



惑星・衛星の磁場について

京都大学数理解析研究所

竹広 真一



平成24年8月23日
衛星系形成小研究会
@ マリンヒルホテル小樽

目次

- 概論
- 固体惑星
- 巨大ガス・氷惑星
- 木星系：ガリレオ衛星
- 土星系衛星

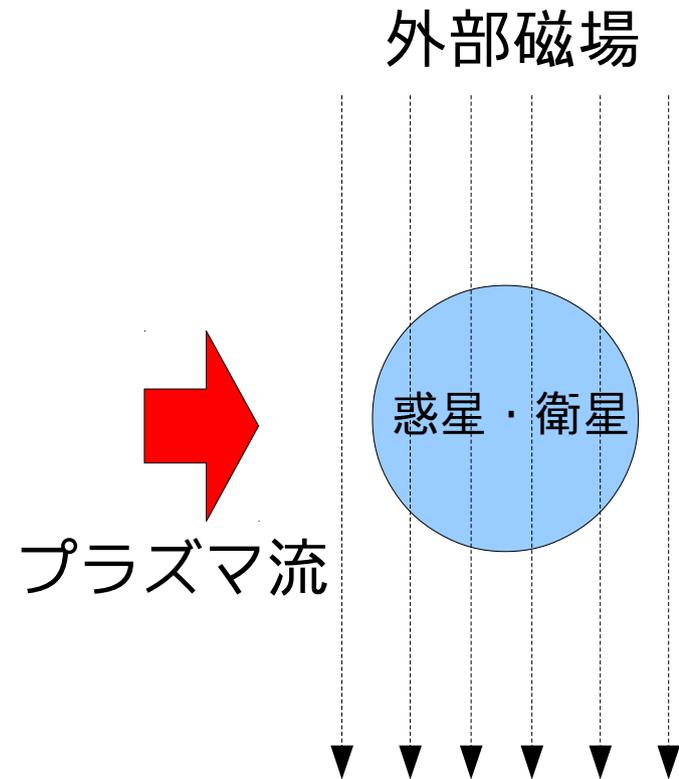
概論

なぜ磁場をみたい？

- 磁場自体への興味
 - 外部：惑星と磁場・プラズマ流の相互作用？
 - 内部：生成維持機構？
- 内部構造への示唆が得られる
 - 流体核？対流運動とダイナモ作用？内部海？

磁場, プラズマ流, 惑星・衛星の状況

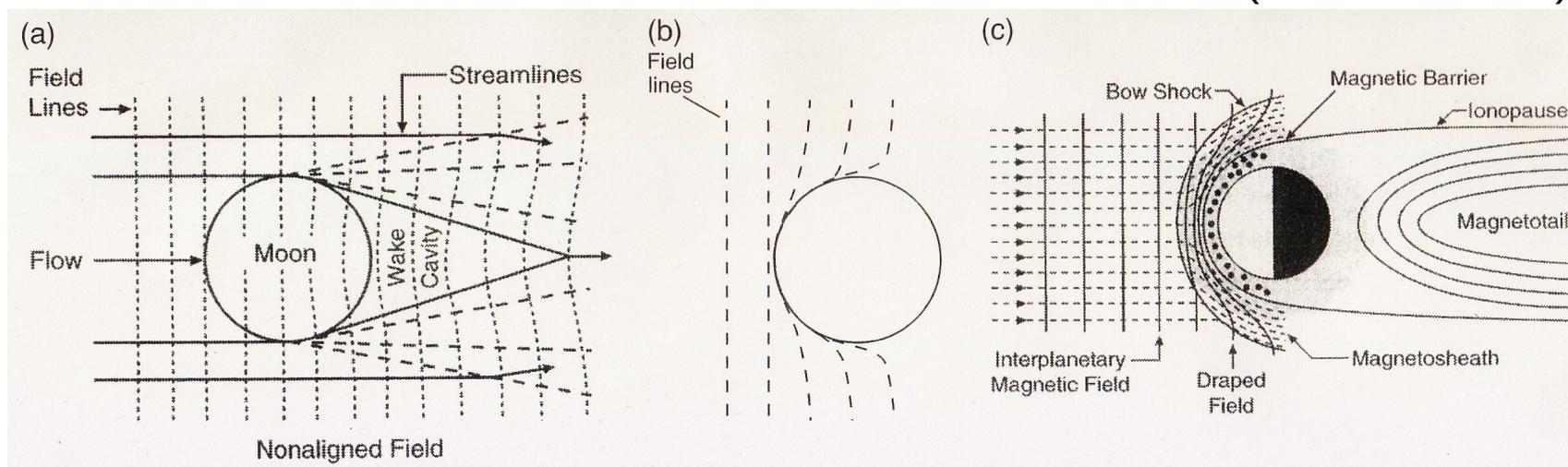
- 共通点
 - 外部磁場が極方向
 - プラズマ流が赤道面方向
- 相異点
 - プラズマ流の向き
 - 惑星：太陽方向から
 - 衛星：軌道に沿った方向から
 - プラズマ流の速度
 - 惑星：超音速
 - 衛星：亜音速



惑星・衛星とプラズマ流の相互作用

- 固有磁場を持たない場合

(Luhmann 1995)



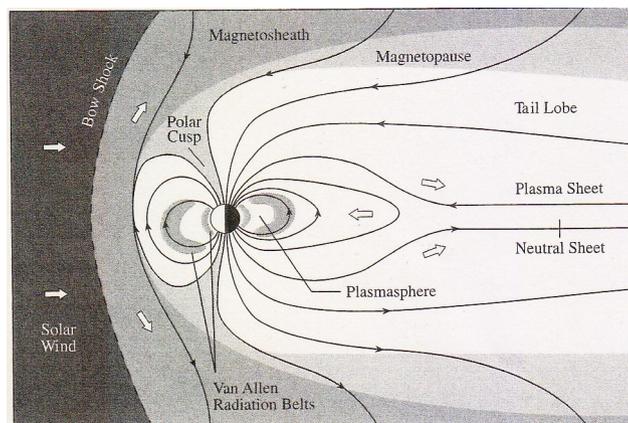
電気不導体

電気伝導体

大気を持つ場合：
誘導磁気圏の形成

- 固有磁場を持つ場合

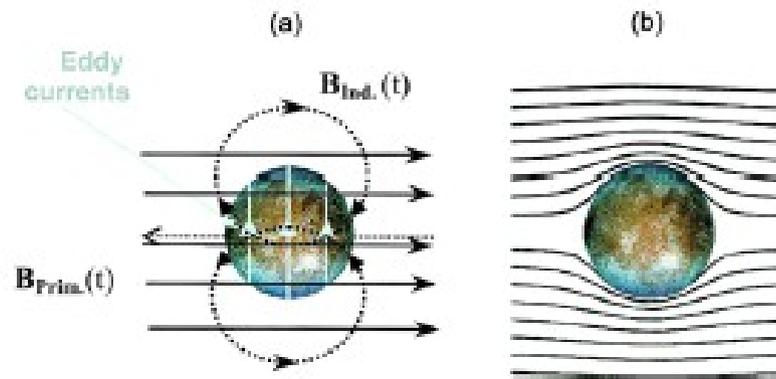
- 磁気圏の形成



(Lang 2011)

時間変化する外部磁場：誘導応答

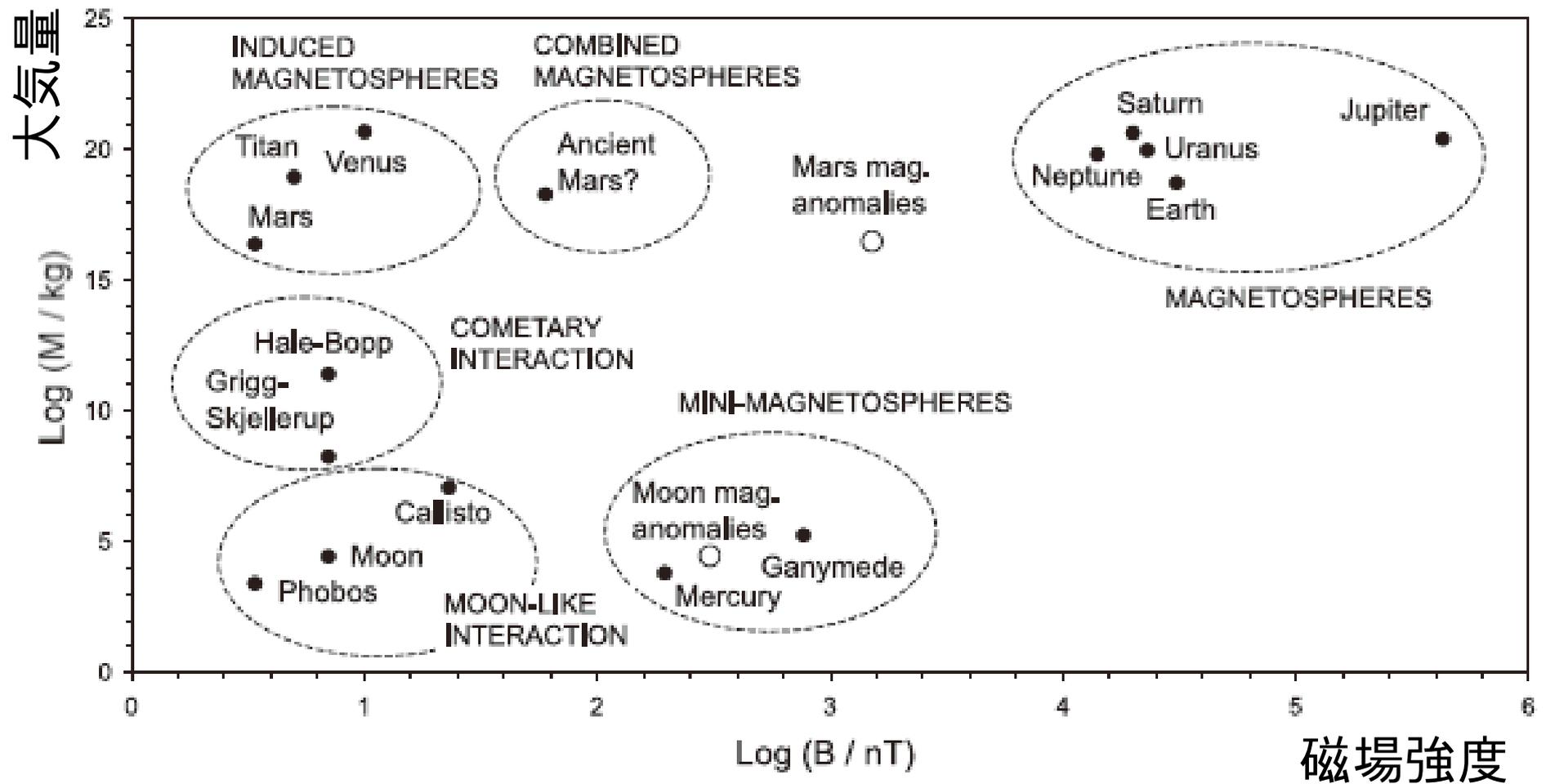
- 内部の電気伝導体の存在の検出



(Khurana et al. 2002)

- (a) 外部磁場 → 導体内部に渦電流が励起 → 誘導磁場
- (b) 結果として生じる全磁場. 導体内部に磁力線が入らない

惑星・衛星磁気圏の分類



(Barabash, 2012)

磁場（応答）の分類

	磁場強度(nT)	特徴
水星	2×10^{-7}	固有磁場
金星	$< 10^{-8}$	プラズマ相互作用
地球	5×10^{-5}	固有磁場
月	$10^{-9} - 10^{-7}$	残留磁化
火星	$10^{-9} - 10^{-4}$	残留磁化
木星	4.2×10^{-4}	固有磁場
土星	2×10^{-5}	固有磁場
天王星	2×10^{-5}	固有磁場
海王星	2×10^{-5}	固有磁場

	磁場強度(nT)	特徴
イオ	$< 10^{-6}?$	プラズマ相互作用
エウロパ	10^{-7}	誘導磁場
ガニメデ	2×10^{-6}	固有磁場
カリスト	4×10^{-9}	誘導磁場
タイタン	$< 10^{-7}$	プラズマ相互作用
エンケラドス	?	プラズマ相互作用
テテュス	?	不活性
レア	?	不活性
ディオネ	?	?
イアペトス	?	?

(Stevenson 2010; Jia et al. 2010)

ダイナモに必要な条件

- エルサッサー数：ローレンツ力 / コリオリ力
 - 普通のダイナモ解では $O(1)$

$$\Lambda = \frac{B^2}{\rho\mu\eta\Omega} \sim O(1)$$

- 磁気レイノルズ数：誘導項 / 磁気拡散項

$$Rm = \frac{UL}{\eta} \geq O(10^2)$$

- ダイナモ作用が働くには $O(100)$ 以上が必要

ダイナモに関するパラメター

Dynamo	Ω (s^{-1})	R_D (R_P)	R_{DI} (R_P)	ρ (kg/m^3)	ν (m^2/s)	κ (m^2/s)	η (m^2/s)	$ B_r(r = R_D) $ (μT)
Mercury	1.2×10^{-6}	0.75	0.5 ?	8000	10^{-6}	10^{-5}	1	0.6
Earth	7.3×10^{-5}	0.55	0.19	11,000	10^{-6}	10^{-5}	1	270
Jupiter	1.8×10^{-4}	0.95	0.2 ?	2000	10^{-7}	10^{-6}	1	625
Ganymede	1.0×10^{-5}	0.3	0 ?	6000	10^{-6}	10^{-5}	1	32
Saturn	1.6×10^{-4}	0.5	0.25 ?	2000	10^{-7}	10^{-6}	1	45
Uranus	1.0×10^{-4}	0.8	0.6 ?	2000	10^{-6}	10^{-7}	10^2	75
Neptune	1.1×10^{-4}	0.8	0.3 ?	2000	10^{-6}	10^{-7}	10^2	73

Parameter	Definition	Physical interpretation
Ekman Number	$E = \nu/\Omega D^2$	Viscous/Coriolis forces
Rayleigh Number	$Ra = \alpha g_o \Delta T D^3/\nu\kappa$	Buoyancy/Diffusion
Prandtl Number	$Pr = \nu/\kappa$	Viscous/Thermal diffusivities
Magnetic Prandtl Number	$Pm = \nu/\eta$	Viscous/Magnetic diffusivities
Rosby Number	$Ro = U/\Omega D$	Inertial/Coriolis forces
Reynolds Number	$Re = U D/\nu$	Inertial/Viscous forces
Magnetic Reynolds Number	$Rm = U D/\eta$	Magnetic induction/Magnetic diffusion
Elsasser Number	$\Lambda = B^2/\rho\mu_o\eta\Omega$	Lorentz/Coriolis forces
	R_D/R_P	Dynamo region depth
	R_{DI}/R_D	Dynamo region geometry

(Schubert and Soderlund 2011)

ダイナモに関するパラメーター

Dynamo	E	Pr	Pm	Rm	Ro	Re	Λ	R_{DI}/R_D	R_D/R_P
Mercury	10^{-12}	0.1	10^{-6}	10^2	10^{-4}	10^8	10^{-5}	0.6	0.75
Earth	10^{-15}	0.1	10^{-6}	10^2	10^{-7}	10^8	0.1	0.35	0.55
Jupiter	10^{-19}	0.1	10^{-7}	10^2	10^{-10}	10^9	1	0.2	0.95
Ganymede	10^{-13}	0.1	10^{-6}	10^2	10^{-5}	10^8	10^{-3}	0	0.2
Saturn	10^{-18}	0.1	10^{-7}	10^2	10^{-9}	10^9	0.01	0.5	0.5
Uranus	10^{-16}	10	10^{-8}	10^2	10^{-6}	10^{10}	10^{-4}	0.6	0.8
Neptune	10^{-16}	10	10^{-8}	10^2	10^{-6}	10^{10}	10^{-4}	0.4	0.8

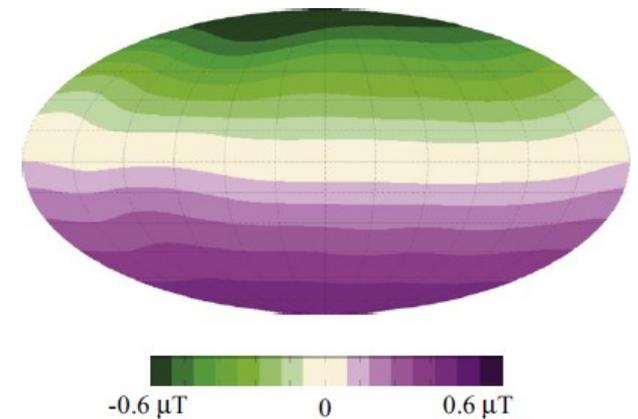
(Schubert and Soderlund 2011)

- エルサッサー数
 - 水星（巨大氷惑星、ガニメデ）小さい→弱い磁場
- エクマン数・ロスビー数小さい
→回転の効果重要

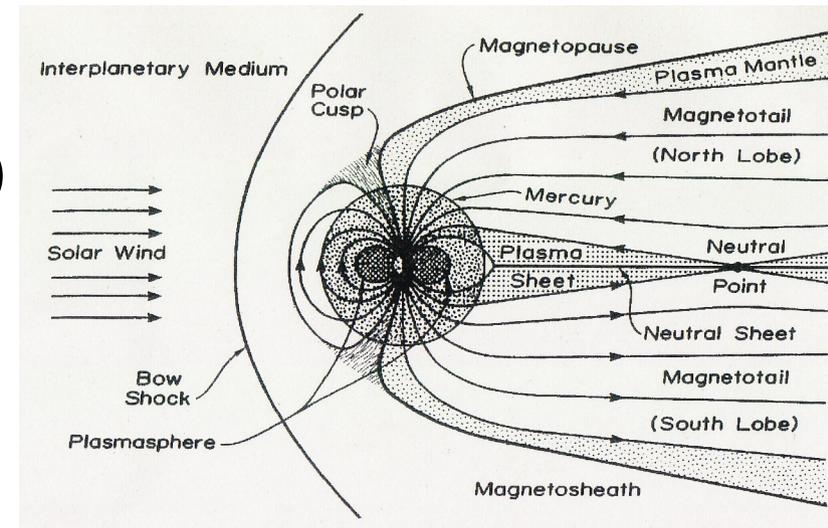
固体惑星

水星

- 弱いながらも固有磁場存在
 - 表面磁場強度 $0.3\mu\text{T}$
→地球の100倍弱い
(CMB では500倍弱い)
 - エルサッサー数 $O(10^{-5})$
⇔普通のダイナモ $O(1)$
(ローレンツ力~コリオリ力)
- 小さい磁気圏を形成



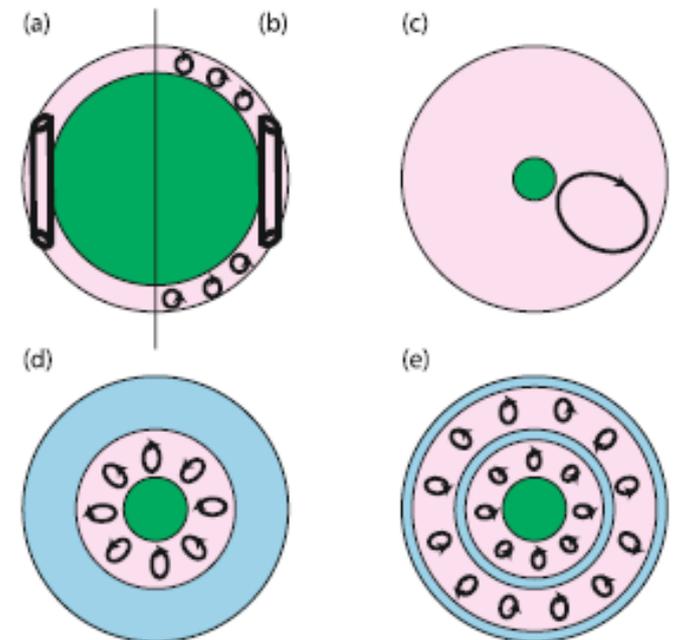
(Schubert and Soderlund 2011)



(Russell et al. 1988)

水星：ダイナモモデル

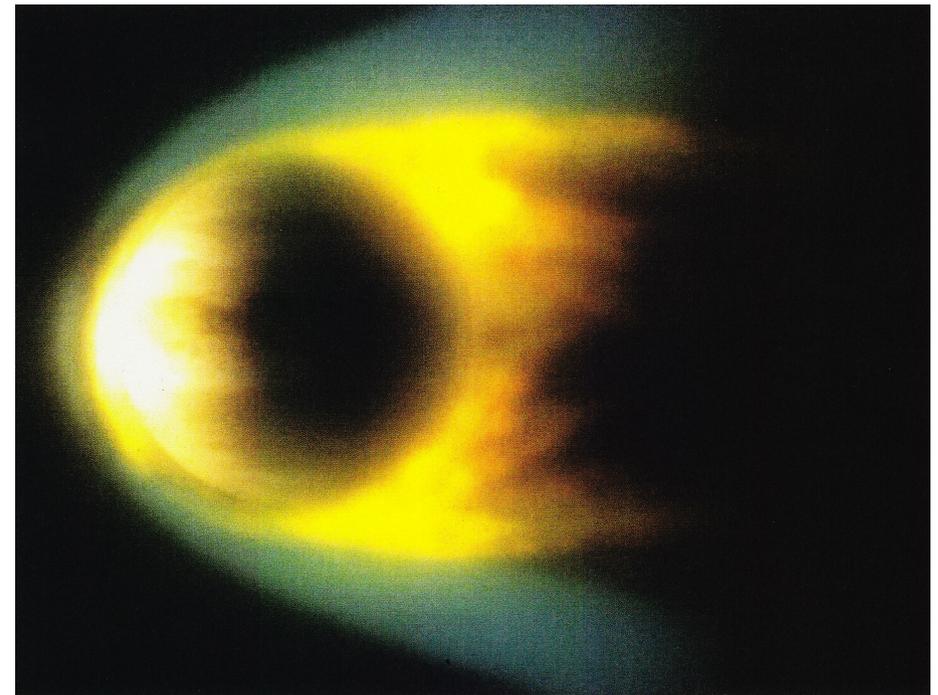
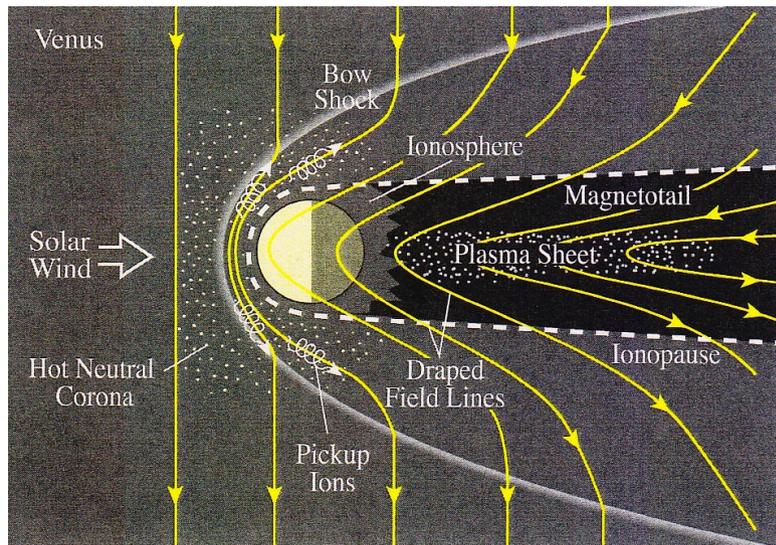
- ダイナモモデル→弱い固有磁場の説明
 - 薄い球殻のダイナモ (Stanley et al. 2005; Takahashi Matsushima 2006)
→ 高波数成分大だが観測されない→相対的に低次成分小さい
 - 厚い球殻内の 1 プルームダイナモ (Heimpel et al. 2005)
→ 弱い対流→弱い磁場
 - 上部に安定成層の存在
→ 安定層が高次成分のフィルター
(Christensen 2006; Stanley Mohammadi 2008)
 - 上端・中層での鉄の凍結による 2重ダイナモ (Vilim et al. 2008)
→ 内外ダイナモ領域で
逆向き磁場が打ち消しあう



(Stanley and Glatzmaier 2010)

金星

- 固有磁場は検出されていない
- 厚い大気とのプラズマ相互作用
→ 誘導磁気圏の形成



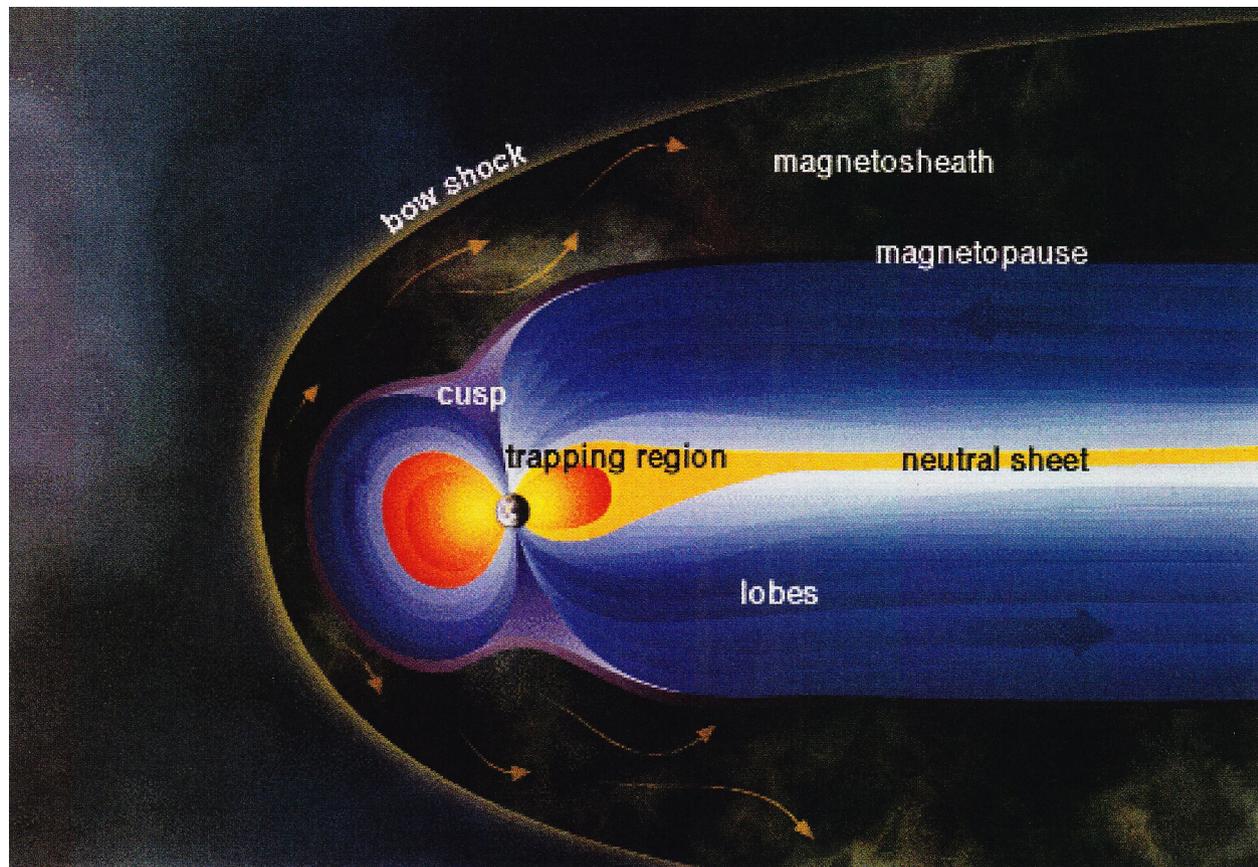
(Lang 2011)

金星：内部磁場の欠如

- 固有磁場が存在しないのは？
 - 内核が形成されていない→組成対流の欠如
熱対流だけではダイナモが維持できない
(Stevenson 1983)
 - プレートテクトニクスがない→核の冷却が不十分
(Nimmo Stevenson 2000)
- 残留磁化が存在しないのは？
 - 高い表面温度→地殻の磁化が生じにくい
 - 昔はダイナモしてたかも
←マントルオーバーターンが急速に核を冷却
(Stegman et al. 2003)

地球

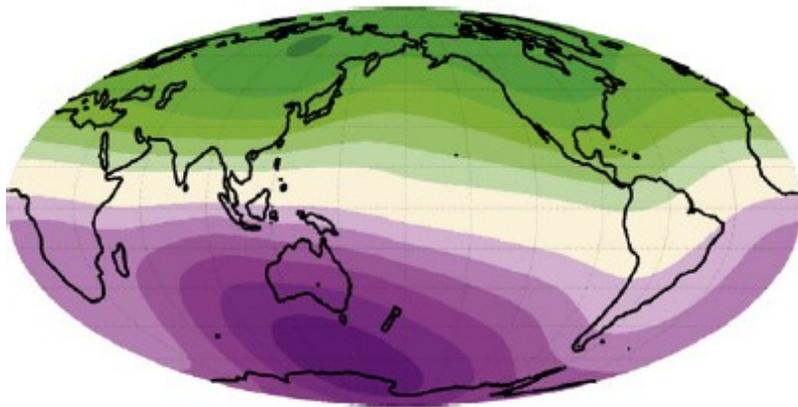
- 固有磁場の存在 → 磁気圏の形成



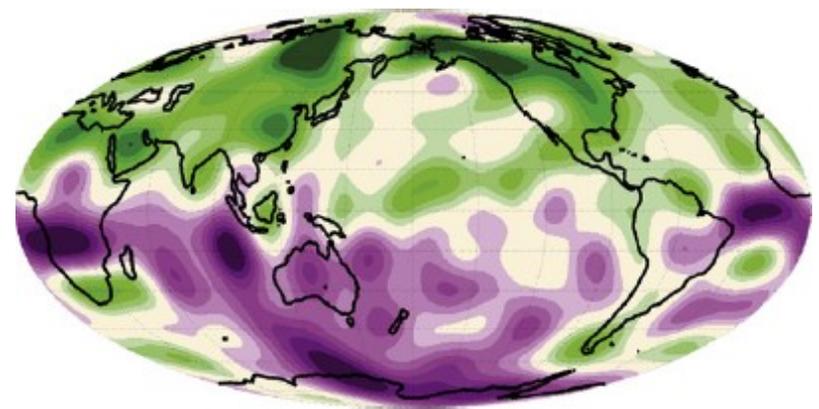
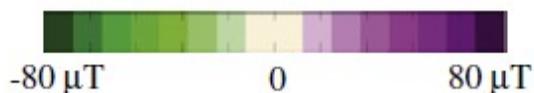
(Lang 2011)

地球：固有磁場

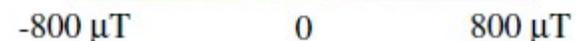
- 固有磁場
 - 35億年以前から存在
 - 強い双極子成分、しばしば逆転
逆転時には強度減少し多重極子卓越
 - 西方移動などの様々な永年変動



表面磁場



CMB磁場



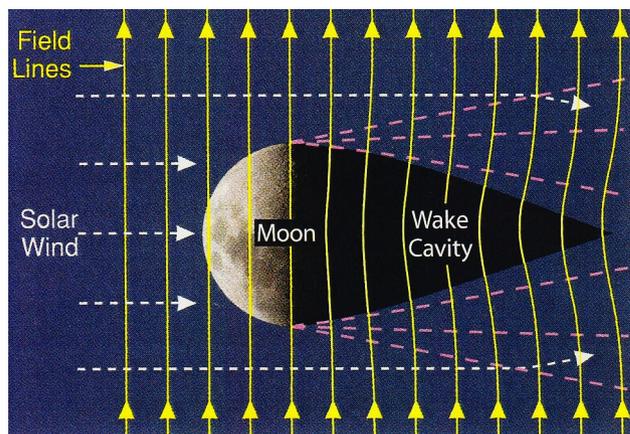
(Schubert Soderland 2011)

地球：ダイナモモデル

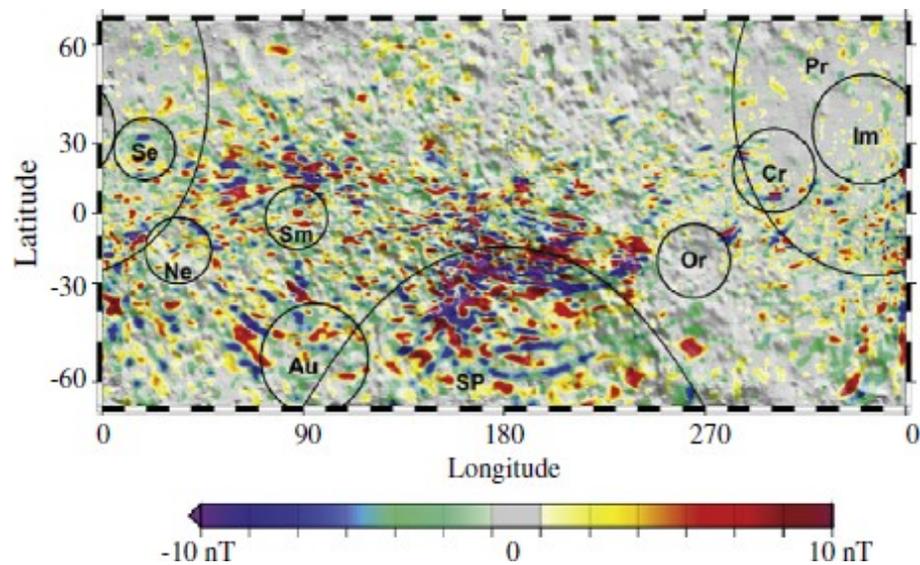
- たくさんの数値計算研究
 - ← 誰でもモデルを回せるようになった
 - とにかくエクマン数を小さくする最先端計算
 - 標準モデルによる漸近状態のスケーリング則の追求
 - CMB 不均一を導入して現実的な磁場変動を説明
 - ...

月

- 固有磁場なし、大気なし、電気不導体
→磁気圏なし
- 地殻残留磁化の存在



(McFadden et al. 2007)



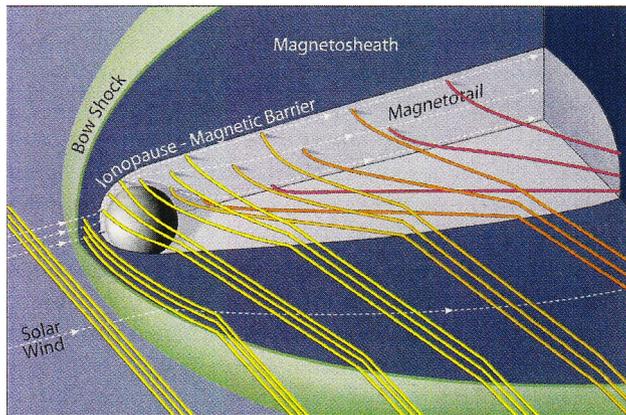
(Schubert Soderland 2011)

月：残留磁化

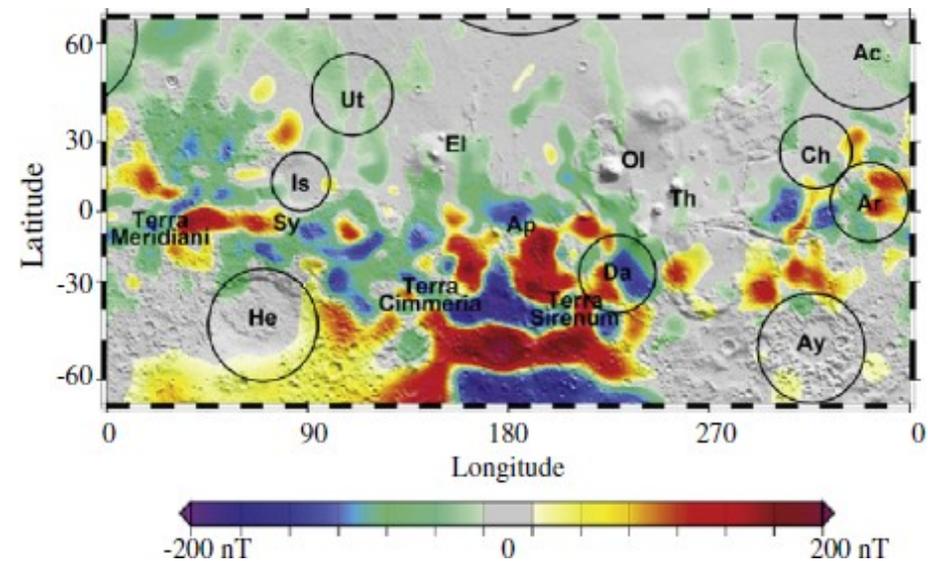
- 残留磁化の起源は？
 - 昔にダイナモがあった？40億年前に停止した？
(e.g. Garrick-Bethell et al. 2009)
 - マントル対流による冷却？章動？

火星

- 固有磁場なし、大気存在 → 誘導磁気圏の形成
- 残留磁化の存在
 - 南半球（高地）に集中、北半球には見られない



(McFadden et al. 2007)



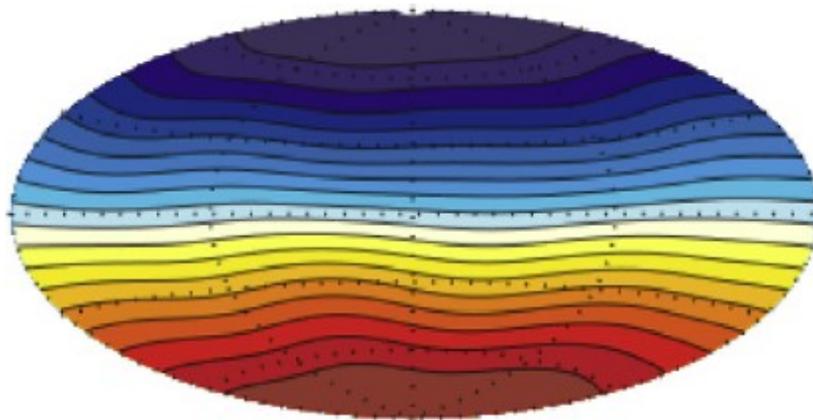
(Schubert Soderland 2011)

火星：古代ダイナモ

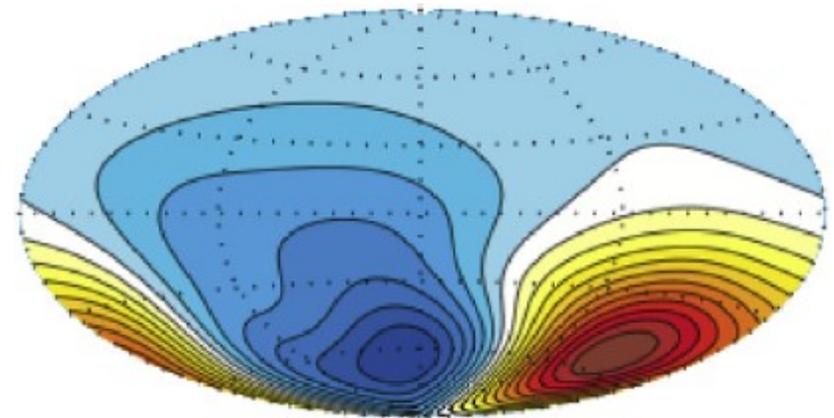
- 残留磁化の起源 ← 古代ダイナモ
- ダイナモがいつ喪失したか？
 - 衝突による磁化消失 → 衝突盆地の形成前（40億年以前）
- ダイナモがなぜ喪失したか？
 - 核内が熱伝導的になるまで冷却、内核はない (Stevenson 1983)
 - マントル対流形態の遷移 (Nimmo Stevenson 2000)
 - 現在は stagnant-lid type、熱輸送が効率的でない
 - 核が十分に冷却され、流体層が薄くなり、ダイナモを維持できなくなった (Stevenson 2010)

火星：残留磁化の2分性

- 残留磁化の南北半球の違いは？
 - 外因性：巨大衝突による北半球の地殻磁場の除去
 - 内因性：次数1のマントル対流、オーバーターン
 - マントル対流による南北半球の不均一熱流
→半球ダイナモの駆動



与えたCMBの熱流分布



-15 μT

0 μT

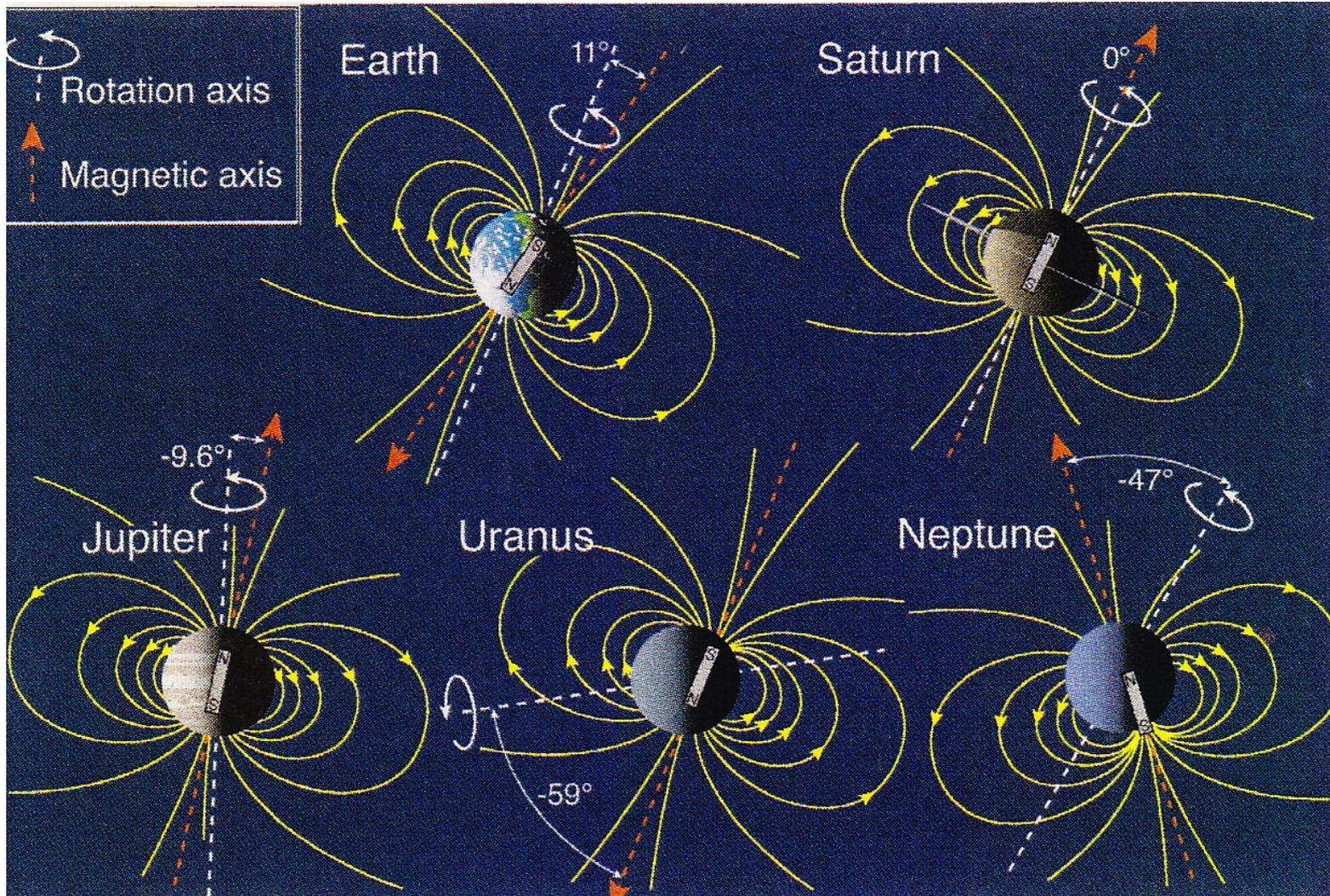
15 μT

(Stanley et al. 2008)

火星表面磁場分布

巨大ガス・氷惑星

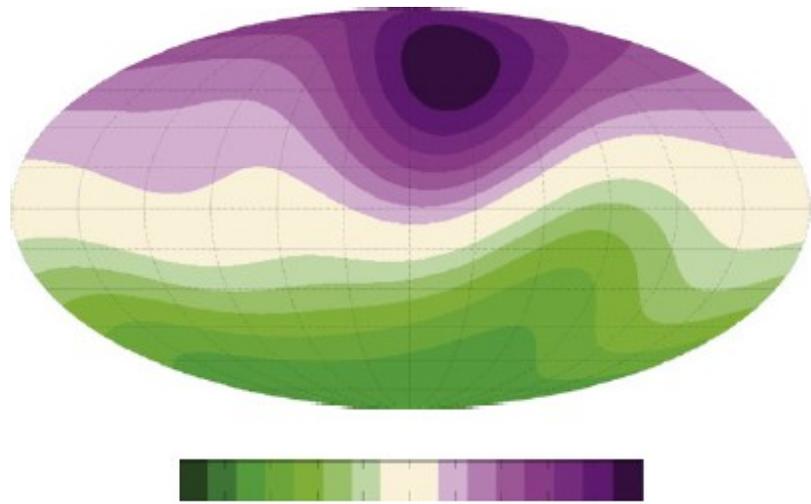
巨大ガス・氷惑星の磁場



(McFadden et al. 2007)

木星

- 太陽系最強の惑星固有磁場($\sim 550\mu\text{T}$)
- 回転軸と磁気双極子軸が傾いている
→ 衛星に対する周期的磁場変動 → 磁気誘導源

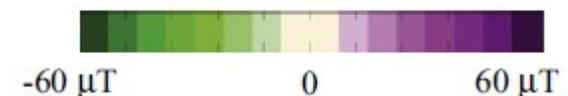
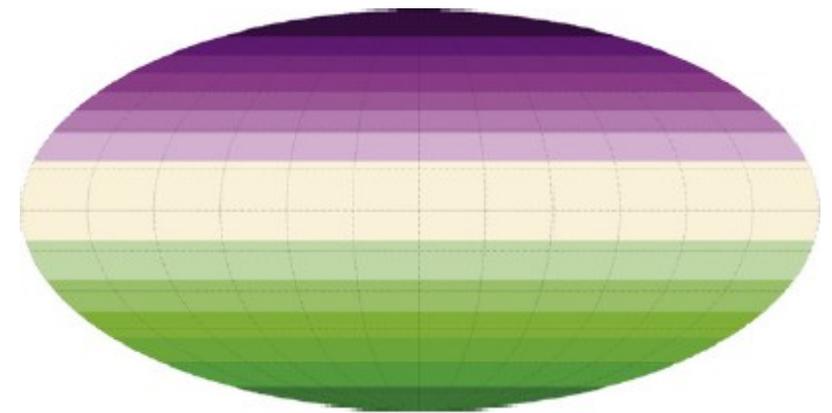


-1200 μT 0 1200 μT

(Schubert Soderland 2011)

土星

- 表面強度木星より弱い($\sim 30\mu\text{T}$)
- 双極子成分卓越、軸対称的
← 隠れている非軸対称磁場の存在？
- 回転軸からの磁場の傾き小さい
→ 誘導磁場源にならない

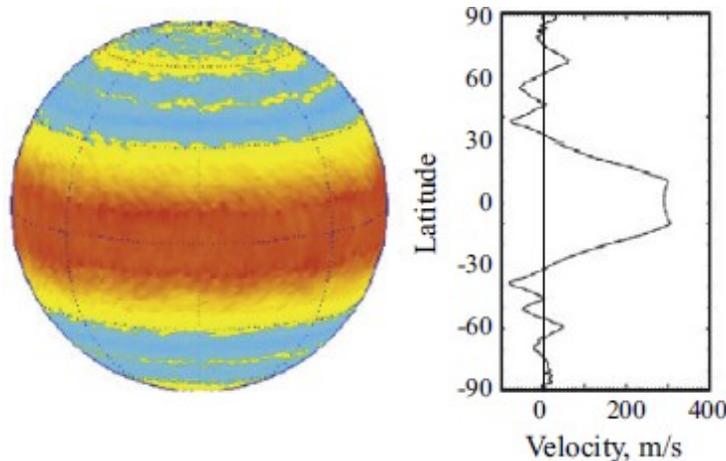


(Schubert Soderland 2011)

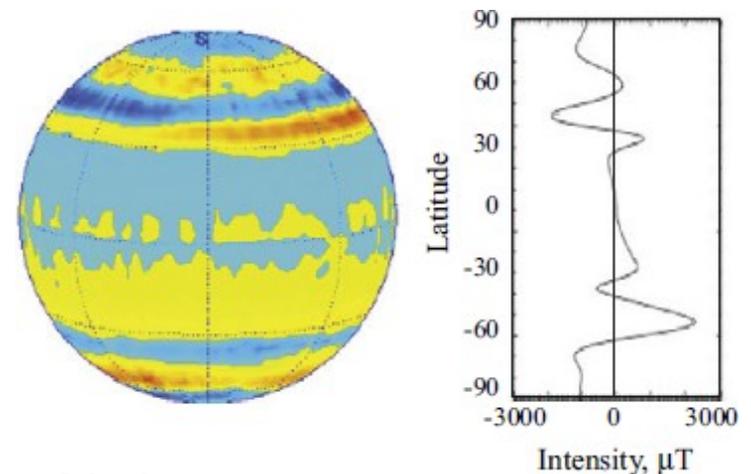
巨大ガス惑星のダイナモモデル

- ダイナモ領域は金属水素層
 - 木星 $\sim 0.8R$, 土星 $\sim 0.5R$
- 帯状流の赤道加速、中高緯度の縞構造の再現
- 密度成層、電気伝導度の成層が重要？

表面帯状流



磁場動径成分

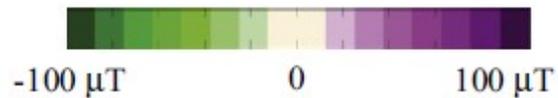
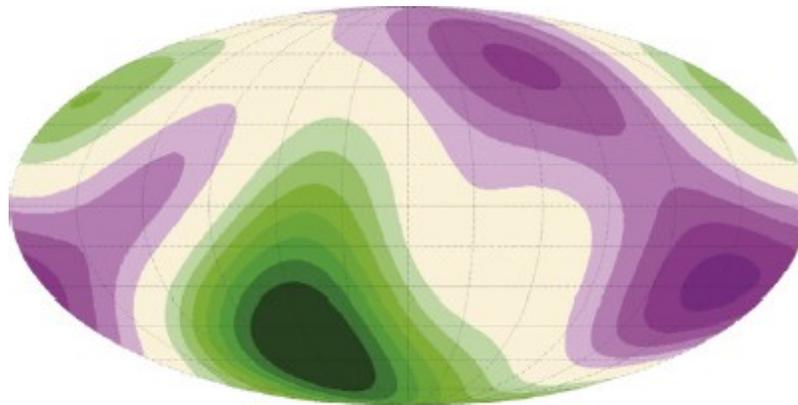


(Stanley Glatzmaier 2010)

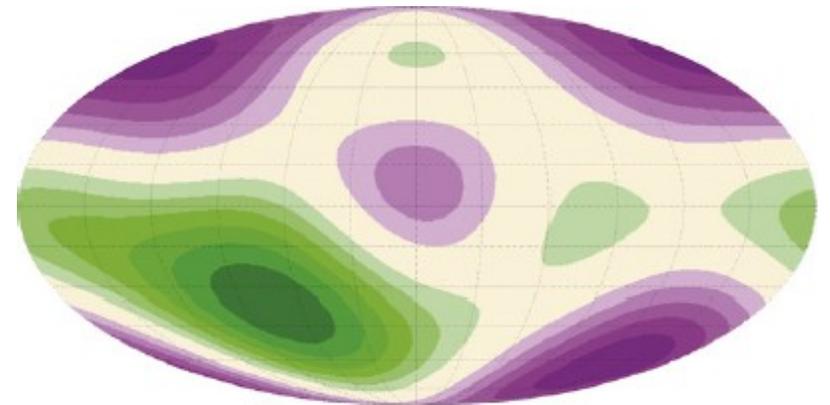
天王星と海王星

- 多重極成分が目立つ、双極子的でない

天王星表面磁場



海王星表面磁場

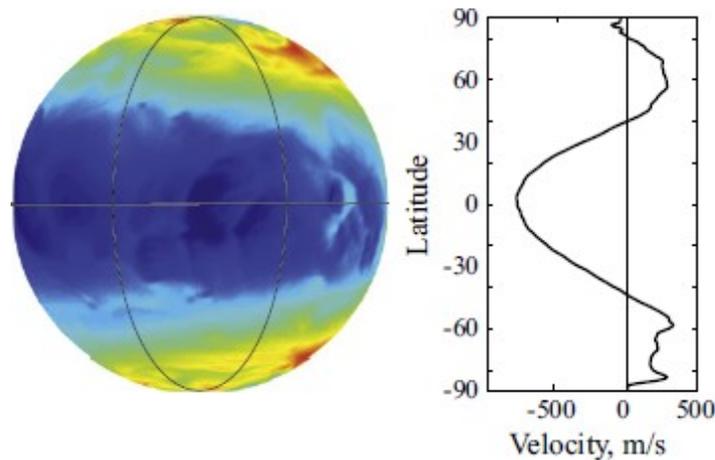


(Schubert Soderland 2011)

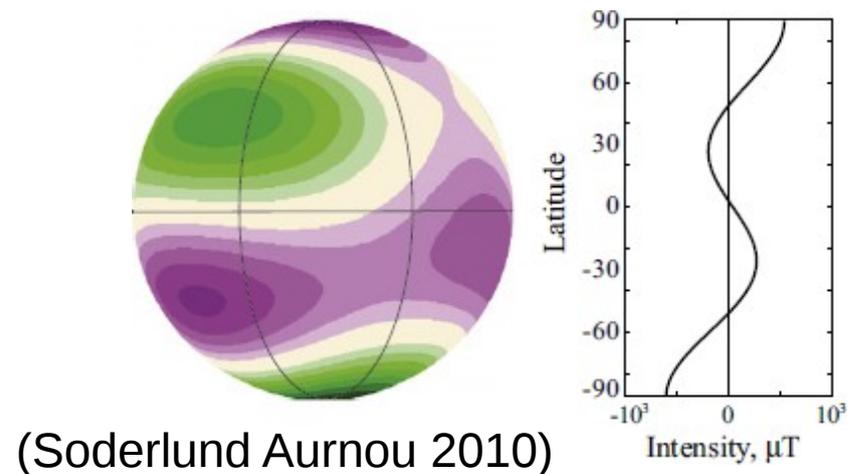
巨大氷惑星のダイナモモデル

- ダイナモ領域問題
 - 金属水素層ない、流体電離層存在？電気伝導度低？
- 帯状流は赤道減速 ← 角運動量一様化？
- 対流運動はテイラープラウドマンの定理に従わない3次元対流 → 磁場は多重極的になる？

表面帯状流

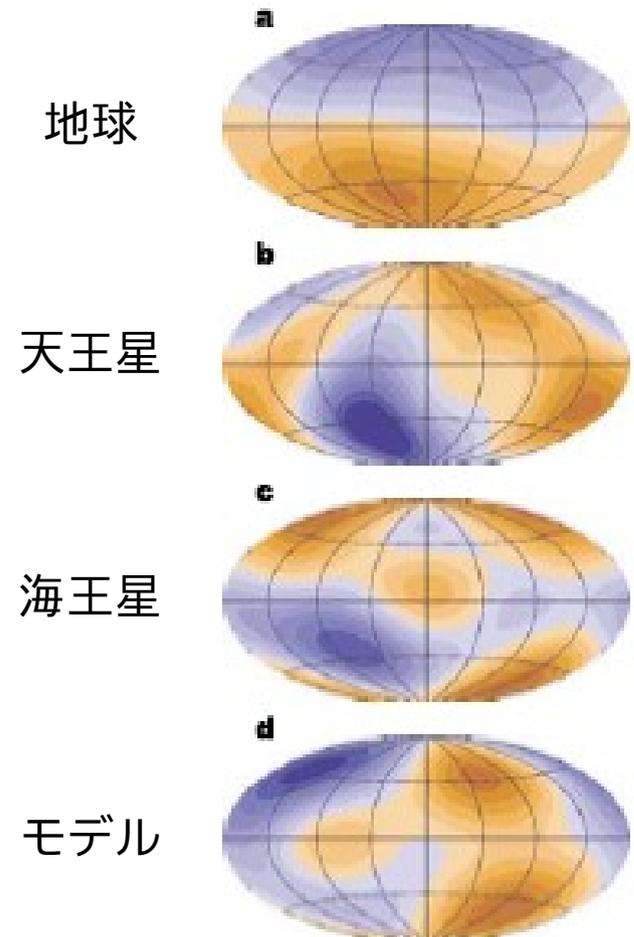
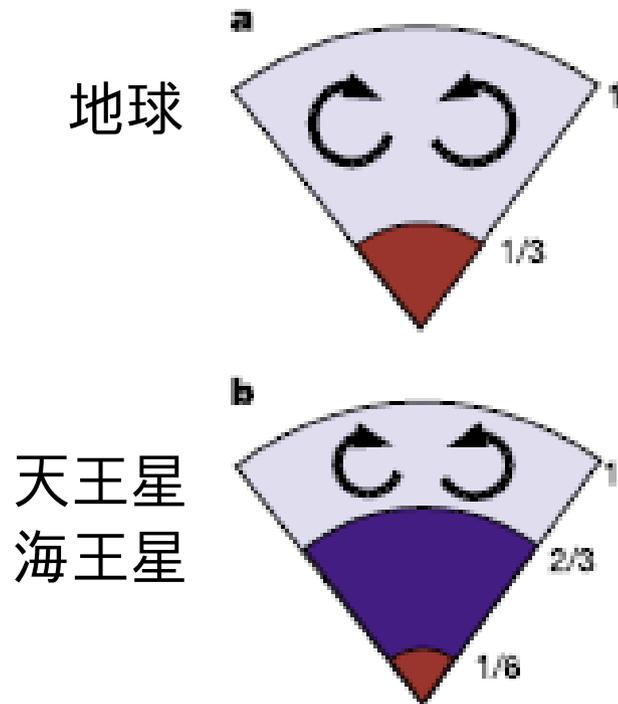


磁場動径成分



巨大惑星のダイナモモデル

- 内部に安定成層 → 薄いダイナモ領域モデル
 - 高波数の磁場生成



(Stanley Bloxham 2004)

木星系

ガリレオ衛星

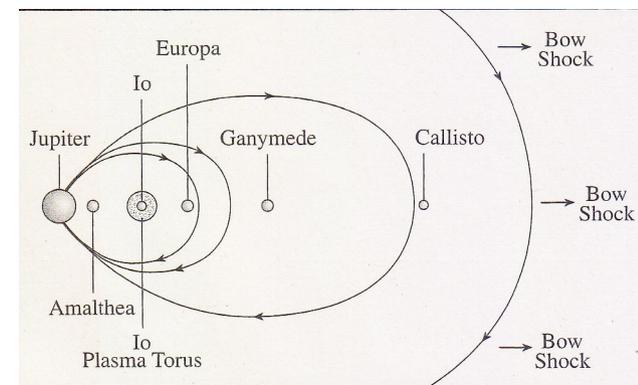
ガリレオ衛星

- 木星の衛星のうち大きな4つの衛星
 - イオ、エウロパ、ガニメデ、カリスト



(Lang 2011)

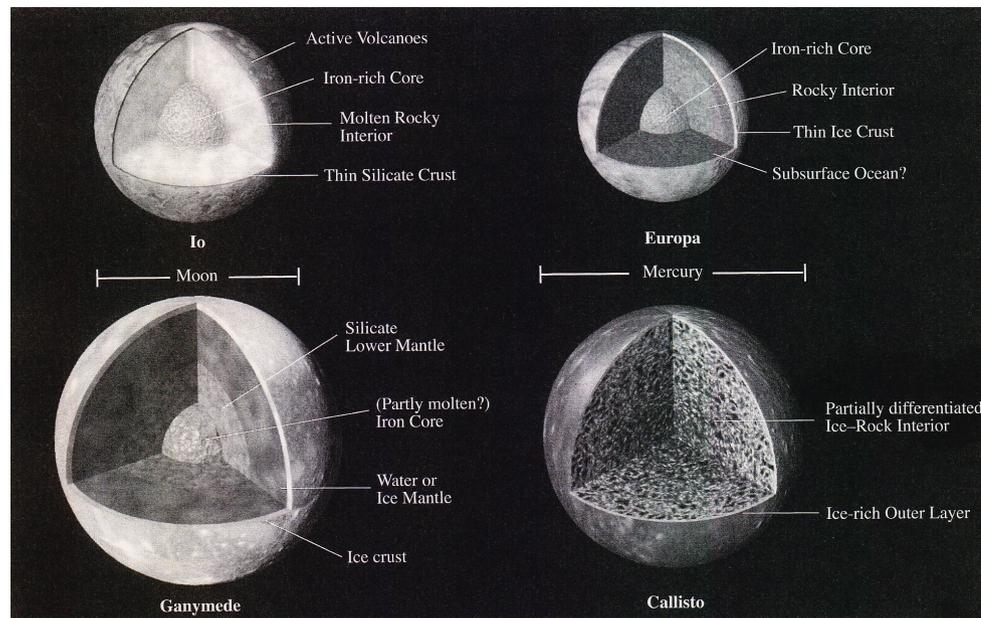
- 全て木星磁気圏内に存在



(Lang 2011)

ガリレオ衛星：内部構造

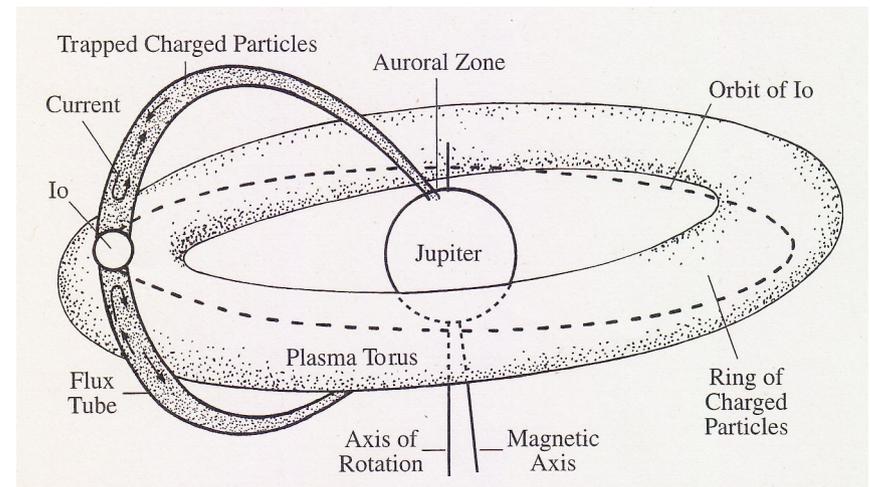
- イオ：大きな金属核、融けたマントル
- エウロパ：分化している、表面下の内部海
- ガニメデ：表面の厚い氷層、小さい金属核
- カリスト：分化進んでいない、氷と岩石の混合



(Lang 2011)

イオ

- 固有磁場なし、誘導磁場なし
- 中性大気（火山からの噴出） → イオン化
→ プラズマトーラスの形成

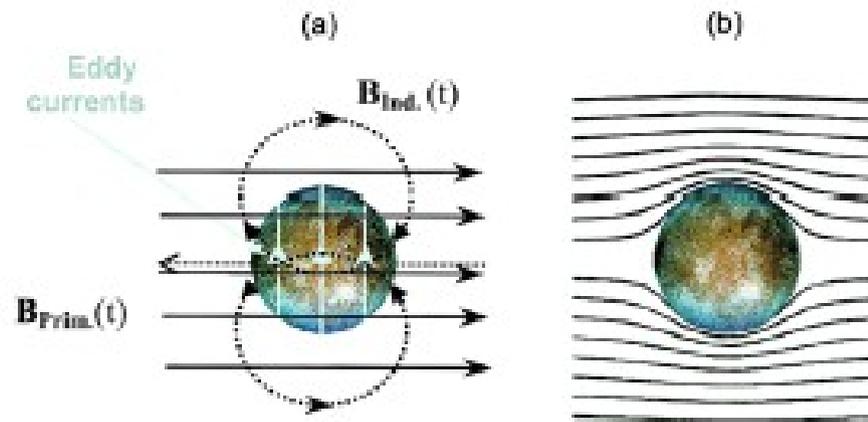


(Lang 2011)

- なぜ固有磁場ない？
 - 大きな金属核の存在 but 潮汐加熱で核が十分に冷えない？

エウロパ

- 固有磁場なし、誘導磁場あり
← 木星の傾いた磁場：周期的磁場変動
→ 表面下の海10km厚さで説明可能

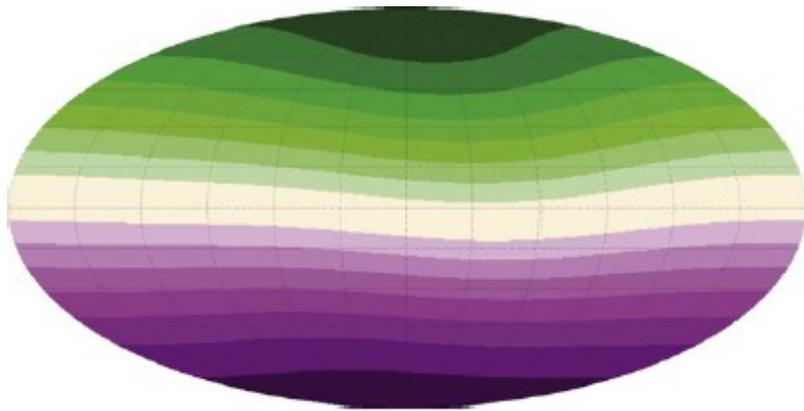


(Khurana et al. 2002)

ガニメデ

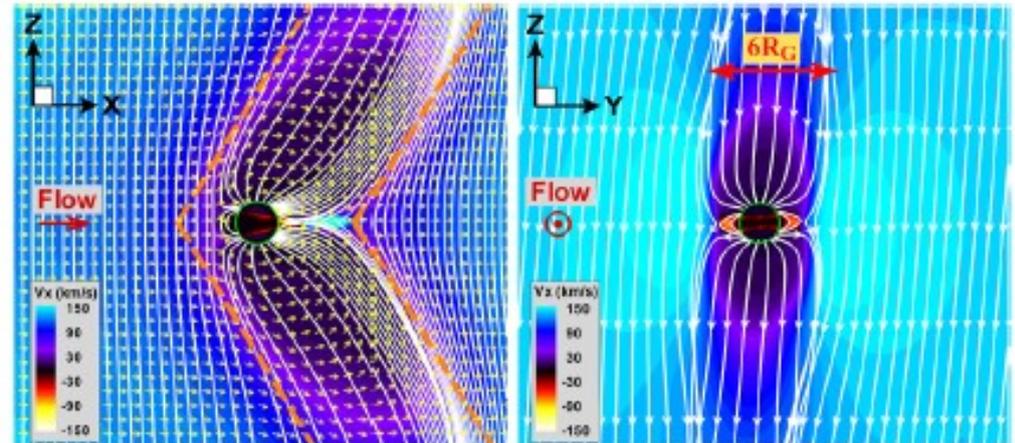
- 固有磁場あり → 磁気圏の形成
- 誘導磁場の信号もあるかも？

表面磁場分布



-1.5 μT 0 1.5 μT
(Schubert Soderland 2011)

磁気圏シミュレーション



(a)

(b)

(Jia et al. 2009)

ガニメデ：ダイナモモデル

- 内部構造
 - 厚い表面の氷層
 - シリケートー金属鉄部分は月の大きさ程度
 - 核はさらにその半分程度？
 - 小さい核でダイナモ維持できる？
- ダイナモのエネルギー源
 - 組成的駆動
 - CMB での鉄の凝結、雪の沈降
 - 核深部での FeS の上昇
 - 潮汐加熱？

カリスト

- 内部磁場なし
← 氷と岩石の混合、分化進んでいない、金属核なし
- 誘導磁場あり
← 木星の傾いた磁場：周期的磁場変動
→ 150～200km深さでの氷層下の塩水海で説明

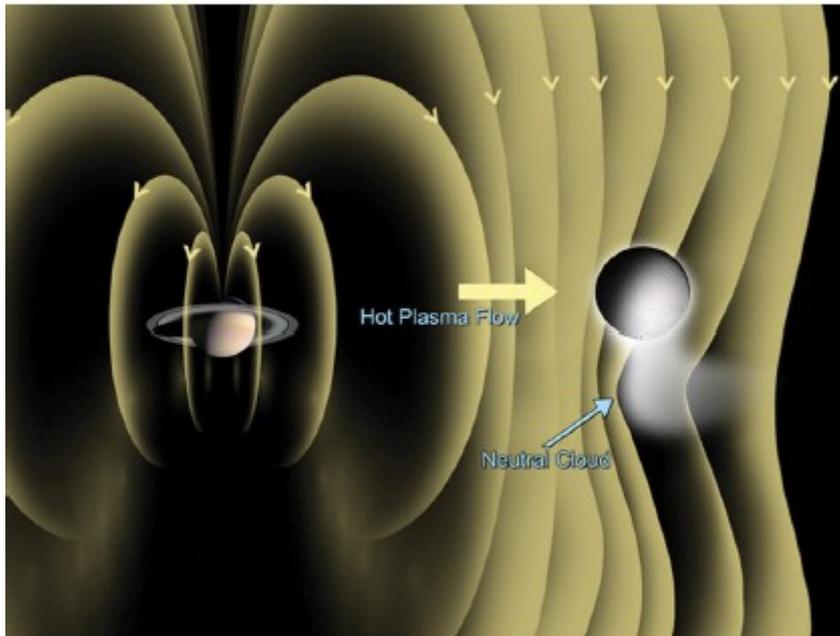
土星系衛星

タイタン

- 固有磁場なし、誘導磁場なし、中性大気
→ プラズマ相互作用、誘導磁気圏の形成
- 固有磁場ないのはなぜ？
← 内部は氷と岩石の部分的分化、金属核がない
- 内部に水の海の存在が示唆
→ 誘導応答が期待できる？
⇔ 土星磁場の傾き小さい：磁場変動小

エンケラドス

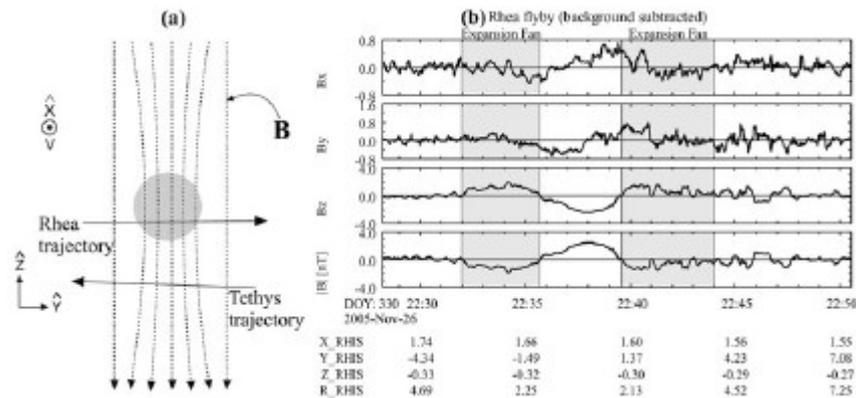
- 内部磁場なし
- 南半球の水プルーム → 中性雲を形成
→ プラズマ相互作用



(Dougherty et al. 2006)

テテュスとレア

- 内部磁場なし
- 内部構造：未分化な氷と岩石の混合物
→ 電氣的に不活性 → 月タイプの磁場応答
- 誘導応答：土星の磁場変動が小さく検出不能



(Khurana et al. 2008)

ディオネとイアペトス

- 状況不明瞭
- ディオネ：わずかな磁場応答が観測された
 - 衛星周囲への弱い磁力線のもたれかかり
 - 薄い大気のプラズマ？氷の低い電気伝導度？
- イアペトス：土星磁気圏外、太陽風の中
 - 磁場擾動観測は太陽風と整合的

参考文献

- Barabash, S., 2012: Classes of the solar wind interactions in the solar system. *Earth Planets Space*, 64, 57--59.
- Christensen, U., 2006: A deep dynamo generating Mercury's magnetic field. *Nature*, 444, 1056--1058.
- Dougherty, M. K., Khurana, K. K., Neubauer, F. M., Russell, C. T., Saur, J., Leisner, J. S., Burton, M. E., 2006: Identification of a dynamic atmosphere at Enceladus with the Cassini magnetometer. *Science*, 311, 1406--1409.
- Garrick-Bethell, I., Weiss, B. P., Shuster, D. L., Buz, J., 2009: Early lunar magnetism. *Science* 323, 356--359.
- Heimpel, M., Aurnou, J., Al-Shamali, F., Gomez-Perez, N., 2005: A numerical study of dynamo action as a function of spherical shell geometry. *Earth Planet. Sci. Lett.* 236, 542--557.
- Jia, X., Walker, R. J., Kivelson, M. G., Khurana, K. K., Linker, J. A., 2009: Properties of Ganymede's magnetosphere inferred from improved three-dimensional MHD simulations. *J. Geophys. Res.* (submitted)
- Jia, X., Kivelson, M. G., Khurana, K. K., Walker, R. J., 2010: Magnetic Fields of the Satellites of Jupiter and Saturn. *Space Sci. Rev.*, 152, 271--305.
- Khurana, K. K., Kivelson, M. G., Russell, C. T., 2002: Searching for liquid water in Europa by using surface observatories. *Astrobiology* 2, 93--103.
- Khurana, K. K., Russell, C. T., Dougherty, M. K., 2008: Magnetic portraits of Tethys and Rhea. *Icarus*, 193, 465--474.
- Lang, K. R., 2011: *The Cambridge guide to the solar system*, Cambridge Univ. Press, Cambridge, 475pp.
- Luhmann, J. G., 1995: Plasma interaction with unmagnetized bodies. in *Introduction to Space Physics*, Eds. Kivelson, M. G., Russell, C. T., Cambridge Univ. Press, Cambridge, pp. 203--226.
- Mcfadden, L., Weissman, P. R., Johnson, T. V. (Eds). 2007: *Encyclopedia of the Solar system*, 2nd Edition, Academic Press, San Diego, 982pp.
- Nimmo, F., Stevenson, D. J., 2000: Influence of early plate tectonics on the thermal evolution and magnetic field of Mars. *J. Geophys. Res. Planet.* 105, 11969--11979.
- Russell, C. T., Baker, D. N., Slavin, J. A., 1988: The magnetosphere of Mercury. in *Mercury*. Eds. Vilas, F., Chapman, C. R., Matthews, M. S., Univ. Arizona Press, Tucson, pp. 514--561.
- Schubert, G., Soderlund, K. M., 2011: Planetary magnetic fields: Observations and models. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 187, 92--108.
- Soderlund, K. M., Aurnou, J. M., 2010: Simulation of an ice giant-style dynamo. *American Geophysical Union Fall Meeting 2010*. San Francisco.
- Stanley, S., Bloxham, J., 2004: Convection-region geometry as the cause of Uranus' and Neptune's magnetic fields. *Nature*, 428, 151--153.
- Stanley, S., Bloxham, J., Hutchison, W., Zuber, M., 2005: Thin shell dynamo models consistent with Mercury's weak observed magnetic field. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 234, 27--38.
- Stanley, S., Elkins-Tanton, L., Zuber, M., Parmentier, E. M., 2008: Mars' paleomagnetic field as the result of a single-hemisphere dynamo. *Science* 321, 1822--1825.
- Stanley, S., Glatzmaier, G. A., 2010: Dynamo models for planets other than Earth. *Space Sci. Rev.*, 152, 617--649.
- Stegman, D. R., Jellinek, A. M., Zatman, S. A., Baumgardner, J. R., Richards, M. A., 2003: An early lunar core dynamo driven by thermochemical mantle convection. *Nature* 421, 143--146.
- Stevenson, D. J., 1983: Planetary magnetic fields. *Rep. Progr. Phys.* 46, 555--620.
- Stevenson, D. J., 2010 : Planetary magnetic fields: achievements and prospects. *Space Sce. Rev.*, 152, 651-664.
- Takahashi, F., Matsushima, M., 2006: Dipolar and non-dipolar dynamos in a thin shell geometry with implications for the magnetic field of Mercury. *Geophys. Res. Lett.* 33, doi:10.1029/2006GL025792.
- Vilim, R., Stanley, S., Hauck, S., 2008: Dynamo generation in the presence of iron snow zones: Application to mercury's weak surface field. *Eos Trans. AGU* 89(53), Fall Meet. Suppl., Abstract U21A-0004