ガス惑星の水氷コアの浸食

水氷のHへの飽和溶解線 (H₂O:H=1:125)



ガス惑星の水氷コアの浸食

水氷のHへの飽和溶解線 (H₂O:H=1:125)



ガス惑星の岩石コアの浸食



ガス惑星の岩石コアの浸食

MgOのHへの飽和溶解線



10000K以上の高温下では、MgOはHと混合

太陽系のガス惑星の内部構造:最近の描像



ガス惑星の内部: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)?

■ 木星・土星の<mark>磁場</mark> (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** (Plasma Phase Transition) →密度の不連続 (*P*~200GPa, *T*~3000-10000K)



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 \rightarrow 系の $H \rightarrow$ 全波動関数 \rightarrow 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) ($P \sim 50$ GPa, $T \sim 3000$ K) (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



金属水素層とガス惑星の内部組成



土星のコアは小さいかもしれない?



太陽系のガス惑星の内部構造:最近の描像



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 ≤ 10bar)のHe枯渇** (原始太陽系星雲:Y=0.27)



土星: $Y = 0.17 - 0.24 \leftarrow Voyager IRIS/RMS$

 $Y = 0.13 \leftarrow \text{Cassini CIRS}(\text{Gautier}+06)$ (Conrath & Gautier,2000)





He

H-Heの分離: P-T領域



H-Heの分離: P-T領域(P≦25Mbar)





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)?

1.2 惑星の熱進化:大気の収縮



(ガス惑星) H/He 大気の収縮 (対流+輻射) (氷惑星) 氷マントルの熱輸送 (地球型惑星) マントル対流, 熱伝導





H/He

氷マントル

岩石



(Fortney & Hubbard, 2003; Fortney+11)

He沈殿による重力ポテンシャルの解放

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**



ここで、分離・沈降領域~土星半径の1/2とすると、 H-He分離によって生じる冷却の**遅延時間**



『He沈殿による熱源 = 土星の冷却を十分に遅らせられる』



H-Heの分離:土星の熱進化

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



横倒しの暗い天王星と明るい海王星

似たような 2つの氷惑星 (天王星,海王星)の明るさの違いは?



天王星と海王星:各物理量の比較



天王星 98°の自転軸傾斜角:自転-軌道共鳴



天王星と海王星:各物理量の比較



暗すぎる天王星と明るい海王星問題



(Fortney & Nettelmann, 2009; Fortney et al. 2011)

氷惑星の二分性:巨大衝突

二重拡散対流:温度勾配と組成勾配

salt-finger対流

天王星への巨大衝突と角運動量

	衝突天体の質量	衝突速度 (v_{esc})
	~ 2.8 M_\oplus	0.1
	~ 1.2 M_{\oplus}	0.5
	~ 0.6 M_\oplus	1.0
	~ 0.3 <i>M</i> ⊕	2.0

※衝突天体,天王星は同じ平均密度を仮定 v_{esc} ~ 天王星からの脱出速度 横倒し:現在の角運動量 ~ 衝突由来 **天王星への衝突天体~ 地球質量**程度

(*cf*)同じ衝突速度の場合、 小さなθ:より大きな衝突天体

天王星・海王星の内部構造:最近の描像

横倒しの暗い天王星と明るい海王星

似たような 2つの氷惑星 (天王星, 海王星)の明るさの違いは? (答え) 巨大衝突?

© Let's do coffee

参考文献

- Anderson, D., Schubert, G., 2007:Saturn's Gravitational Field, Internal Rotation, and Interior Structure, Science, 317, 5843, pp. 1384-.
- Baraffe, et al., 2003: Evolutionary models for cool brown dwarfs and extrasolar giant planets. The case of HD 209458, A&A, 402, pp.701-712.
- Bodenheimer, P, Lin, D. N. C., Mardling, R. A., 2001, On the Tidal Inflation of Short-Period Extrasolar Planets, ApJ, 548(1), pp.466-472.
- Burrows, A., Sudarsky, D., 2003: Models of Irradiated Extrasolar Giant Planets, Scientific Frontiers in Research on Extrasolar Planets, ASP Conference Series, 294, pp. 491-498.
- Burrows, A., et al., 1997: A Nongray Theory of Extrasolar Giant Planets and Brown Dwarfs, ApJ, 491, pp.856.
- Conrath, B.J., Gautier, D., 2000: Saturn Helium Abundance: A Reanalysis of Voyager Measurements, Icarus, 144(1), pp. 124-134.
- Delaney, K. T., et al., 2006: Quantum MonteCarlo Simulation of the High-Pressure Molecular-Atomic Crossover in Fluid Hydrogen, Phys.Rev.Lett., 97, 23,

参考文献

- Dessler, A. J. 1983: Coordinate systems, In: Physics of the Jovian magnetosphere, Cambridge and New York, Cambridge University Press, p. 498-504.
- Fortov, V. E., et al., 2007: Phase Transition in a Strongly Nonideal Deuterium Plasma Generated by Quasi-Isentropical Compression at Megabar Pressures, Phys.Rev.Lett., 99, 18, id 185001.
- Fortney, J. J., et al., 2007: Planetary Radii across Five Orders of Magnitude in Mass and Stellar Insolation: Application to Transits, ApJ, Vol. 659, Iss. 2, pp. 1661-1672.
- Fortney, J., Hubbard, B., 2003: Phase separation in giant planets: inhomogeneous evolution of Saturn, Icarus, 164(1), pp.228-243.
- Fortney, J. J., Nettelmann, N., 2010: The Interior Structure, Composition, and Evolution of Giant Planets, Space Science Reviews, Vol. 152, Issue 1-4, pp. 423-447.
- Fortney, J. J., et al. 2011: Self-consistent Model Atmospheres and the Cooling of the Solar System's Giant Planets, ApJ, Vol. 729, Issue 1, id 32.

参考文献

- Fouchet, T., 2009: Saturn: Composition and Chemistry, Springer Science+Business Media, pp.83.
- Gautier, D., et al., 2006: The helium to hydrogen ratio in Saturn's atmosphere from Cassini CIRS and radio science measurement, 36th COSPAR abstract, #867.
- Graboske, H. C., et al., 1969: Thermodynamic Properties of Nonideal Gases.
 I. Free-Energy Minimization Method, Phys.Rev., 186(1), pp.210-225.
- Guillot, T. et al., 1996: Giant Planets at Small Orbital Distances, ApJL, Vol.459, p.L35
- Guillot, T., 1999: A comparison of the interiors of Jupiter and Saturn, Planet.Space.Sci., 47(10-11), pp.1183-1200.
- Guillot, T., 2005: THE INTERIORS OF GIANT PLANETS: Models and Outstanding Questions, Annu.Rev.Earth.Planet.Sci., 33, pp.493-530.
- Guillot, T., and Gautier, D. 2009: Giant Planets, Treatise of Geophysics, vol. 10, Planets and Moons, Schubert G., Spohn T. (Ed.) (2007) 439-464.

参考文献

- Harris, A. W., Ward, W. R., 1982: Dynamical constraints on the formation and evolution of planetary bodies, Annu Rev Earth Planet Sci, 10, pp.61-108.
- Helled, R., Guillot, T., 2013: Interior Models of Saturn: Including the Uncertainties in Shape and Rotation, Accepted for publication in ApJ.
- Helled, R., et al., 2010: Uranus and Neptune: Shape and rotation, Icarus, 210(1), pp.446-454.
- Hubbard, W. B., Macfarlane, J. J., 1980: Structure and evolution of Uranus and Neptune, J. Geophys. Res., 85, pp.225-234.
- Holst, B. et al., 2008: Thermophysical properties of warm dense hydrogen using quantum molecular dynamics simulations, Phys.Rev.B, 77(18), 184201.
- Ingersoll, A. P., Pollard, D., 1982: Motion in the interiors and atmospheres of Jupiter and Saturn Scale analysis, anelastic equations, barotropic stability criterion, Icarus, 52, pp.62-80.

参考文献

- Lorenzen, W., et al., 2009: Demixing of Hydrogen and Helium at Megabar Pressures, Phys.Rev.Lett., 102(11), 115701.
- Lorenzen, W., et al., 2011: Metallization in hydrogen-helium mixtures, Phys.Rev.B, 84(23), 235109.
- Militzer, B., Ceperley, D. M., 2001: Path integral Monte Carlo simulation of the low-density hydrogen plasma. Phys Rev E, 63(6), 066404.
- Militzer, B., Wilson, H. F., 2010: New Phases of Water Ice Predicted at Megabar Pressures, Phys.Rev.Lett., 105(19), 195701.
- Morales, M. A., et al., 2009: Phase separation in hydrogen-helium mixtures at Mbar pressures, Proceedings of the National Academy of Science, 106(5), pp.1324.
- Nellis, W. J., et al., 1999: Minimum metallic conductivity of fluid hydrogen at 140 GPa (1.4 Mbar), Phys.Rev.B, 59(5), pp.3434-3449.
- Nettelmann, N., et al., 2012: Jupiter Models with Improved Ab Initio Hydrogen Equation of State (H-REOS.2), ApJ, 750(1),10pp.

参考文献

- Niemann, H. B., et al., 1996: The Galileo Probe Mass Spectrometer: Composition of Jupiter's Atmosphere, Science, Vol. 272, Issue 5263, pp. 846-849.
- Podolak, M., Helled, R., 2012: What Do We Really Know about Uranus and Neptune?, ApJL, 759(2), pp.L32.
- Saumon, D.; Chabrier, G. 1992: Fluid hydrogen at high density Pressure ionization, Phys.Rev.A, 46(4), pp.2048-2100.
- Stevenson, D. J., Salpeter, E. E., 1977: The dynamics and helium distribution in hydrogen-helium fluid planets, ApJS, 35, pp.239-261.
- Stevenson, D. J., 1986: The Uranus-Neptune Dichotomy: the Role of Giant Impacts, LUNAR AND PLANETARY SCIENCE, 17, pp.1011-1012.
- Umemoto, K., et al., 2006: Dissociation of MgSiO₃ in the Cores of Gas Giants and Terrestrial Exoplanets, Science, Vol. 311, Issue 5763, pp. 983-986.

参考文献

- von Zahn, U. et al., 2000: The ALOMAR Rayleigh/Mie/Raman lidar: objectives, configuration, and performance, Ann. Geophys., 18(7) pp.815-833.
- Vorberger, J., et al., 2007: Properties of Dense Fluid Hydrogen and Helium in Giant Gas Planets, Contrib.Plasma.Phys., 47, pp.375-380.
- Weir, S. T., 1996: Metallization of Fluid Molecular Hydrogen at 140 GPa (1.4 Mbar), Phys. Rev. Lett., 76 11 pp.1860-1863.
- Wigner, E., Huntington, H. B. 1935: On the Possibility of a Metallic Modification of Hydrogen, JChPh, 3, pp.764-770.
- Wilson, H. F. and Militzer, B., 2011: Erosion of rocky cores in giant gas planets, AGU Fall Meeting 2011 abstract, #P21C-1681.