

「磁石」としての「惑星」

佐々木洋平 (京大・数学)

2014/11/11

北大-大垣東高校間双方向遠隔授業プロジェクト

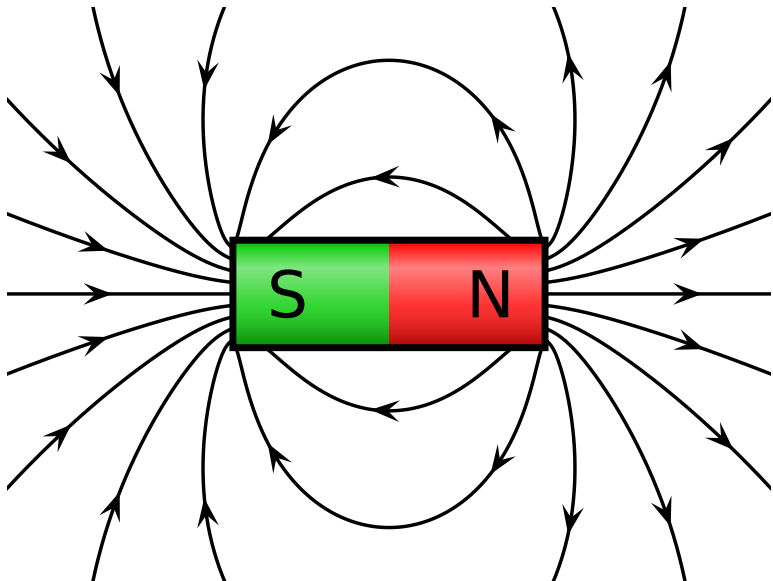
Outline

- ① はじめに: 「磁石」としての「地球」
- ② 何が「オモシロイ」のか?
- ③ 「磁石」としての「(太陽系の) 惑星」
- ④ まとめ …まとまらないけれど…

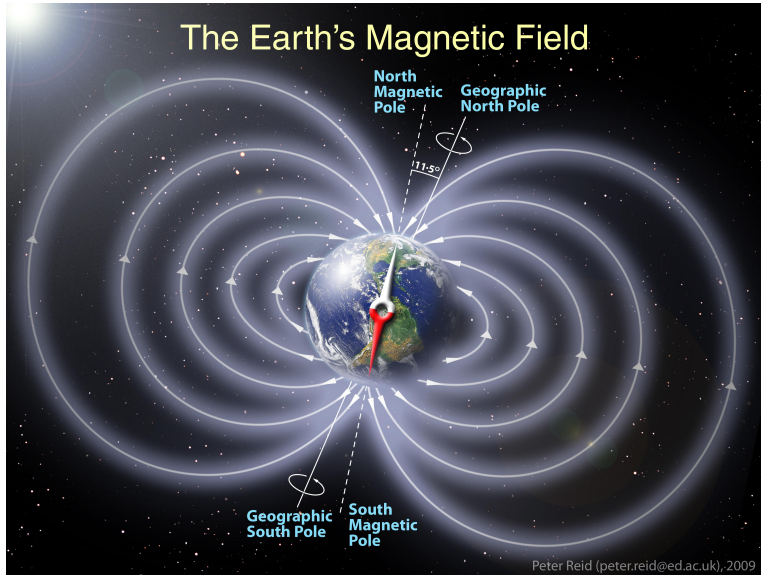
Outline

- ① はじめに: 「磁石」としての「地球」
- ② 何が「オモシロイ」のか?
- ③ 「磁石」としての「(太陽系の) 惑星」
- ④ まとめ …まとまらないけれど…

(復習) 棒磁石の周りの「磁界」



地球はどういう「磁石」？



永久磁石？

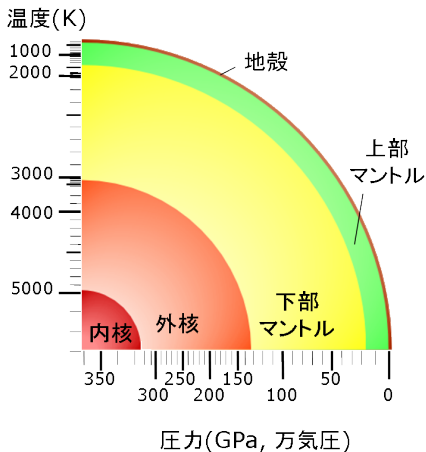
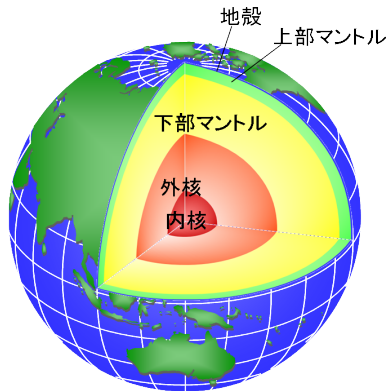
- 外部から電流や磁界の供給無しに「磁性」(磁石としての性質)を示す物体.
- 原子の「スピン」(電子の自転の向き)が揃っていると磁石になる.

永久磁石の作り方

- 原子の「スピン」を揃えれば良い
 - 「スピン」が揃い易い物質:
鉄, コバルト, ニッケル, etc.
- スピンを揃えるには?
 - 加熱して (スピンのバラバラに),
 - 磁界の中で, 冷やす (スピンが揃う)
- スピンがバラバラになる温度:
 - キュリー温度 (鉄は約 800°C)

地球の内部構造

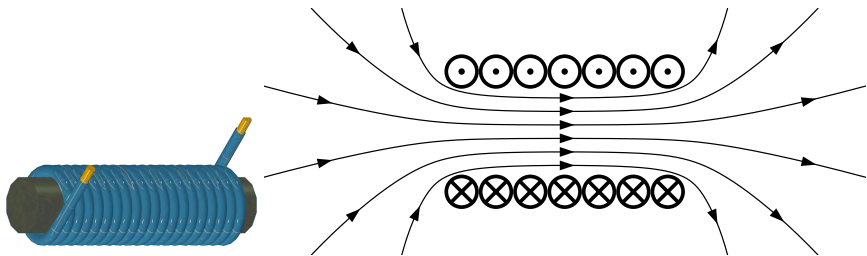
地殻, マントル…岩石



外核 (液体), 内核 (固体)…金属 (主に鉄, ニッケル)

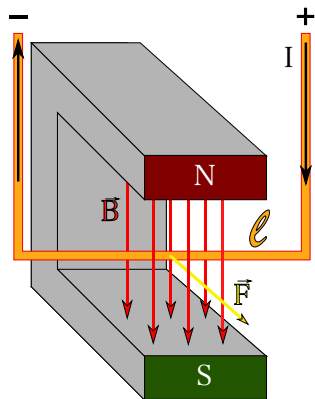
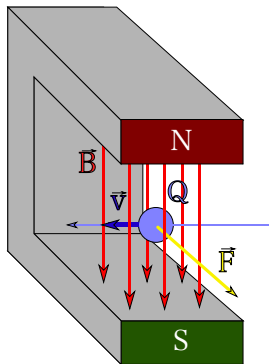
(復習)

「電磁石」



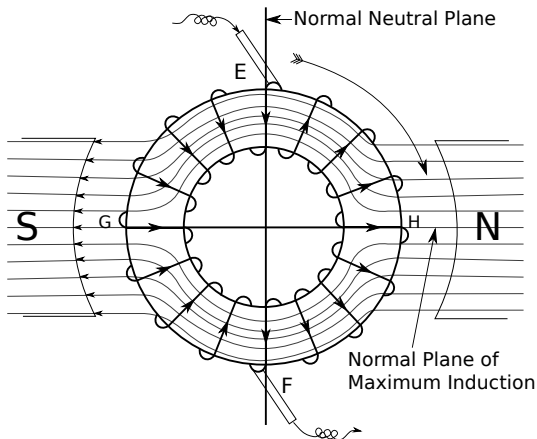
「右手の法則」ってあったよね？

(復習) 電流×磁場→力



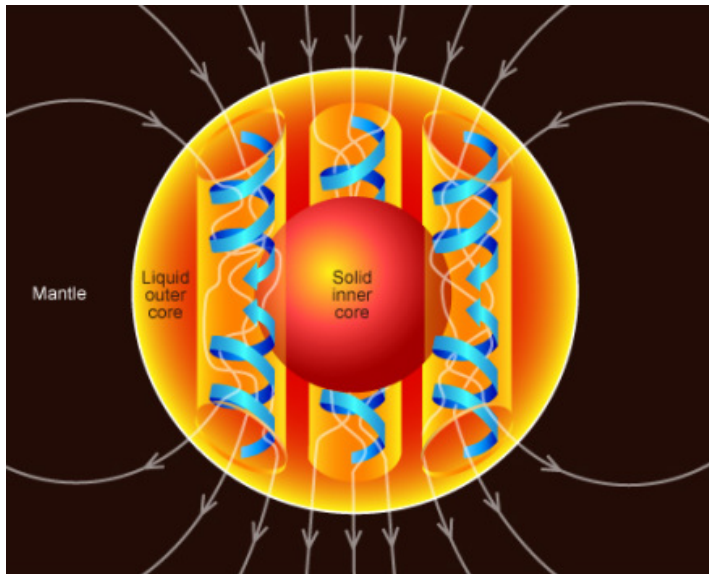
「フレミング左手の法則」, はたらく力: ローレンツ力

(復習) 電磁誘導 (ダイナモ)



「磁界の中で導体を動かすと電流が発生」

地球はどのような「磁石」？



地球はどういう「磁石」？

- 地球は **とても大きな「電磁石」**
 - 外核の運動による電磁誘導によって大規模な磁場が生成される

Have any
Questions?

Outline

- ① はじめに: 「磁石」としての「地球」
- ② 何が「オモシロイ」のか?
- ③ 「磁石」としての「(太陽系の) 惑星」
- ④ まとめ …まとまらないけれど…

何が「オモシロイ」のか？

- ① 非線型物理の「奥義」
- ② 見えないモノを見る手段
- ③ 生命の存在条件...？

何が「オモシロイ」のか？

- ① 非線型物理の「奥義」
- ② 見えないモノを見る手段
- ③ 生命の存在条件...？

非線型物理の「奥義」 (の一つ)

- 流体が運動すると...
 - ① ダイナモ作用により磁場が生成
↓「ローレンツ力」がはたらいて
 - ② 流体の運動が変化 (最初に戻る)
- 「どこで」「どうやって」「どんな」
磁場ができるのか?
 - 流体の運動と磁場との相互作用を
真面目に解く必要がある

何が「オモシロイ」のか？

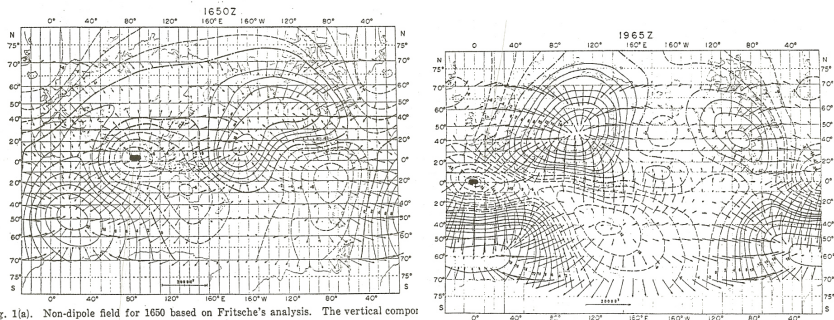
- ① 非線型物理の「奥義」
- ② 見えないモノを見る手段
- ③ 生命の存在条件...？

見えないモノを見る手段

- 惑星の「中身」はとっても見えにくい
- 「惑星表面での観測される磁場」
→ 「内部の運動」に関する唯一の情報

見えないモノを見る手段

地磁気の「西方移動」



地表面での磁場の非双極子成分

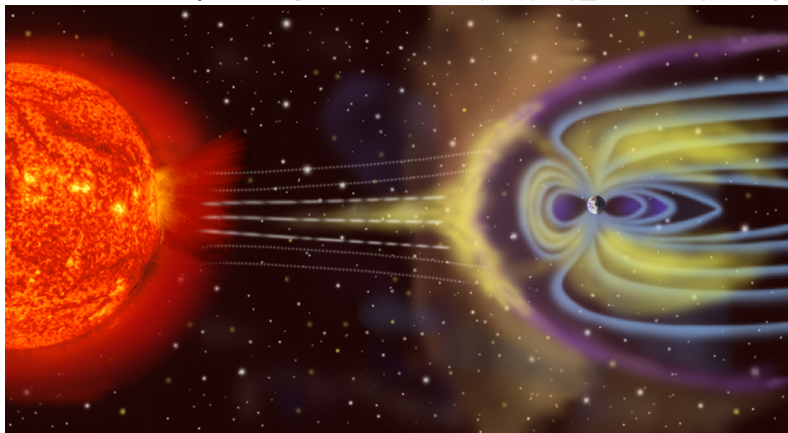
左: 1650 年, 右: 1950 年

何が「オモシロイ」のか？

- ① 非線型物理の「奥義」
- ② 見えないモノを見る手段
- ③ 生命の存在条件...?

生命の存在条件...?

地球型生命を守る「磁気圏」の形成

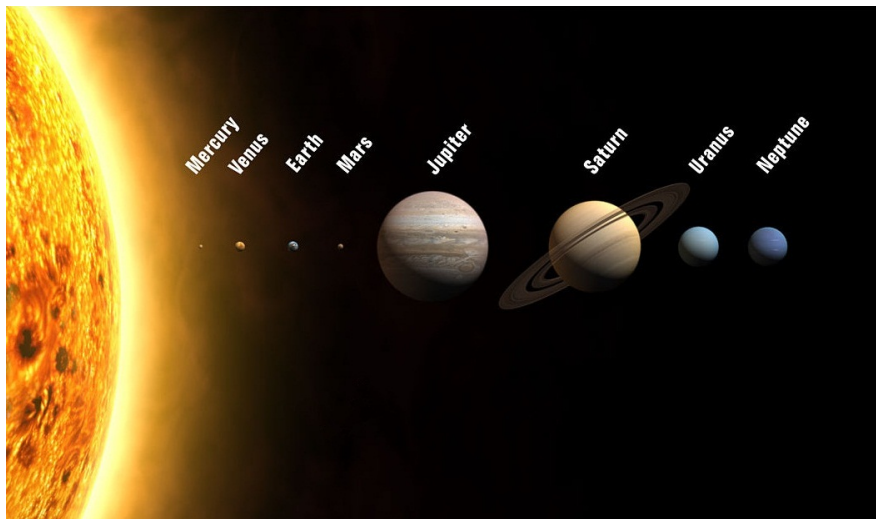


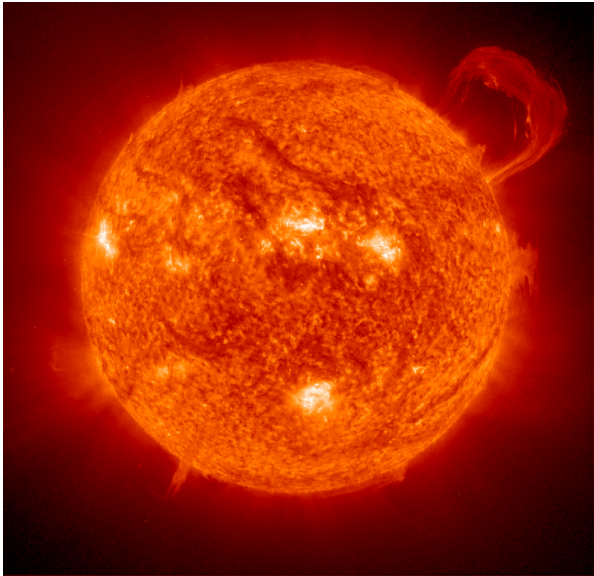
Have any
Questions?

Outline

- ① はじめに: 「磁石」としての「地球」
- ② 何が「オモシロイ」のか?
- ③ 「磁石」としての「(太陽系の) 惑星」
- ④ まとめ …まとまらないけれど…

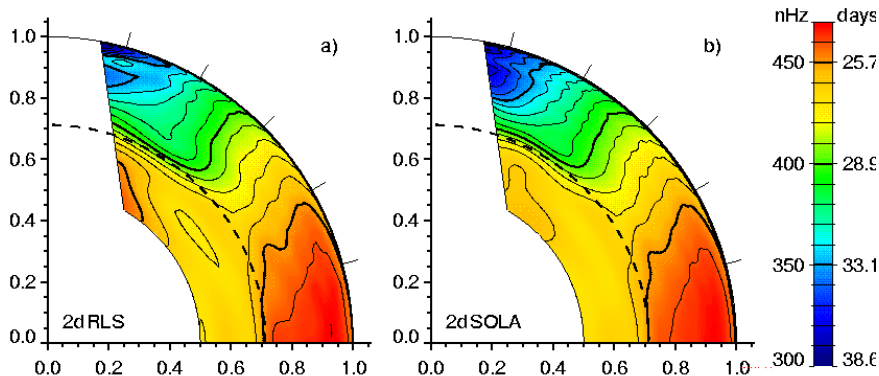
太陽系の天体の「磁場」は？





太陽 (1): 内部の運動

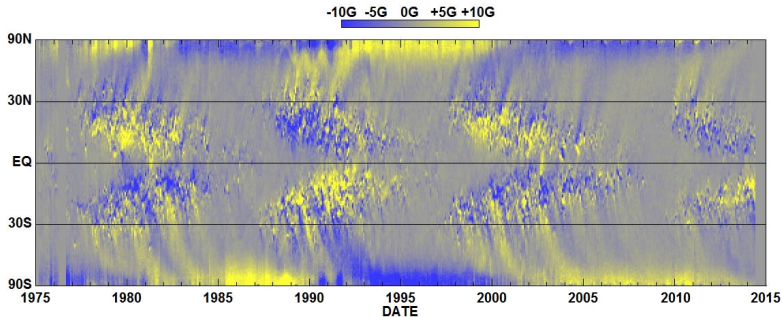
地球よりも詳しい観測: 日震学



内部の「運動」が日々観測されている!

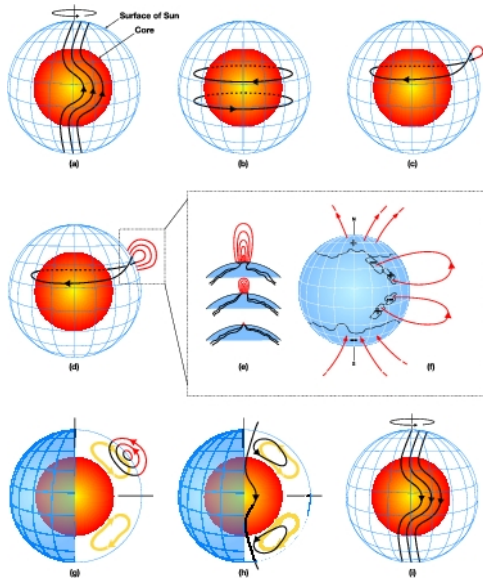
太陽 (2): 表面磁場

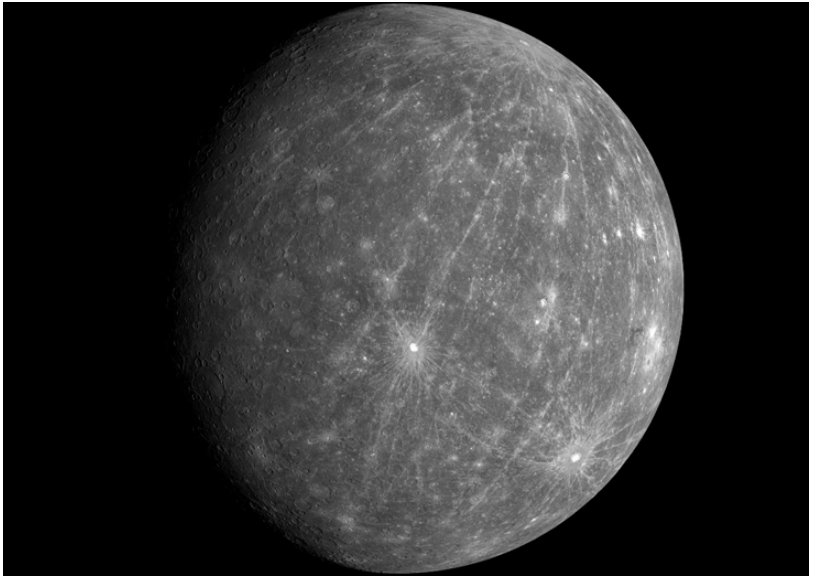
周期的に極性反転:
→ バタフライダイアグラム



Hathaway/NASA/MSFC 2014/06

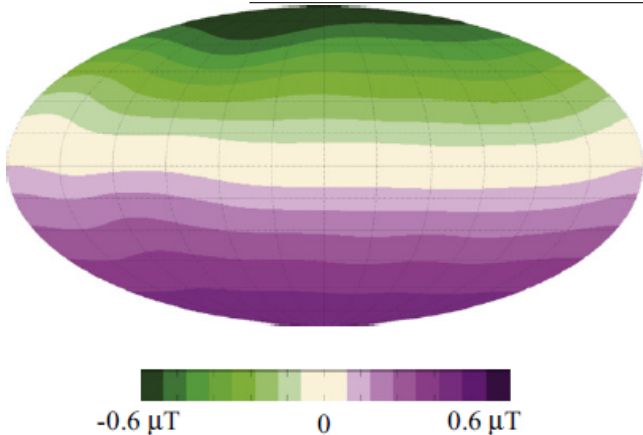
太陽 (3): ダイナモ





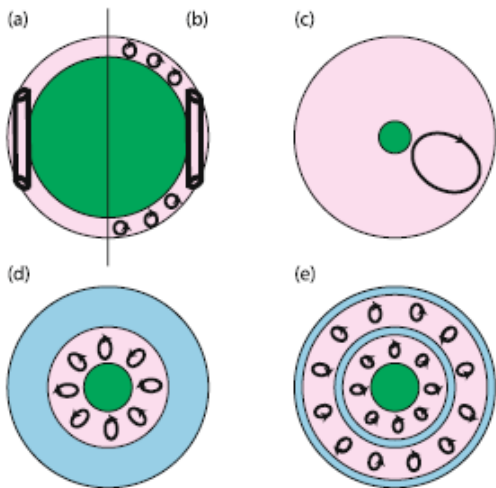
水星 (1): 表面磁場

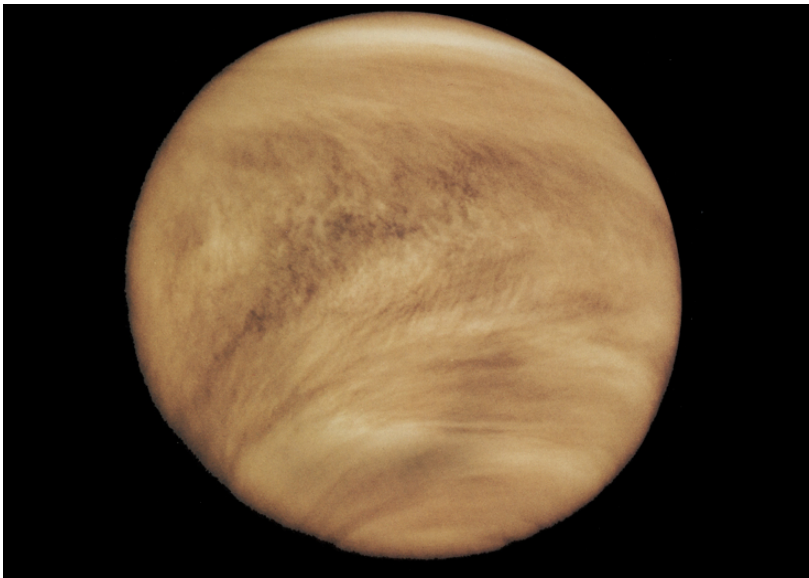
固有の磁場:地球の 100 倍弱い



水星 (2): ダイナモ

弱い磁場を説明するには？





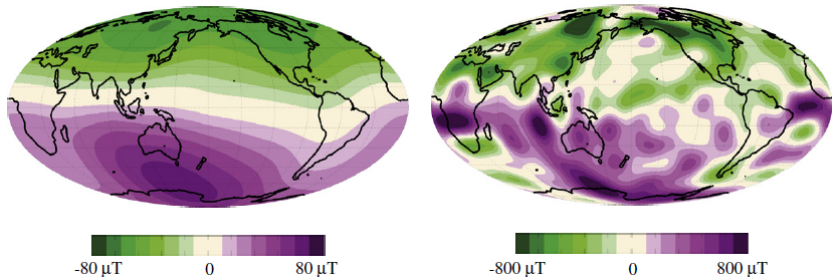
金星：固有の磁場は無い

- 内部が対流していない
 - 内核が無い？
 - プレートテクトニクスが無い？
- 地表面の (残留) 磁場もない
 - 温度が高すぎ: キュリー点越えてる？

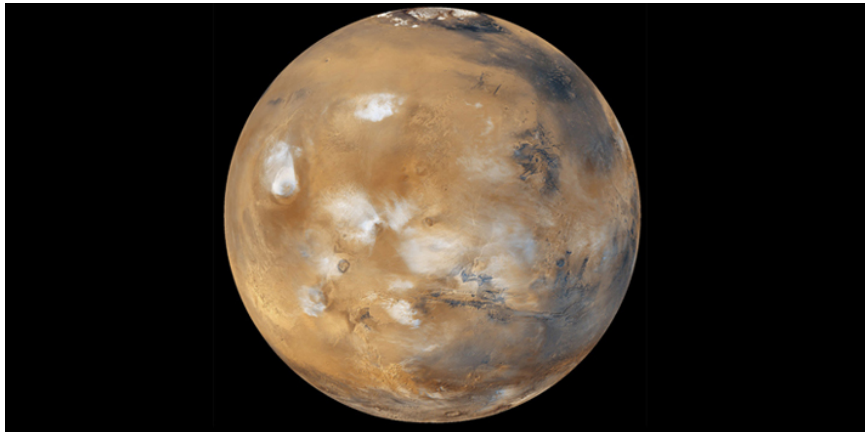


地球 (1): 表面磁場

左: 地表面, 右: 外核表面

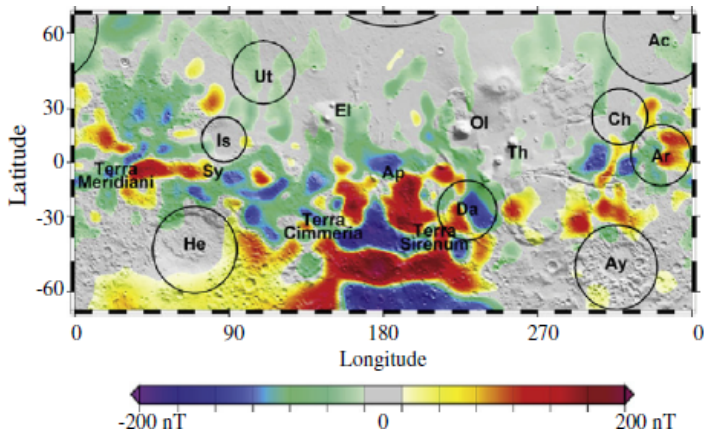


- 35 億年以上存在, 突発的に極性が反転
- 西方移動などの「永年変動」



火星 (1): 表面磁場

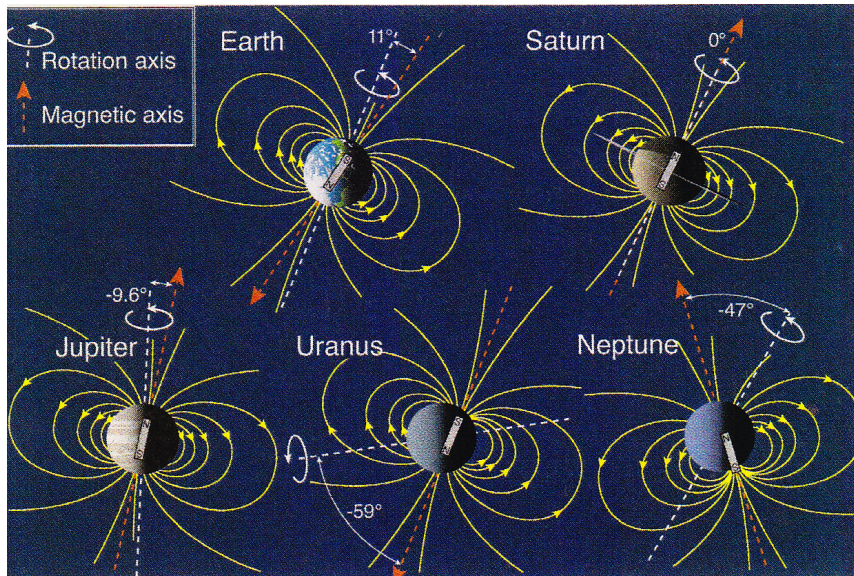
- 固有磁場は無い
- 地表面の残留磁化が南半球に局在

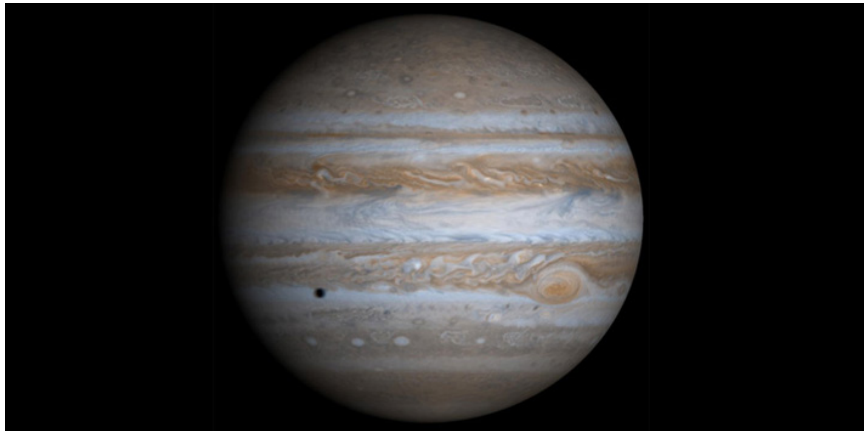


火星 (2): 古代ダイナモ

- 残留磁化: 昔のダイナモの残り
 - 何故南半球に局在化しているのか?
 - いつダイナモが止まったか?
 - 何故止ったか?

ガス・氷惑星

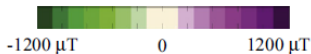
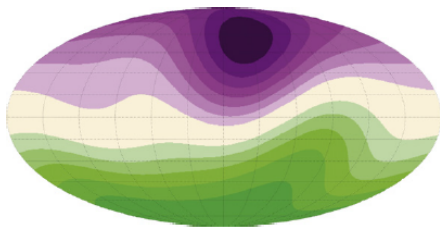




木星 (1)

- 太陽系最強の惑星固有磁場
- 自転軸と磁軸が傾斜

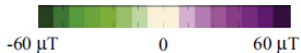
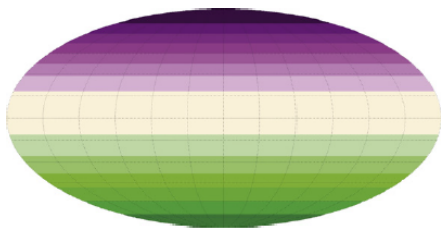
衛星に周期的な磁気変動→磁気誘導の原因

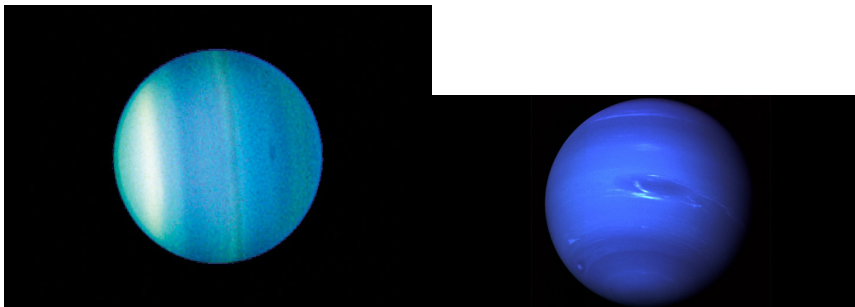




土星 (1)

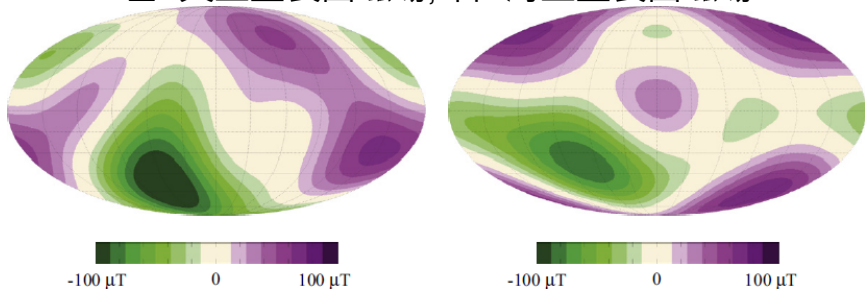
- 木星に比してだいぶ弱い
- 自転軸と磁軸がほぼ一致





天王星と海王星

左: 天王星表面磁場, 右: 海王星表面磁場



- 棒磁石っぽくない (非双極子成分強い)
- 自転軸と磁軸は一致しない

天体固有磁場

- 固有磁場が存在する場合には内部の流体運動によるダイナモで磁場が生成されているのは間違いないだろう
- 顔付きがそれぞれ異なる
→ どう説明するか? 説明できるか?

Have any
Questions?

Outline

- ① はじめに: 「磁石」としての「地球」
- ② 何が「オモシロイ」のか?
- ③ 「磁石」としての「(太陽系の) 惑星」
- ④ まとめ …まとまらないけれど…

まとめ: 天体ダイナモ

- 天体の固有磁場: 巨大な電磁石
 - 内部の「流体運動」による「発電」
- 太陽系内の天体の「固有磁場」
 - 顔付きはかなり違う
 - どうやって説明するか?説明できるか?

参考文献 (1)

- 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.

参考文献 (2)

- 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.

参考文献 (3)

- 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 Sci. 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

引用画像

- Magnetic field of an ideal cylindrical magnet with its axis of symmetry inside the image plane, Geek3, http://commons.wikimedia.org/wiki/File:VFpt_cylindrical_magnet_thumb.svg, CC BY-SA 3.0
- マントル条件下での鉱物の相転移や固溶関係の実験的研究, 北海道大学 大学院 理学研究院 自然史科学部門 地球惑星システム科学 地球惑星物質学グループ, <http://www.sci.hokudai.ac.jp/mineral/index.php/研究紹介> 1
- A simple electromagnet, consisting of an insulated wire wound around an iron core, Public Domain
- Diagram of a solenoid's magnetic field, Geek3 http://commons.wikimedia.org/wiki/File:VFpt_Solenoid_correct.svg, CC BY-SA 3.0
- Illustration of the Lorentz force, Pietz, http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Lorentzkraft_v2.svg, CC BY-SA 3.0
- Seitenl²c²a4ufer-Dynamo f²c²bcr ein fahrendes Ger²c²a4t, Stahlkocher, http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Bicycle_dynamo.jpg, CC BY-SA 3.0
- Drawing based on w:Image:Dynamo - commutating plane idealized.jpg, Borb, http://en.wikipedia.org/wiki/Image:Dynamo_-_commutating_plane_idealized.jpg, CC BY-SA 3.0
Original Ver: http://en.wikipedia.org/wiki/File:Dynamo_-_commutating_plane_idealized.jpg
- A schematic illustrating the relationship between motion of conducting fluid, organized into rolls by the Coriolis force, and the magnetic field the motion generates. http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Outer_core_convection_rolls.jpg, Public Domain