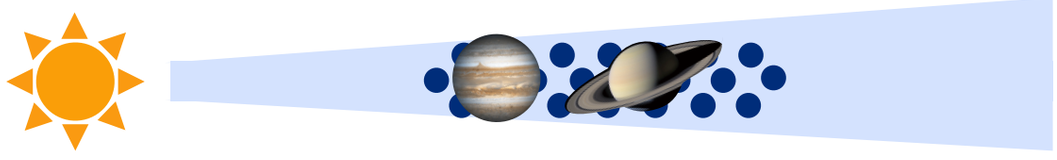
(a) 木星、土星は現在より遠方の低温領域(>30AU)で形成＋内側移動
(Alibert *et al.*2005)



(b) 低温領域で形成された**氷微惑星**の内側輸送＋捕獲

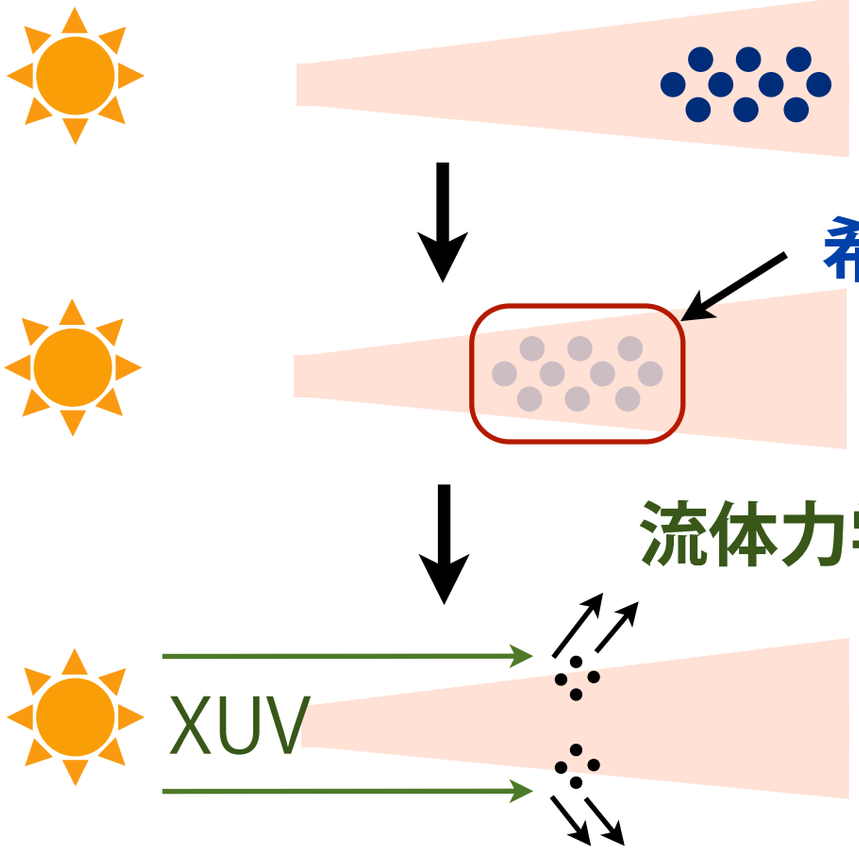


(c) 木星・土星形成時はより低温な原始惑星系円盤



木星・土星の希ガスに富む大気

(b) **光蒸発する円盤**下での大気捕獲 (Guillot & Hueso,2006)



水素の散逸
→ **衝突**で**重い元素／分子**を**引きずる**
→ **質量分別** (--- crossover mass)

■ 木星-土星領域

水素の散逸率

$$\frac{m_c}{m_H} = 3.0 \times 10^3 - 10^4 \longleftarrow m_c = m_H \left(1 + \frac{kT}{X_H m_H g} \frac{F_H}{b}\right)$$

scale height

$m_A < m_c$の時、流体力学的散逸

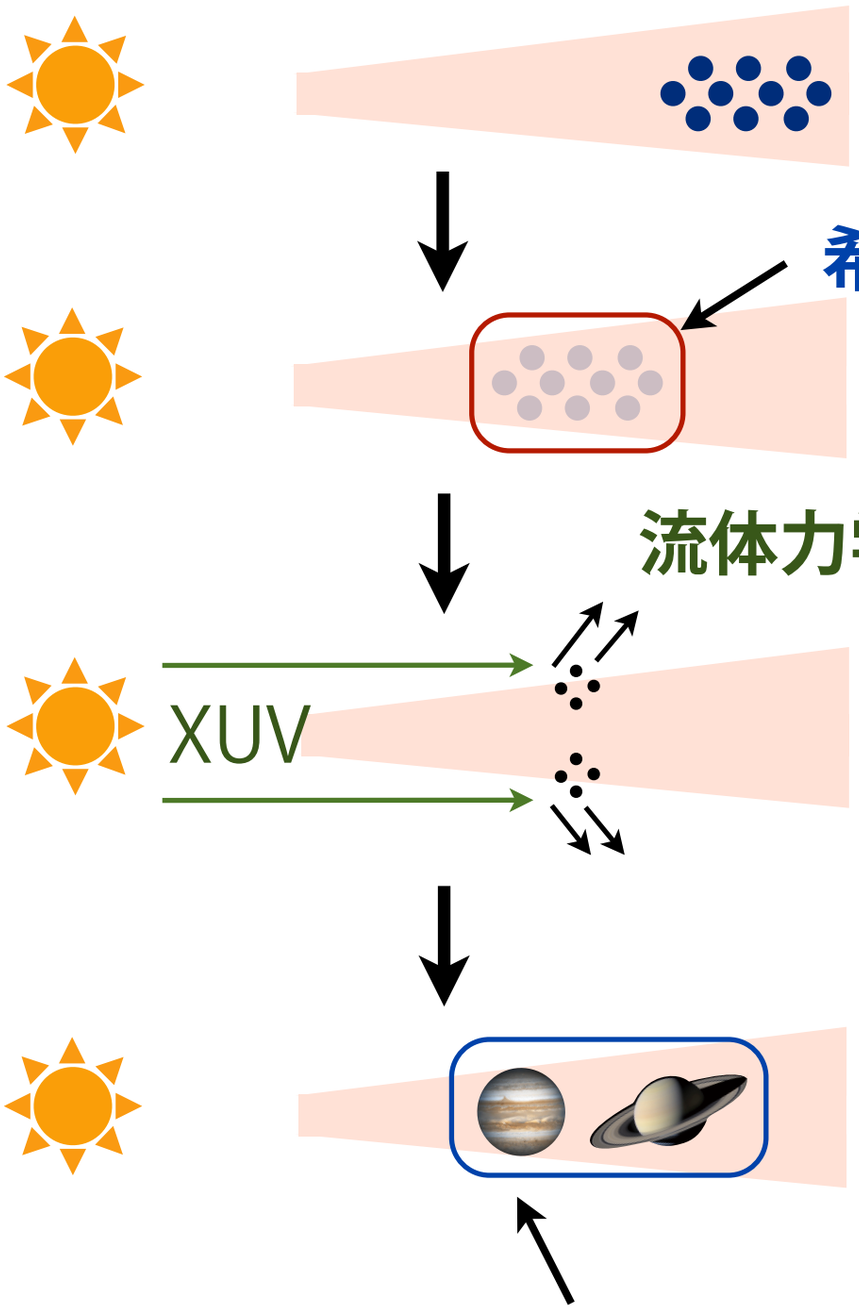
$$F_A = \frac{X_A}{X_H} F_H \left(\frac{m_c - m_A}{m_c - m_H}\right)$$

→ 拡散・圧力勾配で決まる

(Hunten+87)

木星・土星の希ガスに富む大気

(b) **光蒸発する円盤**下での大気捕獲 (Guillot & Hueso,2006)



grain上に**希ガス凝縮**

希ガスに**富む**ガス

流体力学的散逸 ($\lambda < H_{\rm p}$)

水素の散逸
→ **衝突**で**重い元素／分子**を**引きずる**
→ **質量分別** (--- crossover mass)

質量分別した**希ガス**に**富む大気**を**獲得**
(= 進化した円盤中でガス惑星形成)

木星・土星の揮発性元素：同位体比

■ **希ガス**(Ar, Kr, Xe)の**濃縮度合**

(現在) 木星大気 : Ar ~ Kr ~ Xe

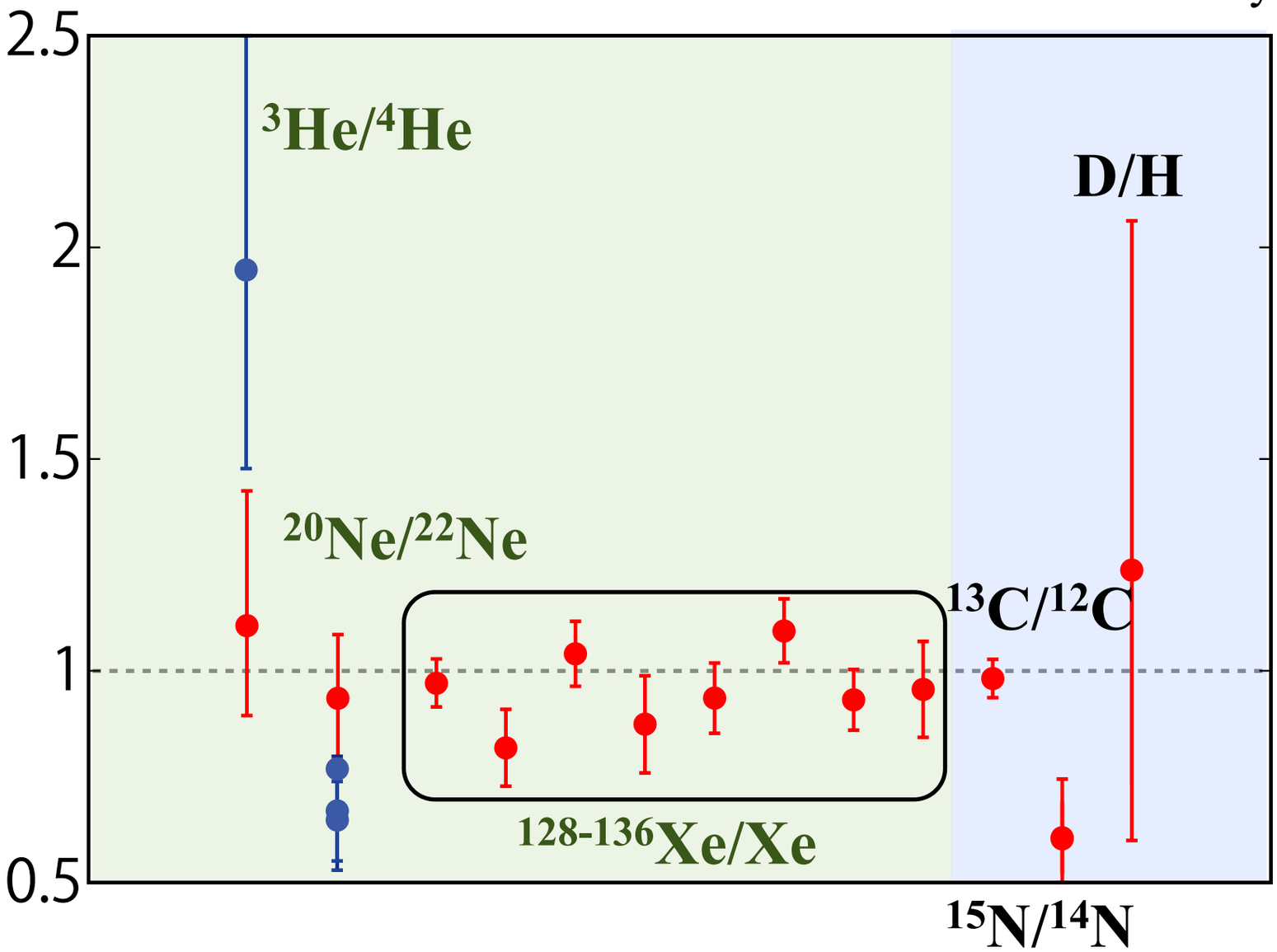
・氷微惑星 → Ar > Kr > Xe (蒸発温度の違いのため) ?
・光蒸発による質量分別 → Ar ~ Kr ~ Xeも可能(?)

↓

『**希ガス**の起源 --- **ガス惑星形成**の**制約**』

木星の揮発性元素：同位体比

■ **希ガス**(He, Ne, Ar, Xe)の**同位体比** (Mahaffy+98,00;Pepin+99;Lellouch+01; Atreya+03;Abbas+04;Fouchet+04;Marty+08)



木星大気／太陽組成(太陽風)

- **木星**
- **81P/Wild2彗星** (Stardust計画)

※ $^{3}He/^{4}He$: 木星／CI chondrite
$^{15}N/^{14}N$: 木星／terrestrial値

※ Krの同位体比 --- 未決定

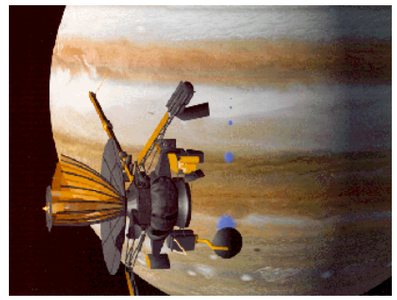
- **木星大気**の**Ne, Ar, Xe**の同位体比 ~ **太陽組成**
- **81P/Wild2(短周期)彗星** --- $^{20}Ne/^{22}Ne$ ≠ 木星大気
  --- $^{3}He/^{4}He$ **~2×**木星大気

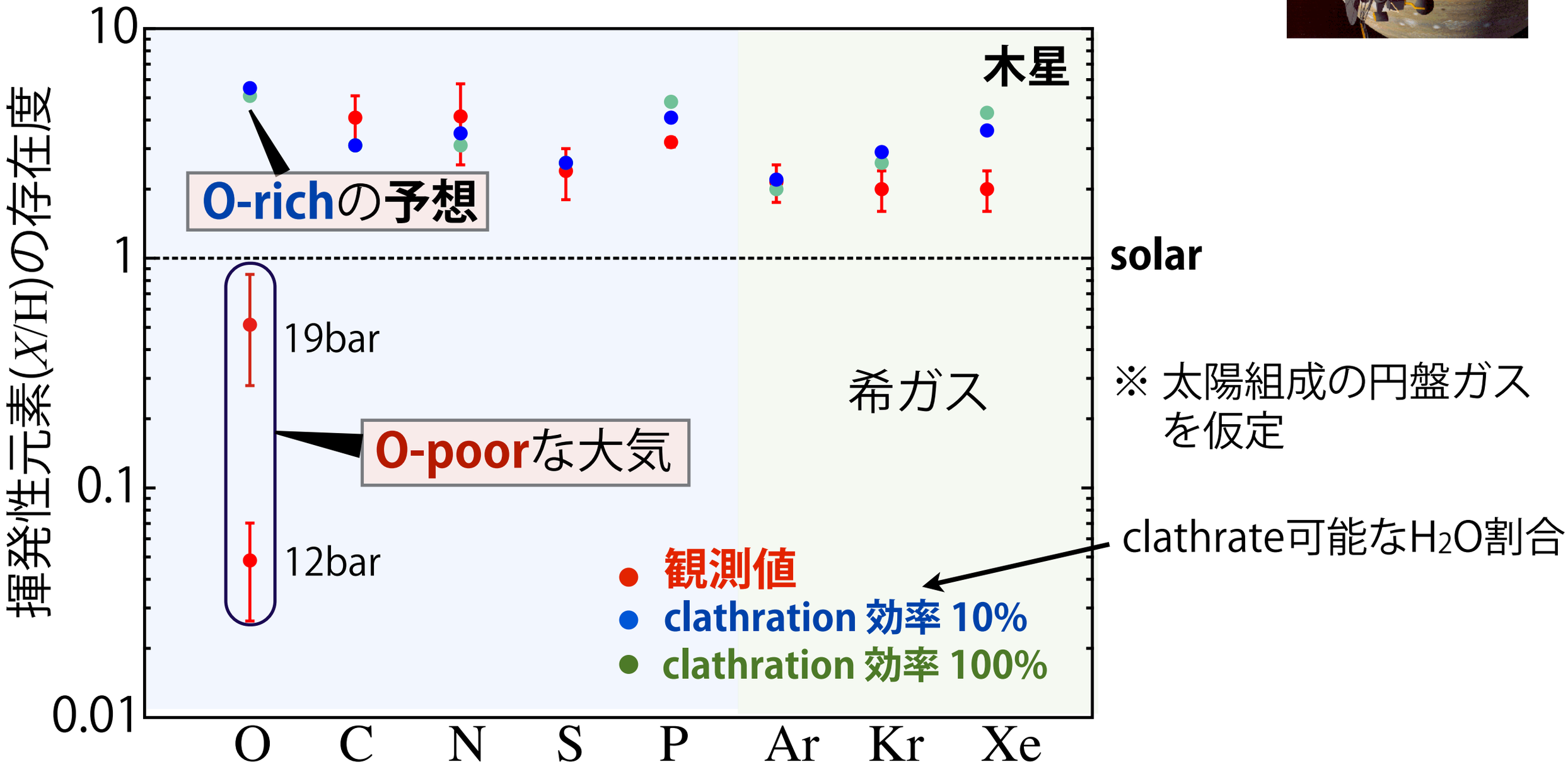
木星大気の酸素存在度

■ **乾燥**した木星大気？

Galileo probe : 木星大気は太陽組成よりも**酸素欠乏**(?)

←→ **氷微惑星**起源の描像と**矛盾**? (Mousis+09)





※ 太陽組成の円盤ガスを仮定

clathrate可能なH_2O割合

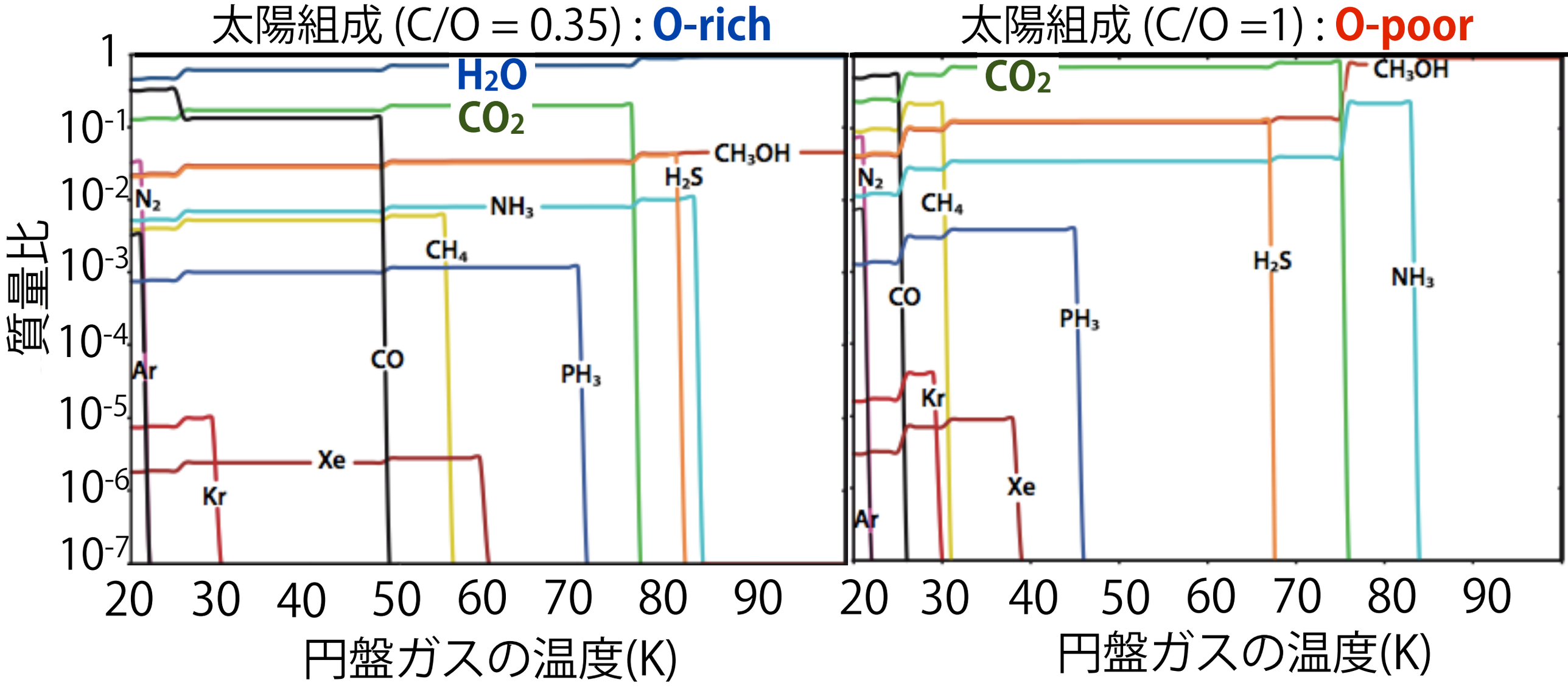
(cf) solar abundances from Lodders (2003)

木星大気の酸素存在度

■ **乾燥**した木星大気？

→ **C/O ~1 (O-poor)**な環境下で木星形成？

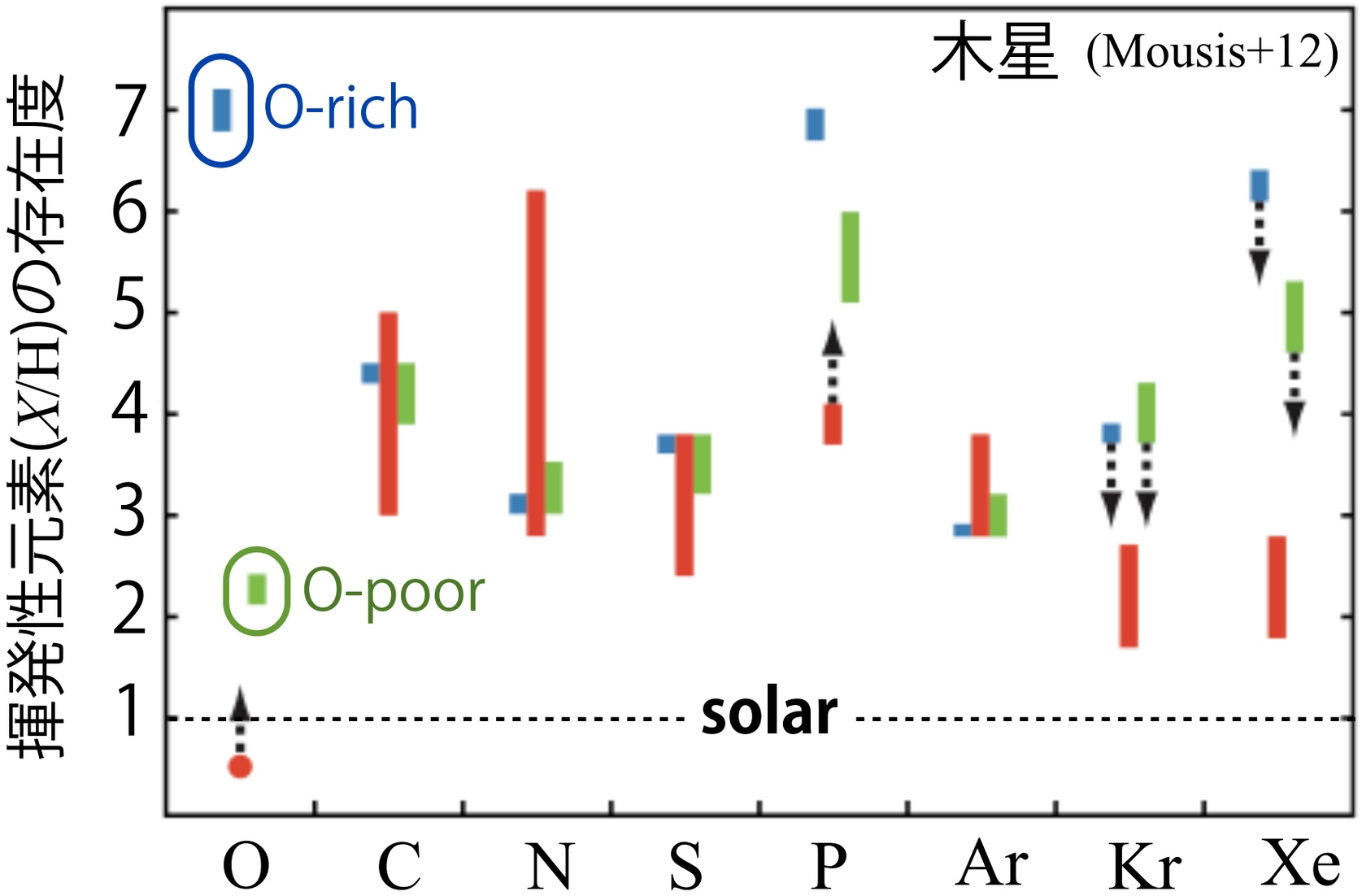
【**O-poor**な環境下での平衡凝縮計算】(Mousis+12)



木星大気の酸素存在度

■ **乾燥**した木星大気？

→ **C/O ~1 (O-poor)**な環境下で木星形成？



観測値

O-poor (C/O =1)

O-rich (C/O = 0.35)

※ O-poor : H_2O氷 欠乏
→ 希ガスは低温凝縮

※ **C/O ~1** : H_2O - COのsnow line位置の違い？ (Öberg + 11)

JUNO missionによる制約 (3)：大気組成

■ 揮発性元素の元素存在度

(1) **木星**の**希ガス, CNOSP**の元素存在度の高精度決定 -- **JUNO**
(2) **土星**の**揮発性元素**の元素存在度の決定 --- **Kronos**?
(3) (将来的には) **Ar, Kr, Xe** の**同位体比測定** --- **Kronos**?
(木星系：**EJSM/Laplace**)

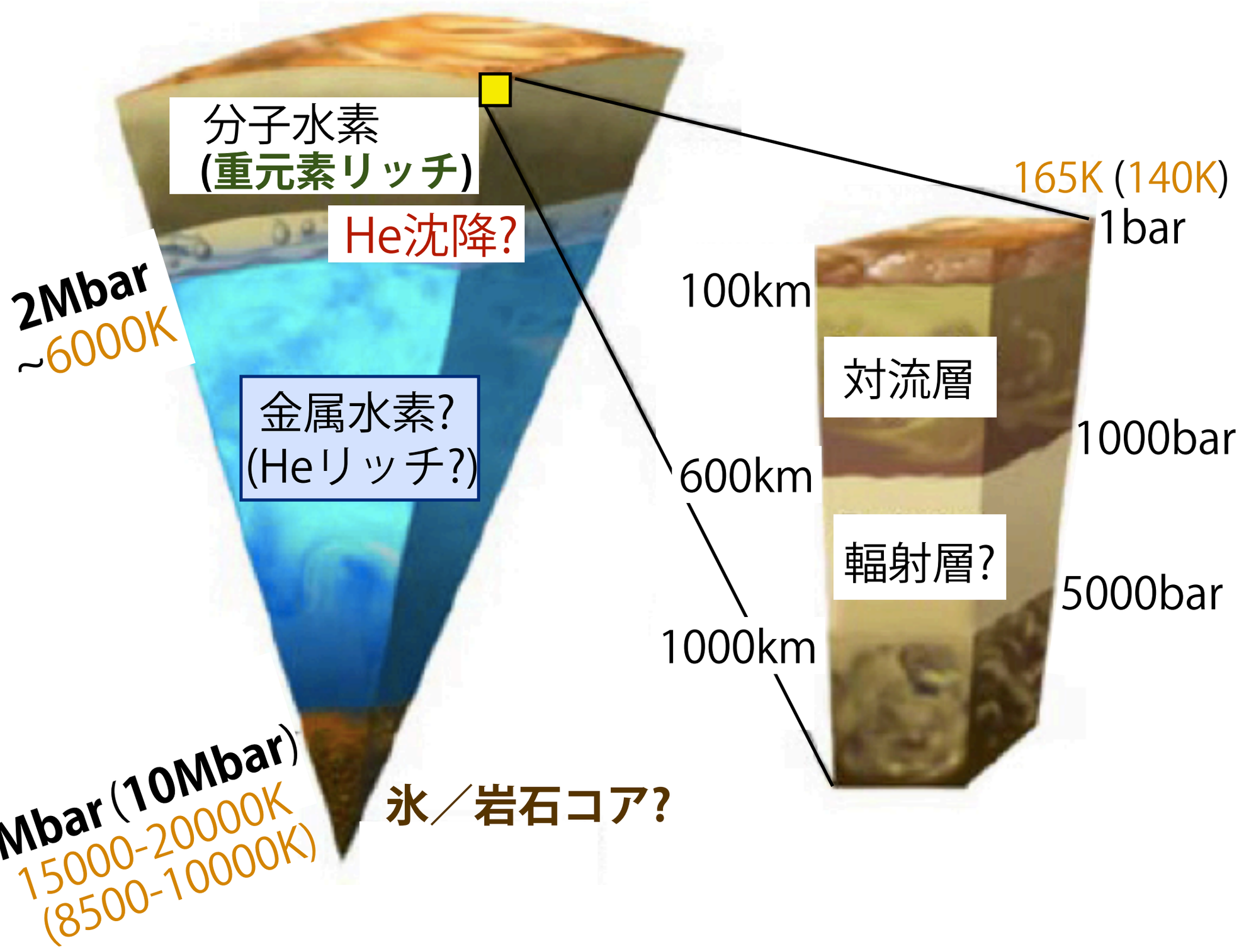
■ H_2Oの3D map

・**木星大気**は **O-poor** or **O-rich**なのか？ --- **JUNO**

↓

『ガス惑星の形成環境の制約』

まとめ


分子水素
(重元素リッチ)
He沈降?
2Mbar
~6000K
金属水素?
(Heリッチ?)
40Mbar (10Mbar)
15000-20000K
(8500-10000K)
氷／岩石コア?
165K (140K)
1bar
100km
対流層
1000bar
600km
輻射層?
5000bar
1000km

ご清聴ありがとうございました