

地球惑星圏物理学

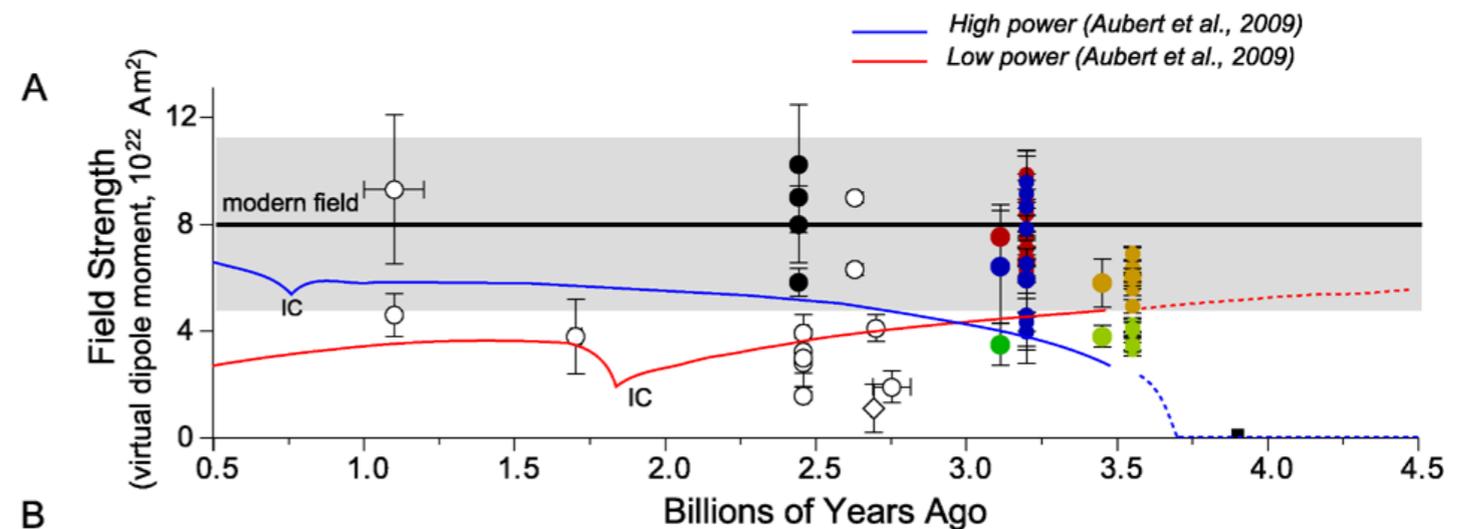
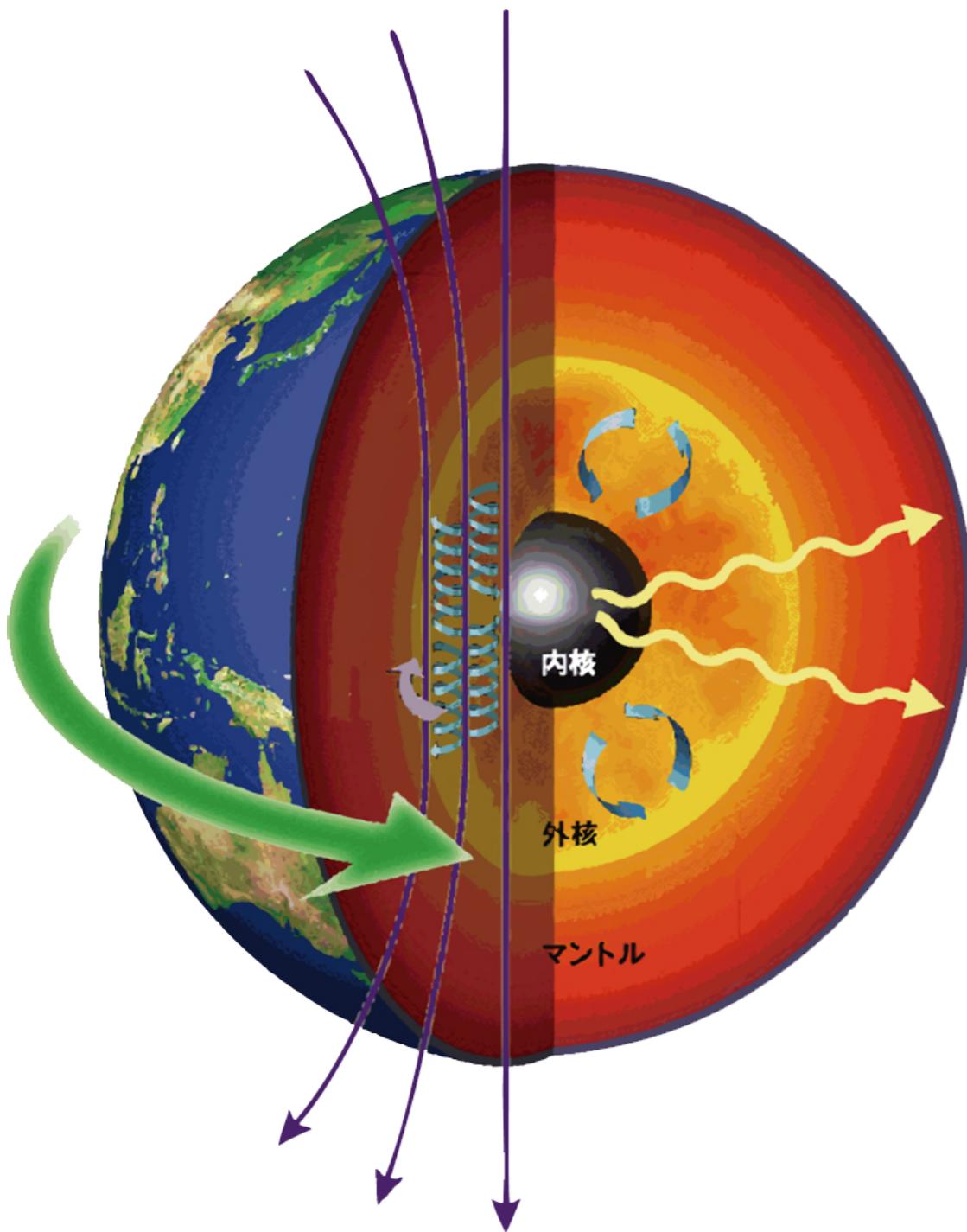
惑星の磁気圏



地磁気の生成(ダイナモ理論)

地球磁場の起源：外核(液体鉄)の対流運動

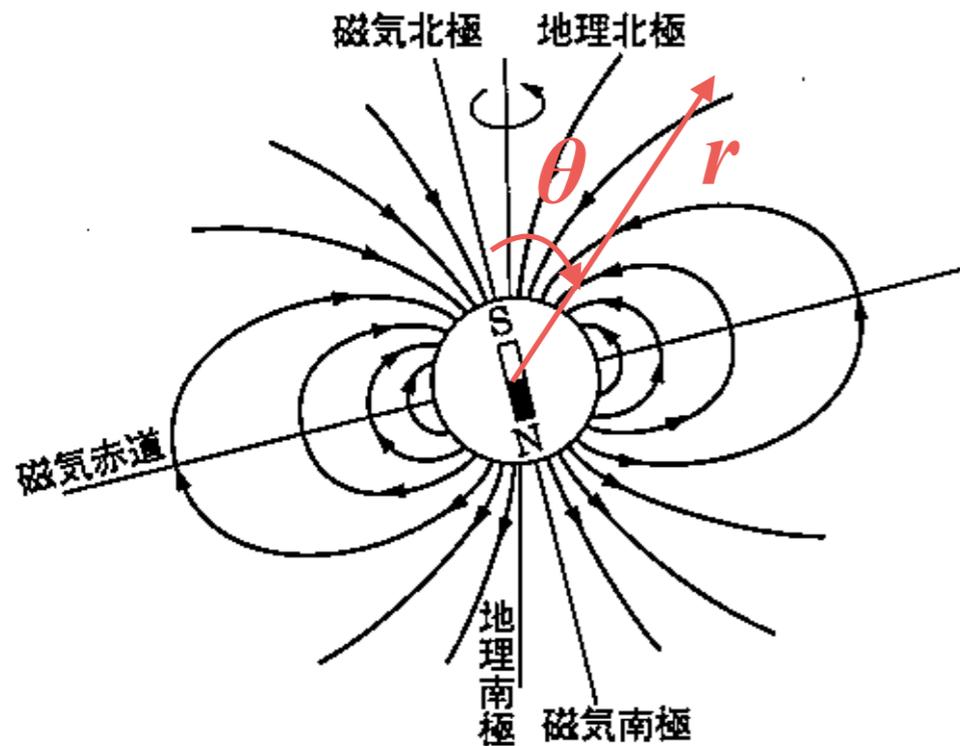
- 地球の冷却に伴い、外核が対流運動
- 電流が磁場を生成
- 地磁気は約40億年間維持されている
(開始時期・強度変化はあまりよくわかっていない)



Aubert et al. (2010) *Space Sci. Rev.*

地球磁気圏の構造

- 完全な真空中に置かれた場合：無限遠まで広がる双極子磁場



恩藤 & 丸橋 (2000)

オーム社『宇宙環境科学』1章

$$\text{磁場ポテンシャル} : \Phi_m \equiv \frac{\mathbf{M} \cdot \mathbf{r}}{r^3}$$

\mathbf{M} : 磁気双極子モーメント [$\text{A} \cdot \text{m}^2$]

$$\text{磁場強度} : \mathbf{B} = -\nabla \Phi_m$$

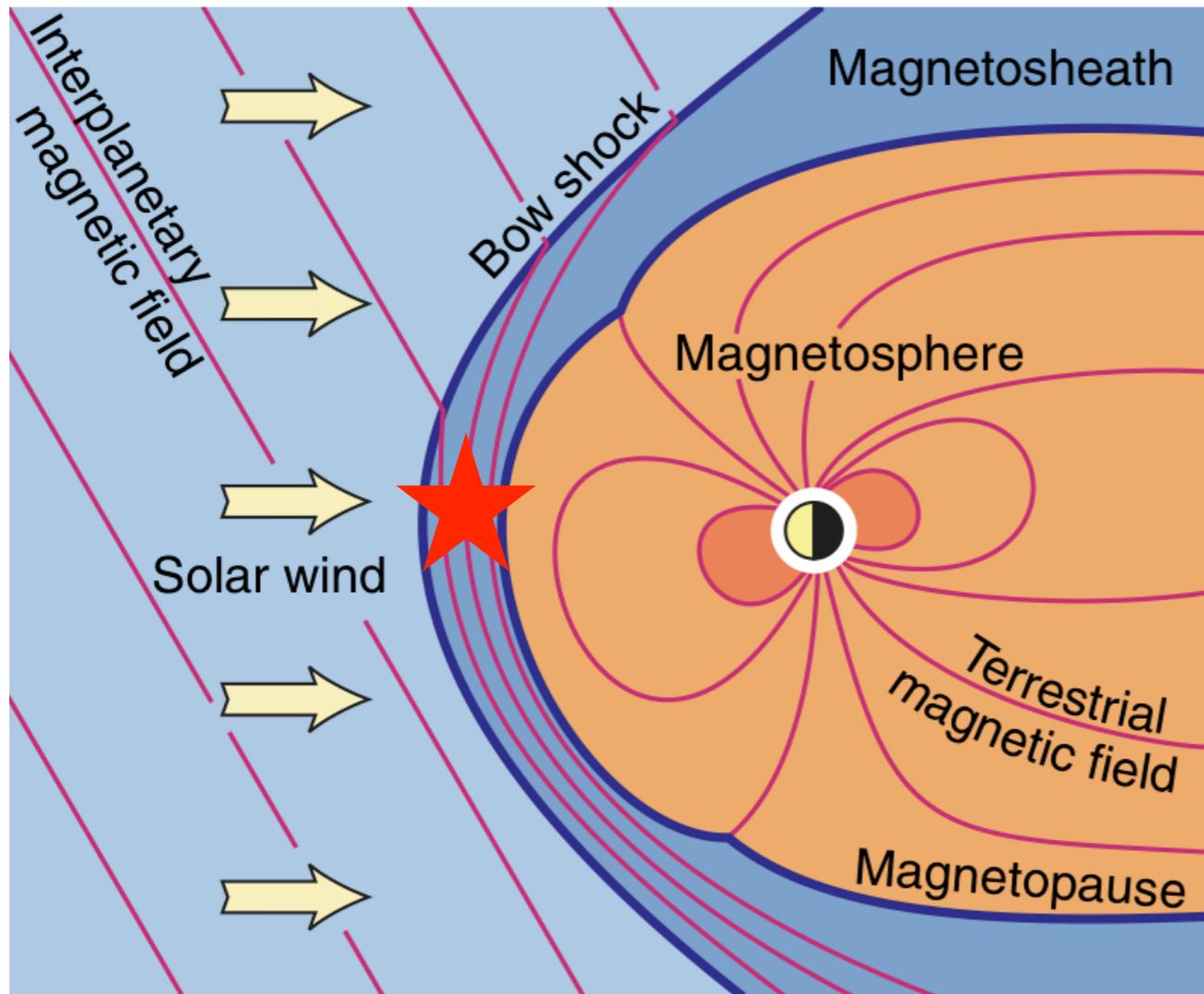
$$B_r = -B_0 \left(\frac{R_E}{r} \right)^3 2 \cos \theta, \quad B_\theta = -B_0 \left(\frac{R_E}{r} \right)^3 \sin \theta$$

$$B = (B_r^2 + B_\theta^2)^{\frac{1}{2}} = B_0 \left(\frac{R_E}{r} \right)^3 (1 + 3 \cos^2 \theta)^{\frac{1}{2}}$$

B_0 : 地表の赤道における磁場強度 3×10^{-5} [T]

⇒ 磁場強度は距離の3乗に反比例

地球磁気圏の構造



- 太陽風の効果によって地球磁気圏は下流側に伸びた構造を持つ
- **バウショック**：
超音速の太陽風による衝撃波面
- **磁気圏界面(Magnetopause)**：
太陽風と磁気圏の境界

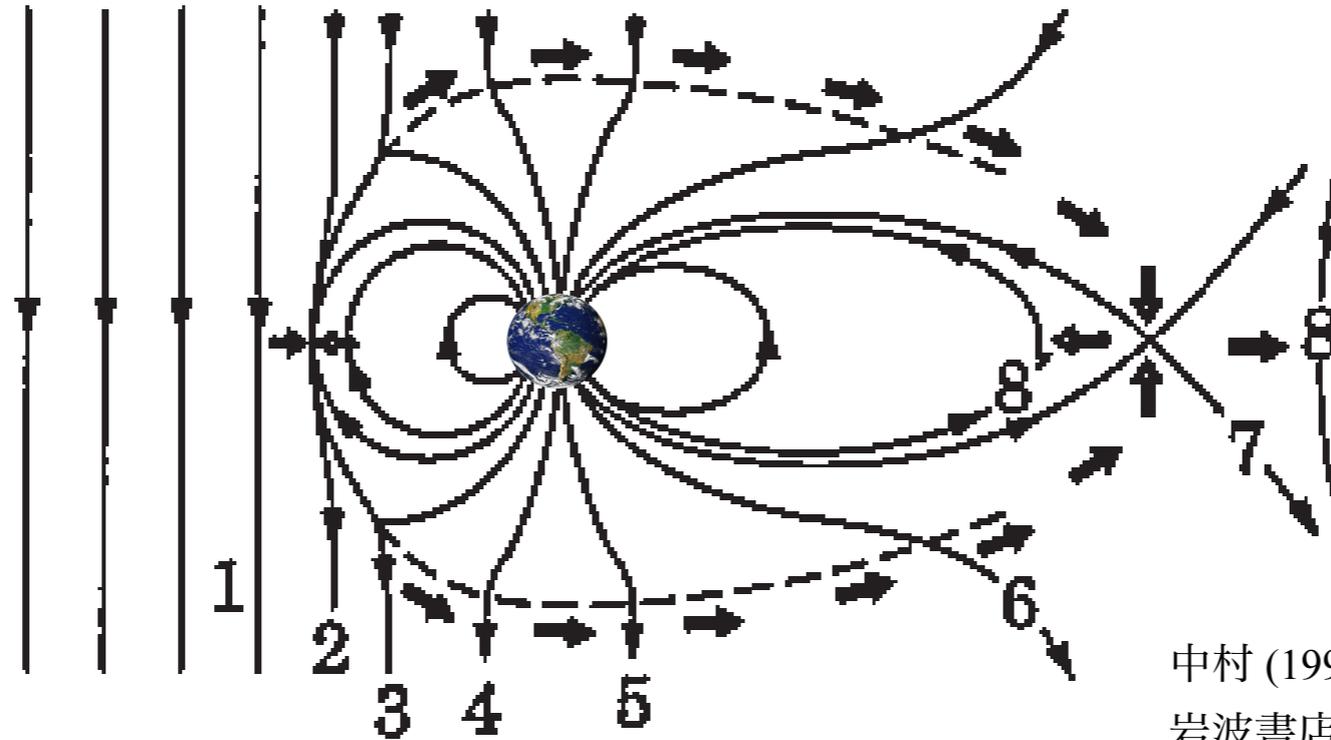
地球の磁気圧 $\frac{B^2}{2\mu_0} = \frac{1}{2}\rho v^2$ 太陽風動圧

⇒ 磁気圏界面の位置 R_m

$$\frac{R_m}{R_E} = \left(\frac{B_0^2}{\mu_0 m_H n_H v^2} \right)^{\frac{1}{6}}$$

$$R \simeq 8.3 \times R_E \quad (\text{実際は } R_m \sim 11 \times R_E)$$

磁気圏対流



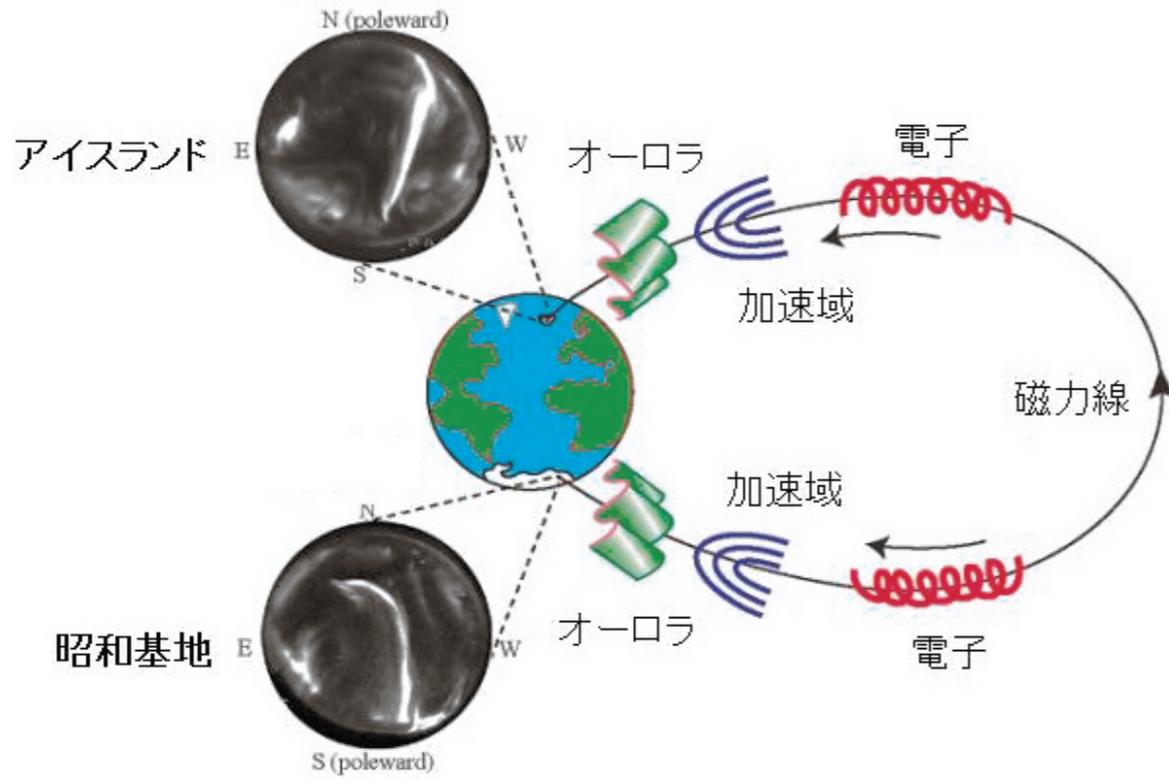
中村 (1997)

岩波書店『宇宙環境科学』4章

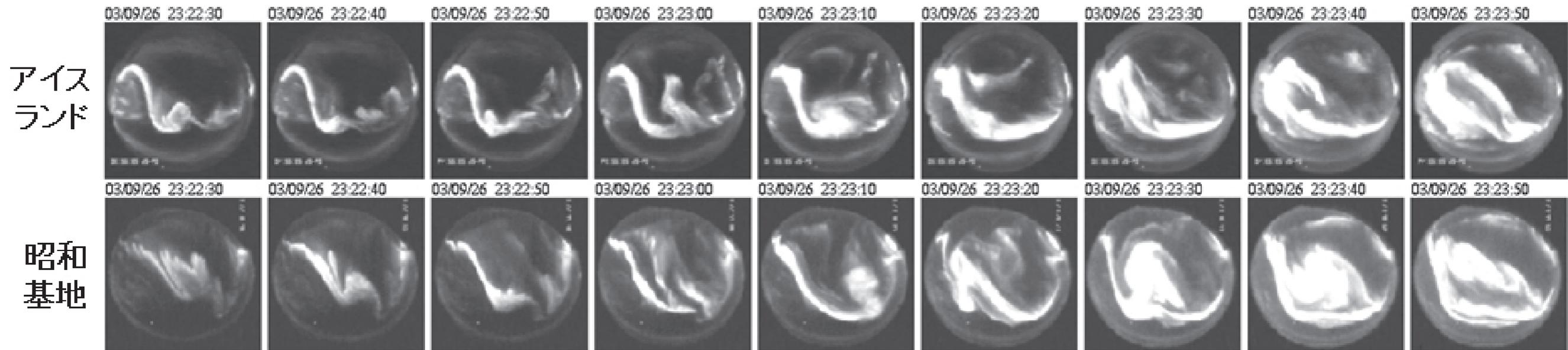
1. 南向き太陽風磁場が太陽風プラズマとともに流れてくる
2. IMFと磁気圏前面の磁場が再結合
- 3-6. 再結合した磁場が太陽風プラズマに流されていく
7. 磁気圏尾部で再結合
8. 再結合による磁気エネルギーの開放とプラズマ流 (サブストーム)



サブストームとオーロラ



- サブストームで磁気圏に流入したプラズマは磁力線に沿って移動し、両極に到達
- 大気粒子との衝突によって大気粒子が励起され、発光 = オーロラ (オーロラブレークアップ)
- オーロラは南北で同時に発生



国立極地研究所ホームページより

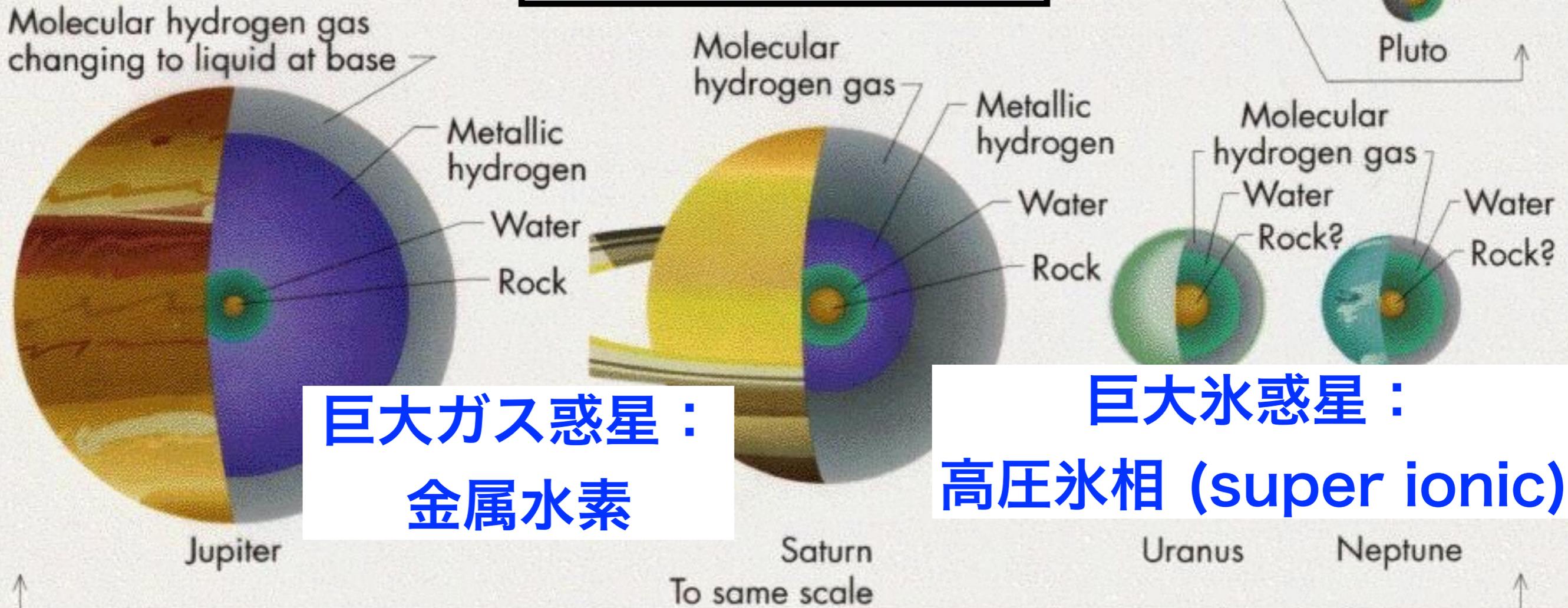
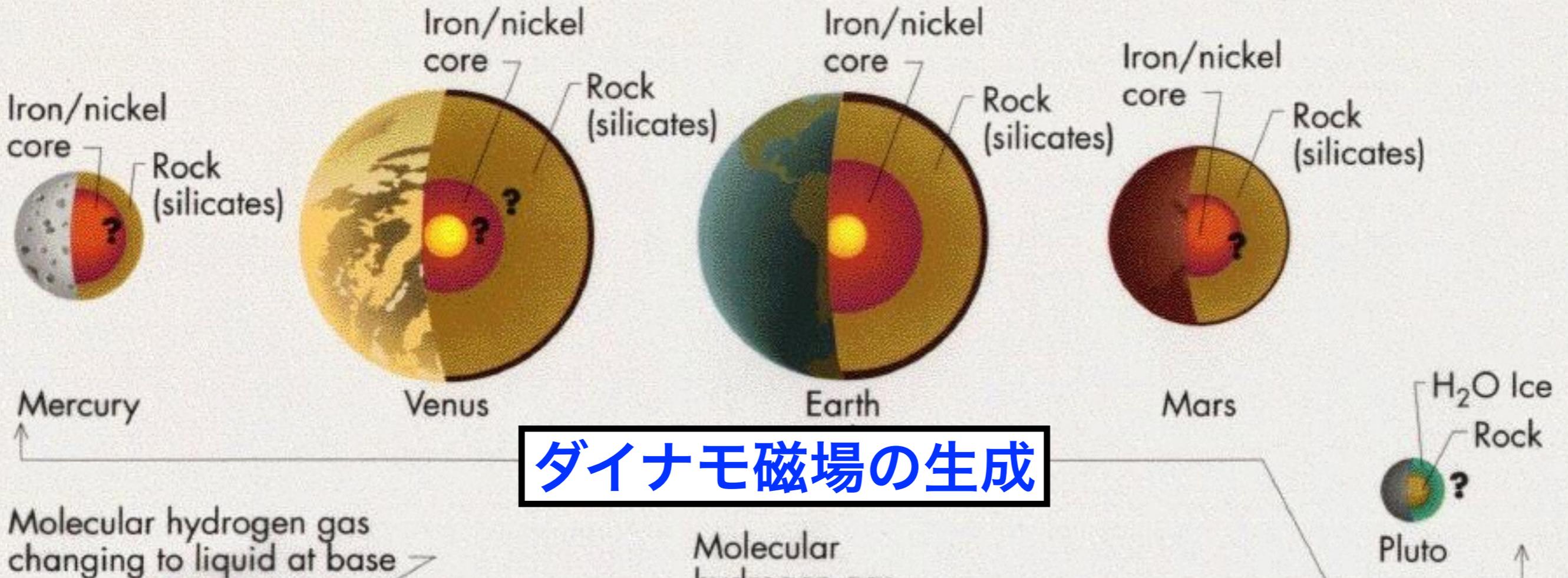
惑星磁気圏の概観

Table 24.2 Magnetic fields of planets. Data from Ness (1994) with a later revision for Mars

Planet	Dipole moment (Am ²)	Dynamo?	Surface field (nT)
Mercury	5×10^{19}	Probably	475
Venus	$<4 \times 10^{18}$	No	<2.5
Earth	8×10^{22}	Yes	41 455
Moon	$<1 \times 10^{16}$	No	<0.26
Mars	$\sim 1 \times 10^{18}$	No	3.5
Jupiter	1.6×10^{27}	Yes	650 000
Saturn	4.7×10^{25}	Yes	32 850
Uranus	3.8×10^{24}	Yes	32 170
Neptune	2.0×10^{24}	Yes	18 560

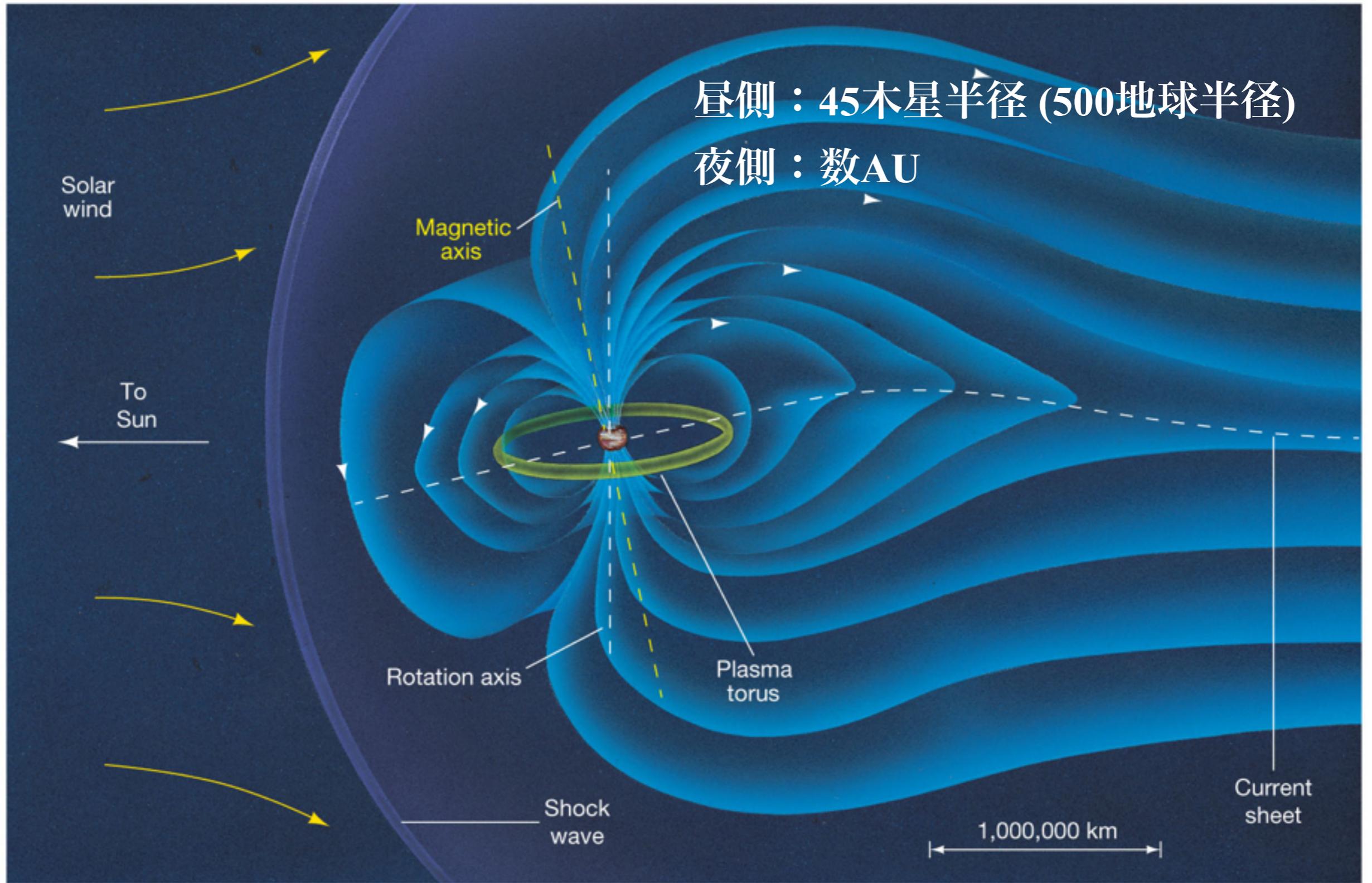
Stacy & Davis (2008)
Physics of the Earth 4th Edition,
Cambridge Press

地球型惑星：金属鉄



木星磁氣圈

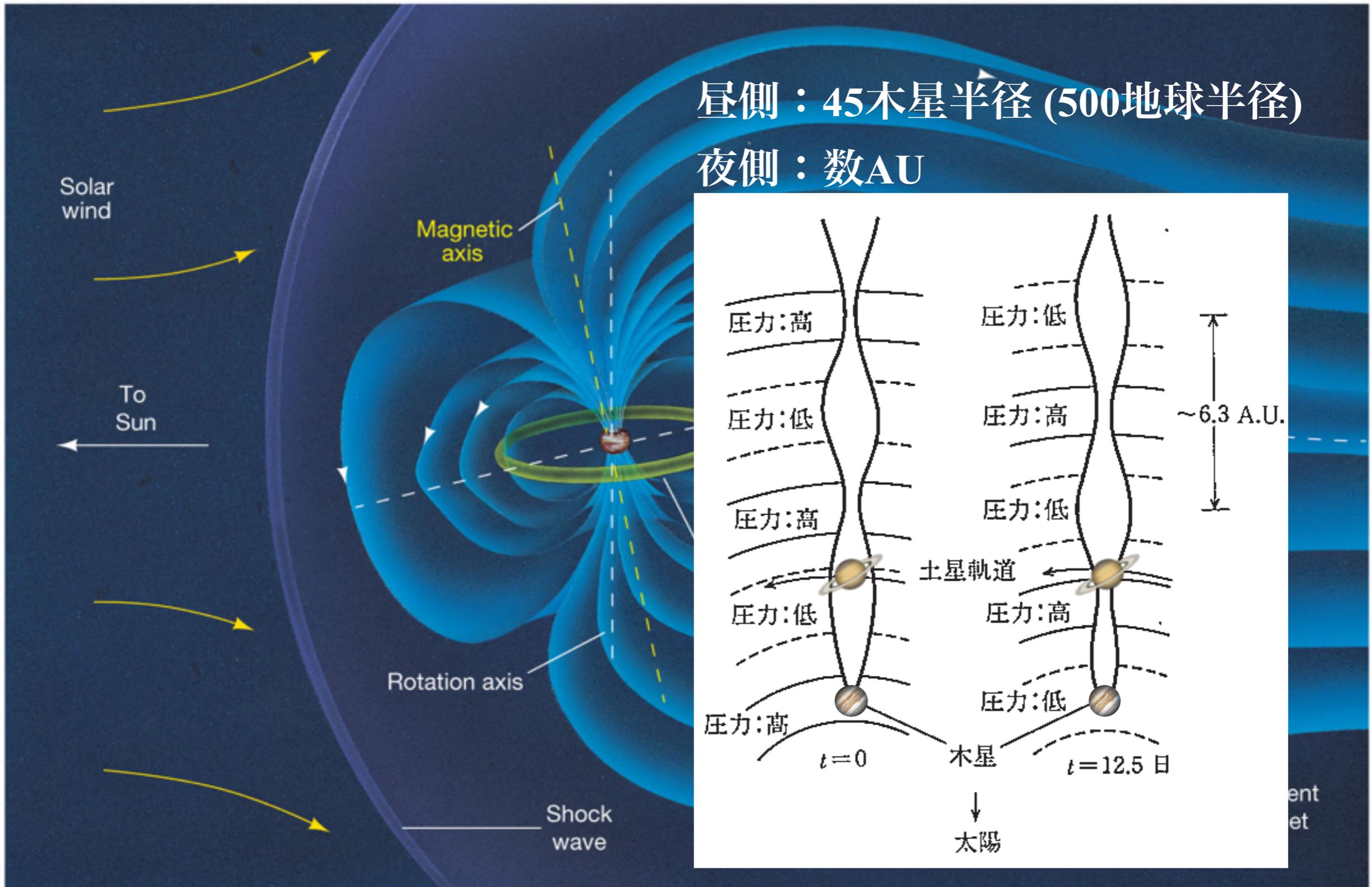
昼側：45木星半徑 (500地球半徑)
夜側：數AU



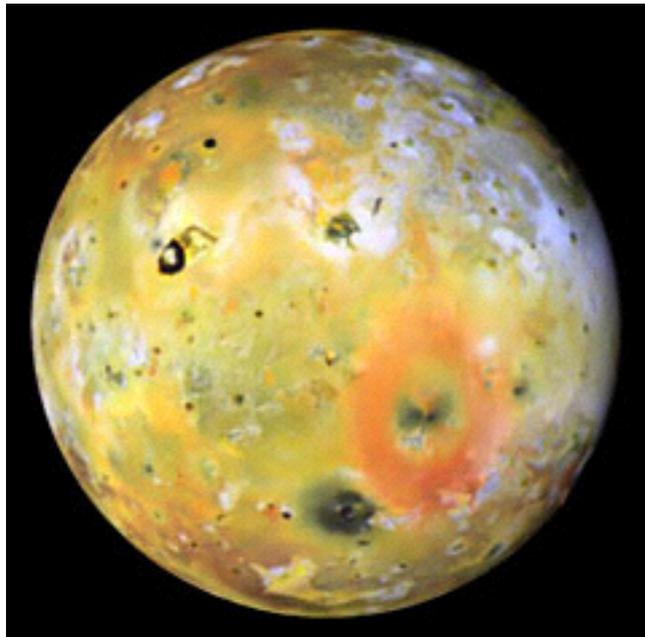
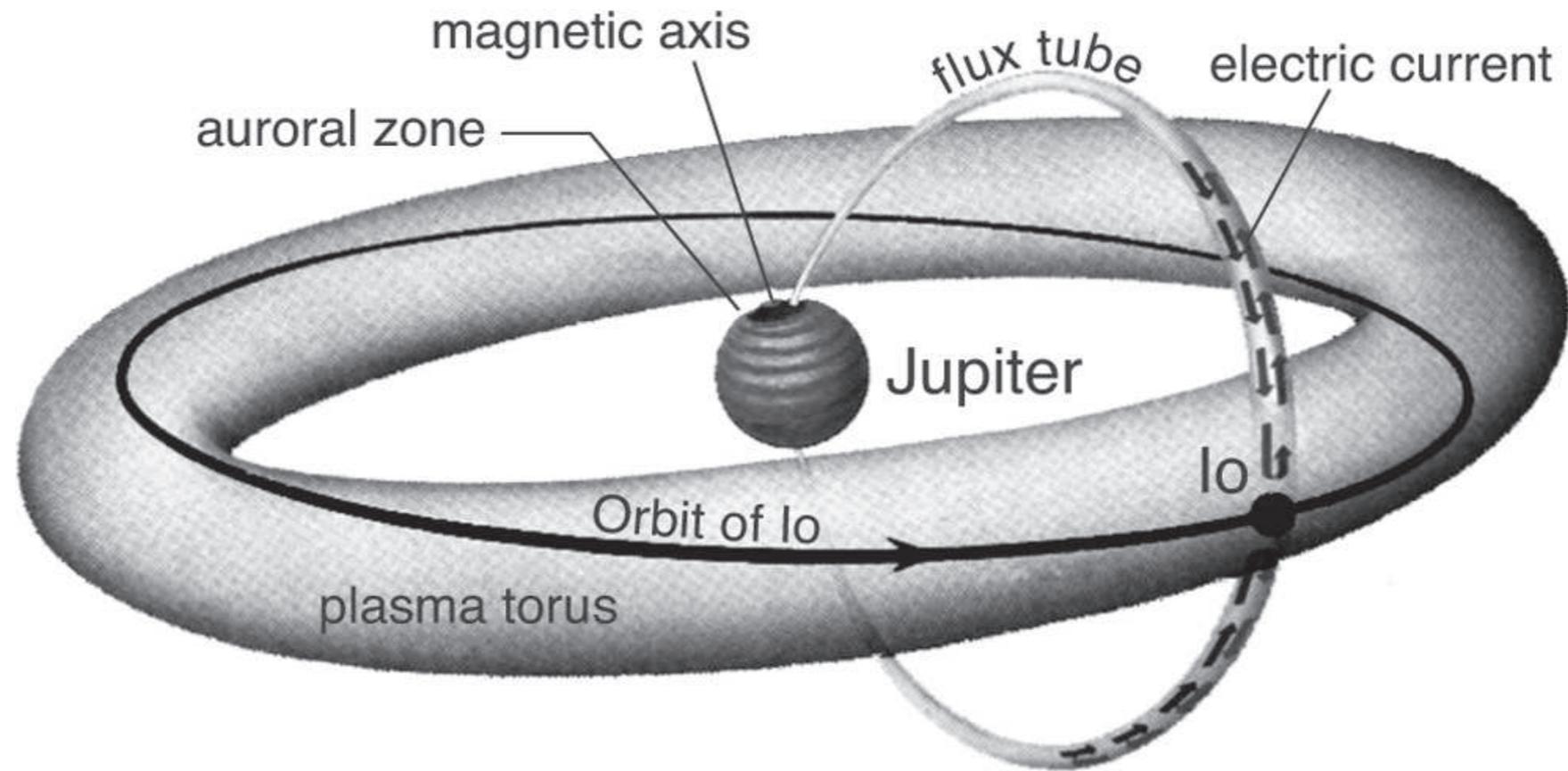
巨大惑星：木星磁気圏

昼側：45木星半径 (500地球半径)

夜側：数AU



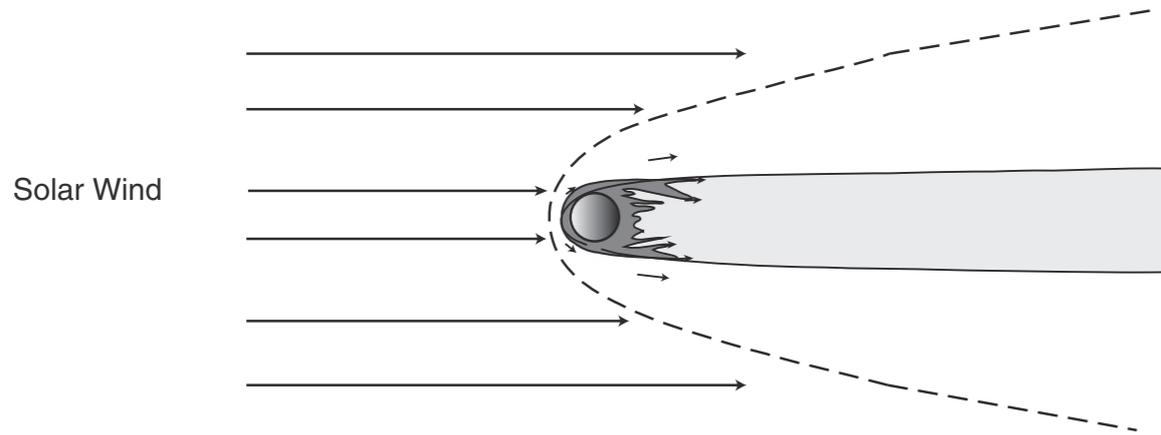
木星磁気圏の特徴



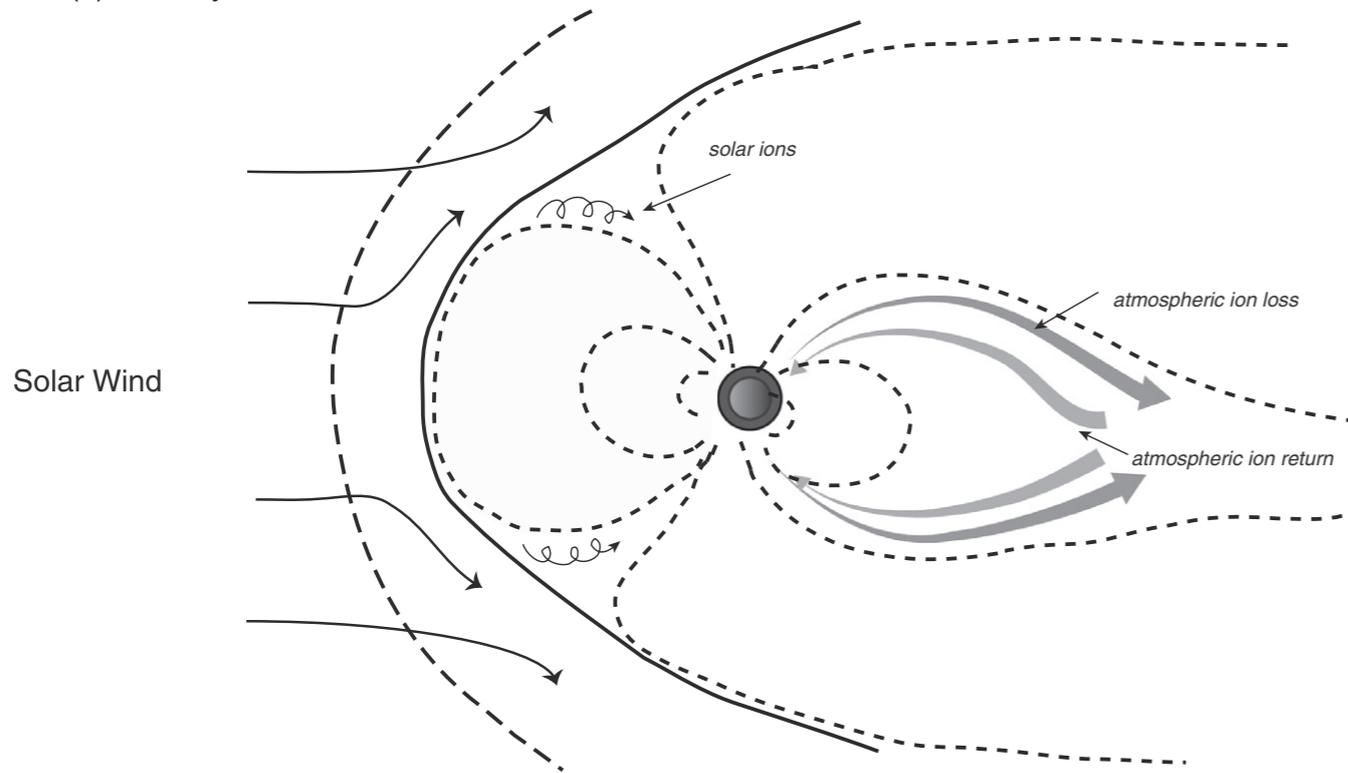
- 地球磁気圏と異なり、プラズマに満ちている
- プラズマ供給源は衛星イオの火山活動
- S^+ や O^+ , Na^+ など、太陽風プラズマと成分が異なる

磁場を持たない惑星：金星

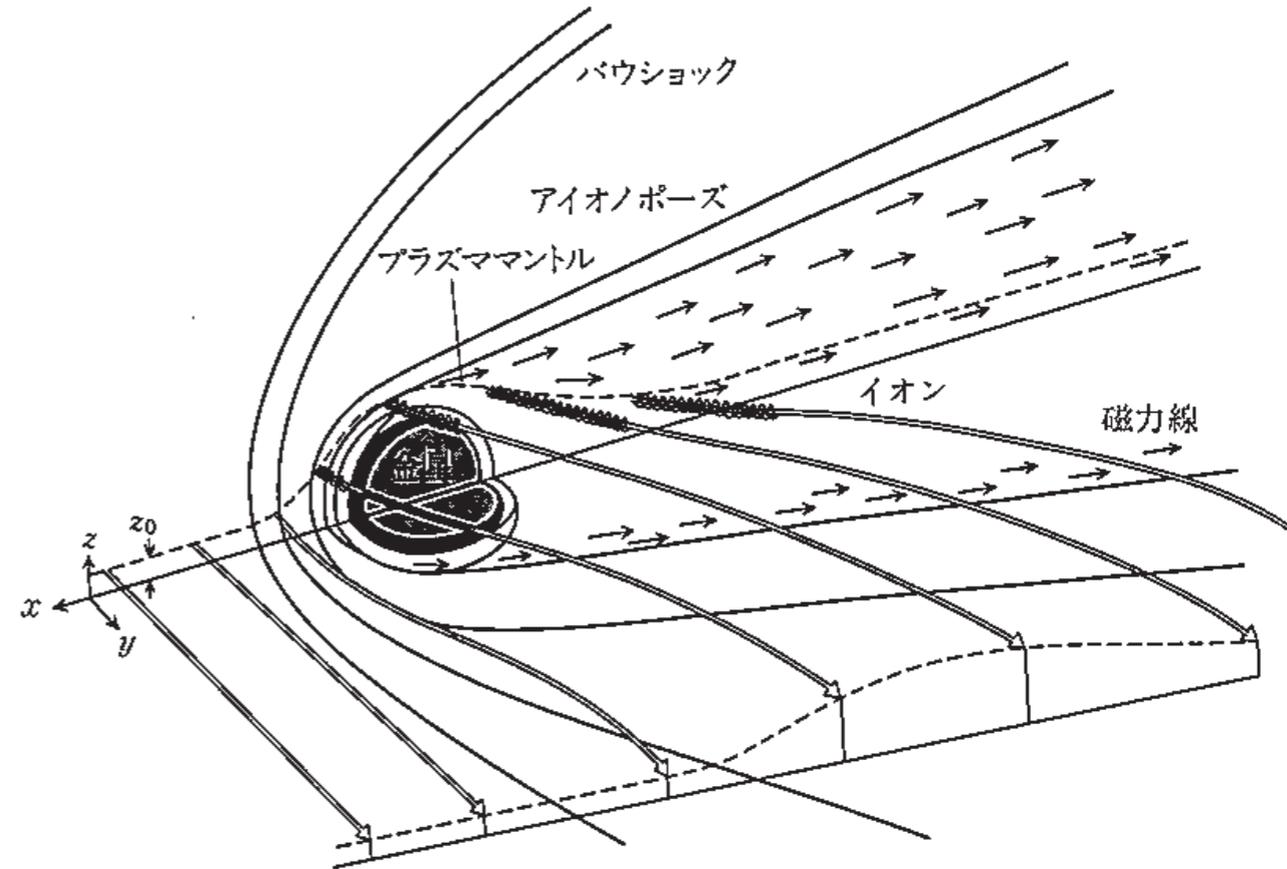
(a) No Core Dynamo



(b) Core Dynamo



電離圏プラズマ圧 (or 誘導磁気圧)
 ~ 太陽風動圧



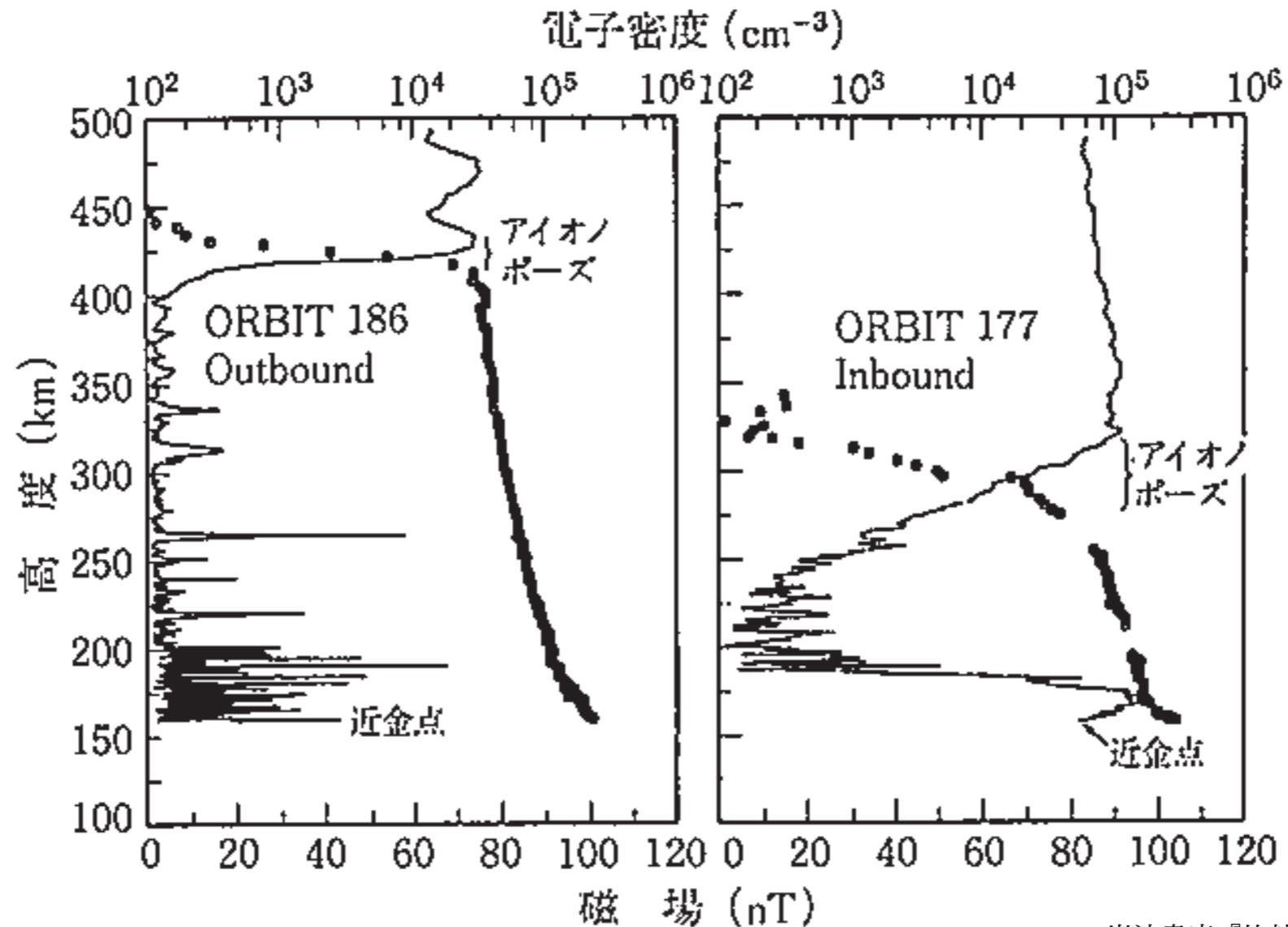
中村 (1997)

岩波書店『宇宙環境科学』4章

Tardano et al. (2014)
 Phys. Earth Planet. Intr.

太陽風-電離圏界面：アイオノポーズ

金星電離層の磁場強度と電子密度 (左) 太陽風動圧低 (右) 太陽風動圧大



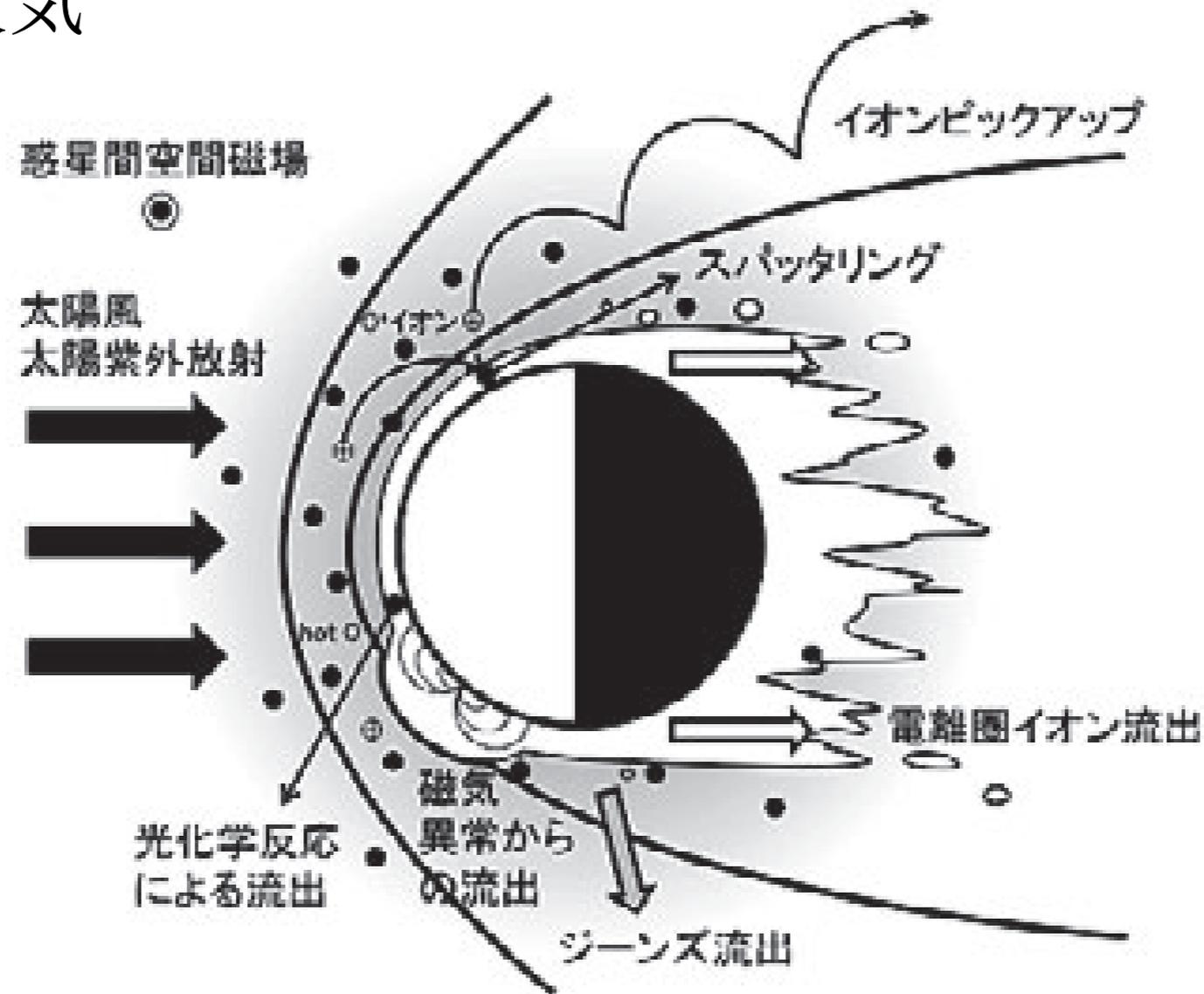
岩波書店『比較惑星学』より転載

電離圏プラズマ圧 (or 誘導磁気圧) ~ 太陽風動圧

⇒ アイオノポーズ(ionopause)は高度300-400 km

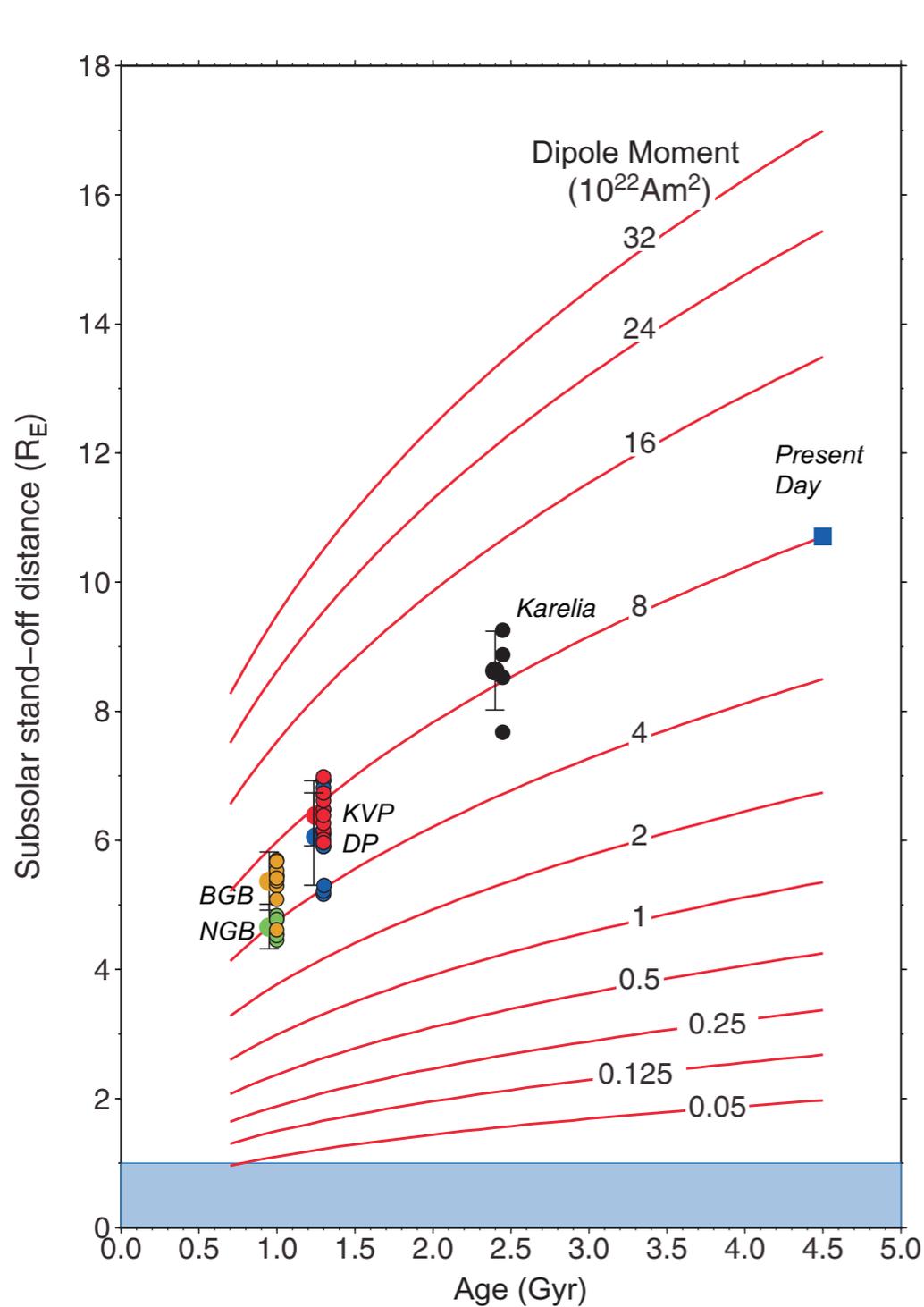
非熱的散逸

- * 光化学反応, 太陽風との相互作用
- * 熱的散逸では殆ど失われない重い元素の散逸
- * 火星大気

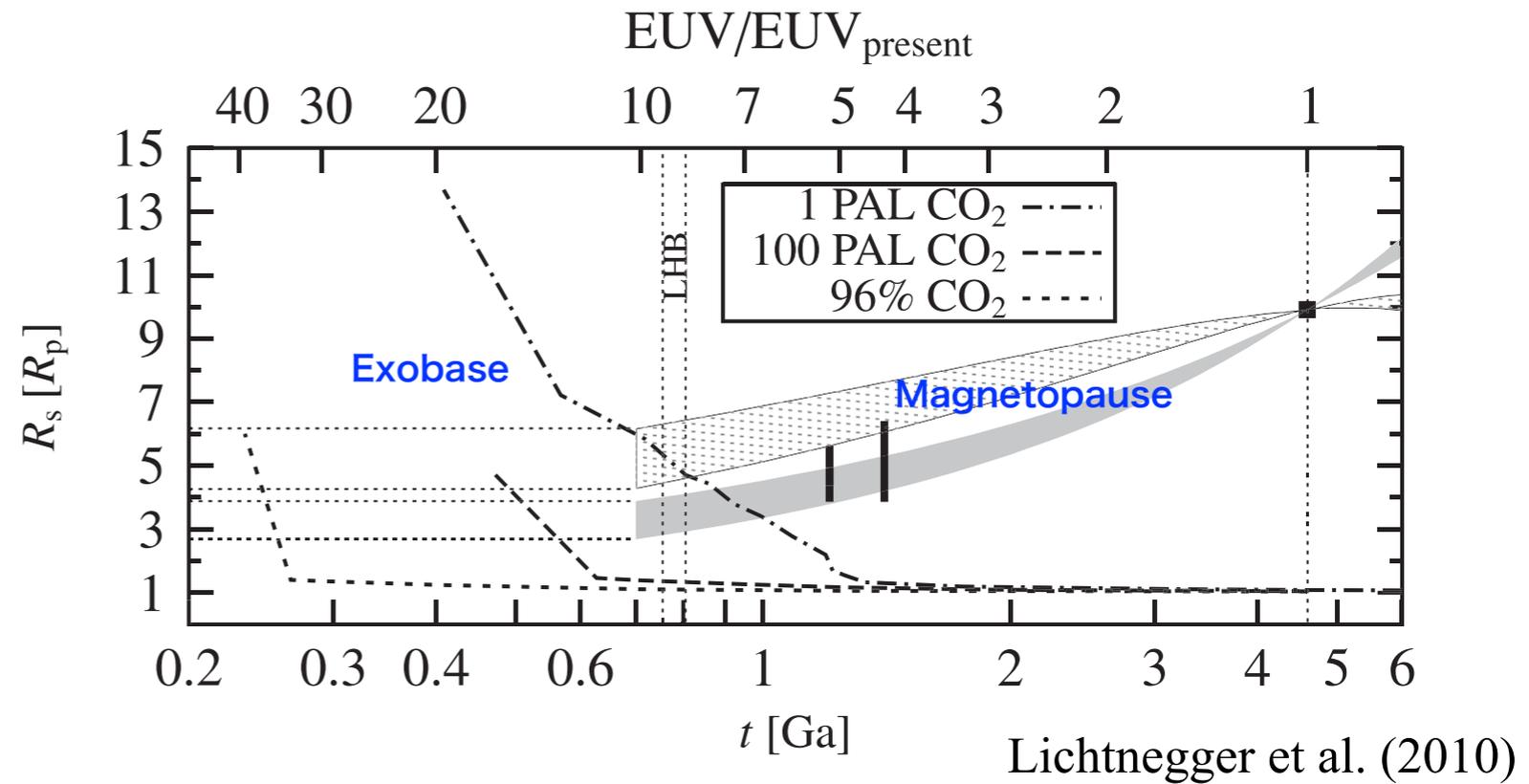


非磁化惑星における大気散逸の模式図。Terada (2014), J. Plasma Fusion Res.

惑星磁気圏の進化



Tardano et al. (2014)



- 現在の磁気圏界面は外気圏界面よりはるかに上空にある
- ただし、過去の地球においては大気と太陽風が直接相互作用した可能性もある
- 火星にはかつてダイナモ磁場・磁気圏が存在したことが岩石残留磁化記録に残っている

まとめ

地球磁気圏

- 液体鉄の外核の対流運動によって生成
- 双極子磁場で近似できる
- 磁気圏界面 = 地球半径の約11倍 (太陽側)

太陽系惑星の磁場

- 地球型惑星のうち、地球と水星が磁場を持つ
- 巨大ガス惑星・巨大氷惑星はすべて磁場を持つ
- 磁場の起源は惑星の構成物質によって異なる
- 磁場のない惑星では、太陽風が大気と相互作用する