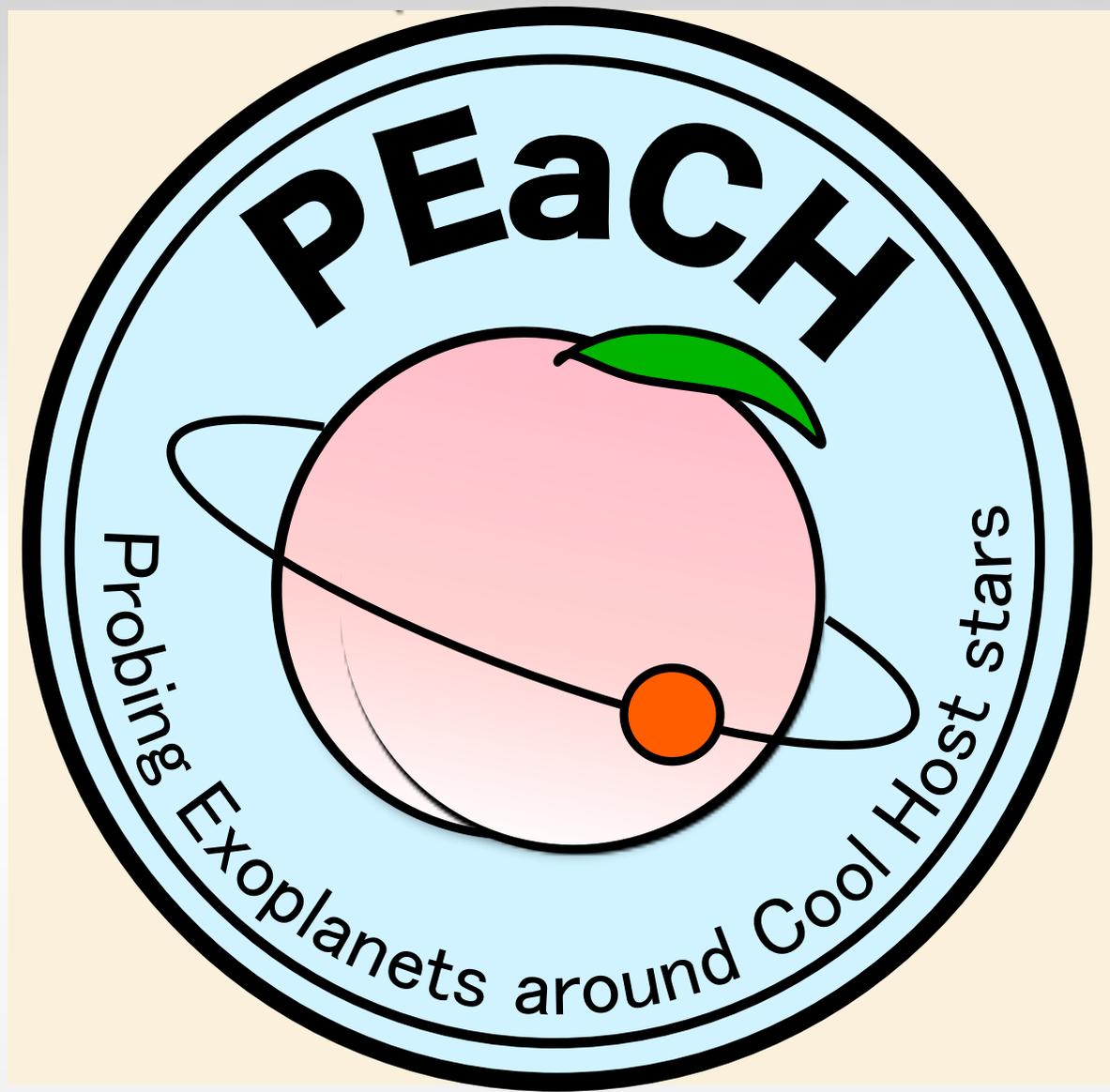


系外惑星大気 WS 2014/惑星大気研究会
新学術領域研究「太陽系外惑星の新機軸:地球型惑星へ」
計画研究 A02「系外惑星大気の数値モデリングと形成進化理論」
2014/01/06 国立天文台三鷹キャンパス

太陽系内の巨大惑星 (木星・土星・天王星・海王星)

生駒 大洋

計画研究B02(惑星形成班)分担者



Study of the Earth's Deep Interior

pre-WS (9/27-29, 湘南国際村)

巨大惑星の解剖学： 内部構造・熱進化から起源へ (第1部)

堀 安範

国立天文台 理論研究部



© JUNO, NASA



© Cassini, NASA

森羅万象学校

The School of the Universe

第13回 森羅万象学校

『木星を解剖する - 巨大ガス惑星の腹のうちと誕生の謎』

2013年3月26日-28日 @北海道 支笏湖

Layered convection as the origin of Saturn's luminosity anomaly

Jérémy Leconte^{1,2*} and Gilles Chabrier^{2,3}

土星の 組成非一様エンベロープの 熱進化モデル

太陽系天体の古典的な問題

他の巨大惑星への応用性

系外惑星への応用性

形成過程への示唆

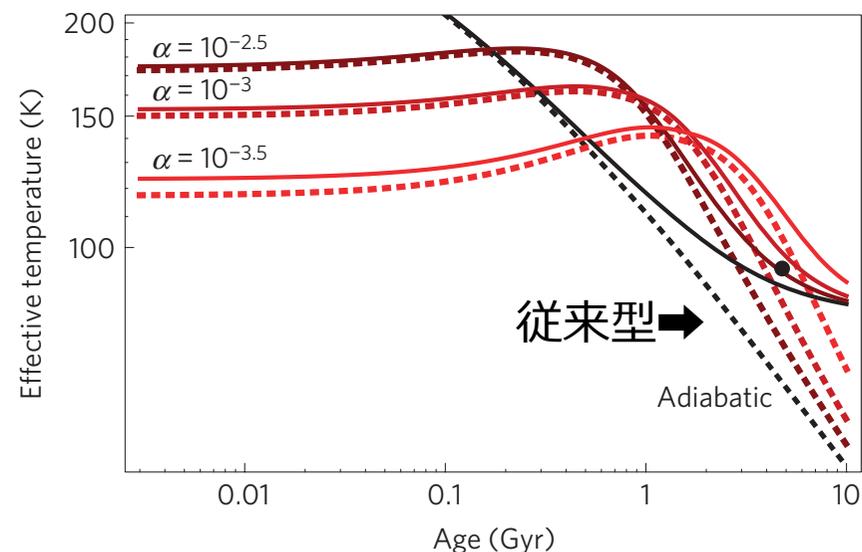


Figure 2 | Cooling sequences of Saturn models with layered convection. **a**, Effective (T_{eff} ; solid curves) and intrinsic (T_{int} ; dashed curves) temperature (see Methods) evolution in time for the adiabatic reference model (black) and three models with layered convection ($\alpha = 10^{-2.5}$, 10^{-3} and $10^{-3.5}$ from dark to light red). **b**, Zoom on present era. Dots show the observed effective temperature. At early ages, the effective temperature of models with layered convection is lower owing to inefficient convection. After a few hundred million years, these models become brighter owing to the release of the excess of energy stored from the initial state.

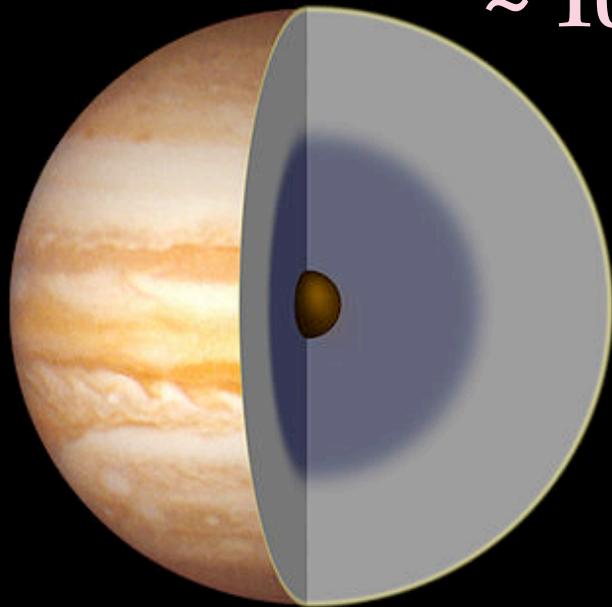
巨大惑星の内部構造と熱進化の基礎知識

太陽系の巨大惑星

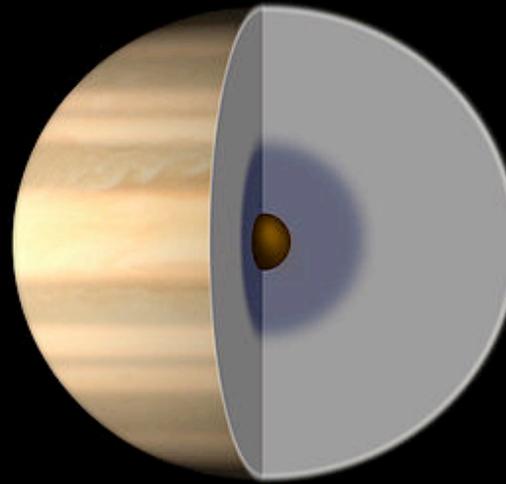
~ 10 R_{Earth}



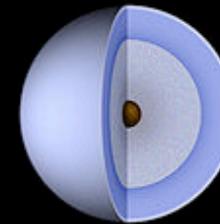
EARTH



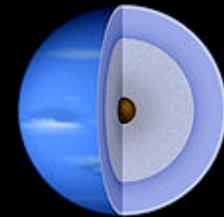
JUPITER



SATURN



URANUS



NEPTUNE

~ 4 R_{Earth}

■ Molecular hydrogen

■ Metallic hydrogen

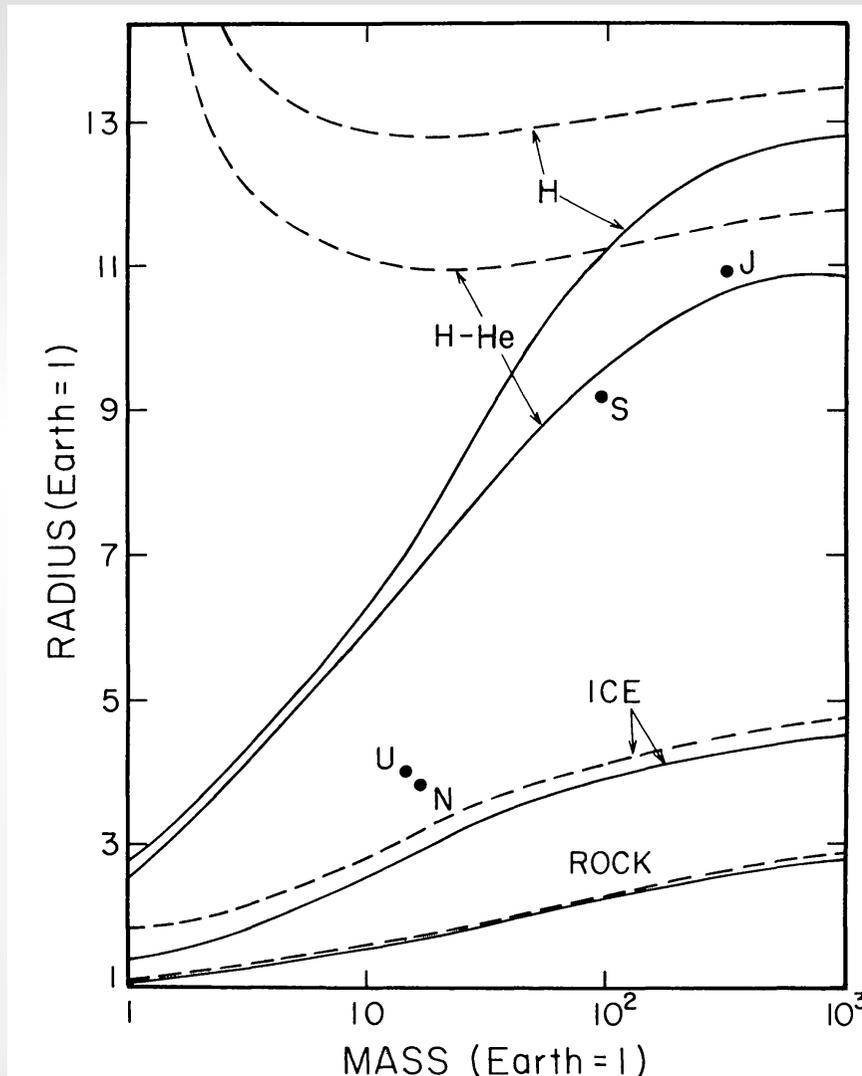
■ Hydrogen, helium, methane gas

■ Mantle (water, ammonia, methane ices)

■ Core (rock, ice)

基礎知識

質量と半径の関係



— 0°K状態方程式（熱圧なし）
- - - 有限温度状態方程式（熱圧あり）

●主成分

- 木星(J), 土星(S) = H+He
- 天王星(U), 海王星(N) = 氷

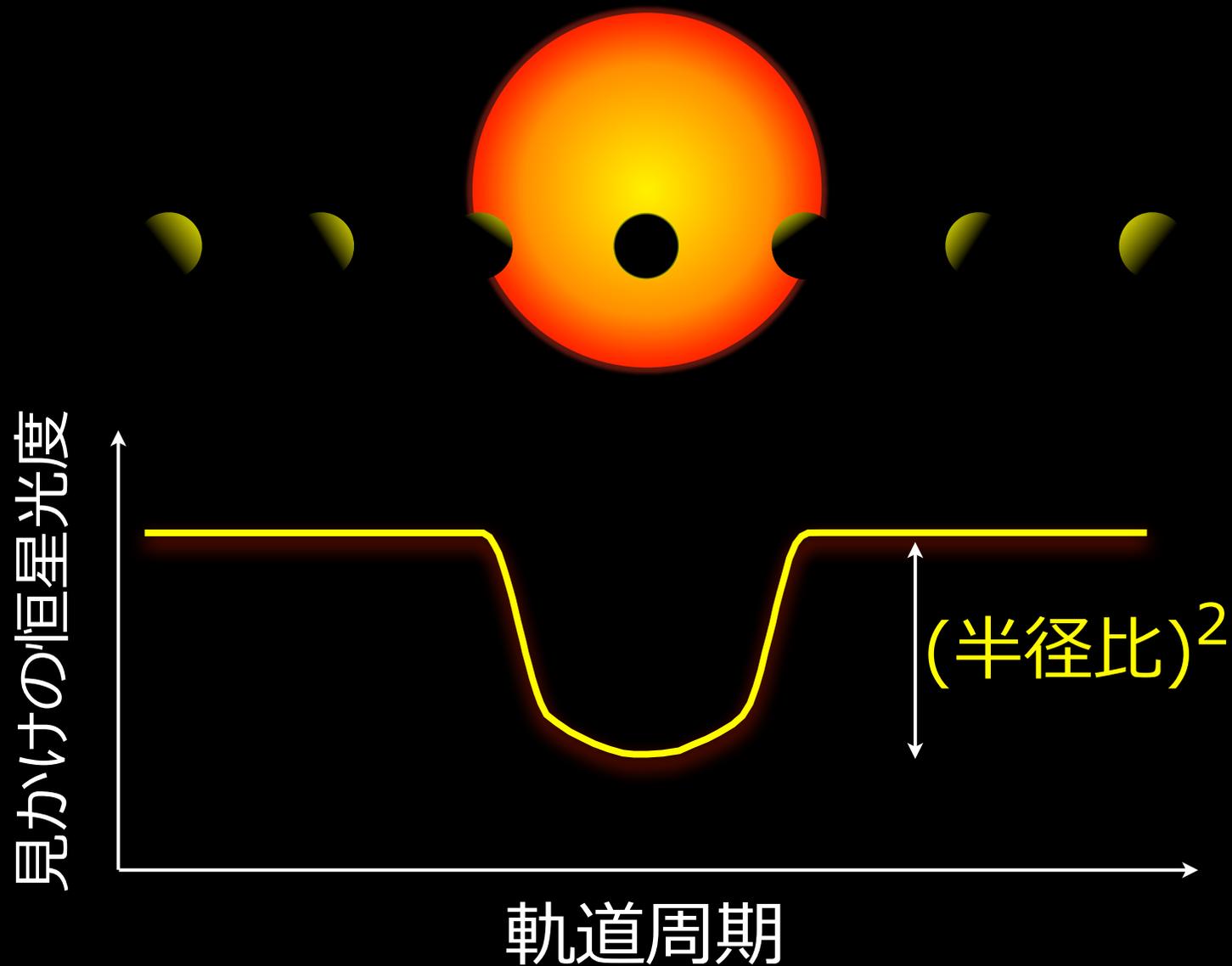
●副成分

- J & S は「重元素」を含む
- U & N は H-He を含む

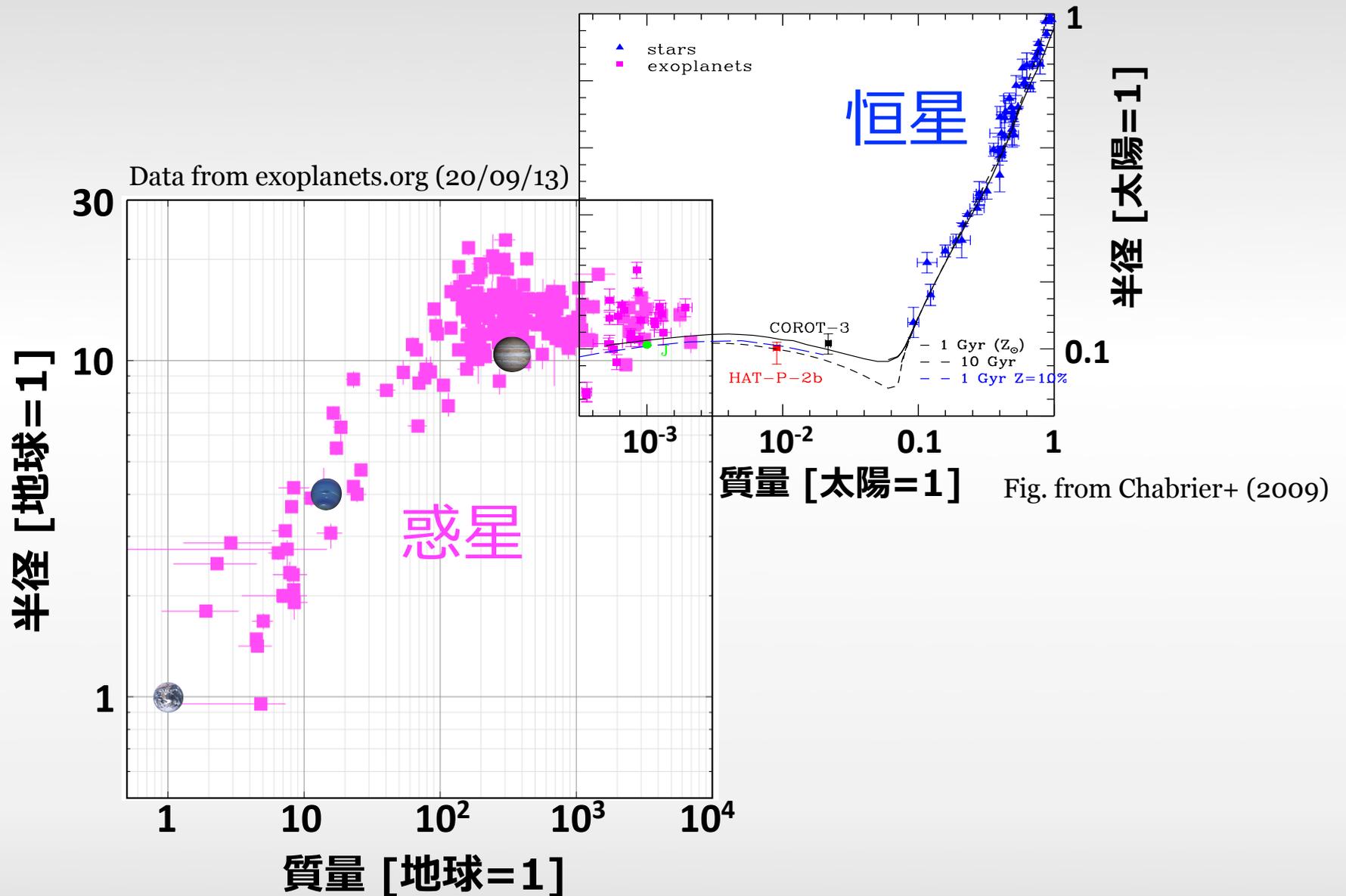
- H-He天体については 特に **温度の効果**が重要である

系外惑星のトランジット観測

since 2000



質量と半径の関係



基礎知識

太陽系内の巨大惑星の観測値

	木星	土星	天王星	海王星
軌道長半径	5.20 AU	9.54AU	19.2 AU	30.1 AU
公転周期	11.9 yr	29.4 yr	84.0 yr	164.8 yr
ヒル半径	0.35 AU	0.43 AU	0.47 AU	0.78 AU
質量	317.8 M _{Earth}	95.2M _{Earth}	14.5 M _{Earth}	17.1M _{Earth}
平均半径	6.99x10 ⁴ km	5.82x10 ⁴ km	2.56x10 ⁴ km	2.46x10 ⁴ km
平均密度	1.326 g/cc	0.687 g/cc	1.27 g/cc	1.64 g/cc
自転周期	9.92 hr	10.7 hr	△17.2 hr	16.1 hr
自転軸傾斜角	3.13°	26.73°	97.8°	28.32°
慣性モーメント	0.254	0.210	0.225	~0.24
有効温度	125K	95 K	57 K	59 K
放射/照射	1.67(9)	1.78(9)	1.06 (8)	2.61 (28)
赤外放射	5.44(43) W/m ²	2.01(14) W/m ²	0.042 (47) W/m ²	0.433 (46) W/m ²
表面組成	H ₂ 89.8%; He 10.2%; CH ₄ 0.3%, NH ₃ 0.026%	H ₂ 96.3%; He 3.25%; CH ₄ 0.45%; NH ₃ 0.013%	H ₂ 82.5%; He 15.2%; CH ₄ 2.3%	H ₂ 80.0%; He 19.0%; CH ₄ 1.5%

内部構造の推定法

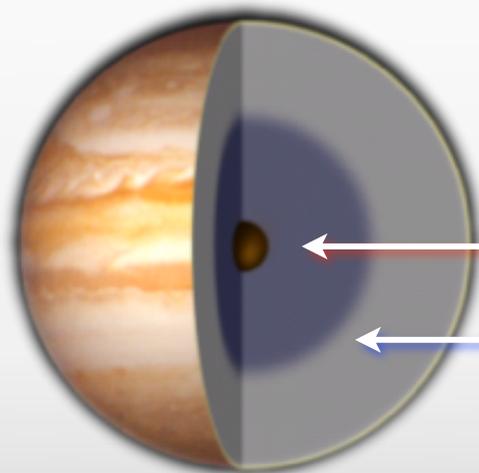
- 惑星まわりの重力ポテンシャル ◀ 観測

$$\Phi = -\frac{GM}{r} \left[1 - \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{R_e}{r} \right)^{2n} J_{2n} P_{2n}(\cos \theta) \right]$$

- 重力モーメント

$$J_{2n} = \frac{-1}{MR_e^{2n} (4n + 1)^{1/2}} \int P_{2n}(\cos \theta) r^{2n} \rho(\mathbf{r}) d^3 r$$

内部の密度分布



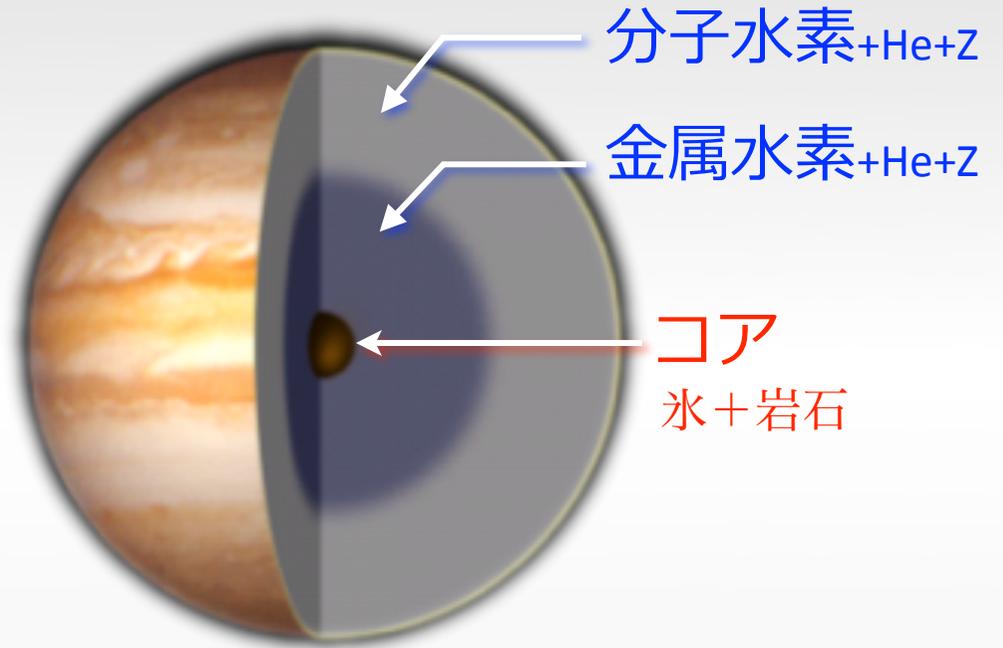
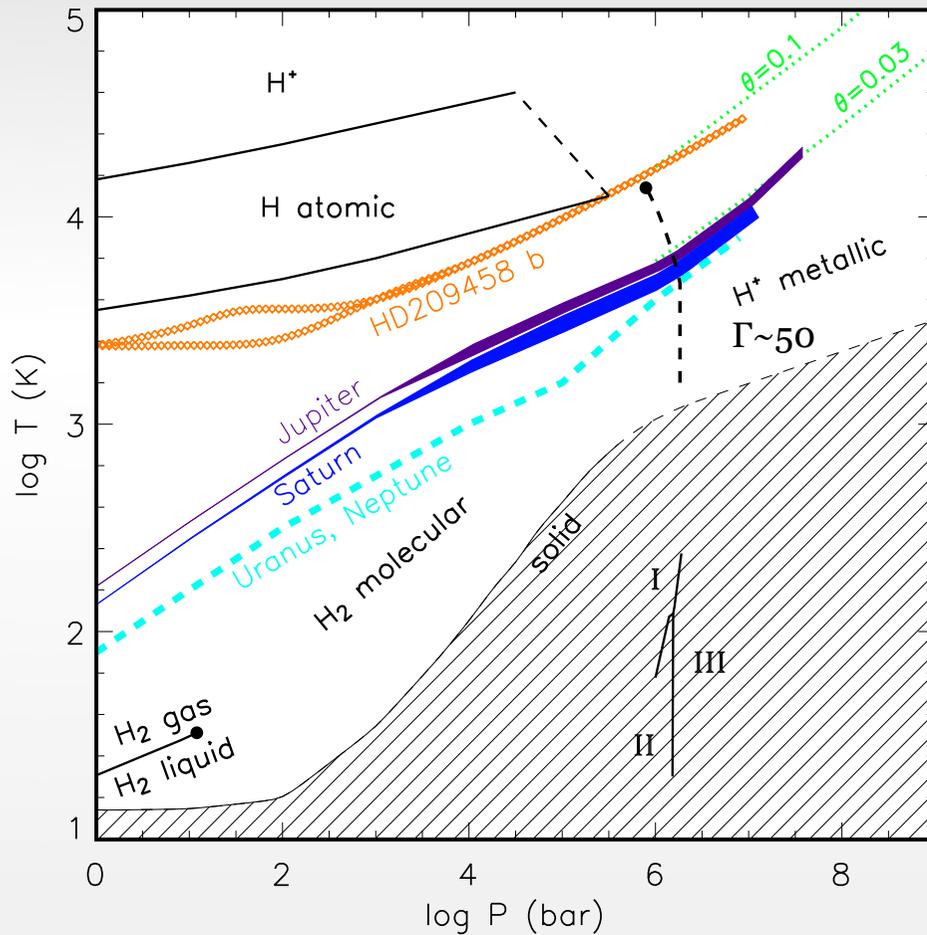
コア 氷+岩石

エンベロープ
水素+ヘリウムほか

基礎知識

巨大惑星内部の水素

水素の相図



$$\theta = \frac{T}{T_F} = \frac{2m_e k}{h^2} \left(\frac{8\pi}{3} \mu_e m_u \right)^{2/3} \frac{T}{\rho^{2/3}}$$

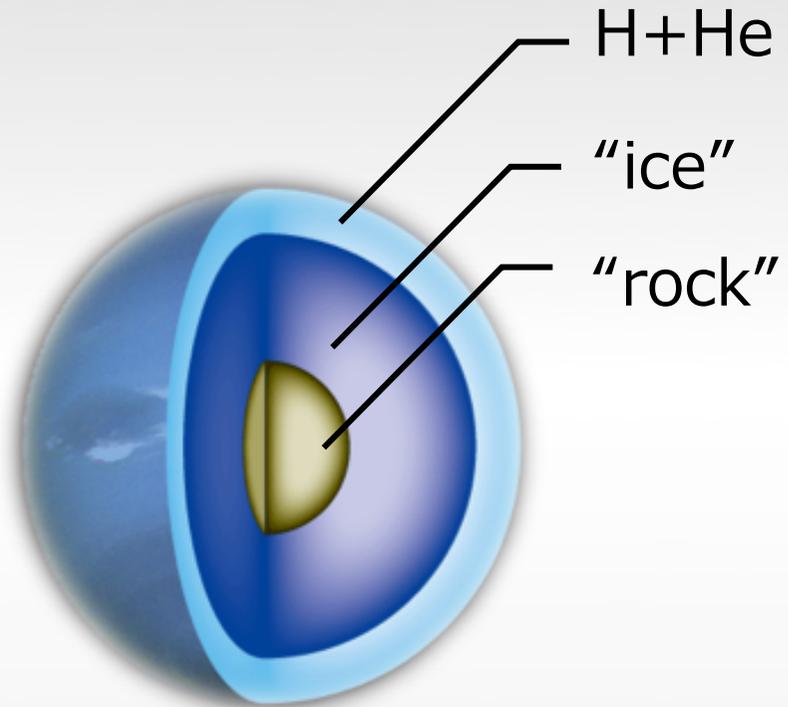
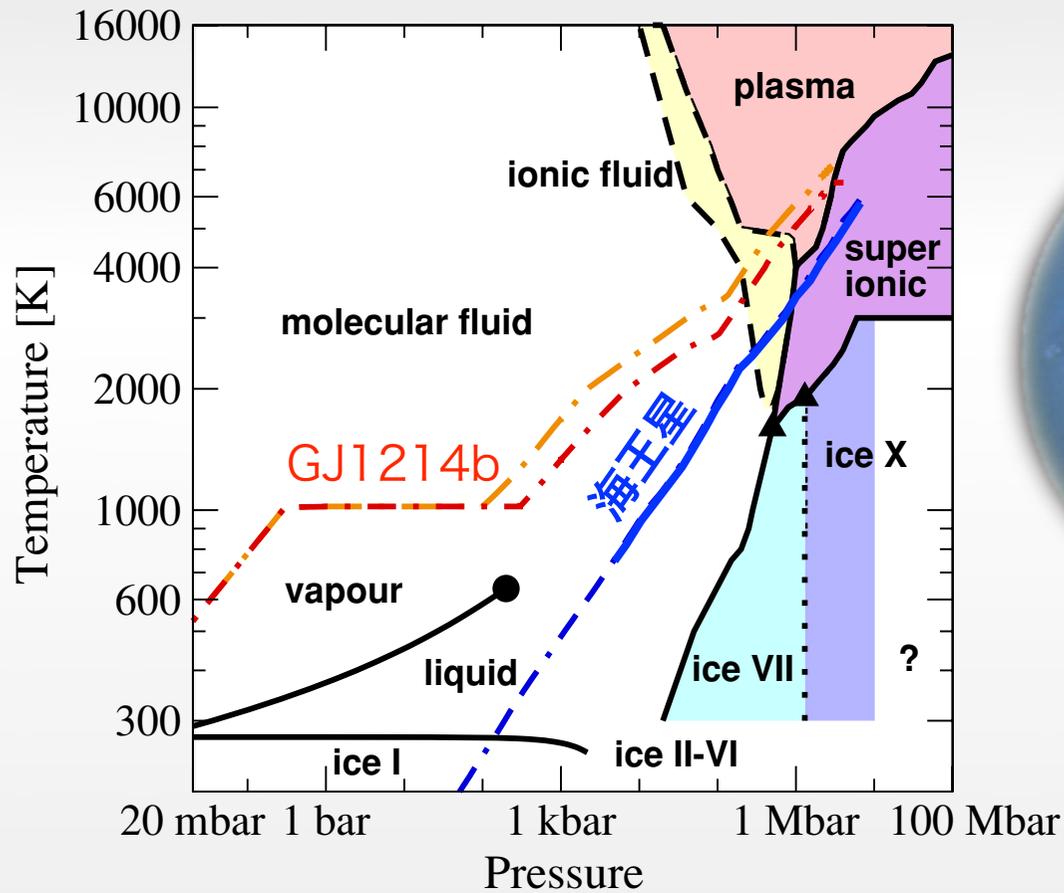
$$\Gamma = \frac{e^2}{akT} = \frac{e^2}{k} \left(\frac{4\pi}{3\mu m_u} \right)^{1/3} \frac{\rho^{1/3}}{T}$$

Figure from Guillot & Gautier (2009)

基礎知識

巨大惑星内部の水/氷

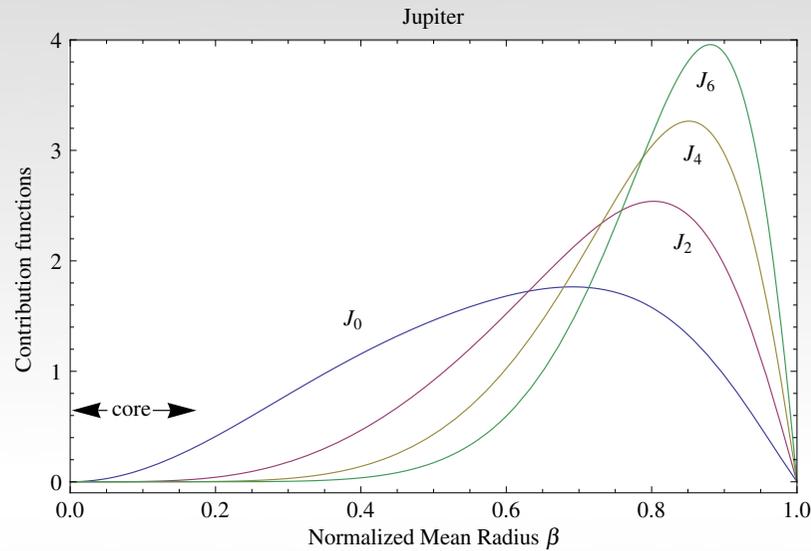
H₂O “ice” の相図



3層内部構造モデル

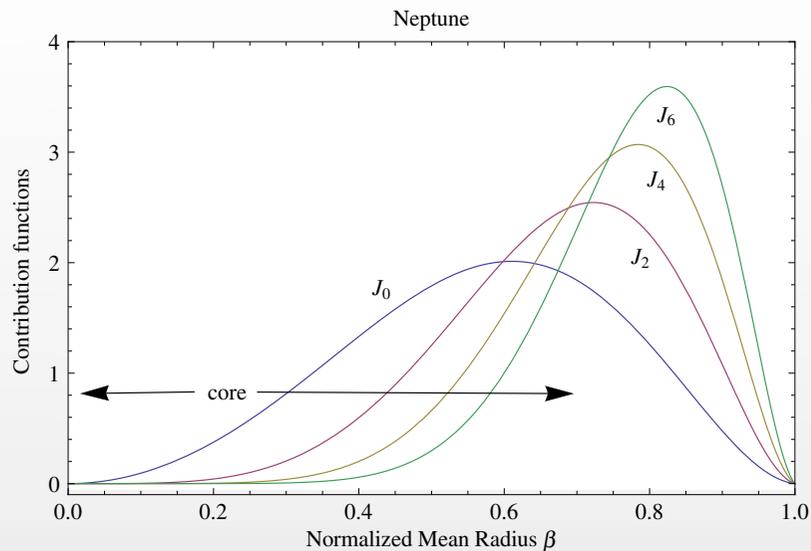
Figure from Nettelmann, Fortney, Kramm+ (2011, ApJ)

重力モーメントの感度



木星/土星

コアに対する感度は低い。

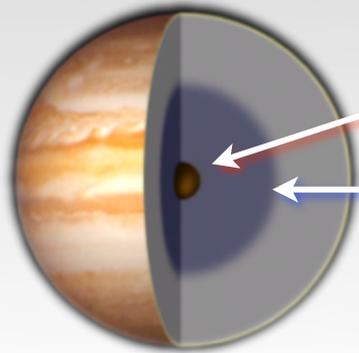


天王星/海王星

コアに対する感度も比較的高い。

基礎知識

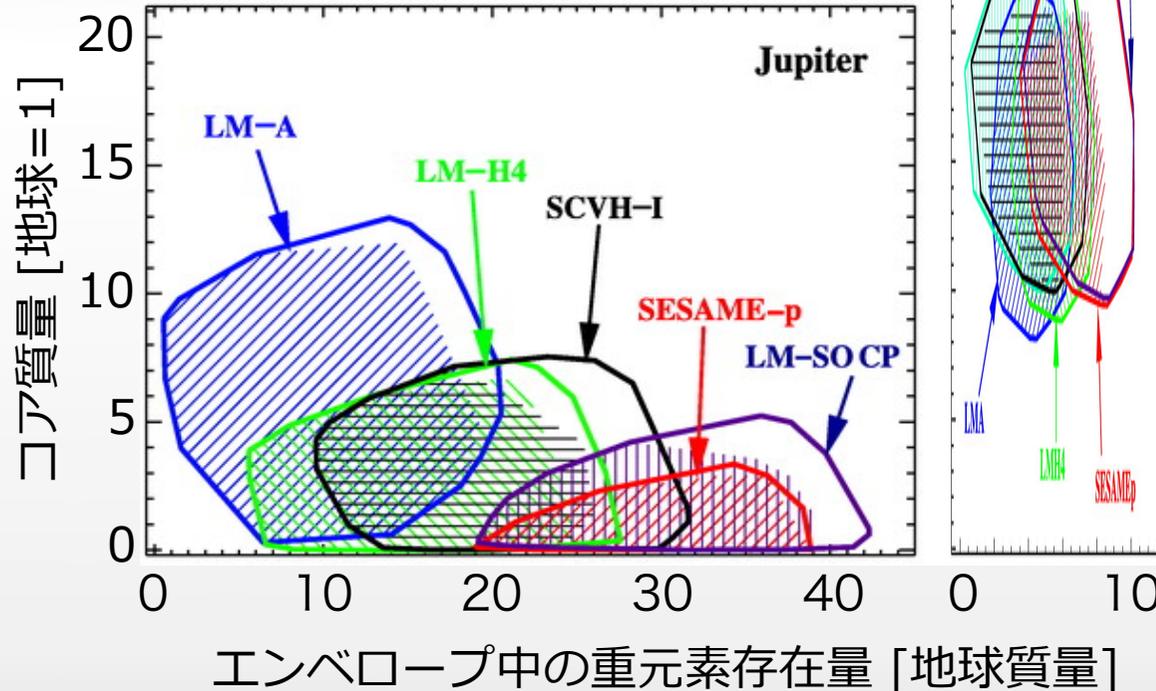
木星型惑星の内部組成



コア 氷+岩石(重元素)

エンベロープ
水素+ヘリウムほか

木星



土星

● コア質量

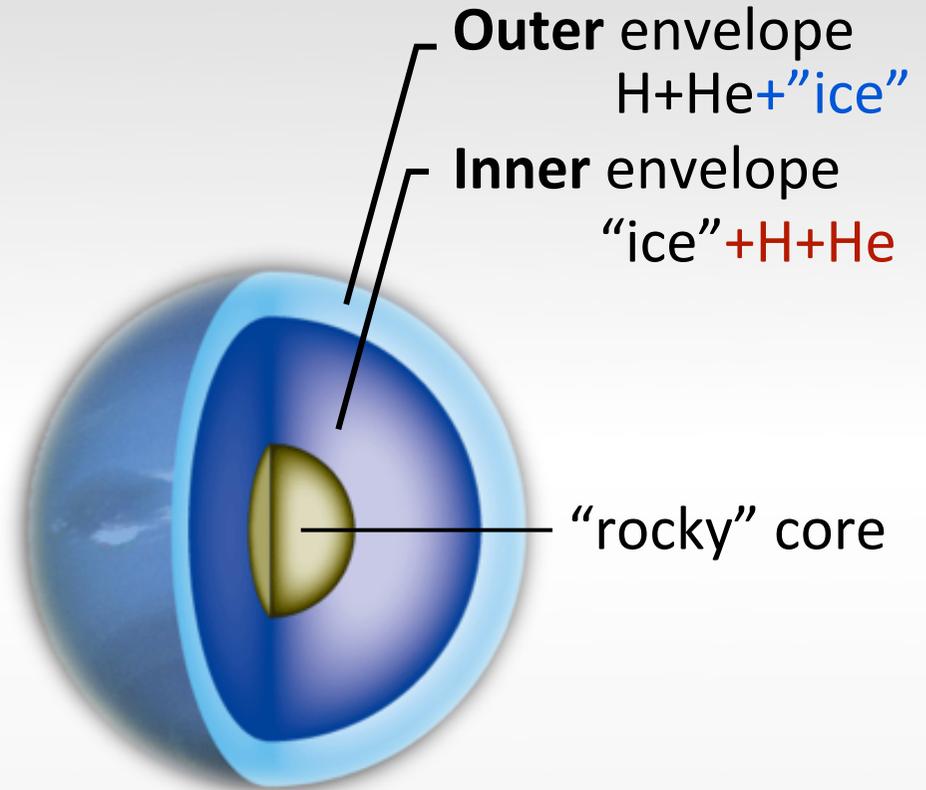
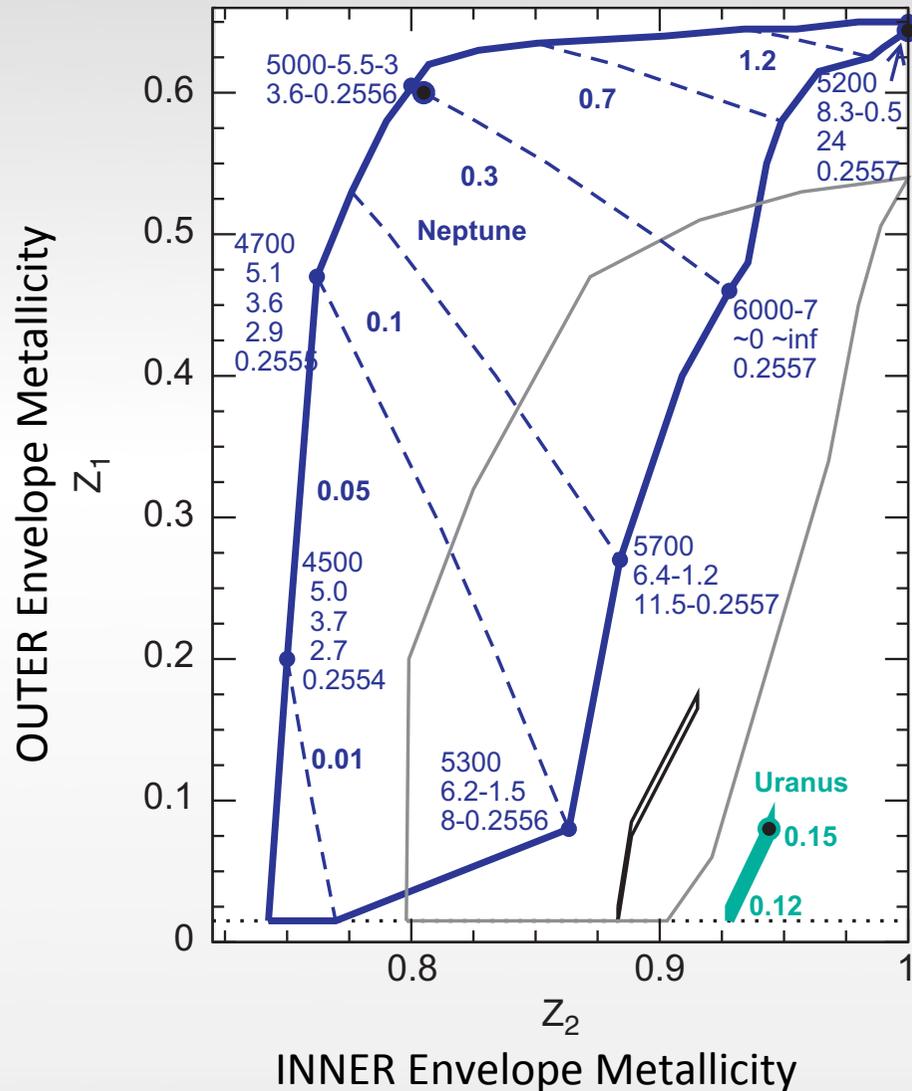
木星：比較的小さい

土星：比較的大きい

● エンベロープは重元素で汚れている

基礎知識

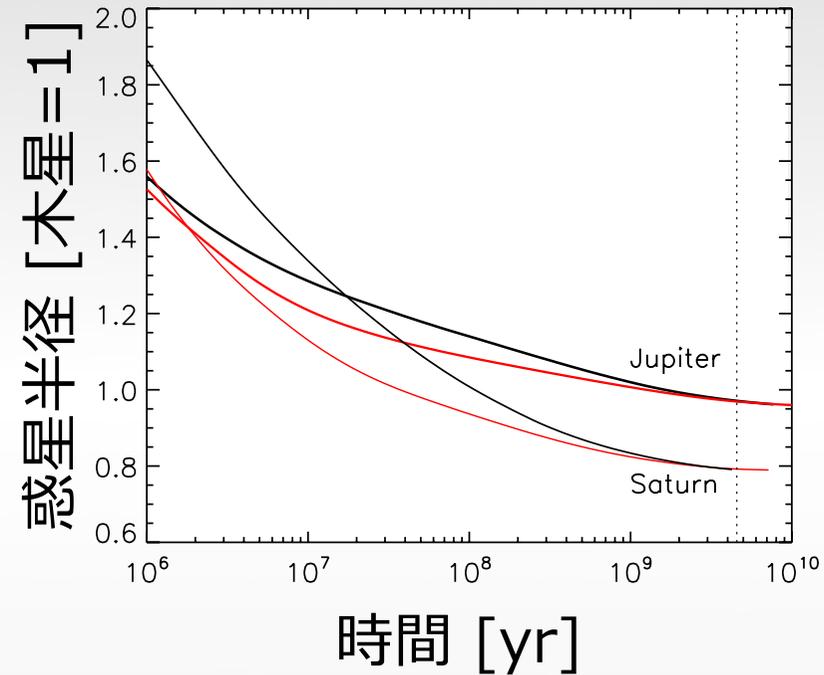
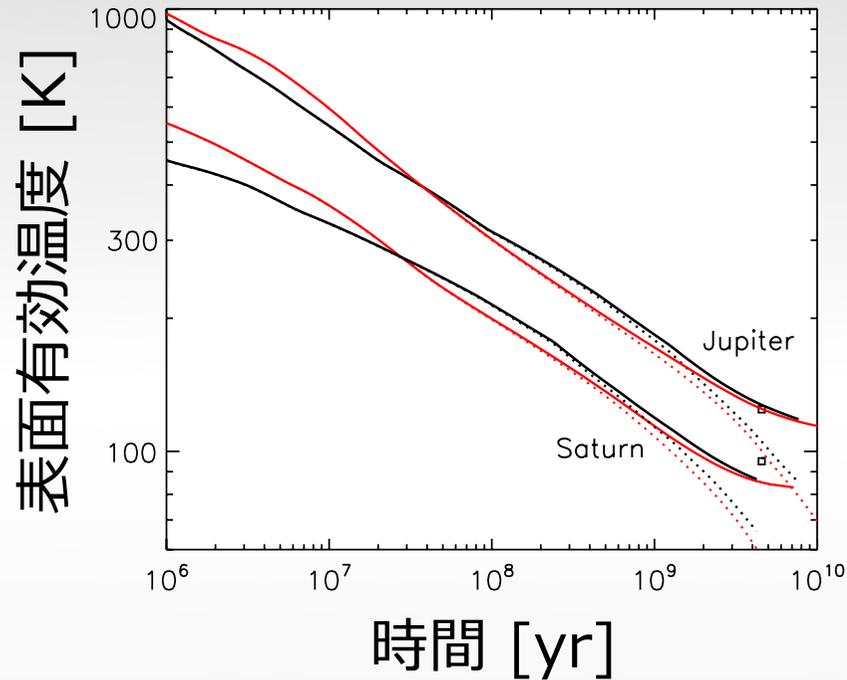
海王星型惑星の内部



3層内部構造モデル(改)

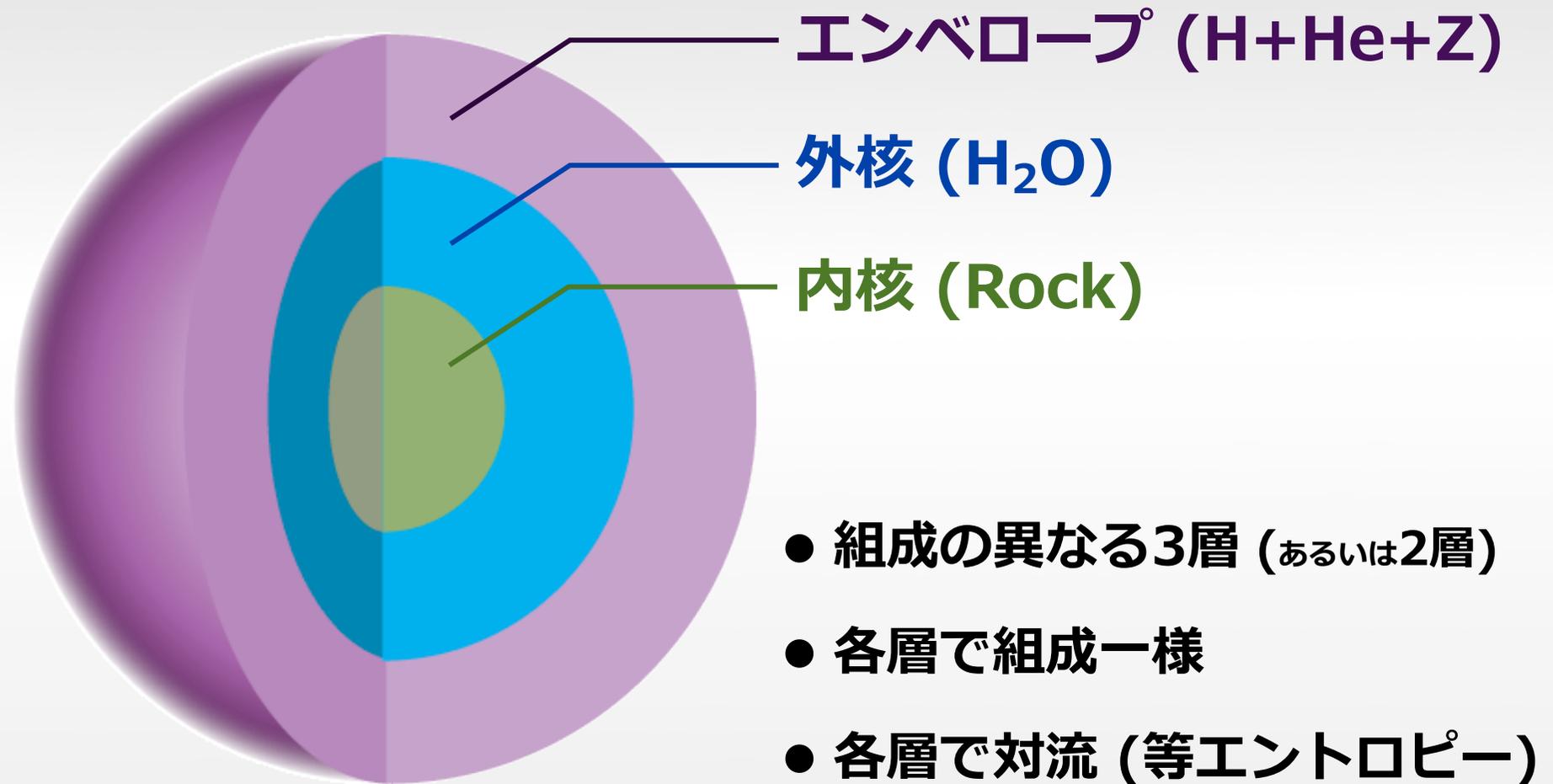
Fig. 3. Same as Fig. 2 but using the modified shape and rotation data for Uranus (cyan) and Neptune (blue). Models U2, N2a, and N2b (Table 2) are highlighted by black-filled, big circles. The boxes of Fig. 2 are also shown to facilitate the comparison. (For interpretation of the references to color in this figure caption, the reader is referred to the web version of this article.)

巨大惑星の熱進化 (重力収縮)

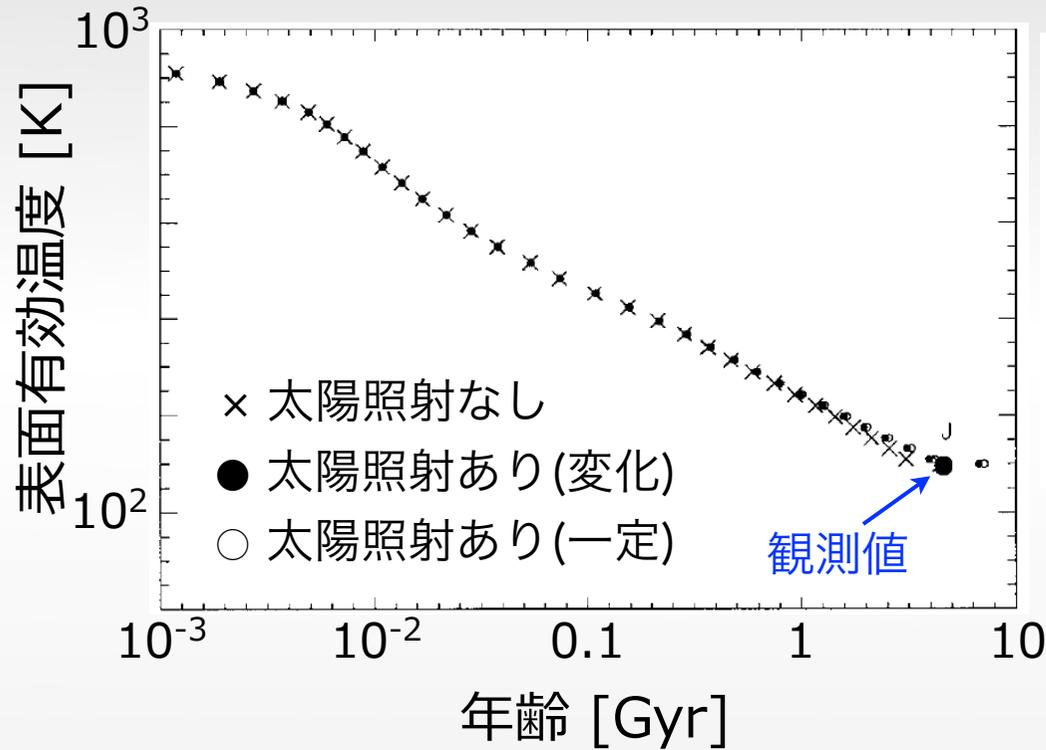


- 時間とともに、有効温度が下がる(惑星放射が減少する)
- 時間とともに、半径が小さくなる

「従来型」内部モデル



「従来型」熱進化モデル



ICARUS 30, 305-310 (1977)
The Jovian Surface Condition and Cooling Rate
W. B. HUBBARD
*Department of Planetary Sciences, Lunar and Planetary Laboratory,
University of Arizona, Tucson, Arizona 85721*
Received April 6, 1976; revised June 2, 1976

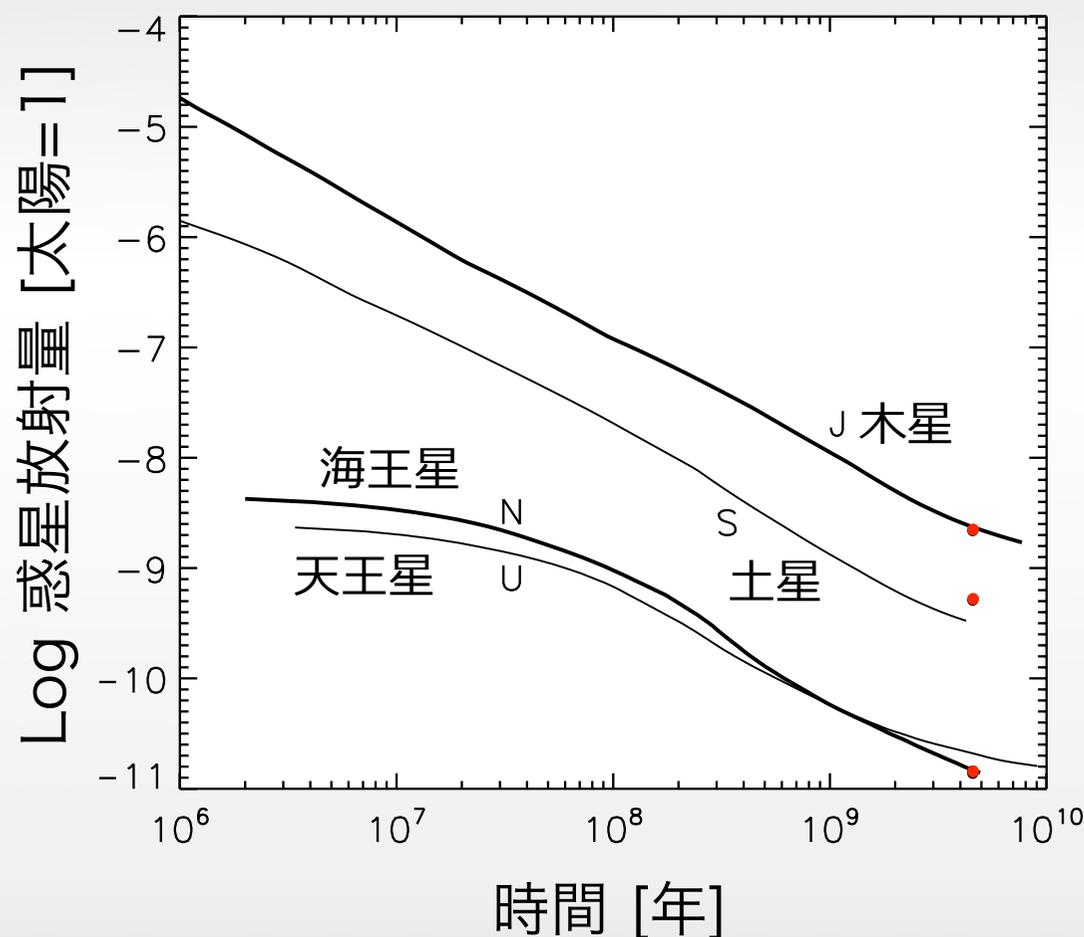
A theory which is almost fully analytic is used to investigate Jupiter's cooling rate. We find that a simple model of contraction with adiabatic interior structure gives a total cooling time to the present which is in good agreement with the age of the solar system. The interplay between the surface condition and the cooling rate is exhibited and discussed. The current rate of change of the effective temperature is calculated to be $-1^\circ\text{K}/0.145 \times 10^9 \text{ yr}$. Discrepancies with fully numerical investigations of the Jovian age and cooling rate are noted.

単純な一様・対流モデルで
木星の年齢を説明できる

Conventional Evolution Models with State-of-the-art Input Physics

Fortney, Ikoma, Nettelmann, Guillot, & Marley (2011, ApJ)

理論進化曲線 (全対流・重力収縮モデル)



●アップデート:

- 観測値 (post-Voyager)
- 太陽光照射を考慮した大気モデル
- 最新の状態方程式

●結果 (現在の放射量—理論 vs 観測)

木星: 一致

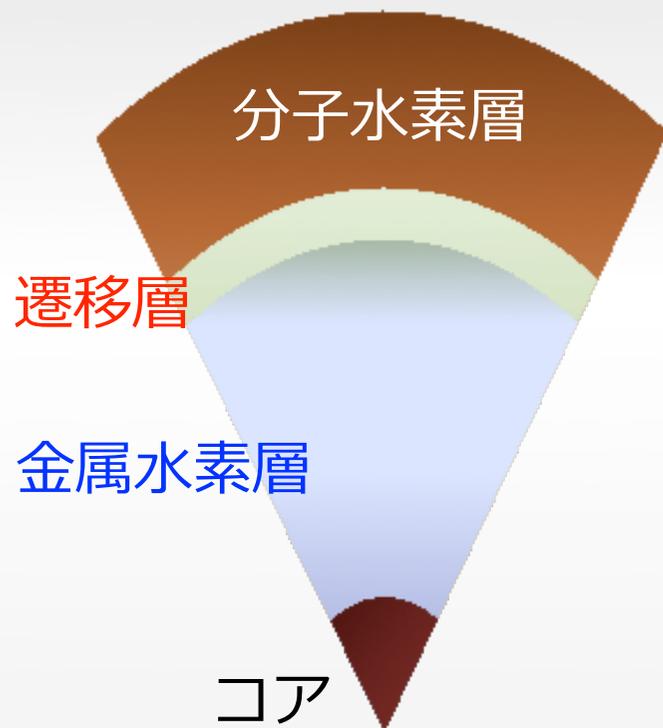
土星: 理論値よりもっと明るい

天王星: 理論値よりもっと暗い

海王星: 一致 ← New

土星が明るすぎる問題

土星の「明るい」問題の解決案



He沈殿による重力エネルギー解放

- 木星に比べて、土星の表面He量が少ないという観測値と整合的である

Hubbard & Stevenson (1984)

Fortney & Hubbard (2003,2004)

組成勾配による対流の非効率化

- エンベロープが重元素に汚れているという事実と整合的である

Leconte & Chabrier (2013)

H-Heの分離：大気中のHe含有量

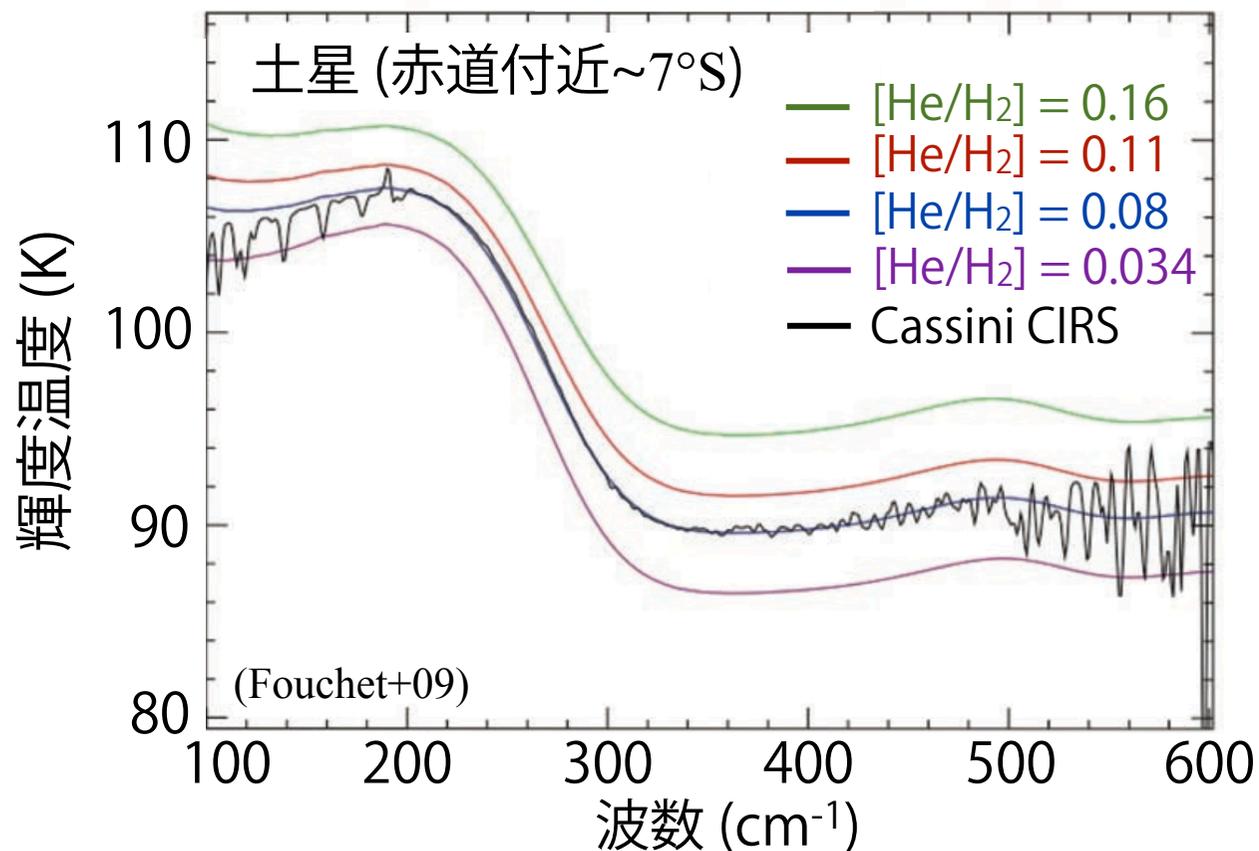
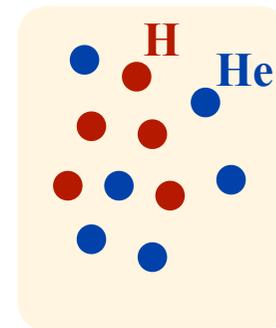
■ H-Heの不混和 (He沈降) (Stevenson & Salpeter, 1977)

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

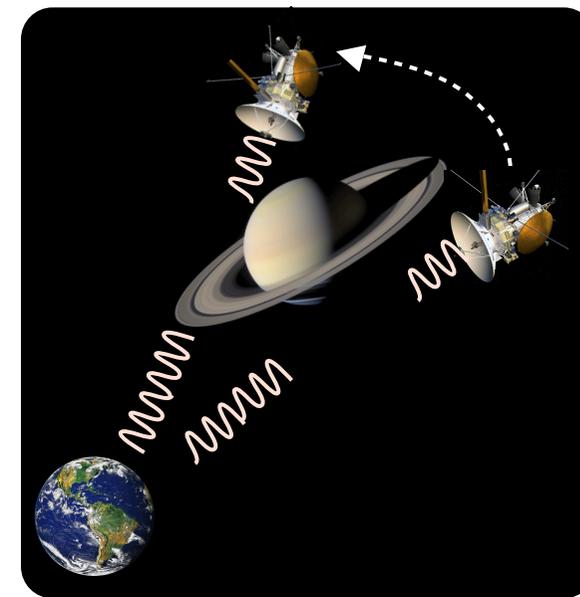
木星： $Y = 0.231$ ← Galileo NMS (Von Zahn+00; Niemann+00)

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

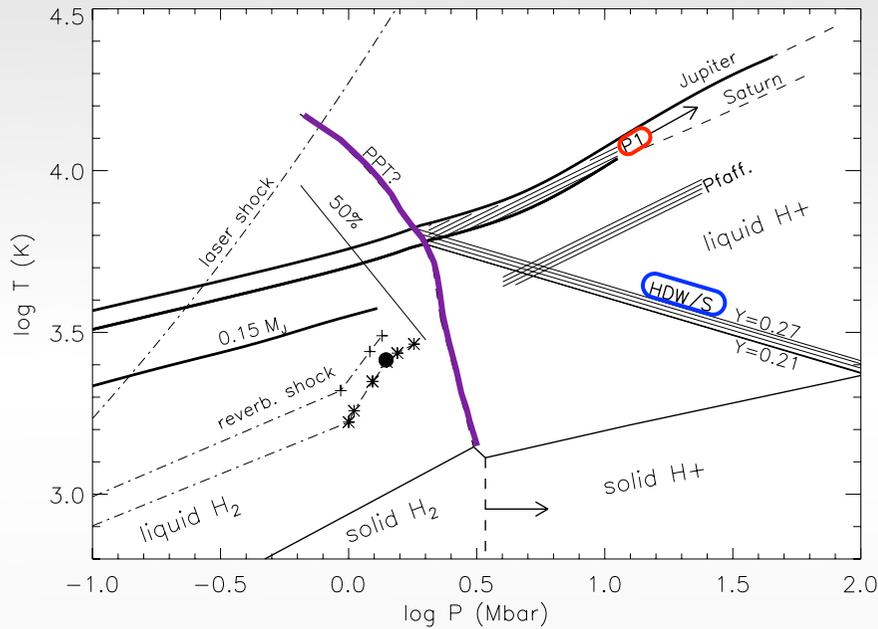


(スライド提供：堀 安範)

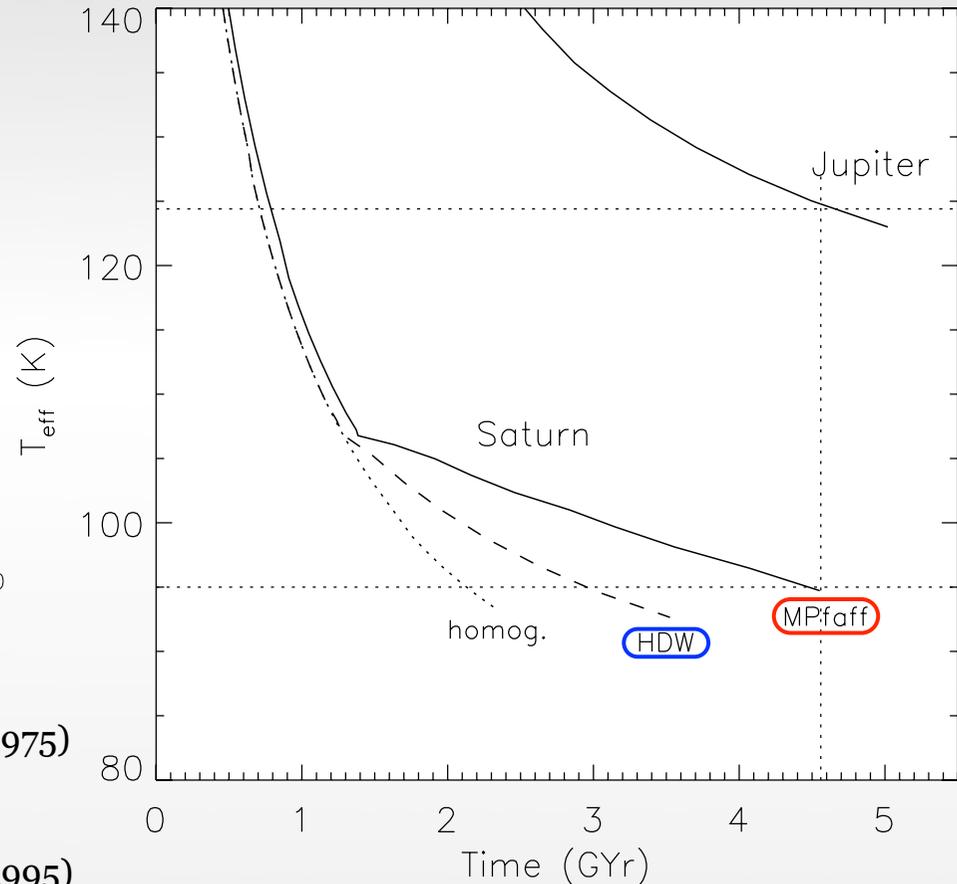
土星の光度(年齢)問題

He分離によるエネルギー解放

Hの相図とHe不混和領域



He分離を考慮した熱進化



HDW/S ... 熱力学計算

Hubbard & DeWitt (1985); Stevenson (1975)

Pfaff ... 分子動力学計算

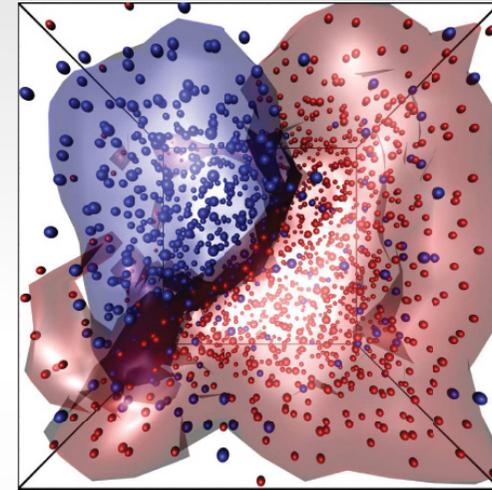
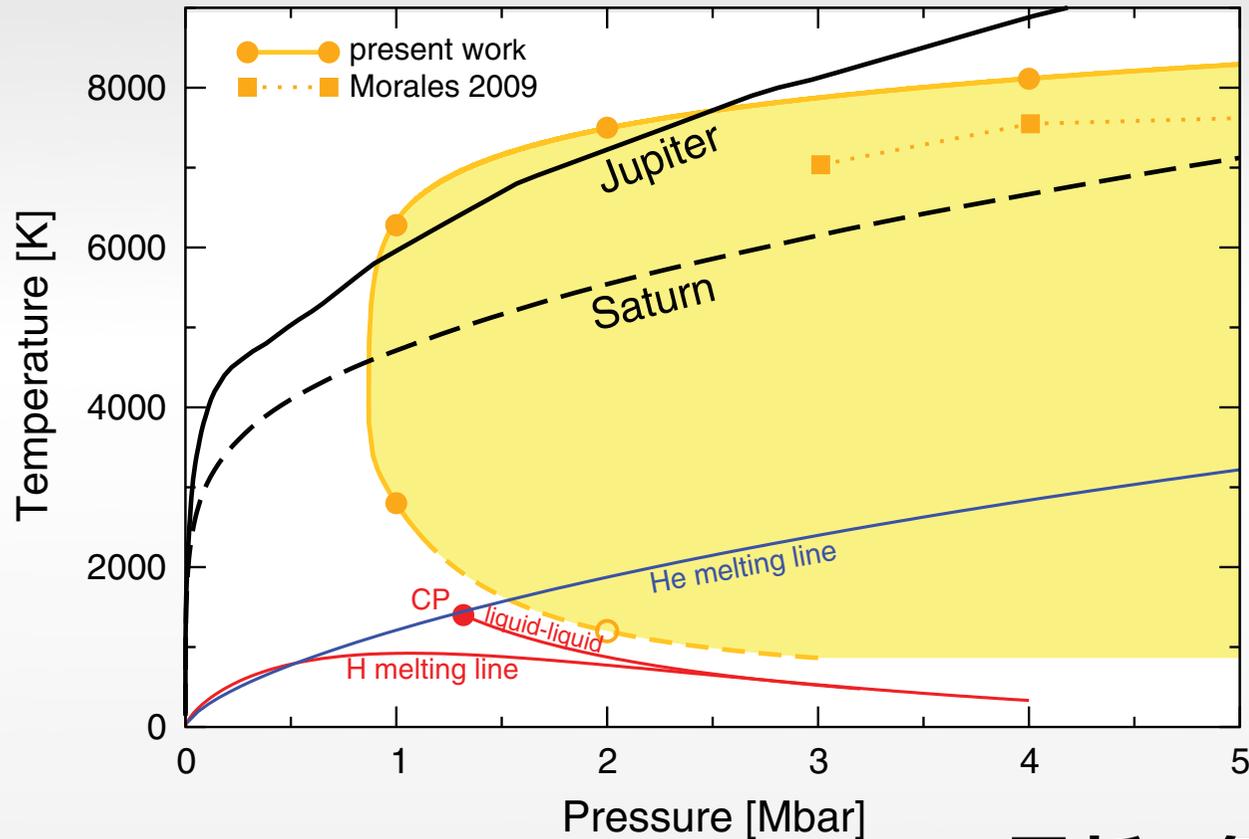
Pfaffenzeller+ (1995)

平行移動 \hookrightarrow MPfaff (P1)

**不混和領域がかなり深部(コア
付近)まで続いていることが必要**

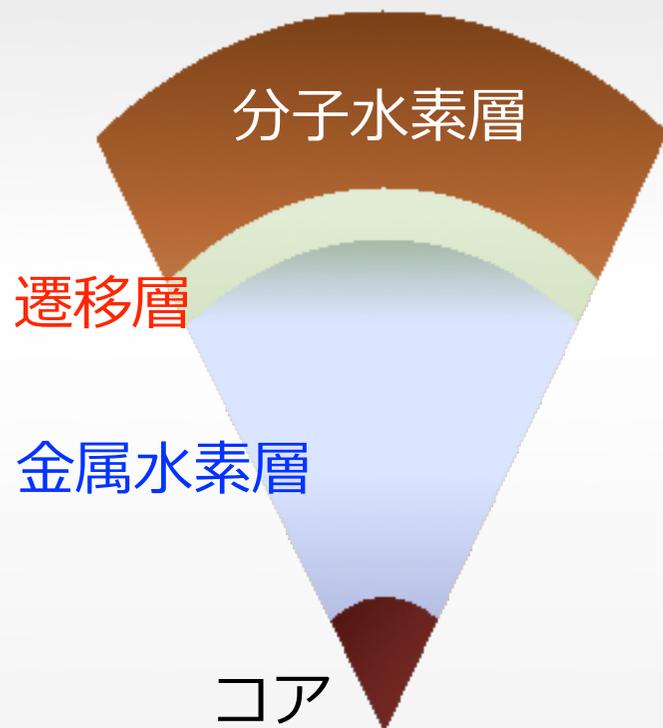
土星の光度(年齢)問題

ヘリウム不混和領域



最新の第一原理計算の結果は
He分離説と整合的である

土星の「明るい」問題の解決案



He沈殿による重力エネルギー解放

- 木星に比べて、土星の表面He量が少ないという観測値と整合的である

Hubbard & Stevenson (1984)

Fortney & Hubbard (2003,2004)

組成勾配による対流の非効率化

- エンベロープが重元素に汚れているという事実と整合的である

Leconte & Chabrier (2013)

組成非一様エンベロープの対流条件

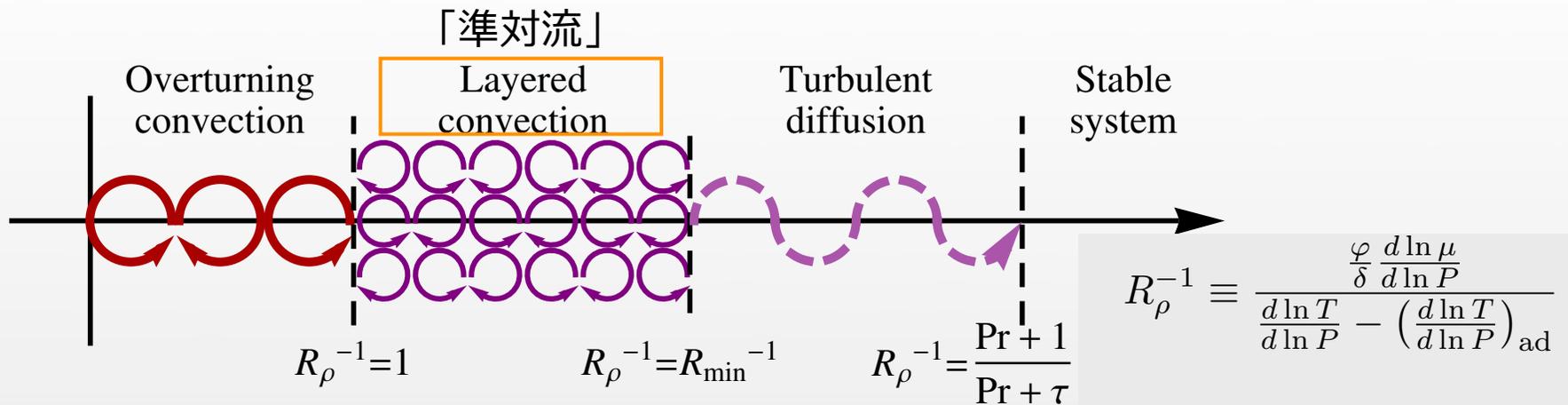
Schwarzschild 不安定条件

Ledoux 安定条件

$$\left(\frac{d \ln T}{d \ln P} \right)_{\text{ad}} < \frac{d \ln T}{d \ln P} < \left(\frac{d \ln T}{d \ln P} \right)_{\text{ad}} + \frac{\varphi}{\delta} \frac{d \ln \mu}{d \ln P}$$

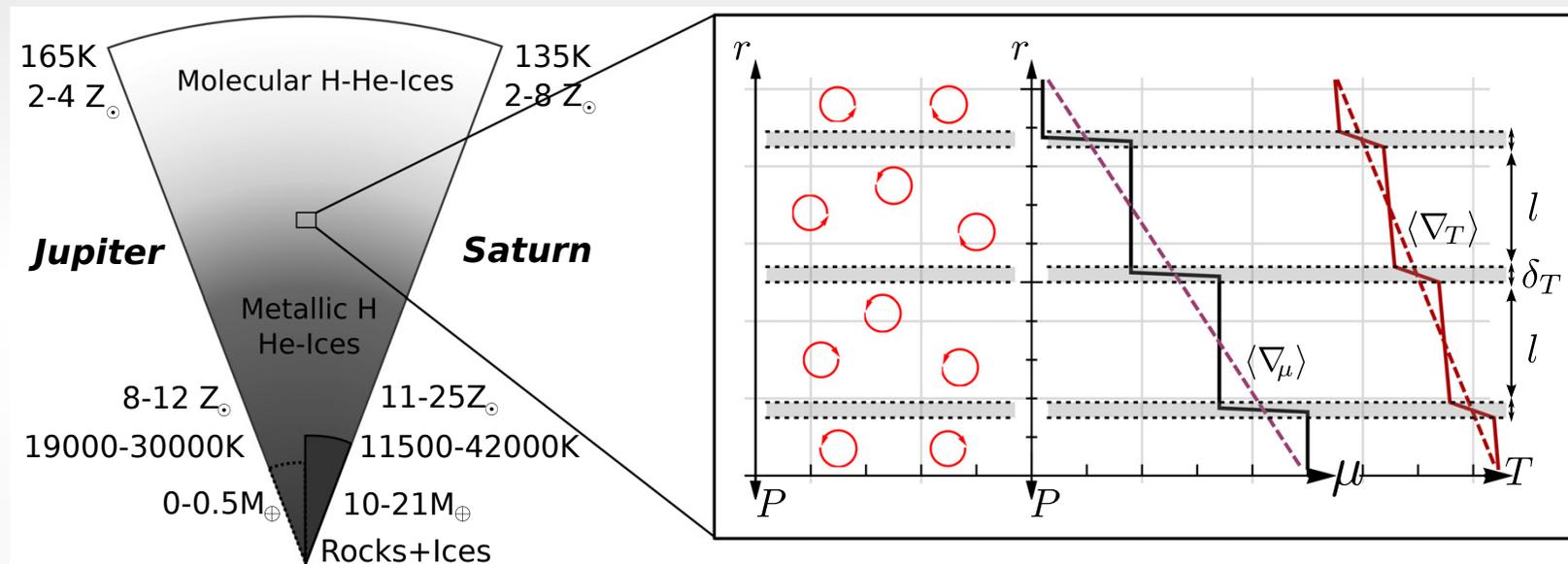
μ : 平均分子量, $\delta \equiv - \left(\frac{\partial \ln \rho}{\partial \ln T} \right)_{P, \mu}$, $\varphi \equiv \left(\frac{\partial \ln \rho}{\partial \ln \mu} \right)_{P, T}$

対流不安定性の概略図



土星の光度(年齢)問題 準対流モデル

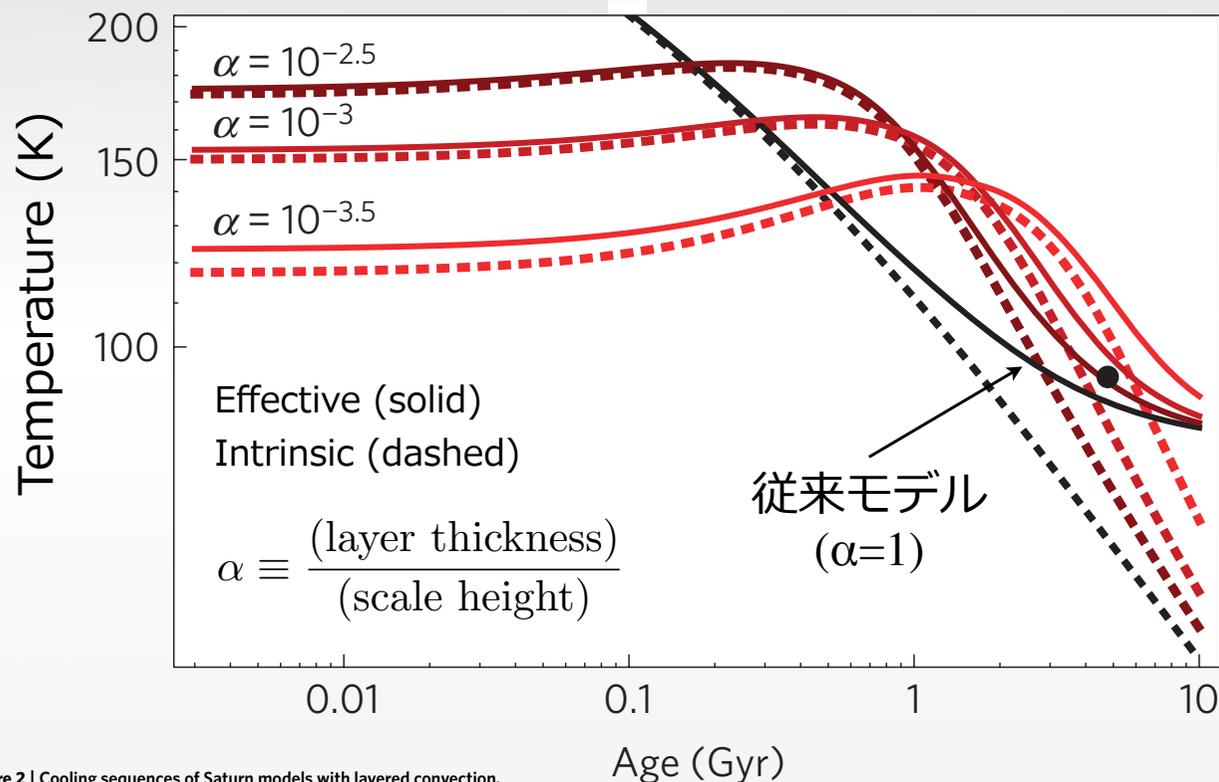
Leconte & Chabrier (2012) の半解析的モデル



- Parameterized convection
- 層のサイズと数を仮定
- 進化において層構造は常に維持されると仮定

土星の光度(年齢)問題

準対流熱進化モデル



従来モデルとの違い

1. 進化前期

組成勾配による

熱輸送の阻害 → 暗い

2. 進化後期

高温状態が長期間維持

→ 明るい

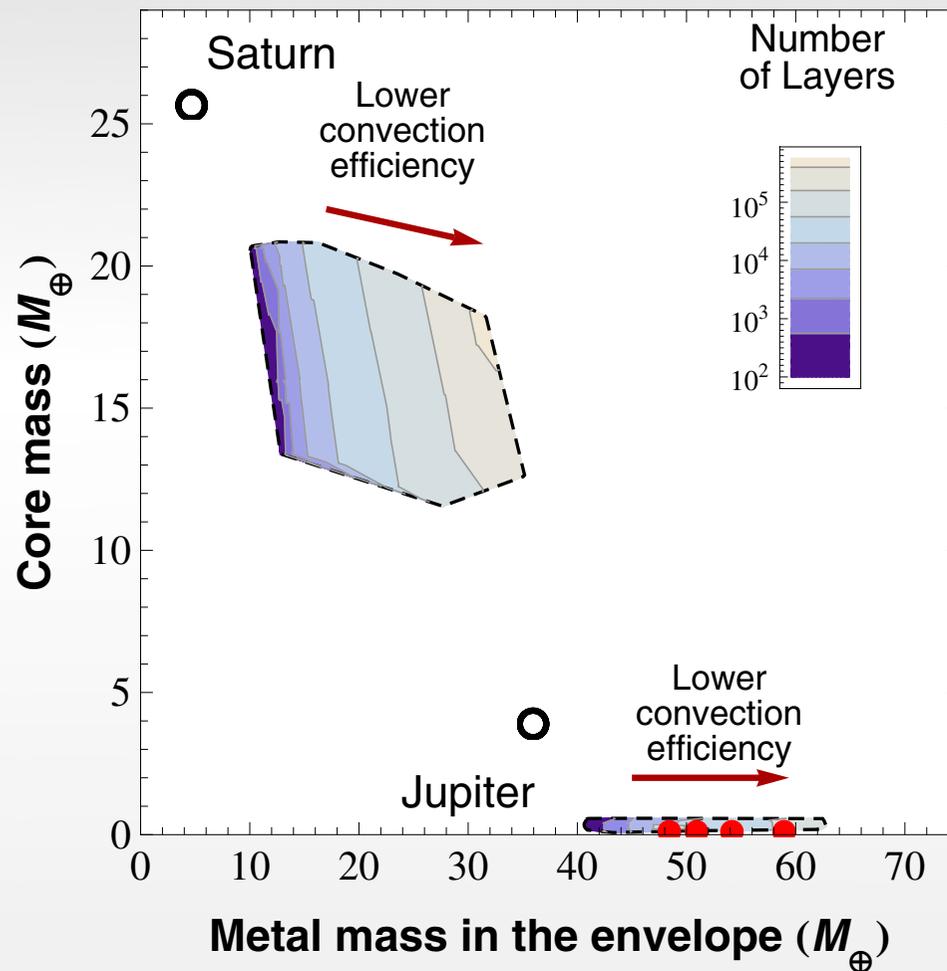
Figure 2 | Cooling sequences of Saturn models with layered convection.

a. Effective (T_{eff} ; solid curves) and intrinsic (T_{int} ; dashed curves) temperature (see Methods) evolution in time for the adiabatic reference model (black) and three models with layered convection ($\alpha = 10^{-2.5}$, 10^{-3} and $10^{-3.5}$ from dark to light red). **b.** Zoom on present era. Dots show the observed effective temperature. At early ages, the effective temperature of models with layered convection is lower owing to inefficient convection. After a few hundred million years, these models become brighter owing to the release of the excess of energy stored from the initial state.

土星の光度(年齢)問題

準対流：内部組成推定への影響

重力モーメントの観測値と整合する解



熱輸送効率の低下

➡ 高温エンベロップ

➡ 重元素の分配

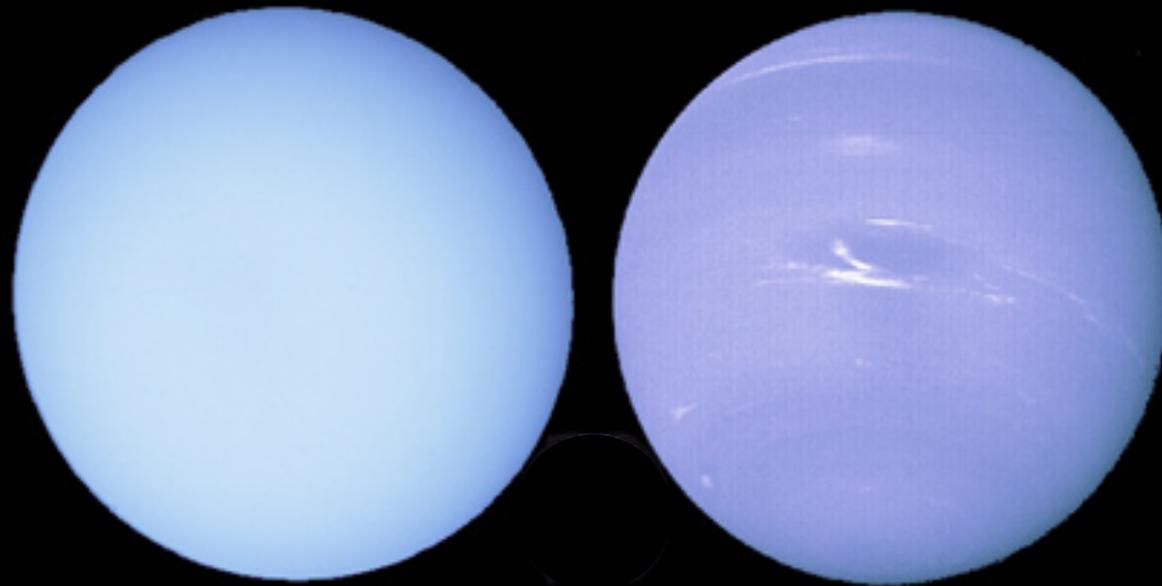
コアなし木星でも重力場と整合する

✓ コア集積モデルと矛盾？

✓ コアの浸食？

天王星が暗すぎる問題

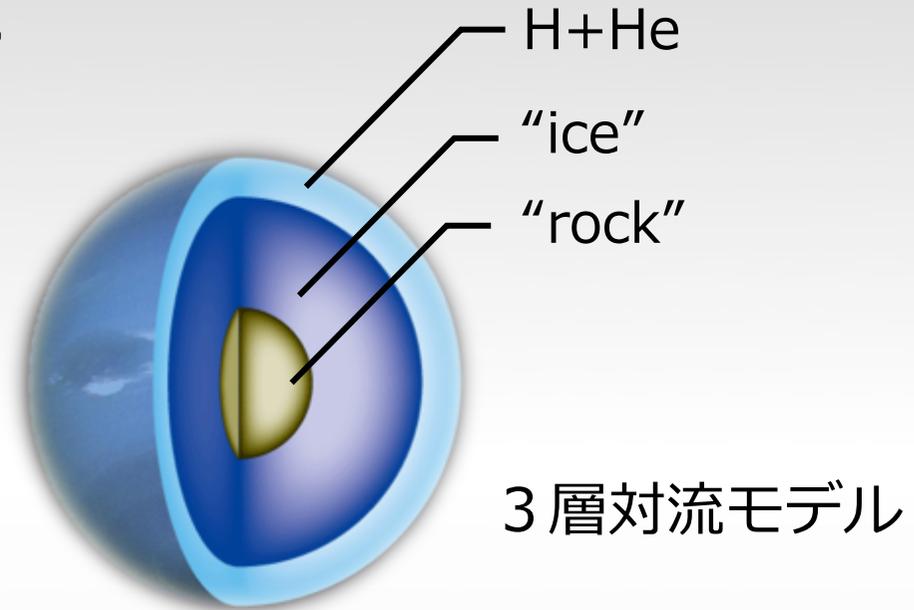
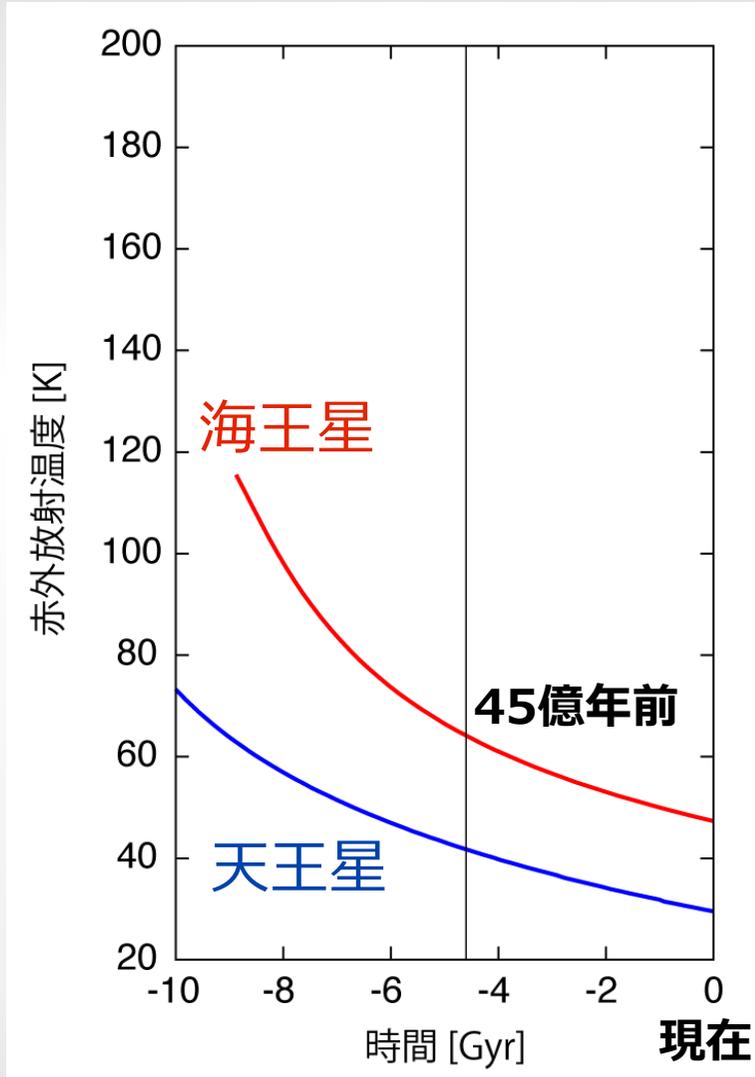
天王星と海王星は似たものどうし？



暗い天王星問題

1990年代の問題意識

Hubbard & MacFarlane (1980)を再現



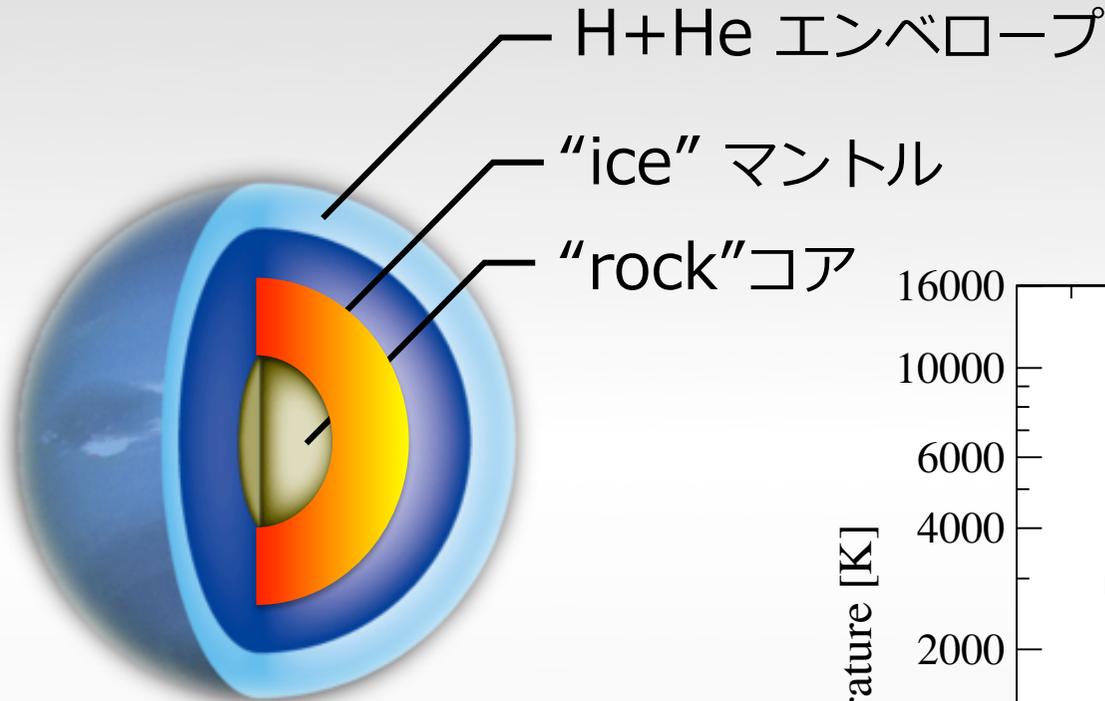
天王星と海王星の両方が暗い

天王星と海王星は形成時から低温

➡ 集積率 10^{-10} 地球質量/年に相当
...遅すぎる！

暗い天王星問題

高圧氷層による対流の阻害



超イオン (super-ionic) 層
... 高圧氷 + 自由プロトン

- ▶ 固体 or 液体?
- ▶ 固体なら磁場はどうする?

第一原理計算に基づく
H₂O "ice" の相図

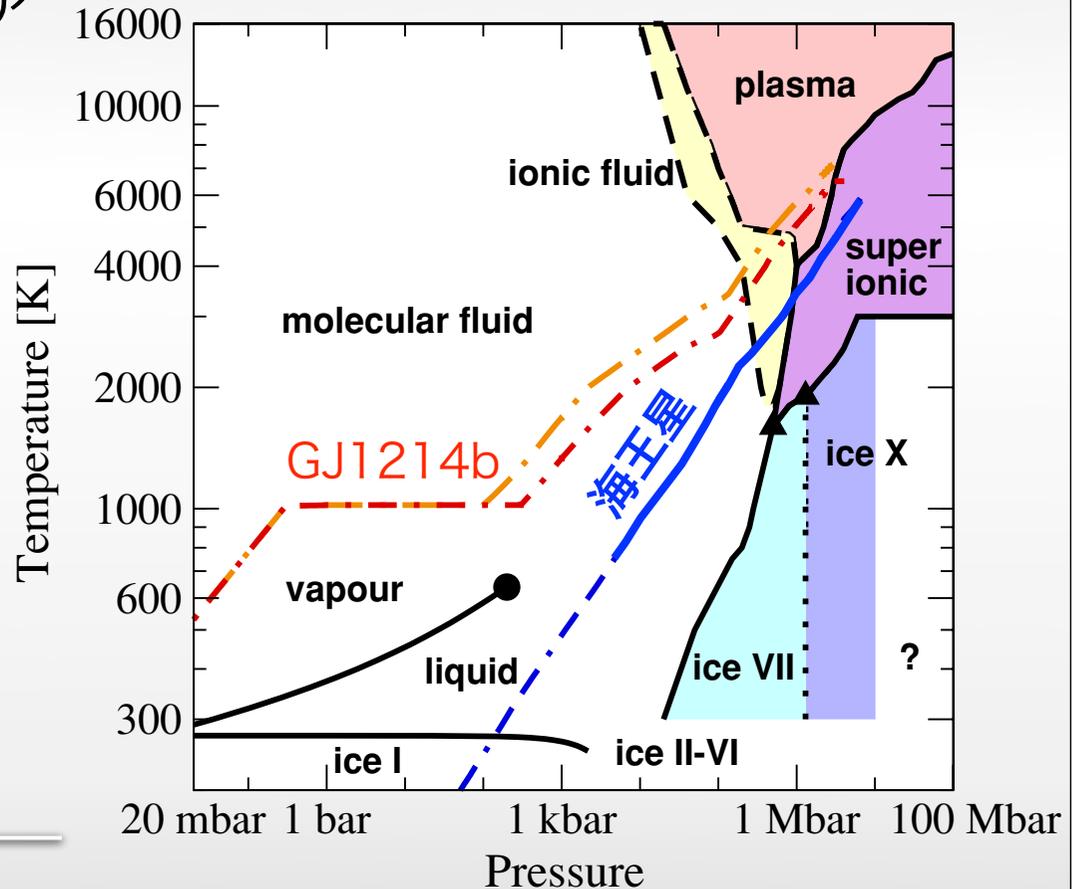
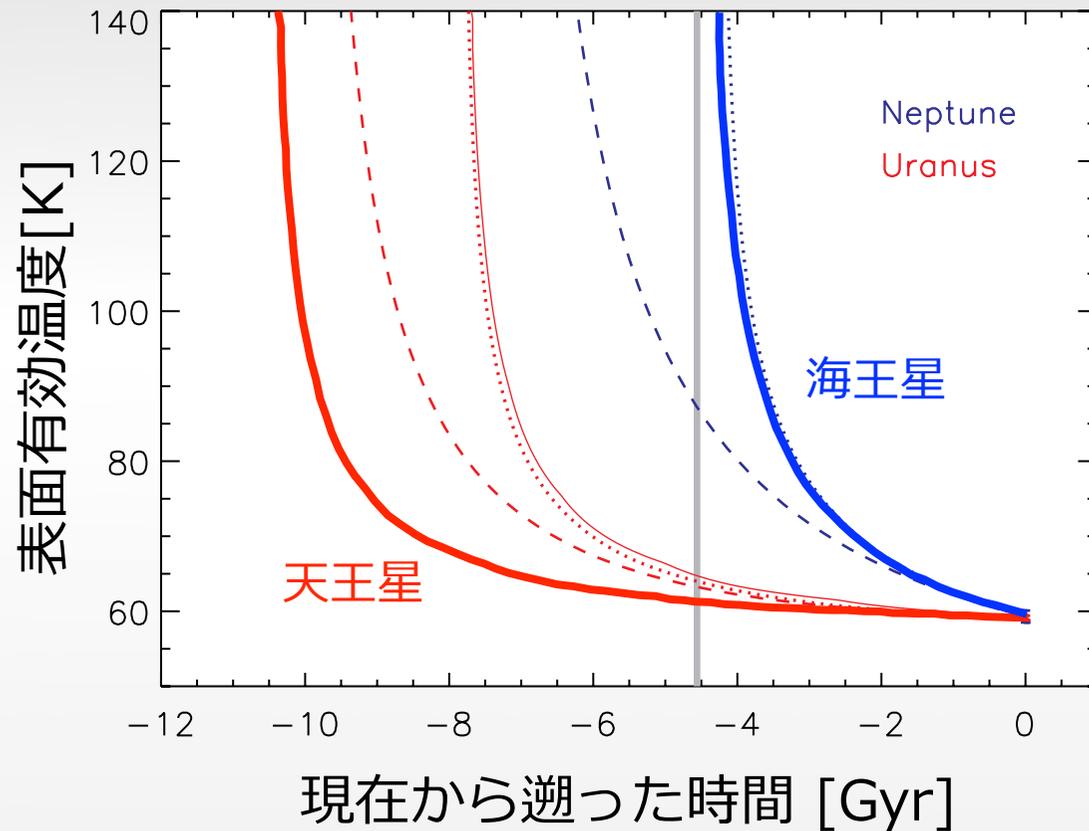


Figure from Nettelmann+ (2011, ApJ)

暗い天王星問題 問題の変更

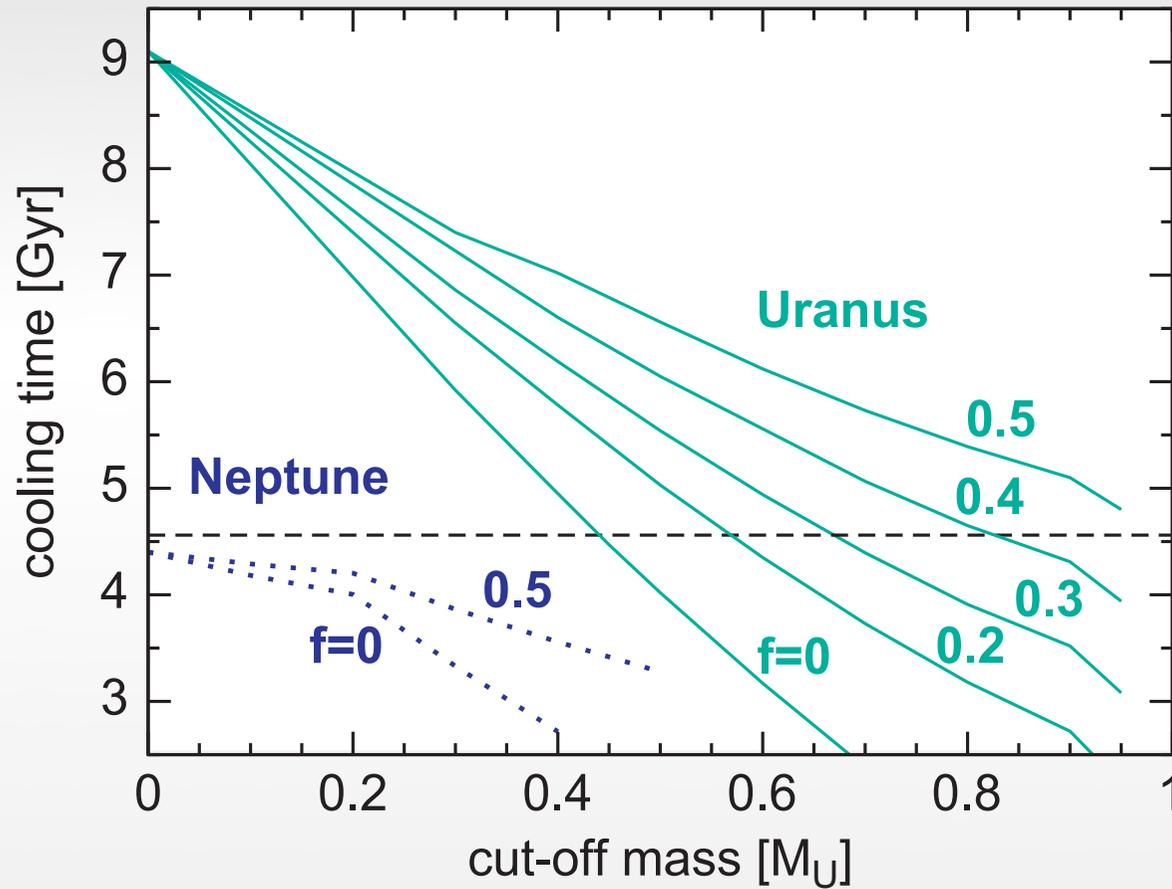


●アップデート：

- 観測値 (post-Voyager)
- 太陽光照射を考慮した大気モデル
- 最新の状態方程式

**天王星だけが
あきらかに暗い**

放射への寄与の制限



Cut-off mass

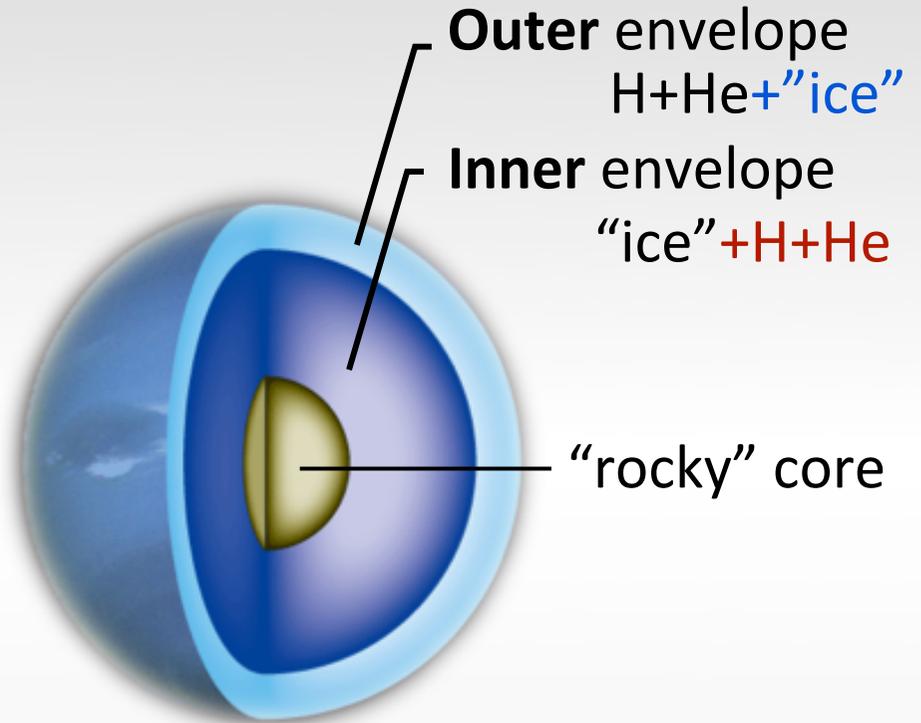
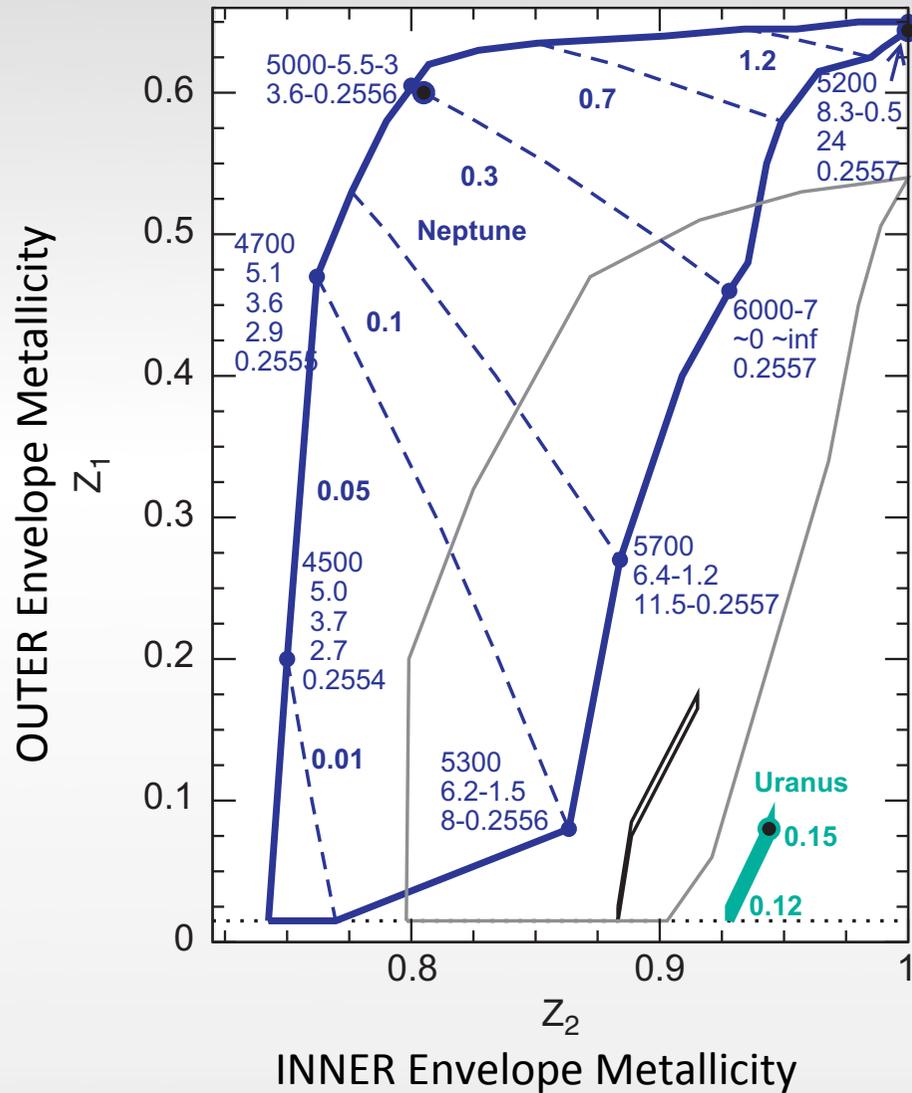
... それより内側からの
エネルギー輸送を制限

f ... 制限領域での

エネルギー輸送効率

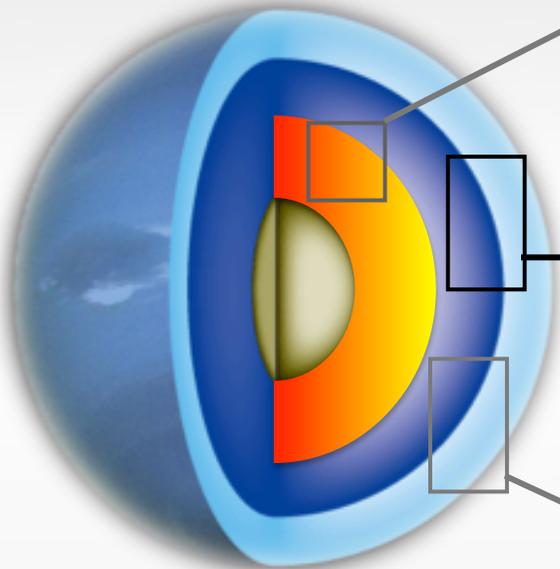
暗い天王星問題

天王星と海王星の内部



2つの惑星の
内部組成は異なる？

天王星の「暗い」問題の解決案



超イオン氷による対流阻害

- 惑星放射に寄与する部分の制限
- 状態（固体 or 液体）が不明

巨大衝突による加熱

- 倒れた自転軸と整合的である

Podolak & Helled (2012)

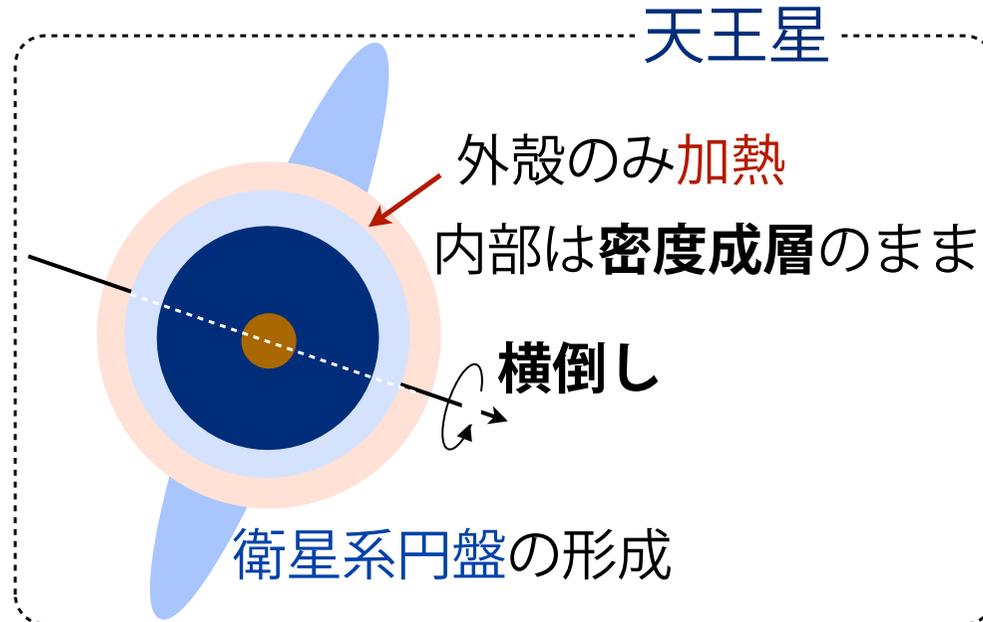
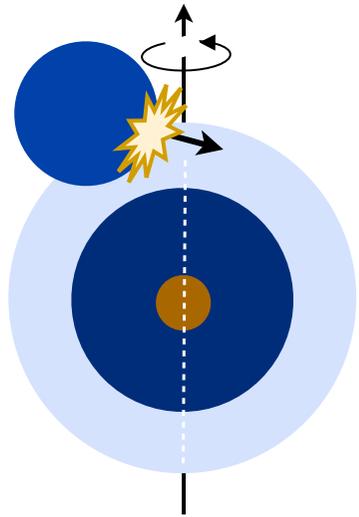
組成勾配による対流の非効率化

- エンベロープが重元素に汚れているという事実と整合的である

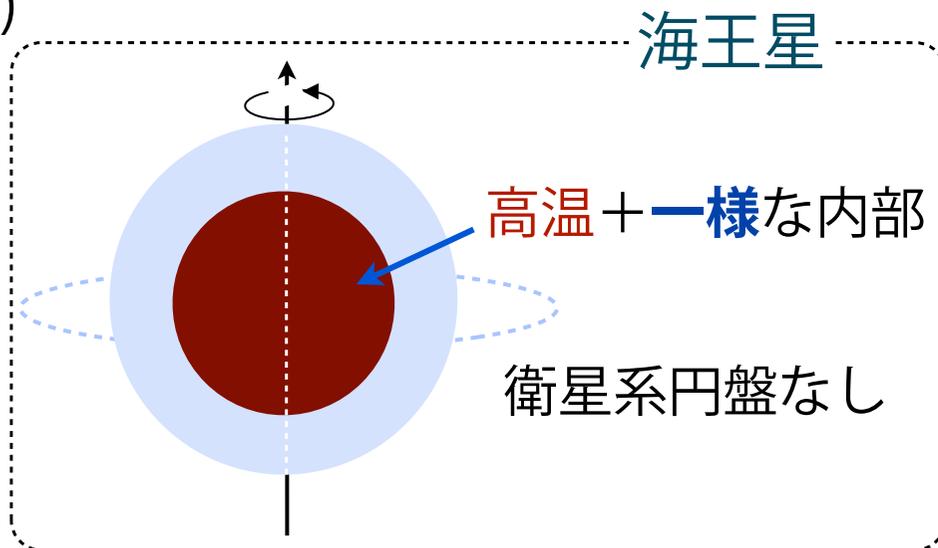
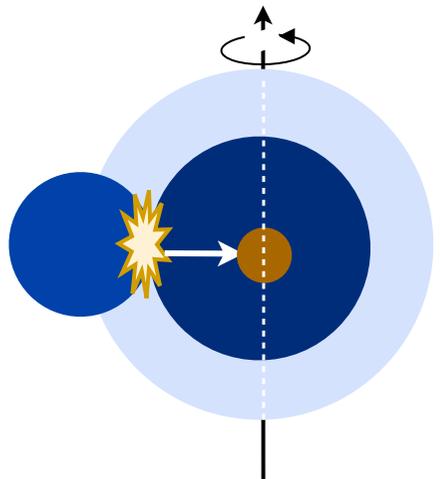
氷惑星の二分性：巨大衝突

(Stevenson, 1986; Podolak & Helled, 2012)

斜め衝突 (oblique collision)

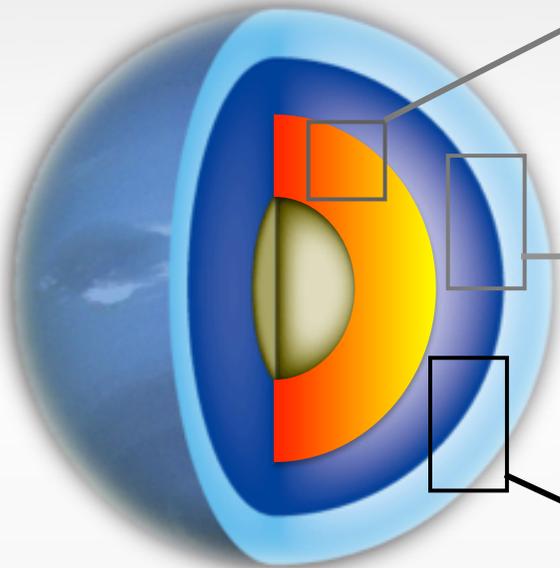


正面衝突 (head-on collision)



(スライド提供：堀 安範)

天王星の「暗い」問題の解決案



超イオン氷による対流阻害

- 惑星放射に寄与する部分の制限
- 状態（固体 or 液体）が不明

巨大衝突による加熱

- 倒れた自転軸と整合的である

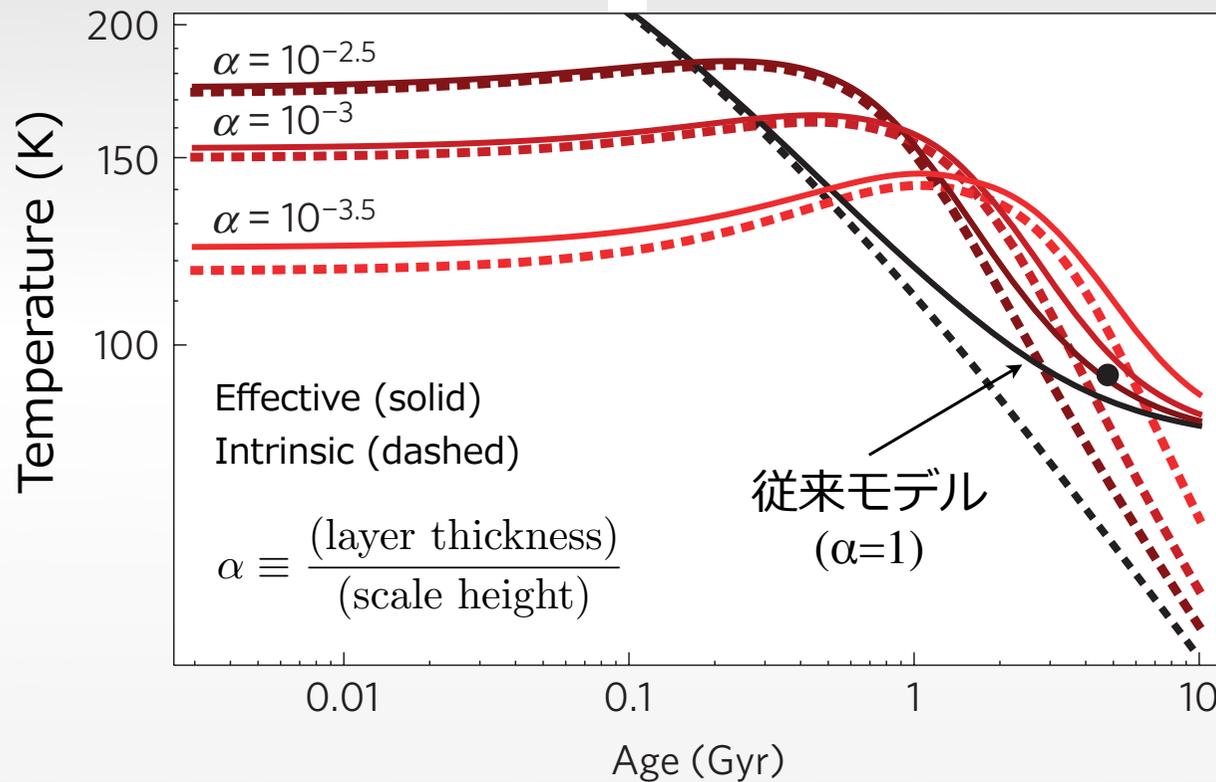
Podolak & Helled (2012)

組成勾配による対流の非効率化

- エンベロープが重元素に汚れているという事実と整合的である

暗い天王星問題

準対流熱進化モデル



1. 進化前期

組成勾配による

熱輸送の阻害 → 暗い

天王星?

2. 進化後期

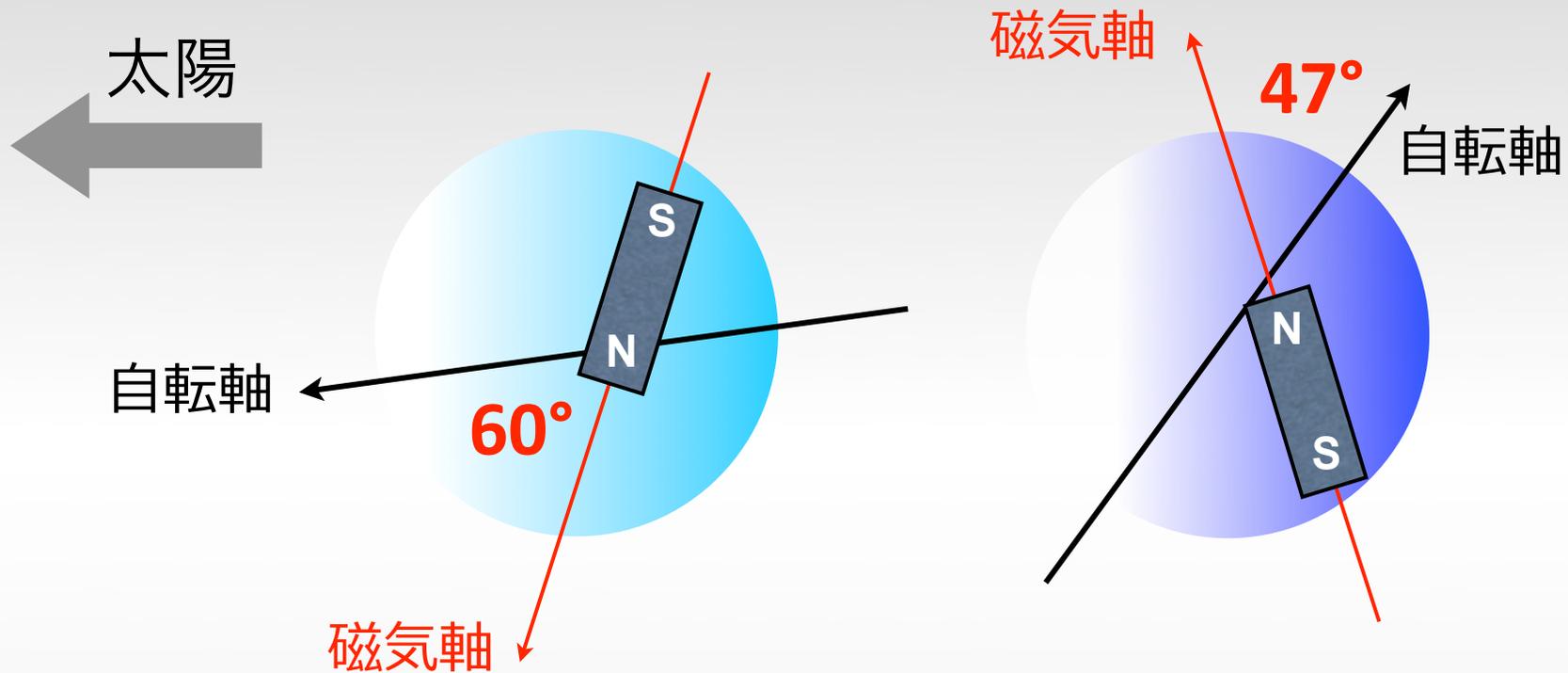
高温状態が長期間維持

→ 明るい

土星?

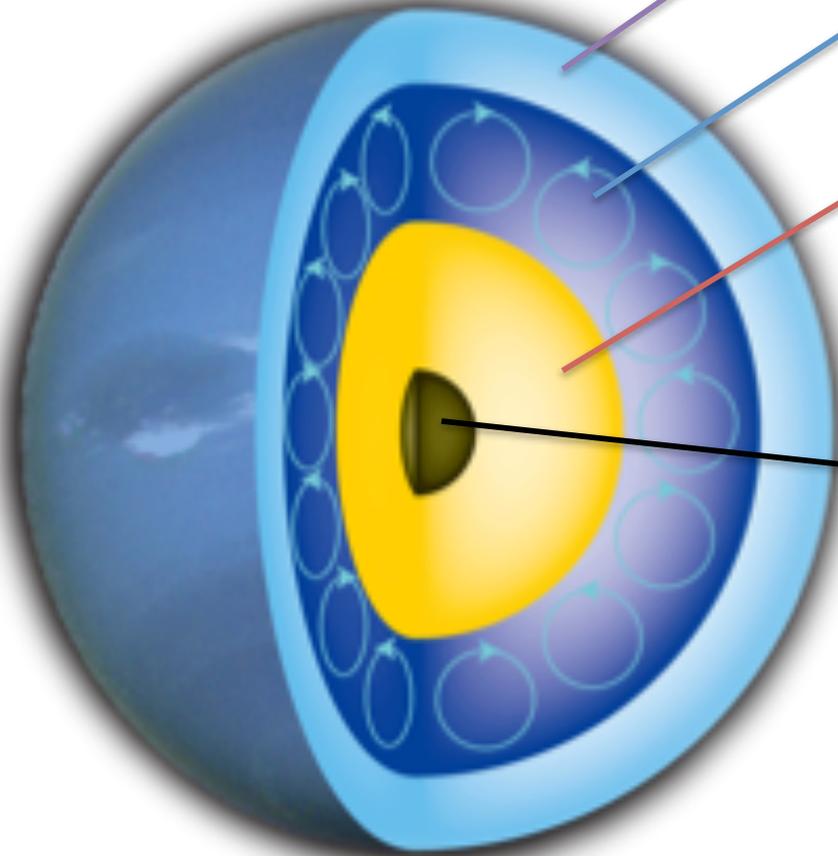
暗い天王星問題

天王星・海王星の自転軸と磁場

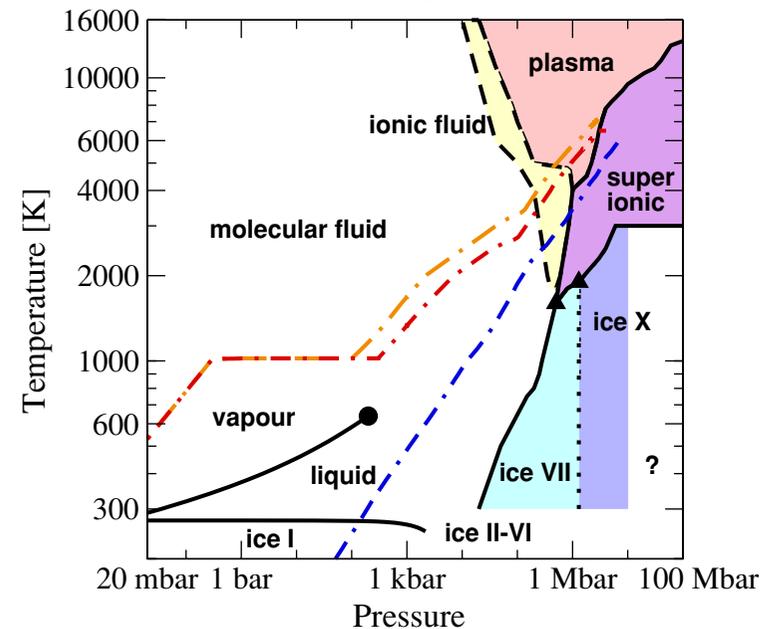


	天王星	海王星
ダイポールモーメント	$0.23 \text{ gauss } R_U^3$	$0.13 \text{ gauss } R_N^3$
自転軸に対する磁気軸の傾き	60°	47°
惑星中心に対するオフセット	$0.3 R_U$	$0.6 R_N$

最適モデル (?)



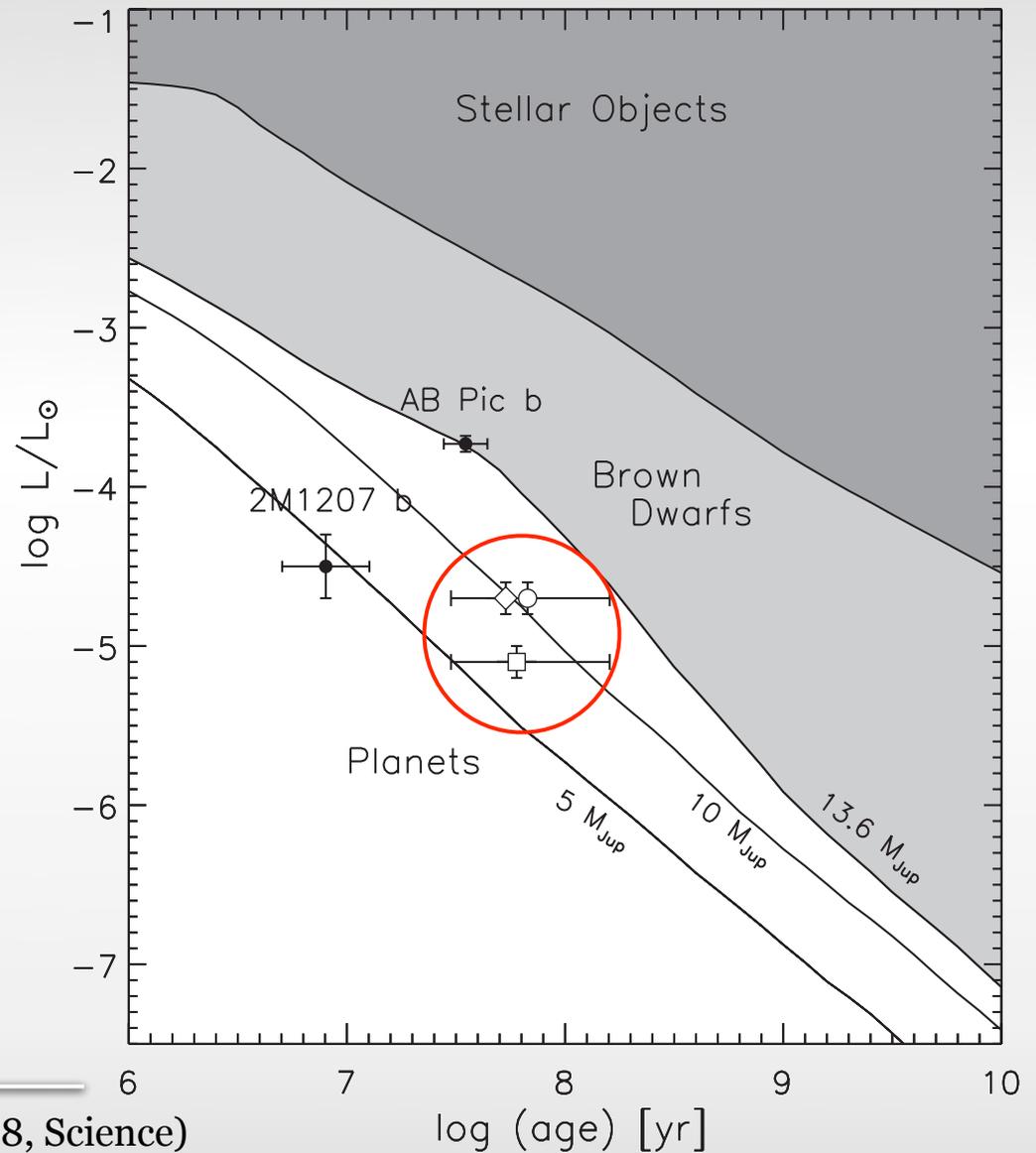
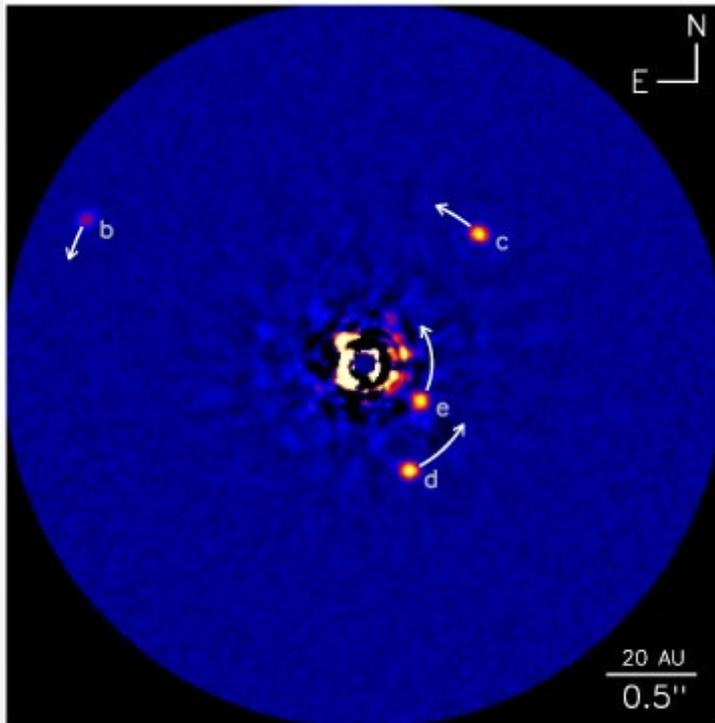
- 水素/ヘリウムと水などの混合
- 混合率勾配 ⇒ 対流しない
- 対流する伝導性流体
H₂O (超イオン相 or プラズマ相?)
- 対流しない伝導性流体
-H₂Oとシケイトの混合+勾配
or
-熱伝導性の高いH₂O
- 小さい岩石/鉄コア (?)



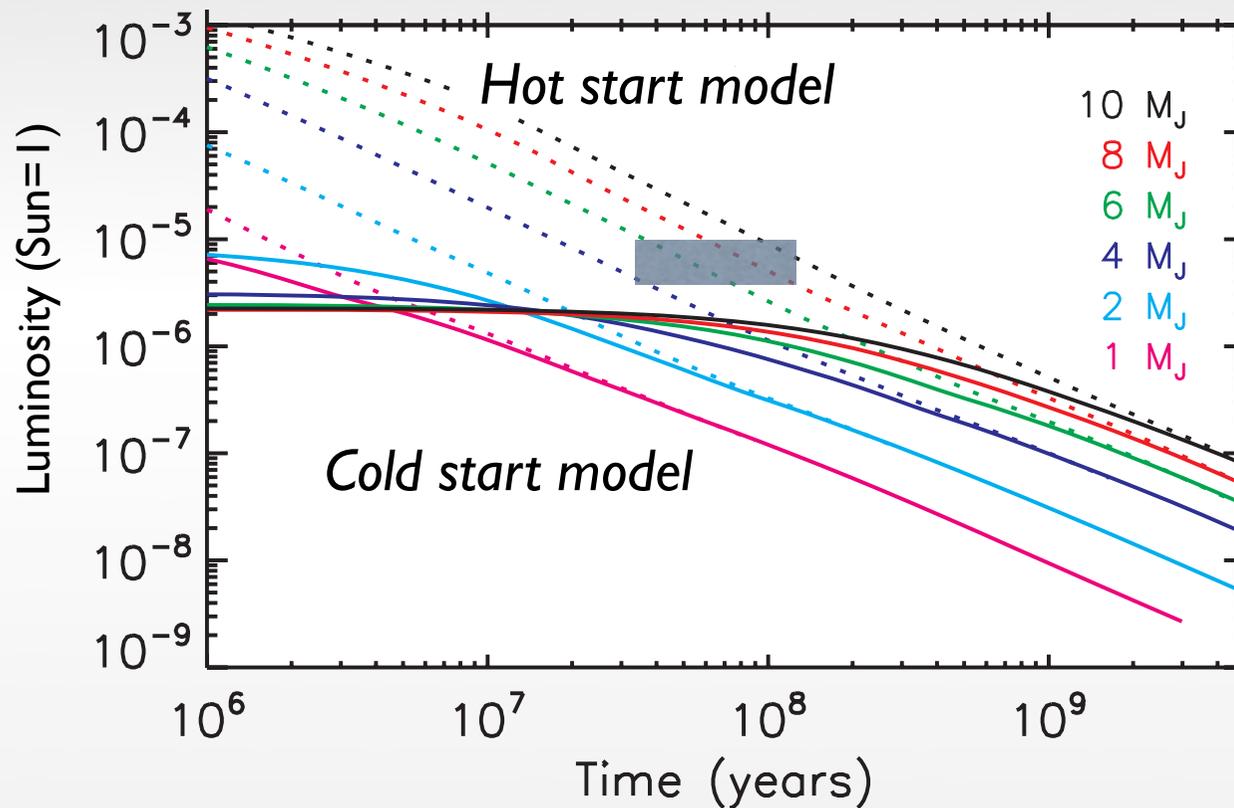
系外惑星への応用

巨大惑星の直接撮像

HR8799



Hot Start or Cold Start?



Hot Start

➡ **Disk Instability**

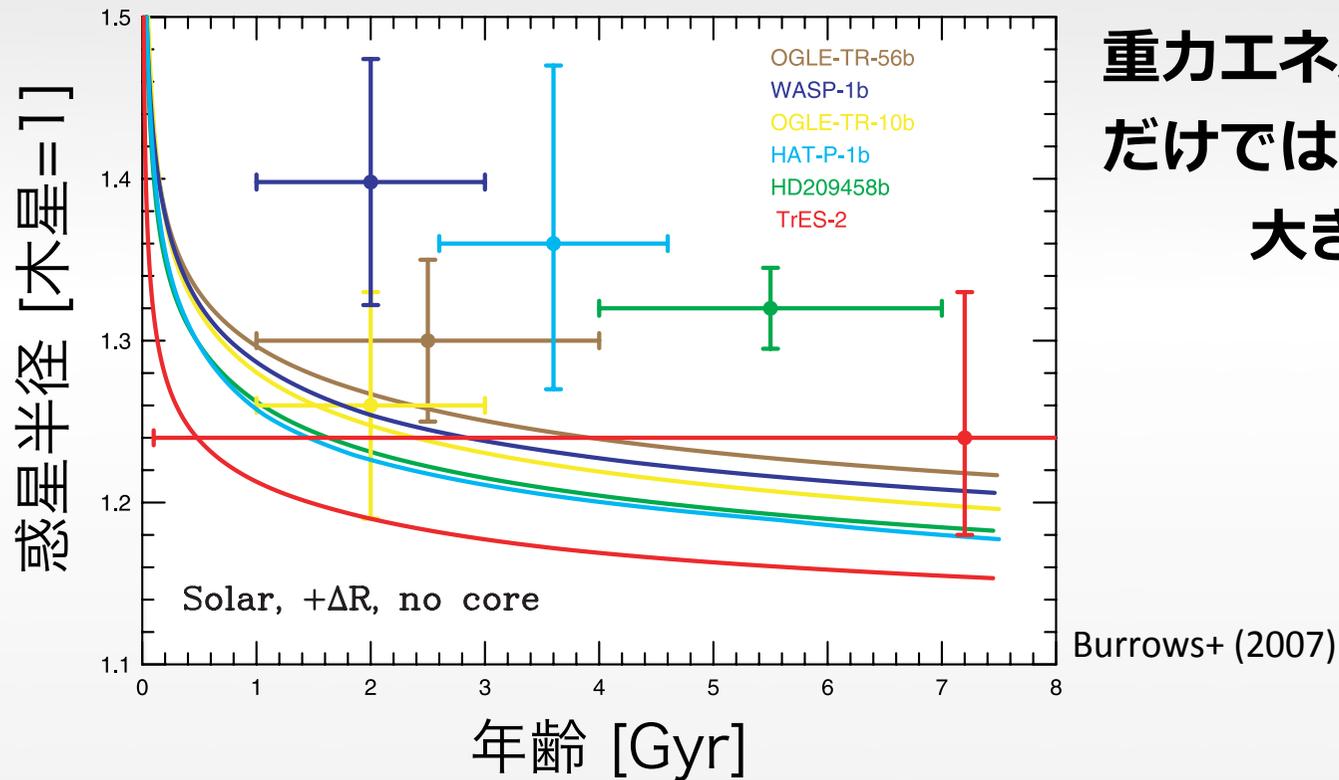
Cold Start

➡ **Core Accretion**

...という区別は
正しいのか？

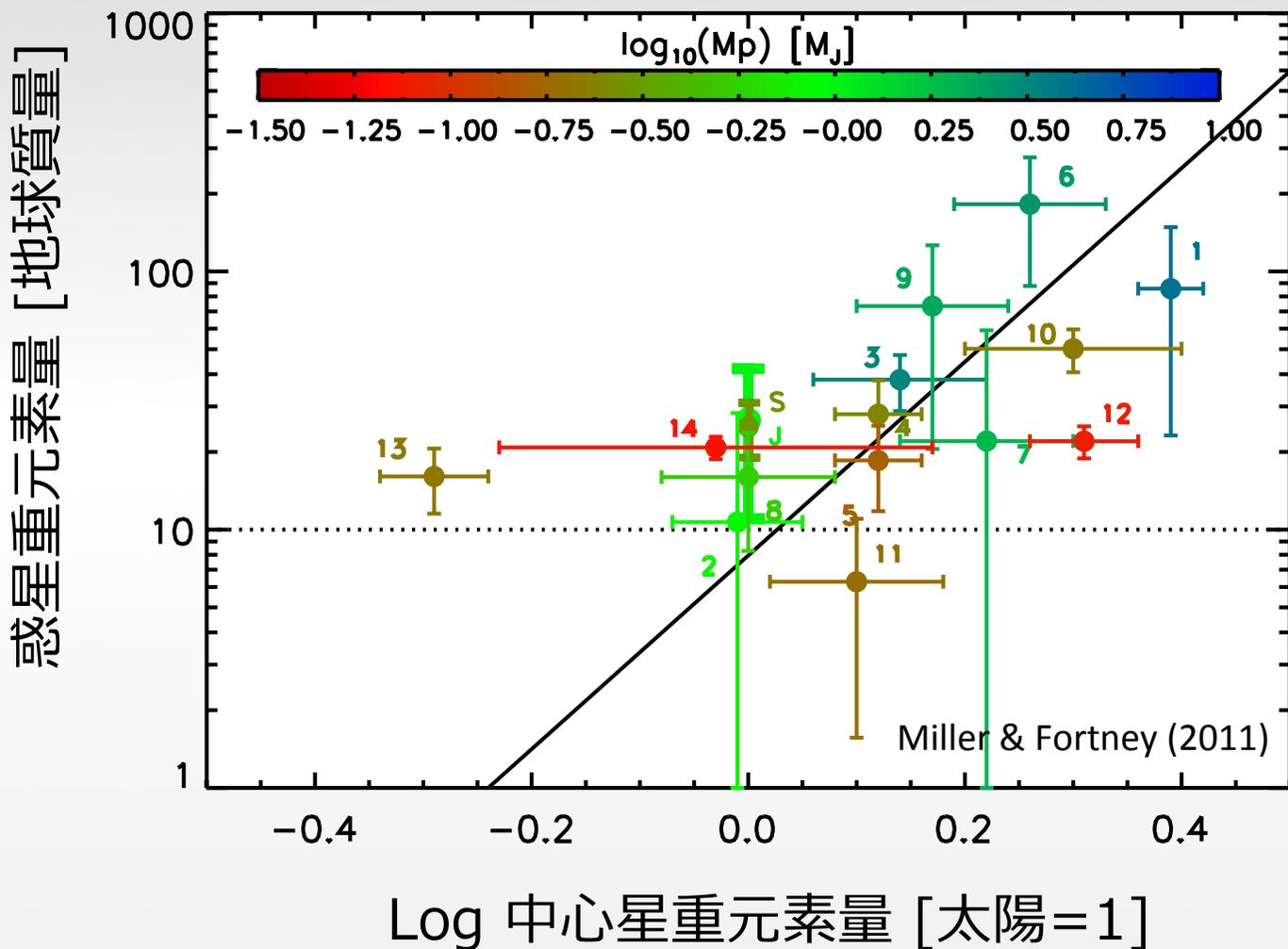
ホットジュピター：異常膨張

理論と観測の比較



重力エネルギー + 中心星輻射
だけでは説明できないくらい
大きな半径を持つ

ホットジュピターの重元素



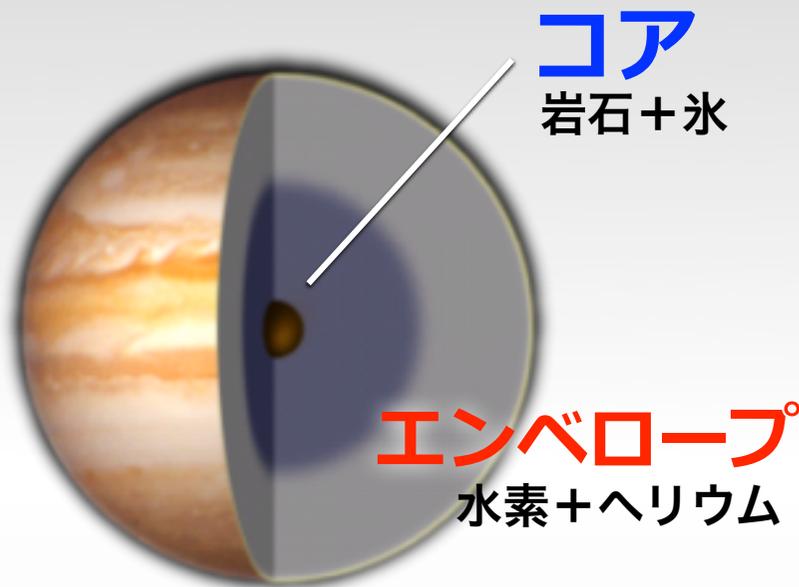
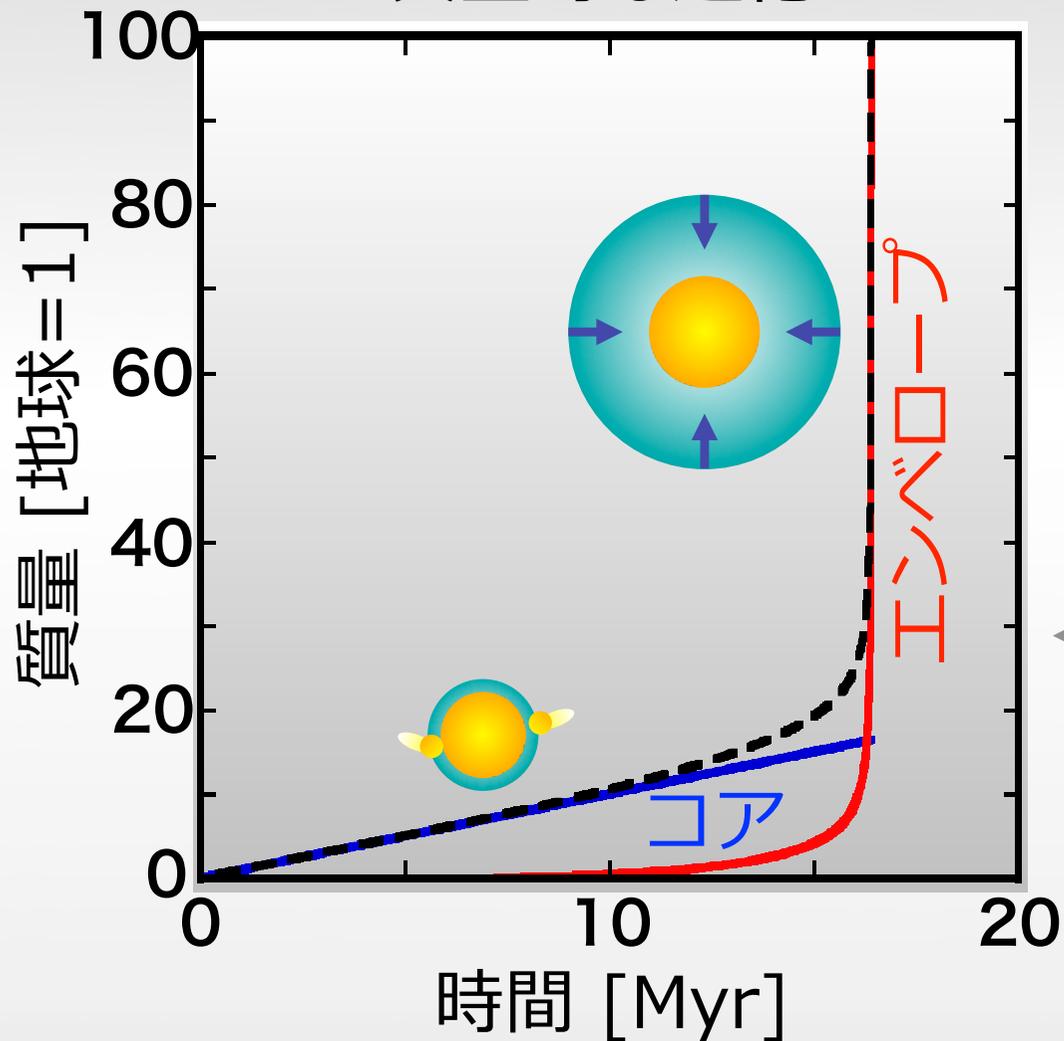
系外木星型惑星は重元素に富む

形成過程への示唆

形成過程への示唆

木星型惑星のガス捕獲過程

典型的な進化



◀ 2段階のプロセス

① コアがある**臨界質量**に
まで成長

② **円盤ガス**の暴走的**集積**

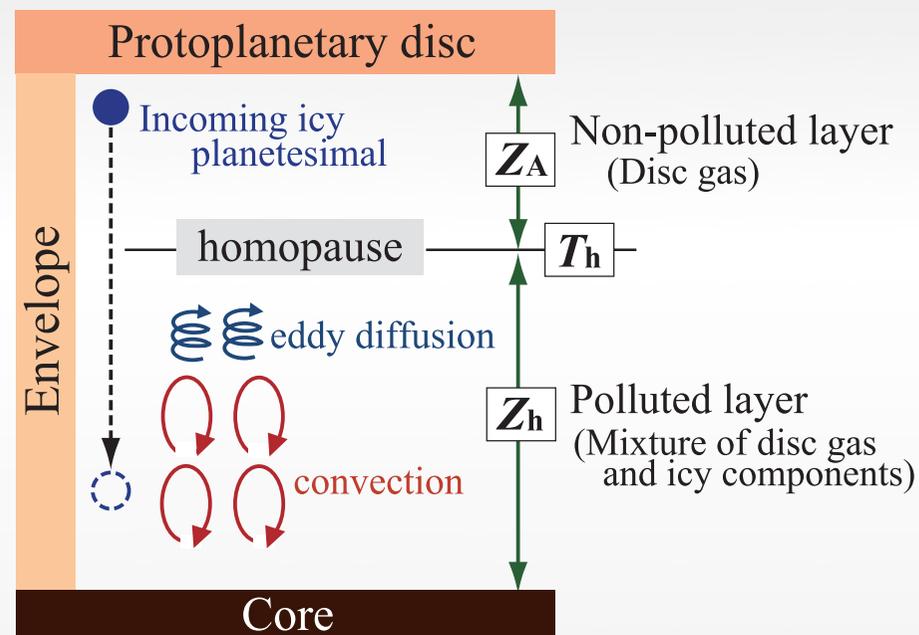
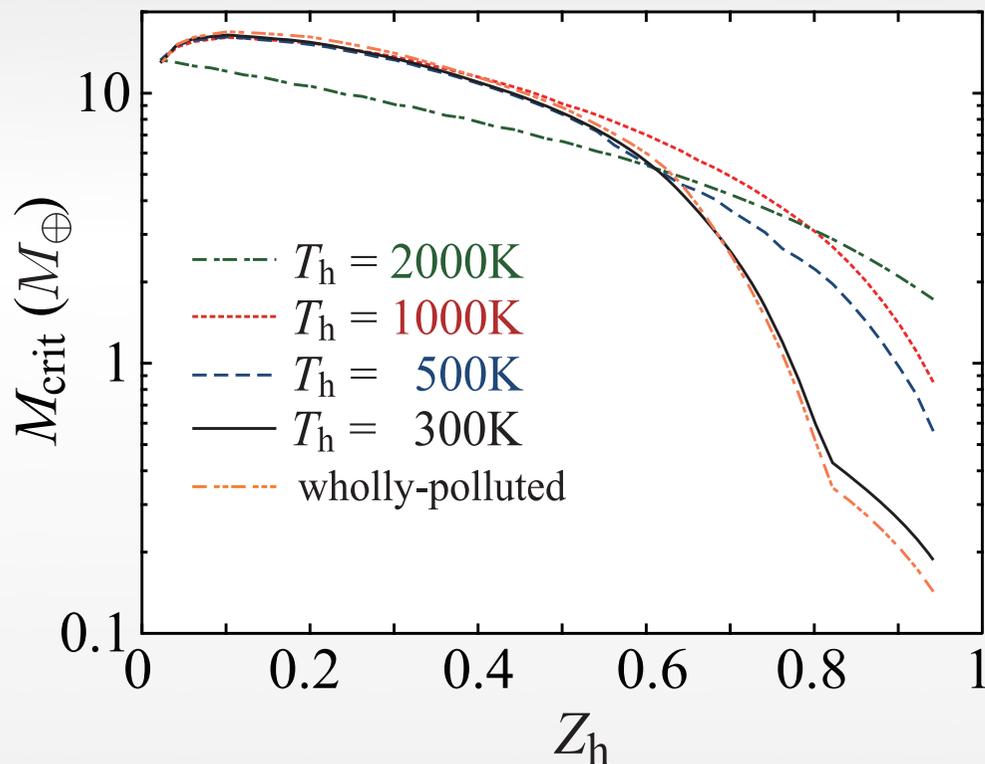
による**エンベロープ**形成

巨大惑星の集積過程の現代的描像

微惑星破片集積 (Inaba+ 2003; Kobayashi+2011他)

+破片の大気による捕獲 (Inaba & Ikoma 2003)

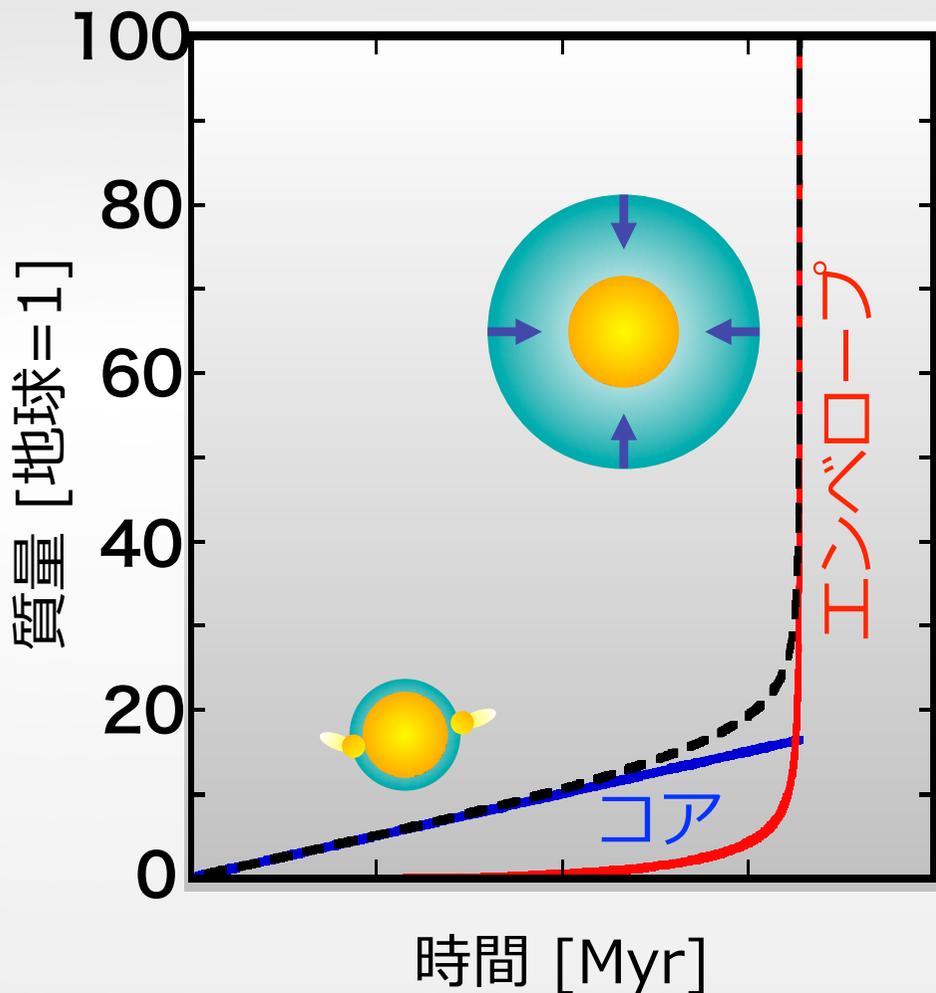
+破片による大気汚染 (Hori & Ikoma 2011)



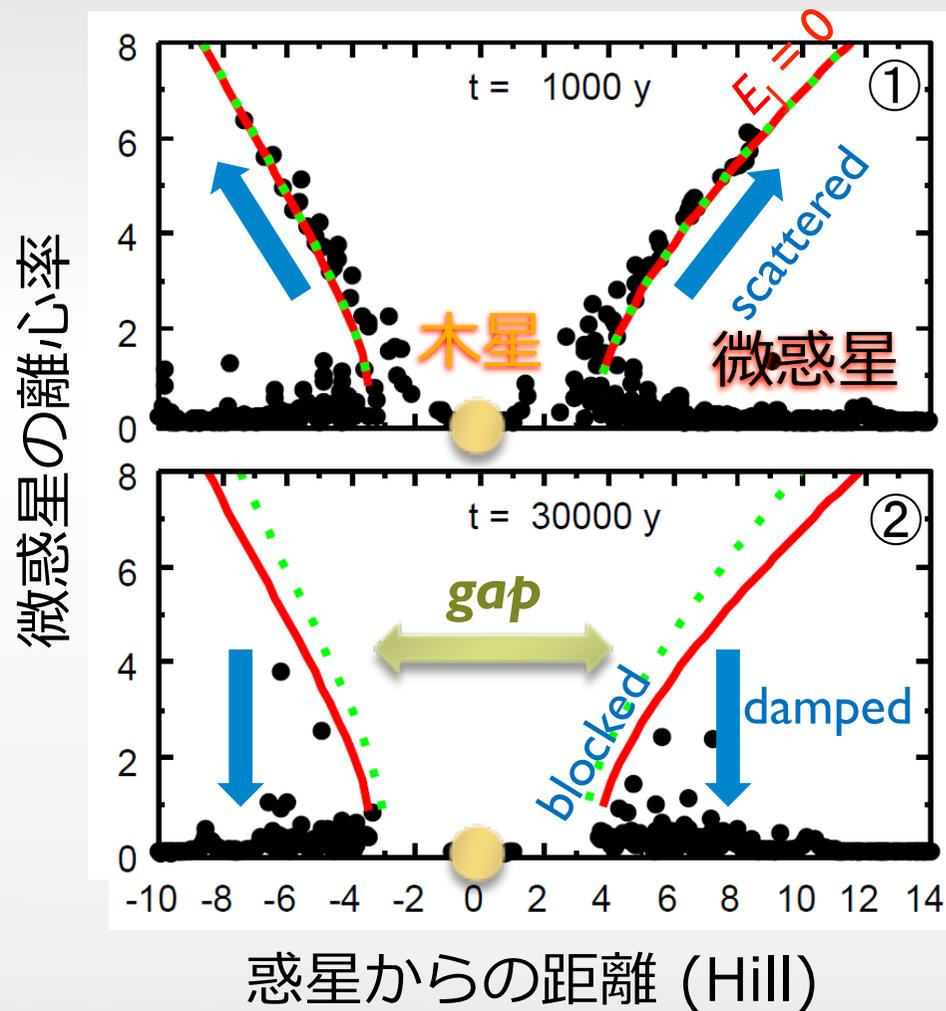
重元素汚染で臨界質量は急激に小さくなる

形成後期の重元素の獲得

コアとエンベロープの成長



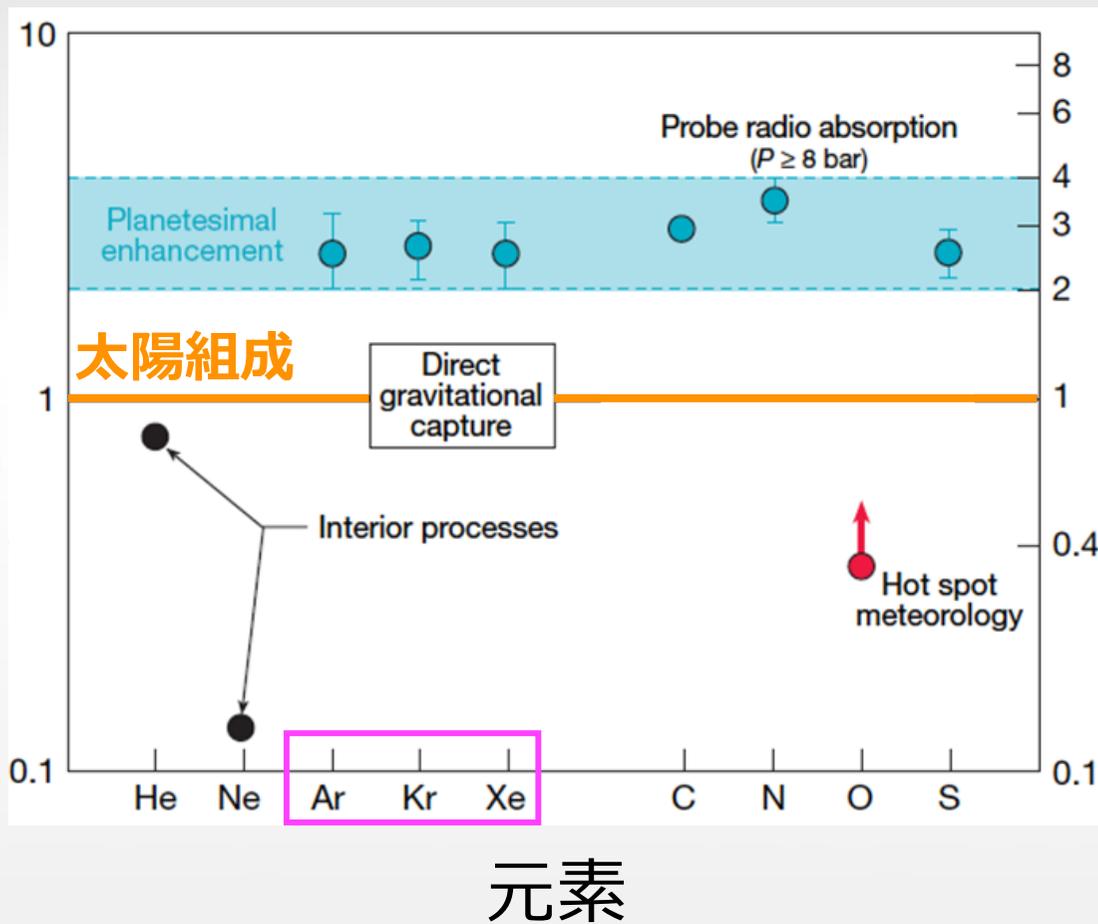
惑星周りの微惑星の運動



表面大気中の元素存在度

ガリレオプローブ測定

存在比 [木星/太陽]



● 希ガスも含めて
ほぼ一様に過剰

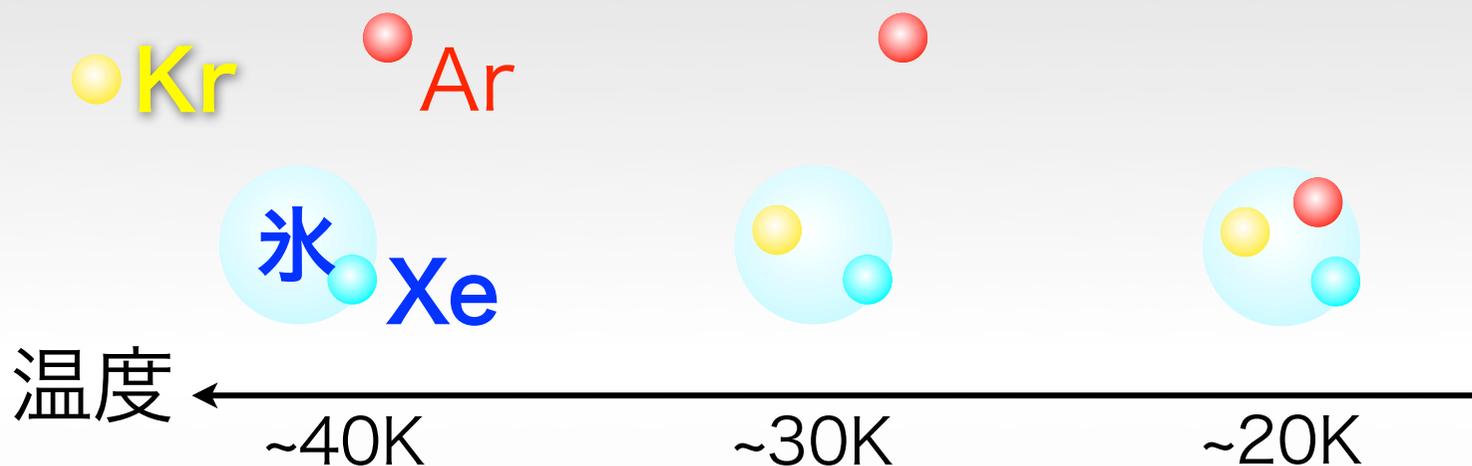
● Oが少ない

← 高気圧に落下

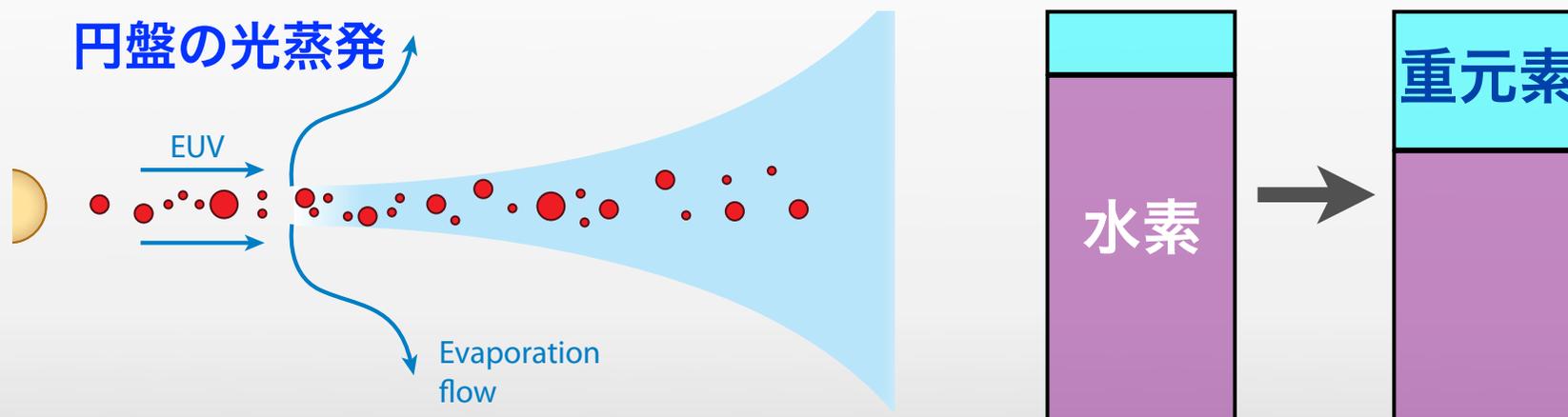
形成過程への示唆

過剰希ガスの起源

- 可能性 1 : 非常に低温の氷の集積



- 可能性 2 : 水素の選択的散逸 → 遅い形成

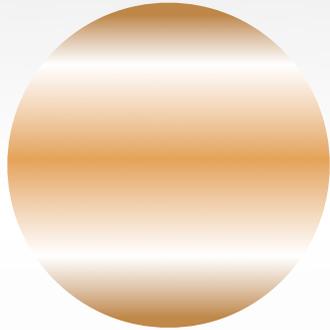


形成過程への示唆

衛星の氷の形成温度

本体と同じ元素存在度か

木星



ガリレオ衛星

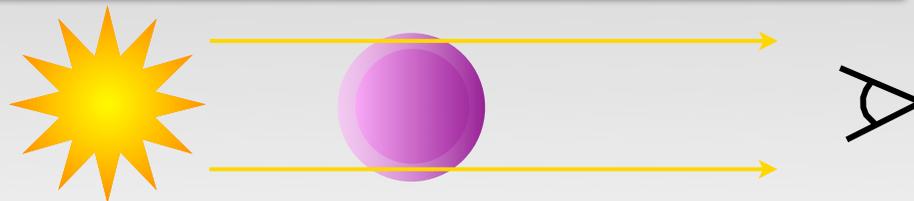
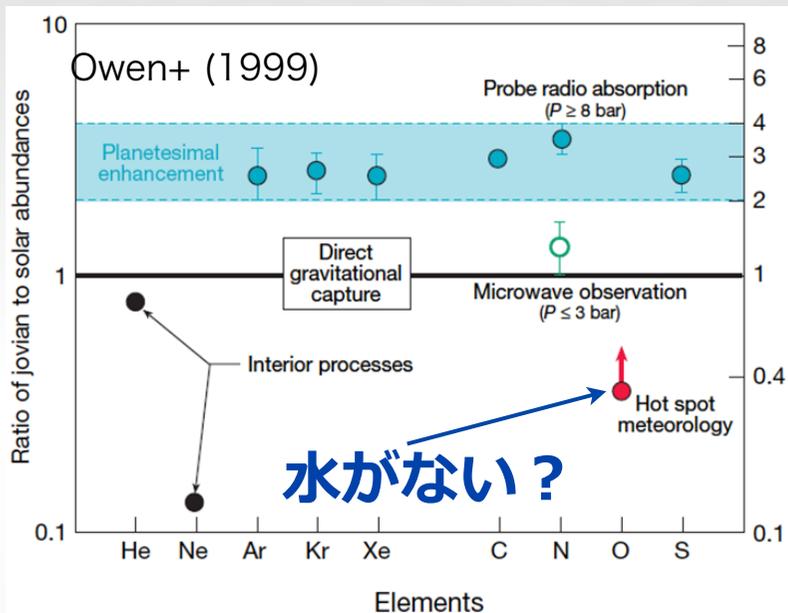


衛星 = 低温氷 → 可能性 1

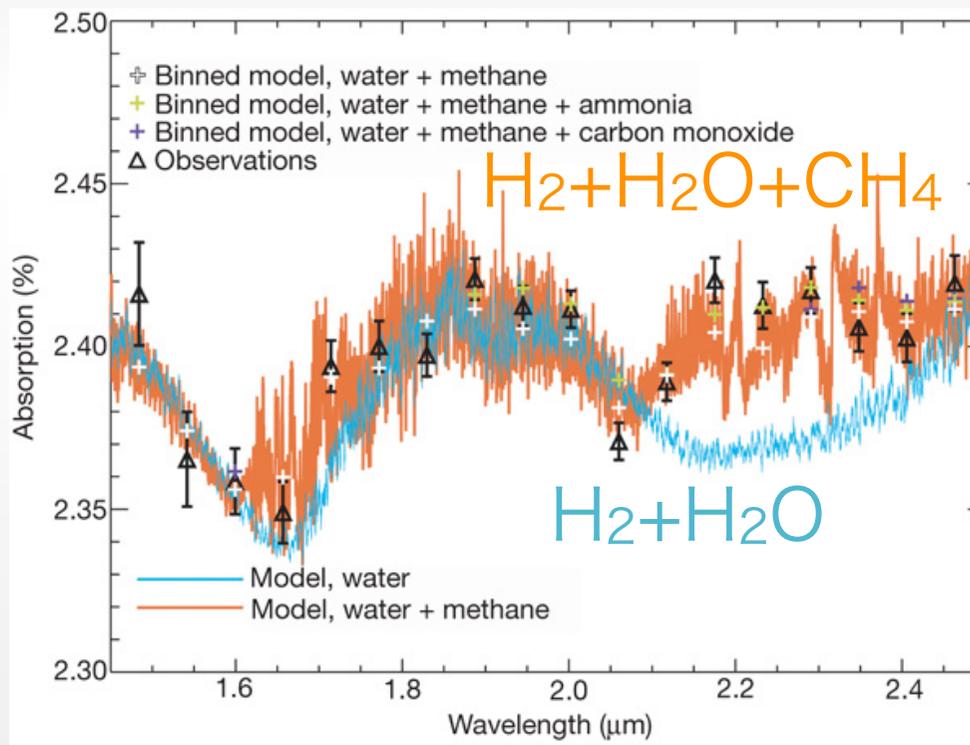
衛星 = 高温氷 → 可能性 2

ホットジュピター大気の大重元素

木星大気の様子観測



ホットジュピターの大気透過スペクトル



ホットジュピターの大気
分子が見えつつある

➡大気分子種による比較可能

Hubble Space Telescope

Swain, Vasisht, & Tinetti (2008, Nature)

重力モーメントの限界

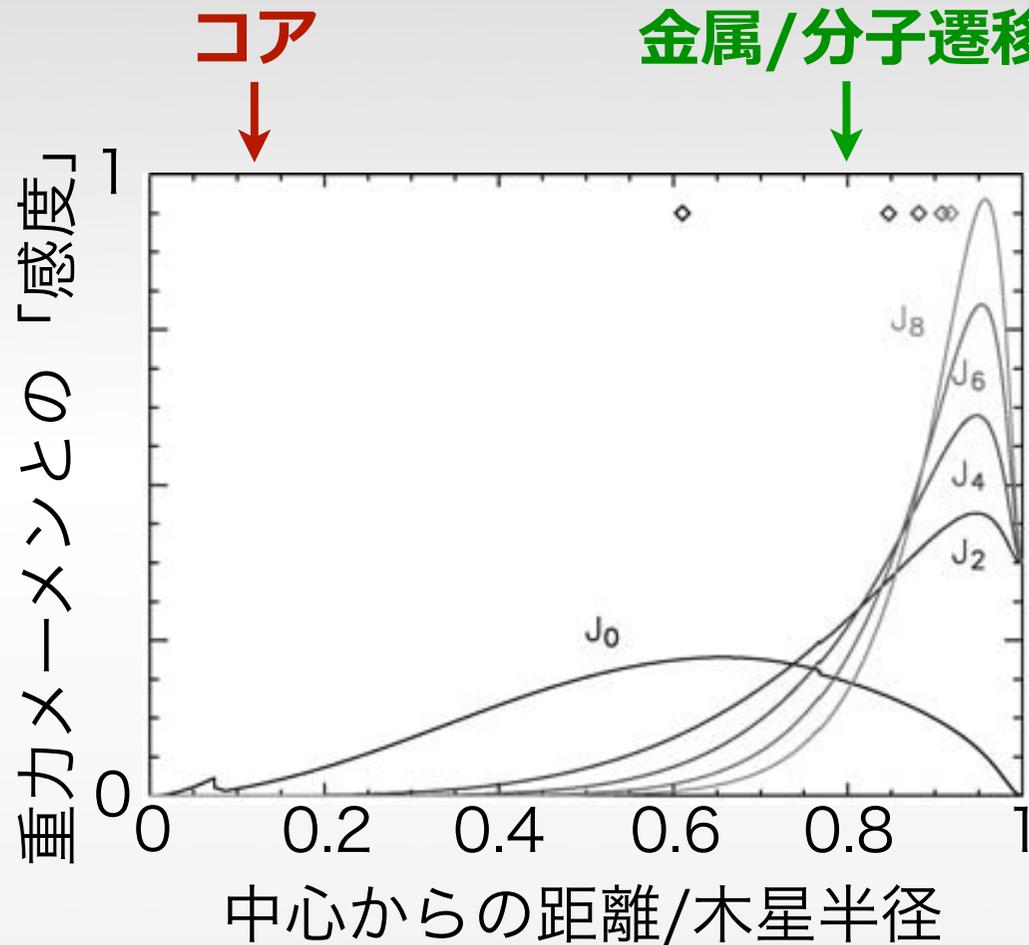
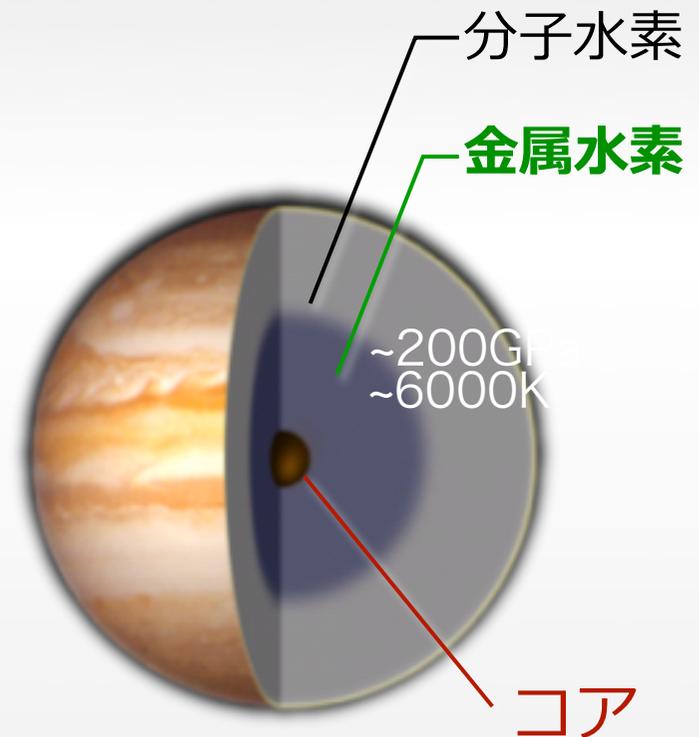


Fig: Guillot (2005, AREPS)

高次重力モーメント測定
(e.g. JUNO 2011~)

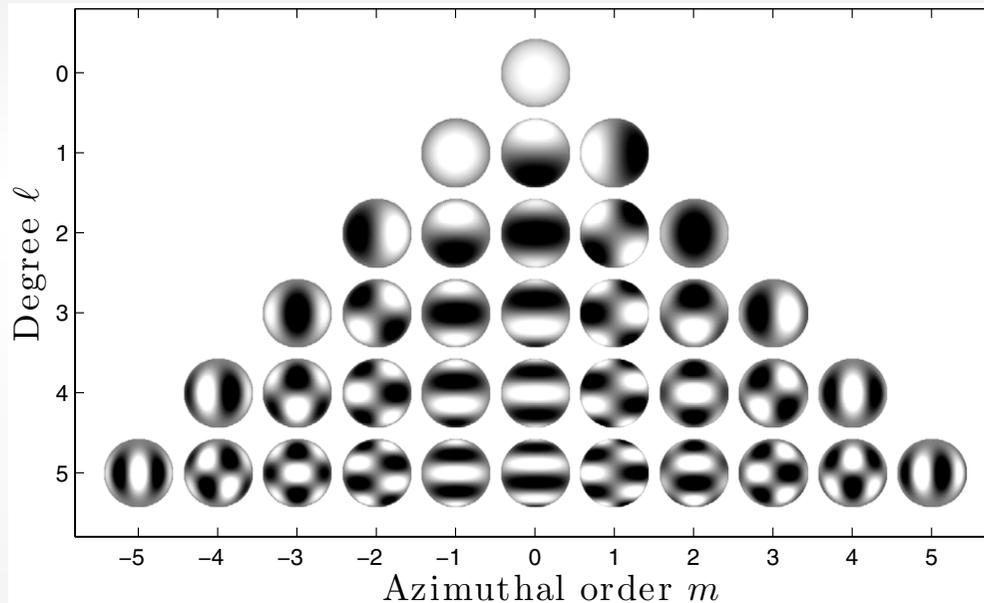


コアやエンベロープ深部に対する感度が低い

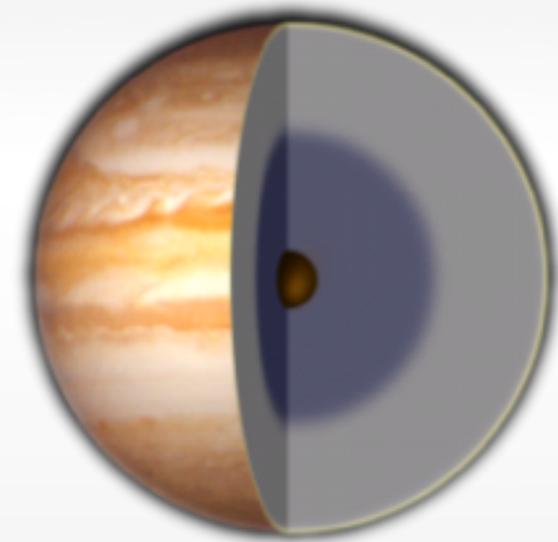
テキスト

「木星」 波による内部探査

木星表面の自由振動モード解析



Gaulme, Schmitter, Gay+ (2011, A&A)



深部の情報が直接取れる可能性あり

まとめ

- 従来型（3層対流、各層一様）熱進化モデルの理論に比べて
 - ▶ 土星は明るすぎる
 - ▶ 天王星は暗すぎる
- それらしいシナリオはあるが未解決
- 組成非一様な大気の熱輸送が重要
- 系外惑星の理解にも重要
- 形成論の問題として、原始大気の組成非一様の生成と緩和が重要