

**ドップラー振動撮像装置を用いた
木星自由振動観測
内部構造と起源の解明に向けて**

生駒 大洋

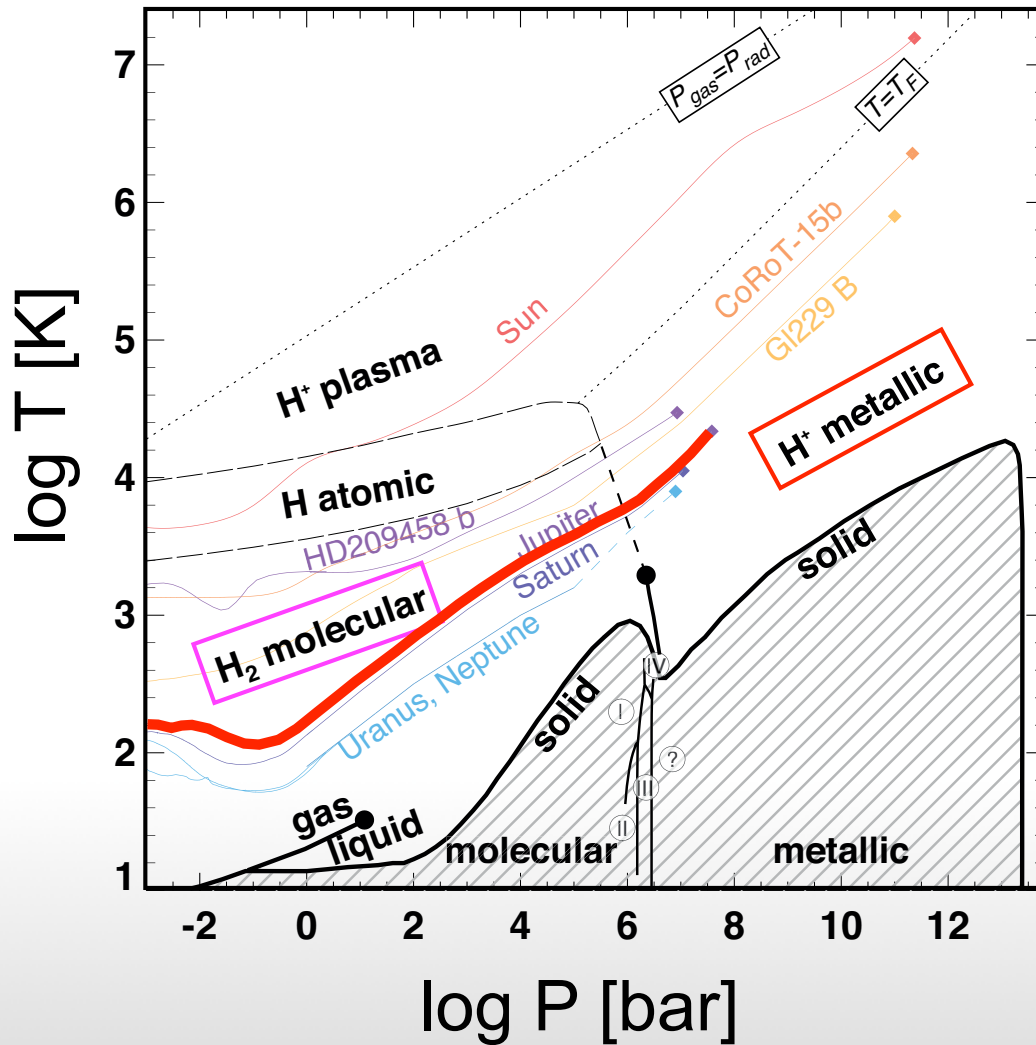
東京大学大学院理学系研究科

共同研究者：佐藤文衛，井田茂 (東工大)， T. Guillot (OCA)

JOVIAL チーム

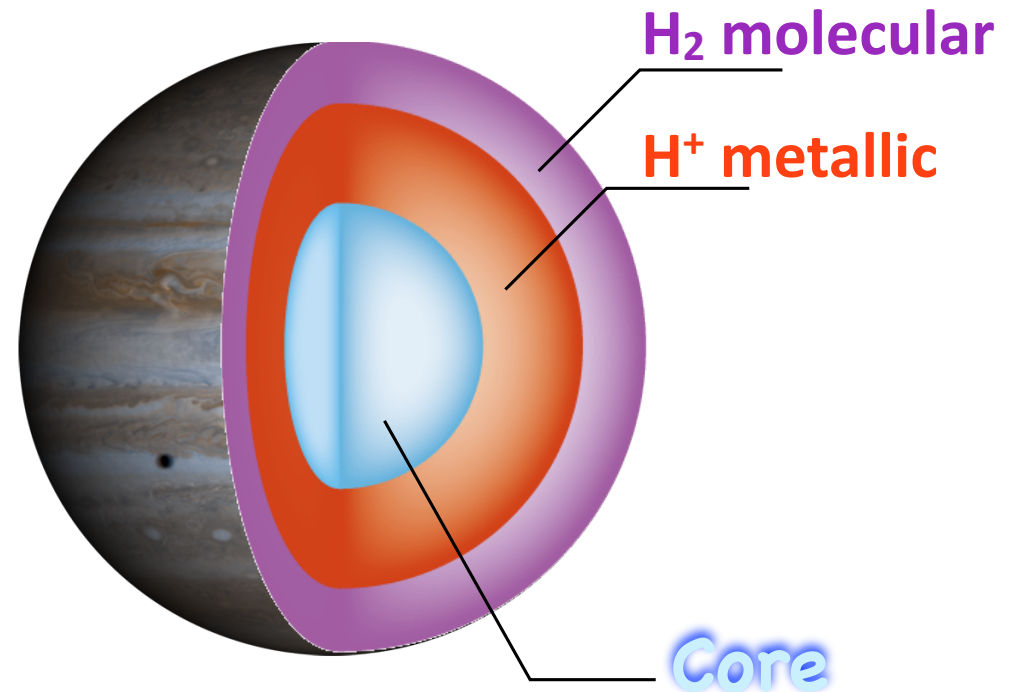
木星内部構造

Phase Diagram of Hydrogen & T-P profile in Jupiter's envelope



Envelope

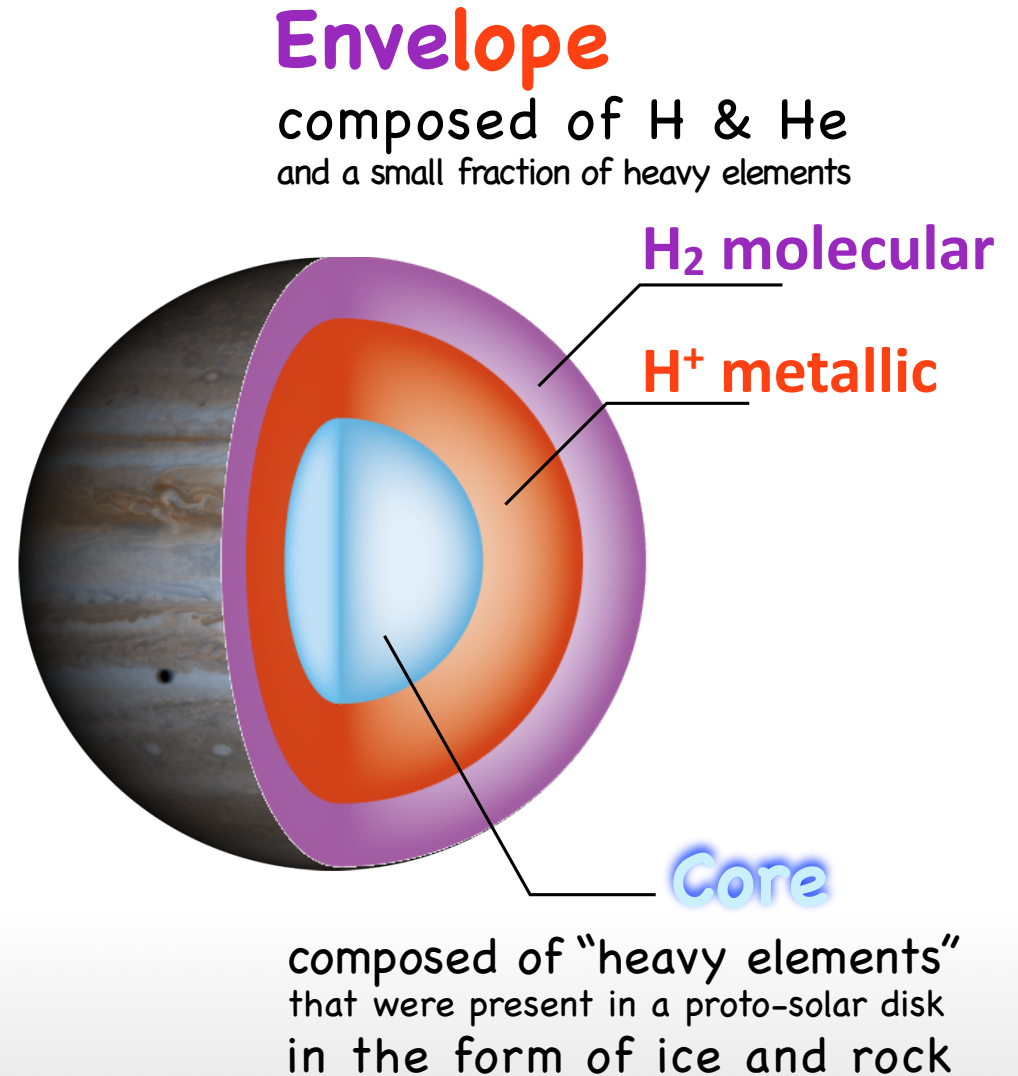
composed of H & He and a small fraction of heavy elements



composed of "heavy elements" that were present in a proto-solar disk in the form of ice and rock

木星内部の不明な点

- 中心に高密度コアは存在するの
か？その大きさは？
- コアとエンベロープに明確な境
界は存在するの？
- エンベロープに重元素はどの程
度含まれているの？また、分
布は一様なの？
- 分子/金属水素層境界の深さは？
また、遷移は不連続なの？
- 水素とヘリウムの分布に偏りは
あるの？



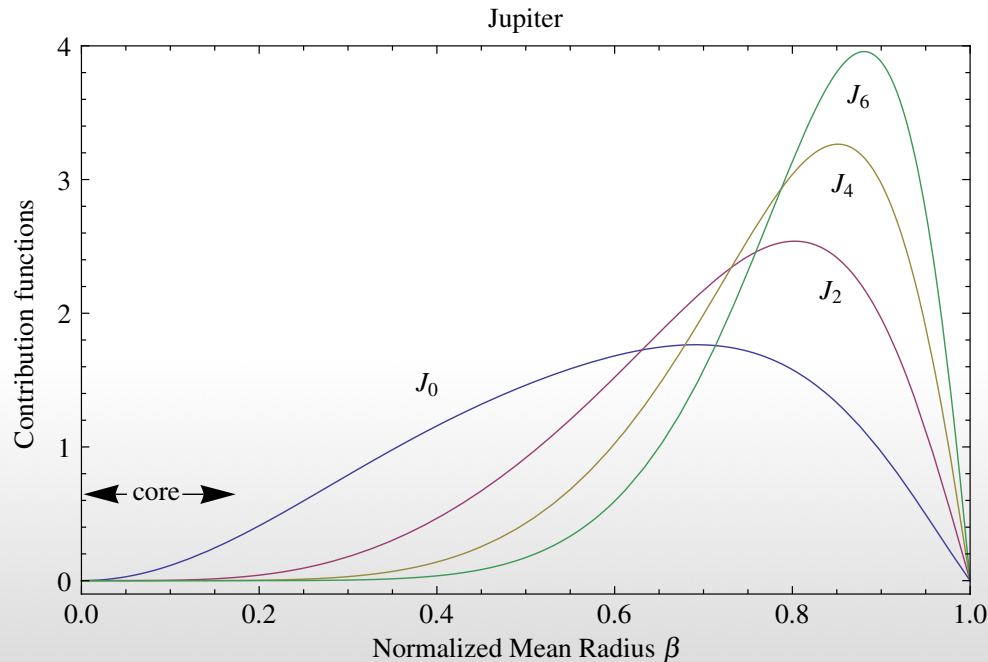
従来の内部構造の推定法

重力ポテンシャル ◀ 観測

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

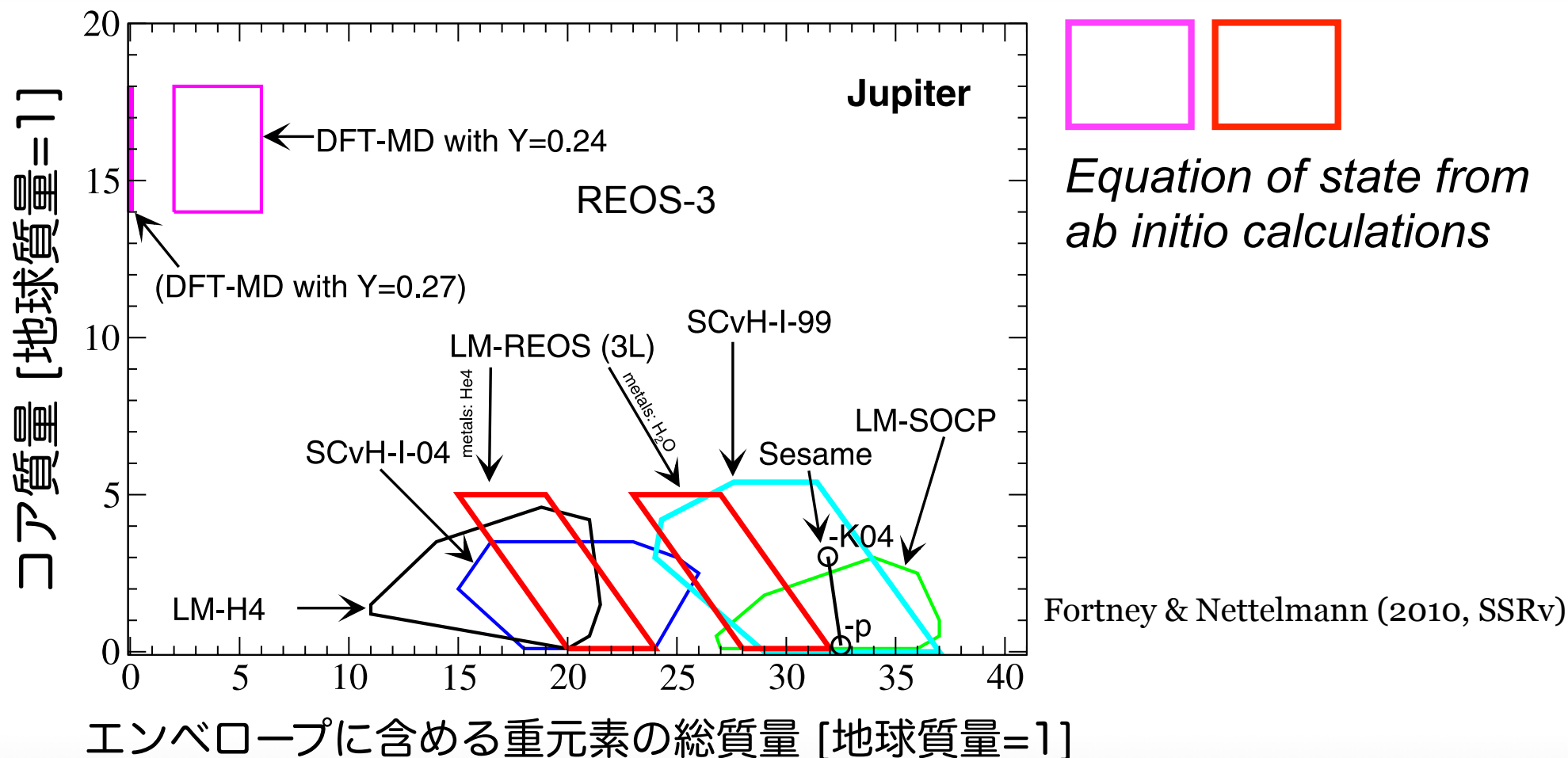
重力モーメント

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



- 重力モーメントと整合的な内部密度分布を理論的に決定する
- エンベロープの浅い部分の構造に敏感で、**深部の情報は取れない**
- 超高压の物性に大きく依存する

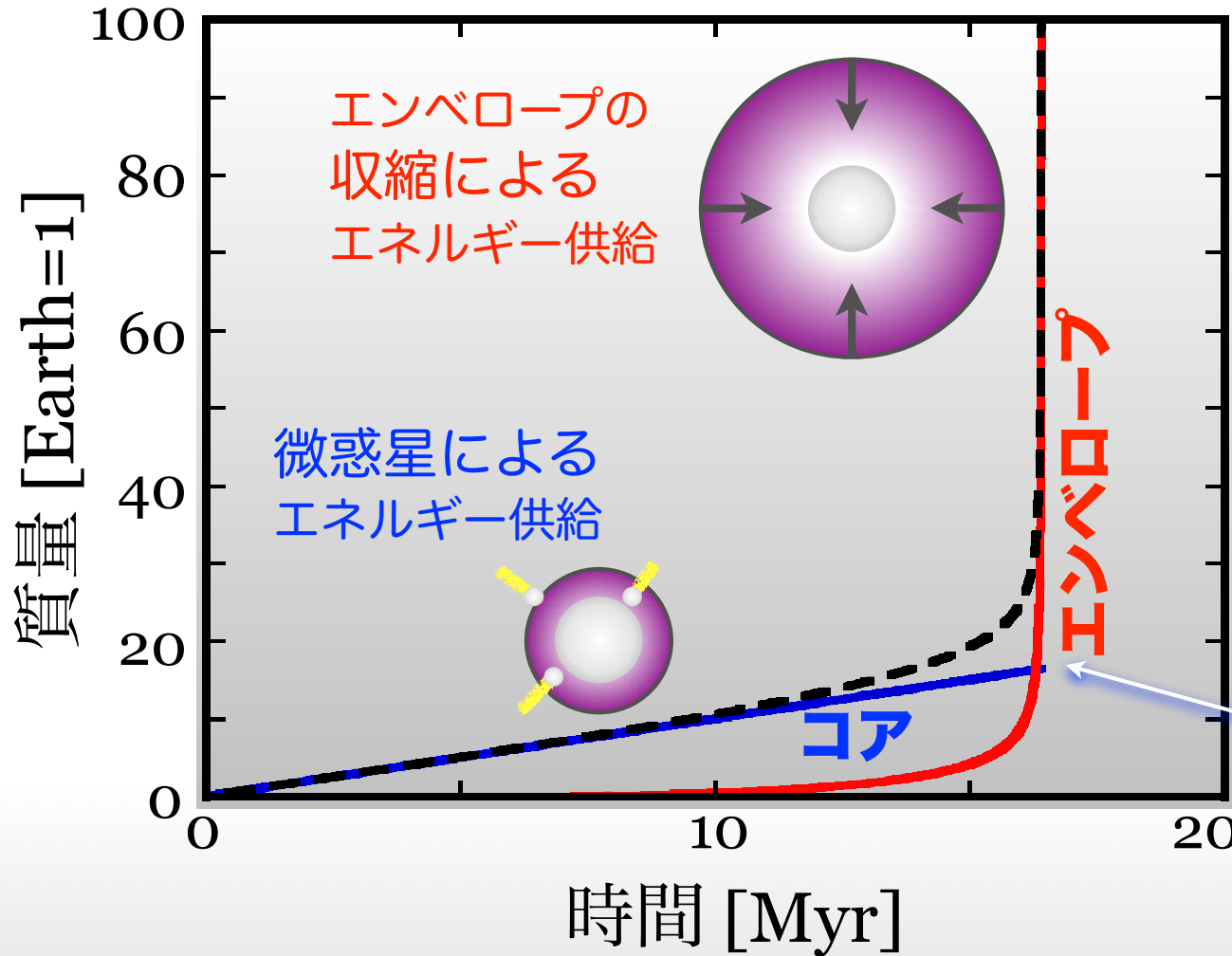
従来の内部構造の推定法：コア質量



- コア質量に大きな不定性あり
- エンベロープに含まれる重元素量にも大きな不定性

木星型惑星形成モデル

Ikoma, Nakazawa & Emori (2000, ApJ)



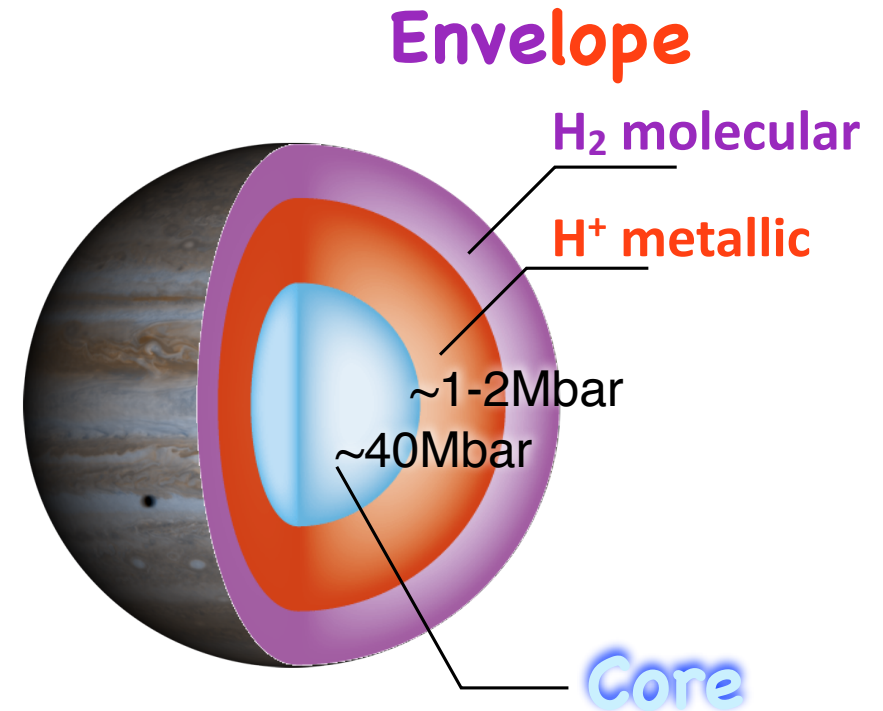
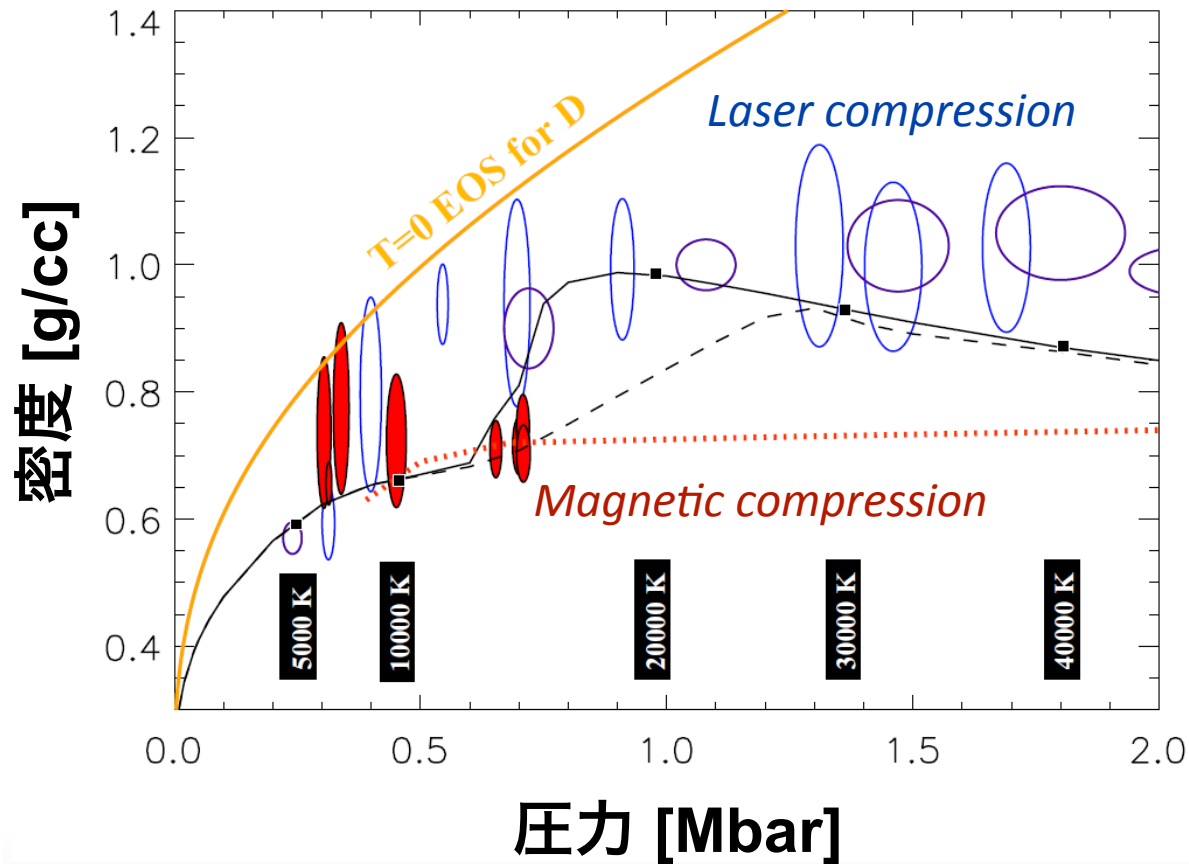
二段階集積

- 1) 微惑星の集積によってコアが成長し、臨界コア質量に到達する
- 2) 円盤ガスの獲得が暴走的に起きる

木星形成過程の解明には**コア質量が鍵**となる

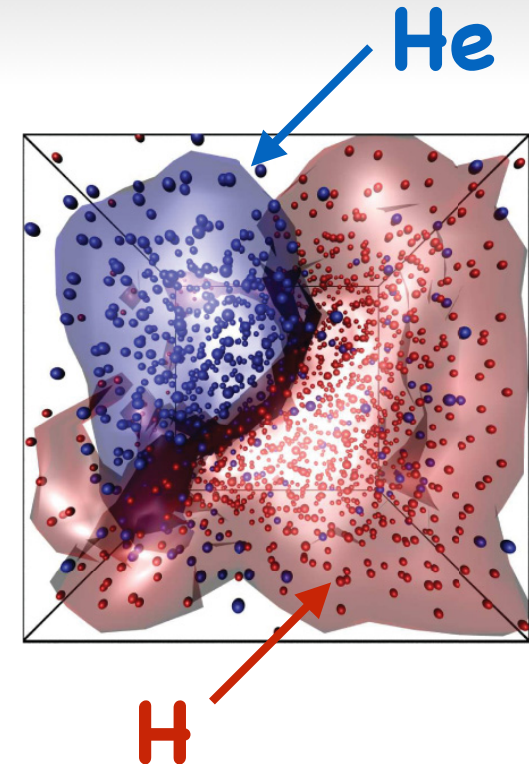
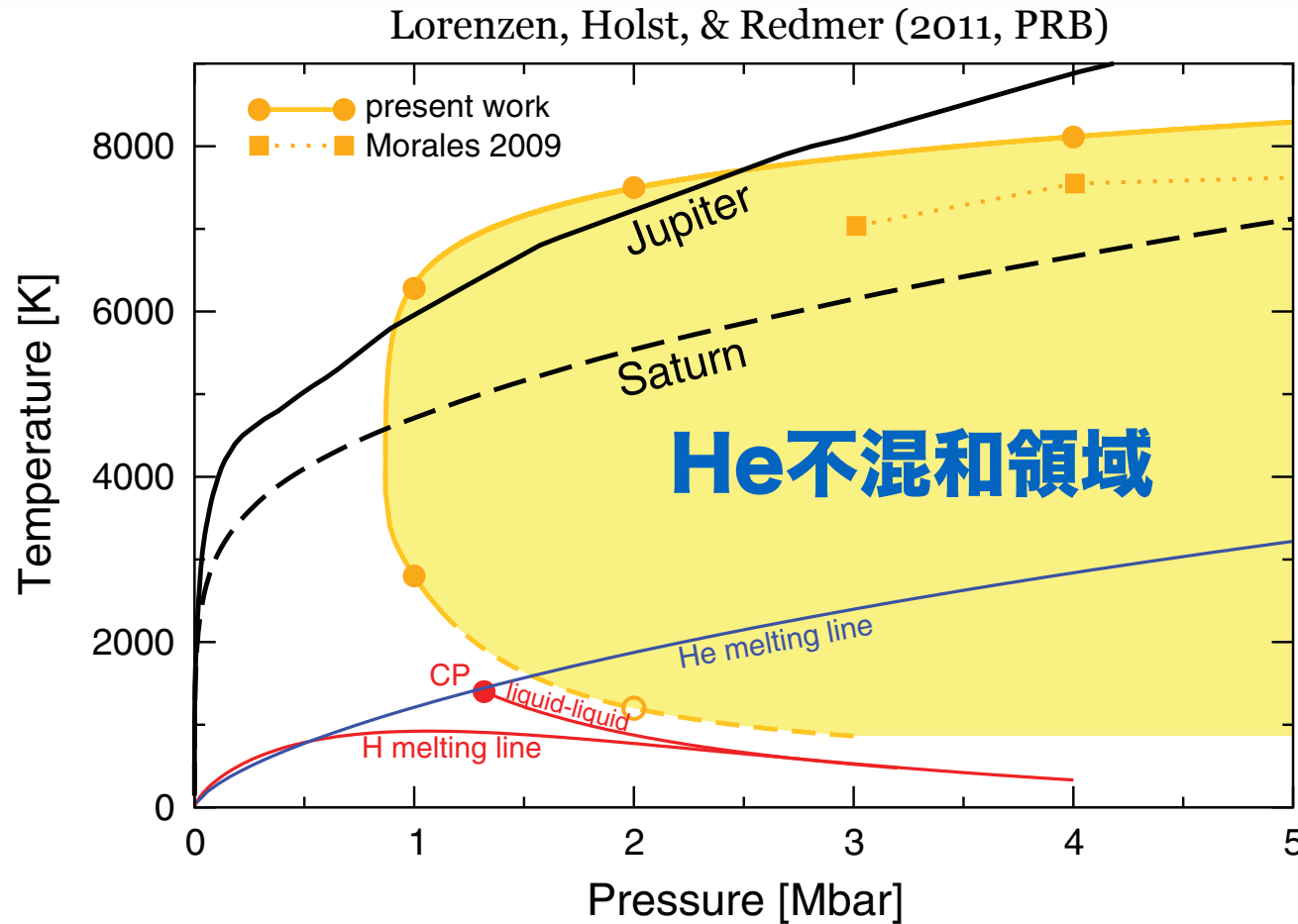
超高压物性の不明点

Fig. from Guillot et al. (2004)



分子水素 → 金属水素への転移の仕方および場所が不明

超高压物性の不明点



● **ヘリウム不混和層**は本当に存在するのか？

● **ヘリウム分離**はどのように進行するのか？

→ 惑星放射量や年齢の問題と関係

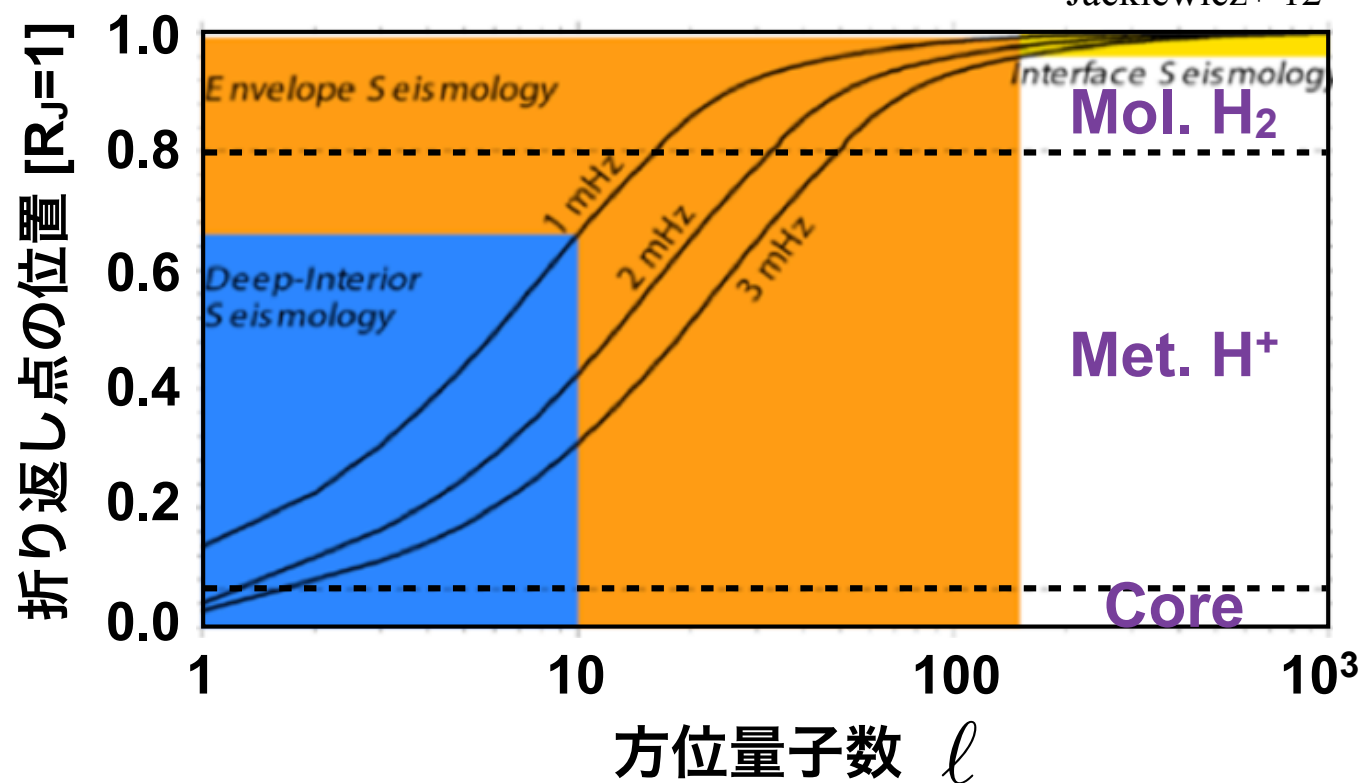
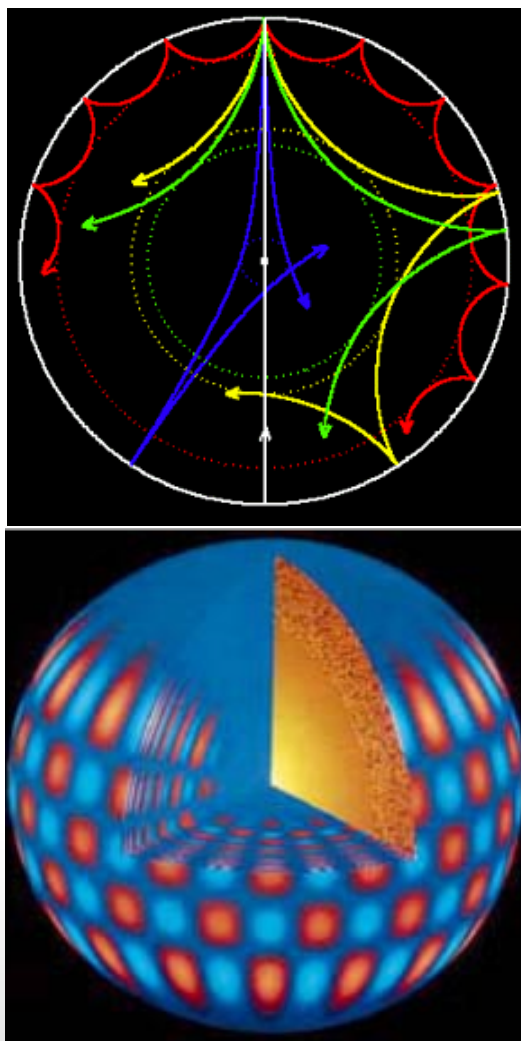


内部をもっと直接見たい

日震学/星震学を木星に応用

「木震学」

Jackiewicz+ 12

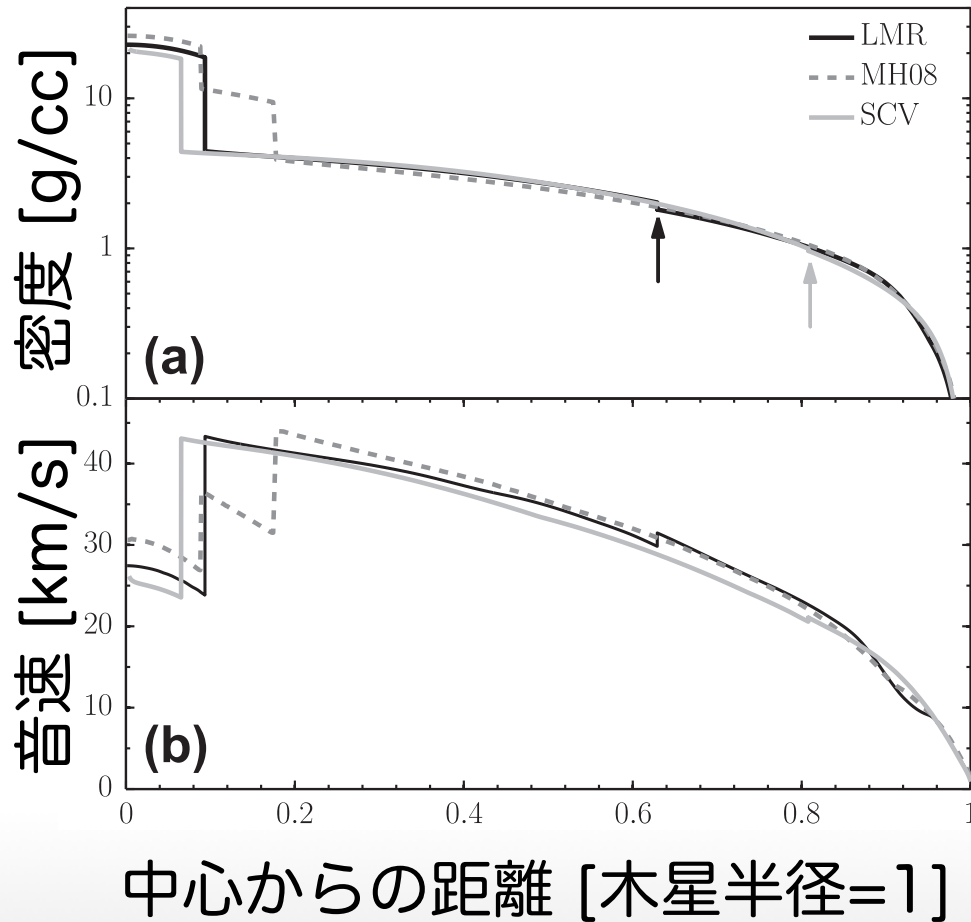


折返点の位置・音速と方位量子数の関係

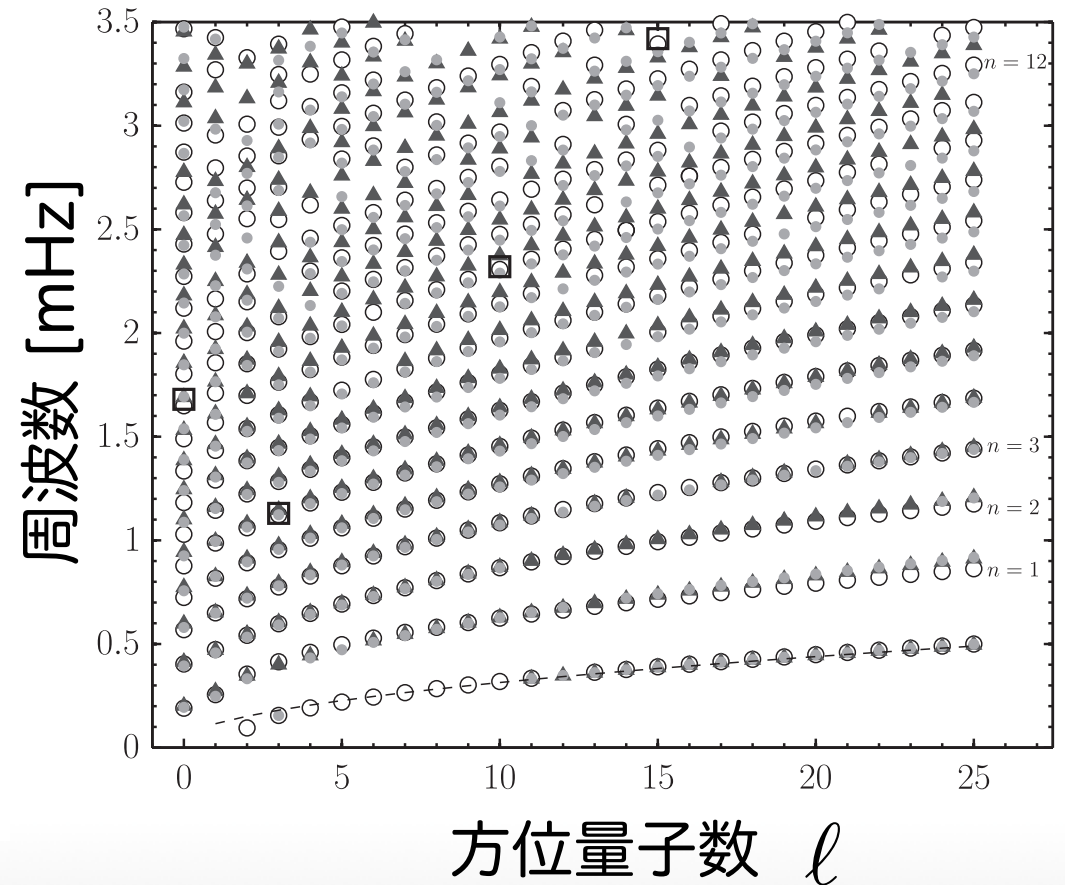
$$\frac{c_s^2(r_t)}{r_t^2} = \frac{4\pi^2\nu^2}{l(l+1)}$$

木震学：理論モデル

内部構造の計算結果



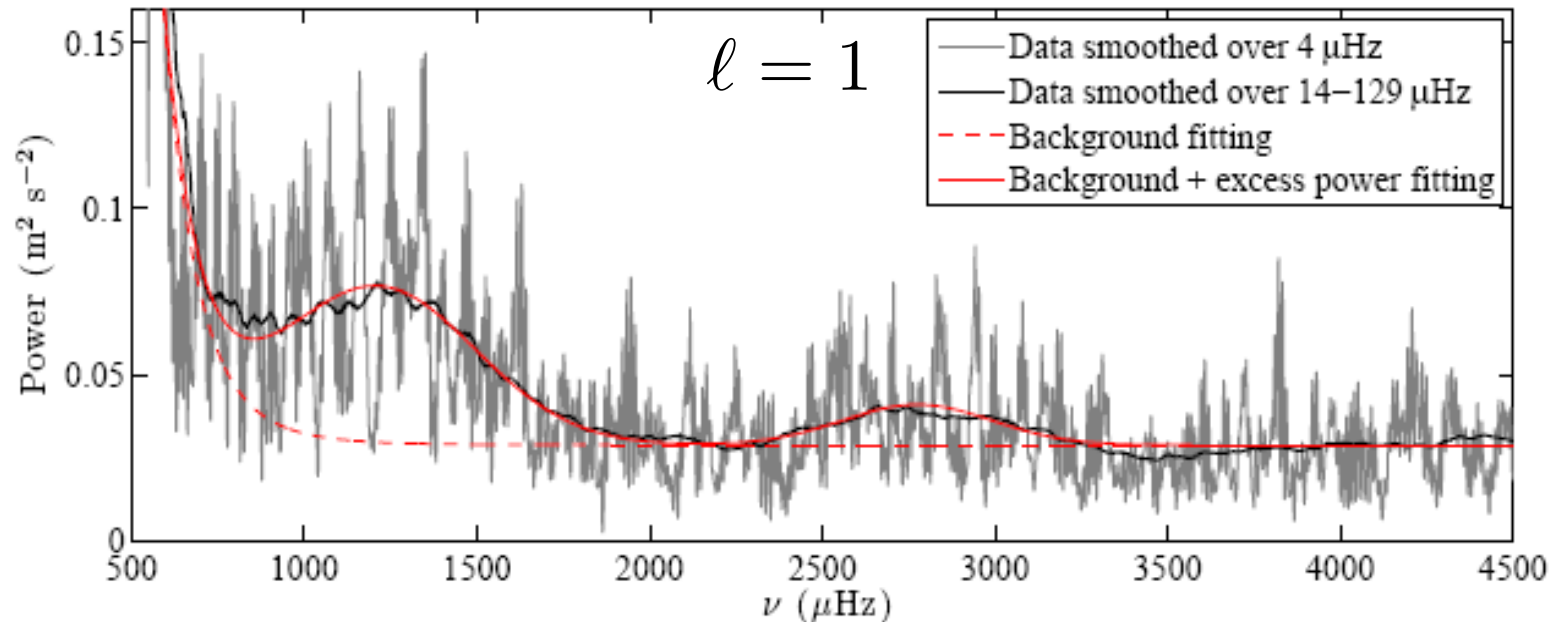
方位量子数と振動数の関係



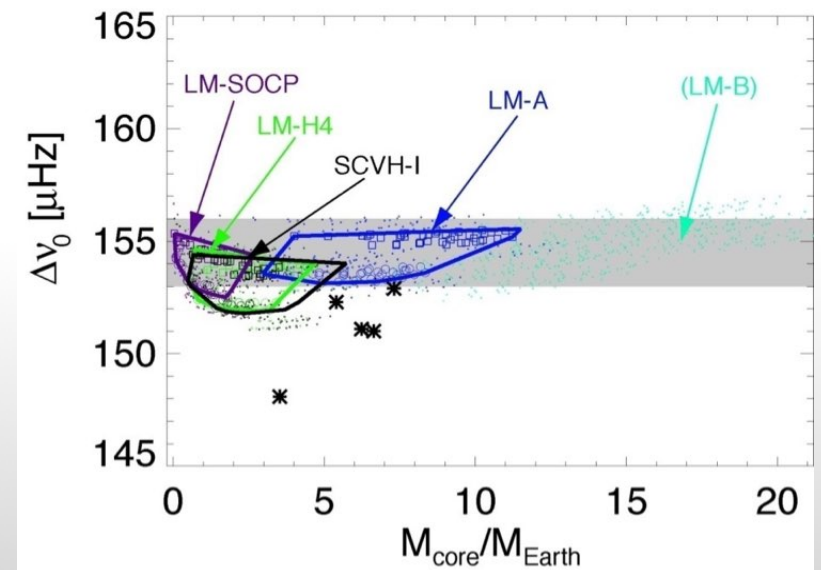
SYMPA Project

Seismographic Imaging Interferometer for Monitoring Planetary Atmospheres

Gaulme+ 2011



- 800-3000 μHz に強度過剰
- 振幅 $30\text{cm/s} \pm 10\text{cm/s}$ のピークが約20個
- ピーク振動数間隔
 $\Delta\nu_0 = 154.5 \mu\text{Hz} \pm 1.5 \mu\text{Hz}$
→内部構造モデルと整合的



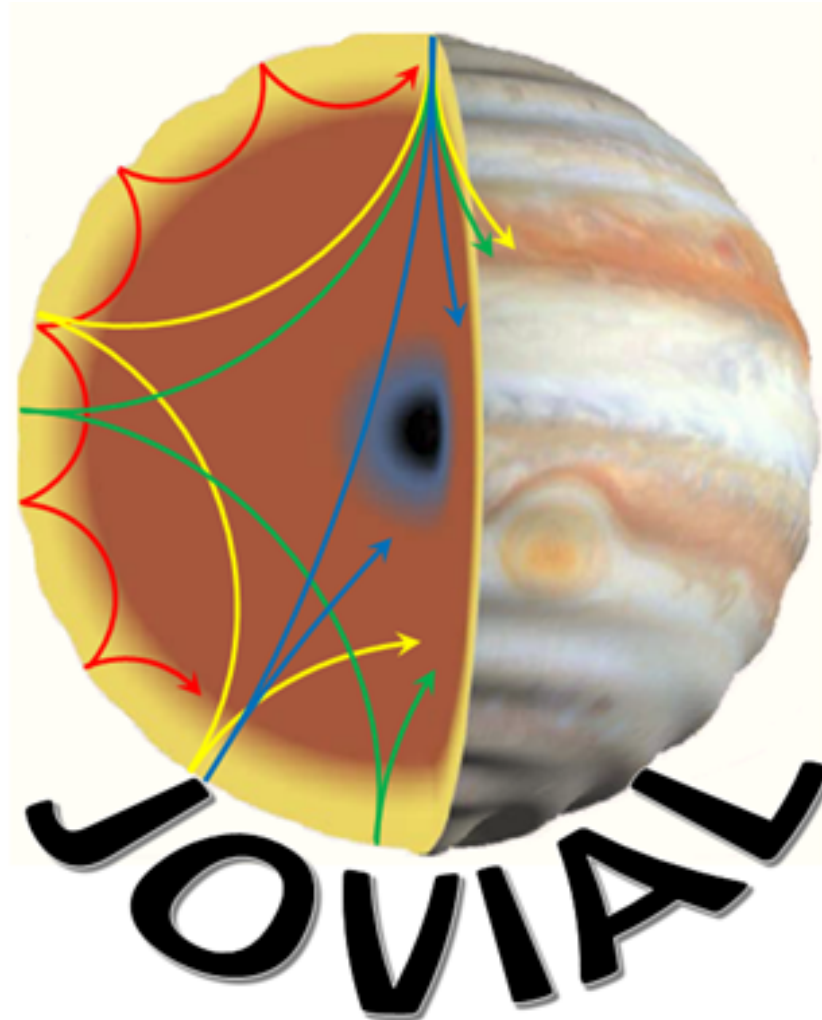


Observatoire
de la CÔTE d'AZUR

AGENCE NATIONALE DE LA RECHERCHE
ANR



NM
STATE
UNIVERSITY



Jovian Oscillations through radial Velocimetry ImAging observations at several Longitudes

JOVIAL ネットワーク

Goal: Simultaneous observations from 3 sites
Target: Duty-cycle > 50 % over two weeks



Observatoire de Calern (France)

2015

- C2PU: 1 m telescope with DSI prototype

New Mexico (USA)

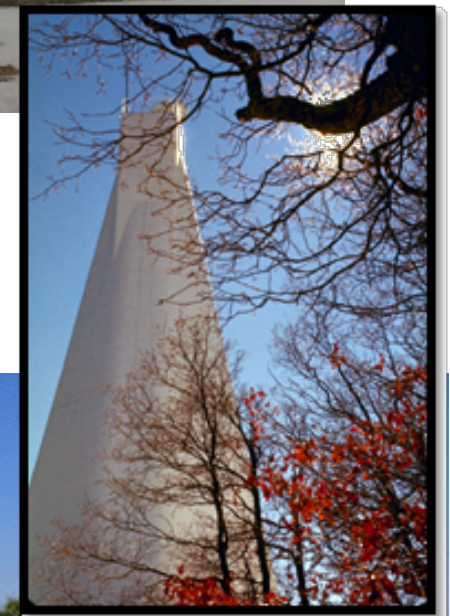
2017

- Dunn Solar telescope (Sacramento Peak)

Okayama Observatory (Japan)

2018

- 1.88 m telescope
- Backup: Ishigaki observatory (1m telescope)



The JOVIAL Team

| Organisation | Last name | First name | Current position | Involvement (Man-Month) | Contribution to the project |
|-----------------------------------|-------------|-----------------|------------------------|-------------------------|---|
| Laboratoire Lagrange | Schmider | François-Xavier | Directeur de Recherche | 24 | Principal Investigator |
| Laboratoire Lagrange | Guillot | Tristan | Directeur de Recherche | 12 | Science Team Leader, Internal structure and evolution model |
| Laboratoire Lagrange | Goncalves | Ivan | Doctorant | 18 | Data processing |
| Laboratoire Lagrange | Mekarnia | Djamel | Chargé de Recherche | 6 | Observation and data processing |
| Laboratoire Lagrange | Bresson | Yves | Ingénieur d'Etudes | 10 | Optical studies, tests |
| Laboratoire Lagrange | Preis | Olivier | Ingénieur d'Etudes | 12 | Project Manager |
| Laboratoire Lagrange | Dejonghe | Julien | Ingénieur d'Etudes | 12 | Mechanical studies and integration |
| Institut d'Astrophysique Spatiale | Appourchaux | Thierry | Directeur de Recherche | 24 | Partner n°2 Leader Data analysis |
| Institut d'Astrophysique Spatiale | Baudin | Frédéric | Astronome | 10 | Data analysis |
| Institut d'Astrophysique Spatiale | Boumier | Patrick | Chargé de Recherche | 6 | Instrumental expertise |
| Institut d'Astrophysique Spatiale | Le Clec'h | Jean-Christophe | Ingénieur d'Etudes | 4 | Thermal control study |
| Institut d'Astrophysique Spatiale | Morinaud | Gilles | Ingénieur de Recherche | 4 | Vacuum tank study |
| Institut d'Astrophysique Spatiale | Ballans | Hervé | Ingénieur de Recherche | 12 | Data analysis and archiving |
| NMSU | Gaulme | Patrick | Astronome | 9 | Commissioning and operation |
| NMSU | Jackiewicz | Jason | Professor | 9 | Seismic model |
| NMSU | Voelz | David | Professor | 6 | Optical interface |
| NMSU | Underwood | Tom | PHD student | 12 | Instrument control software |
| Tokyo Inst. Of Technology | Sato | Bu'nei | Associate Professor | 6 | Coordination of the Okayama observations |
| Tokyo Inst. Of Technology/ELSI | Ida | Shigeru | Full Professor | 4 | Science Interpretation: Solar System formation models |
| University of Tokyo | Ikoma | Masahiro | Associate Professor | 6 | Science Interpretation: Interior models |

観測期間

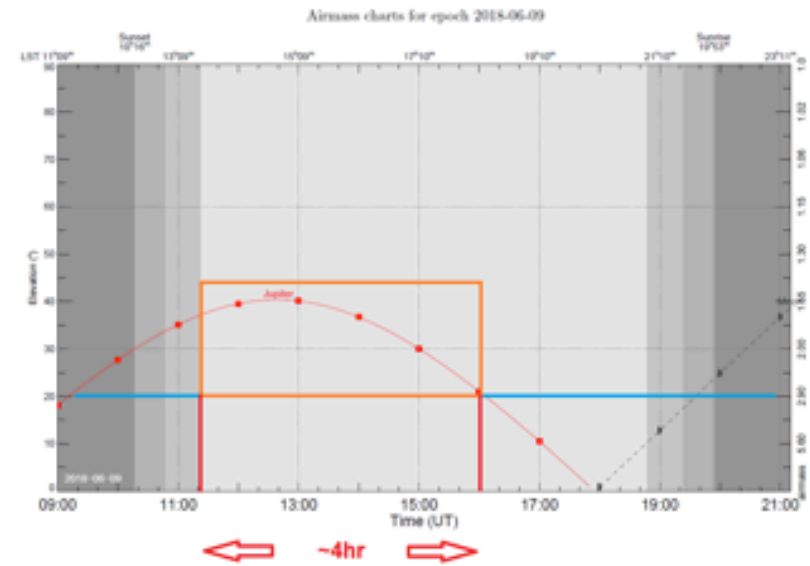
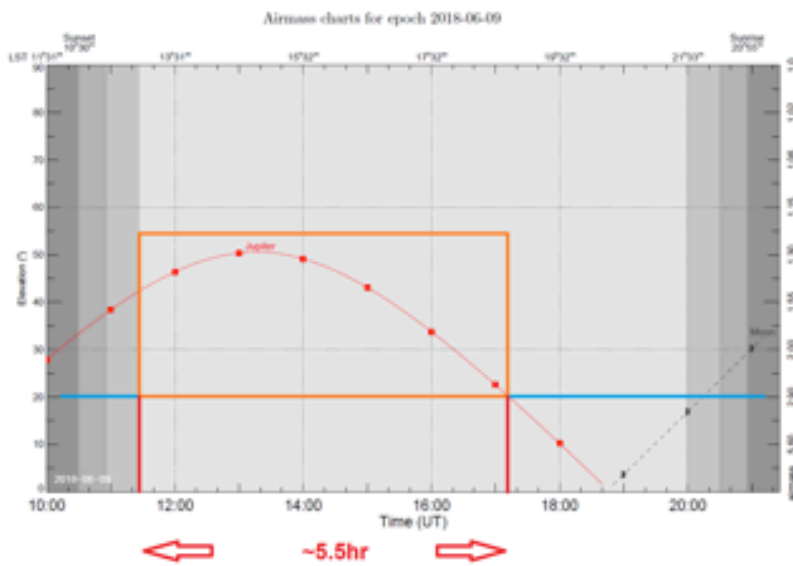
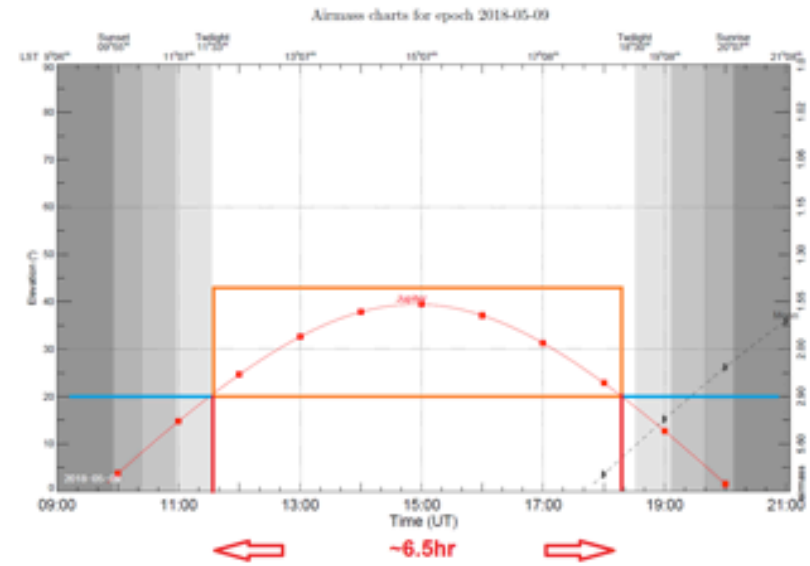
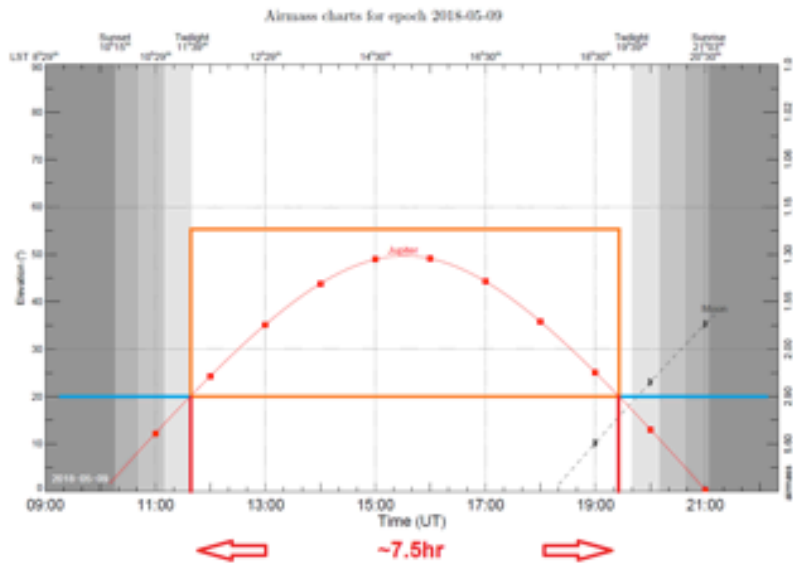
Ishigaki

Okayama

2018

May

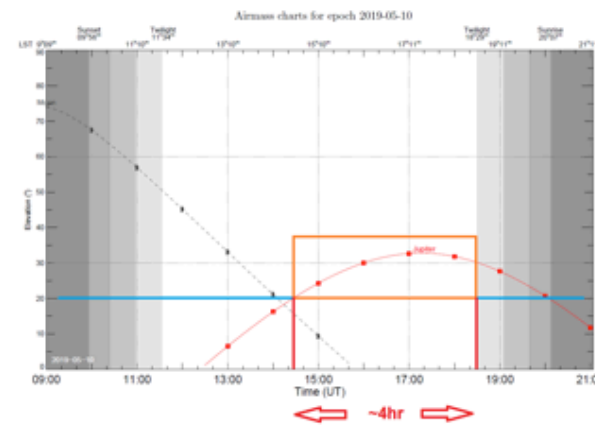
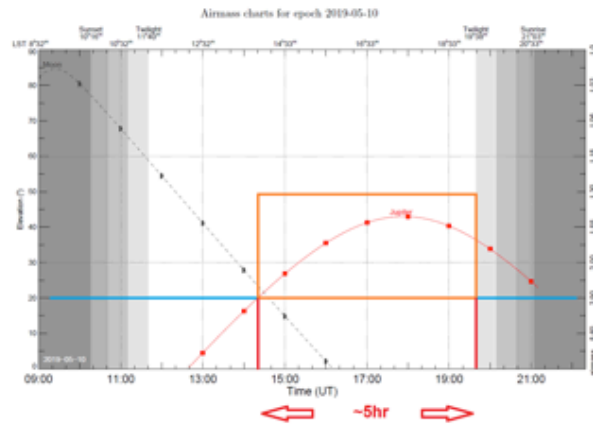
June



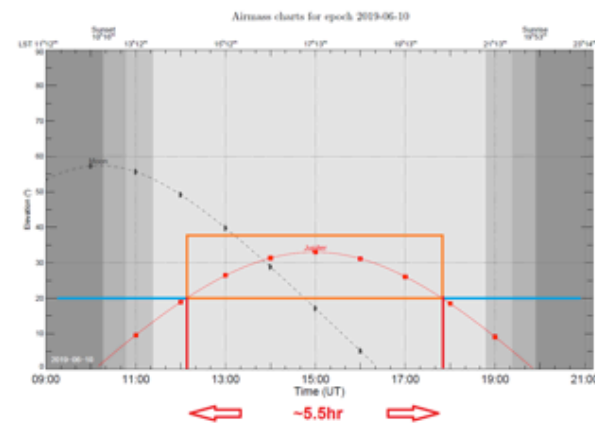
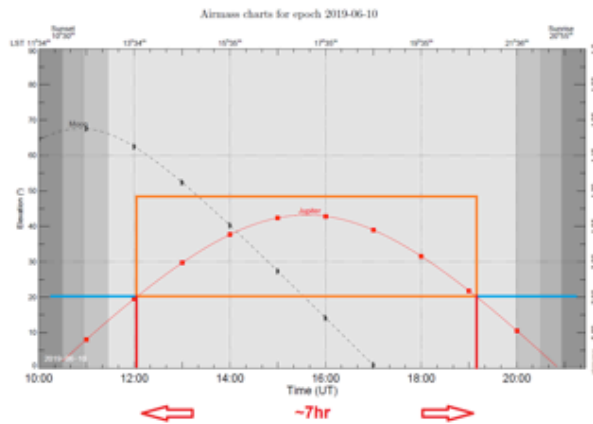
観測期間

2019

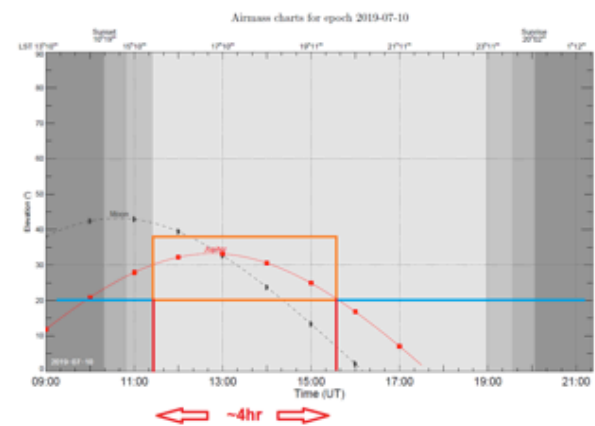
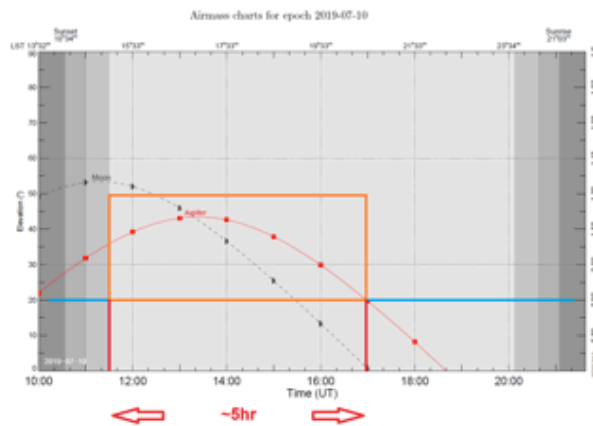
May



June



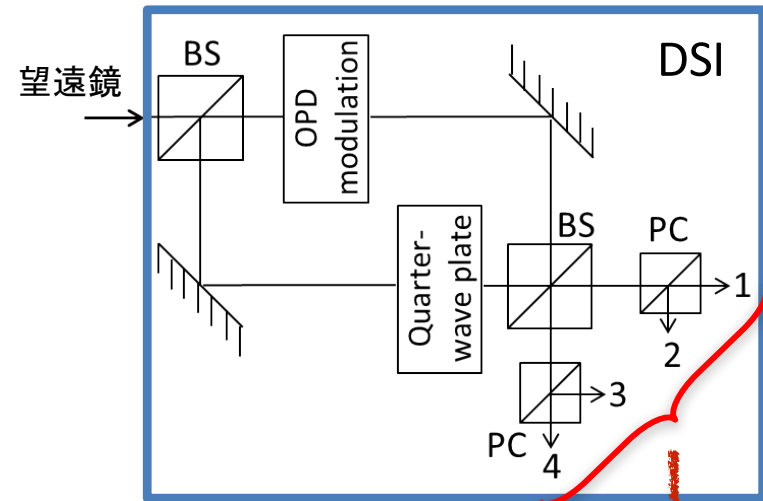
July



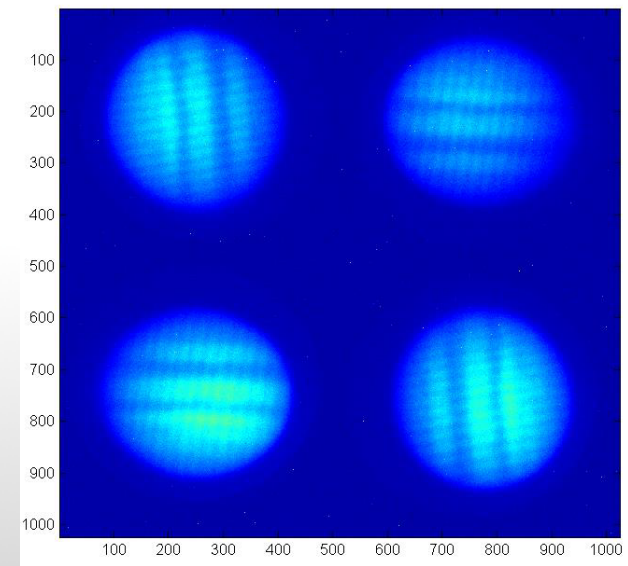
観測装置

Doppler Spectro-Imager (DSI)

- 木星表面で反射された太陽スペクトルのドップラーシフトを測定
- Mach-Zehnder 干渉計
- 位相が90度ずつずれた4つの干渉像から時々刻々の位相変化を測定
 - 木星表面各点の速度変化
- ノイズレベル < 4cm/s in 2 weeks (photon noise)
 - ・ On sky で ~3 cm/s (in 2.5夜) を達成
 - ・ 速度精度は ~ 20m/s/“ in 1h (2014年1月時点)



位相が90度ずつずれた
木星の干渉像



設置予定場所

- クーデ焦点 (クーデ室内)
- HIDESと干渉しないようにする
- 今年7月にフランスチームが
現地視察。泉浦さん・神戸さん
を交えて議論

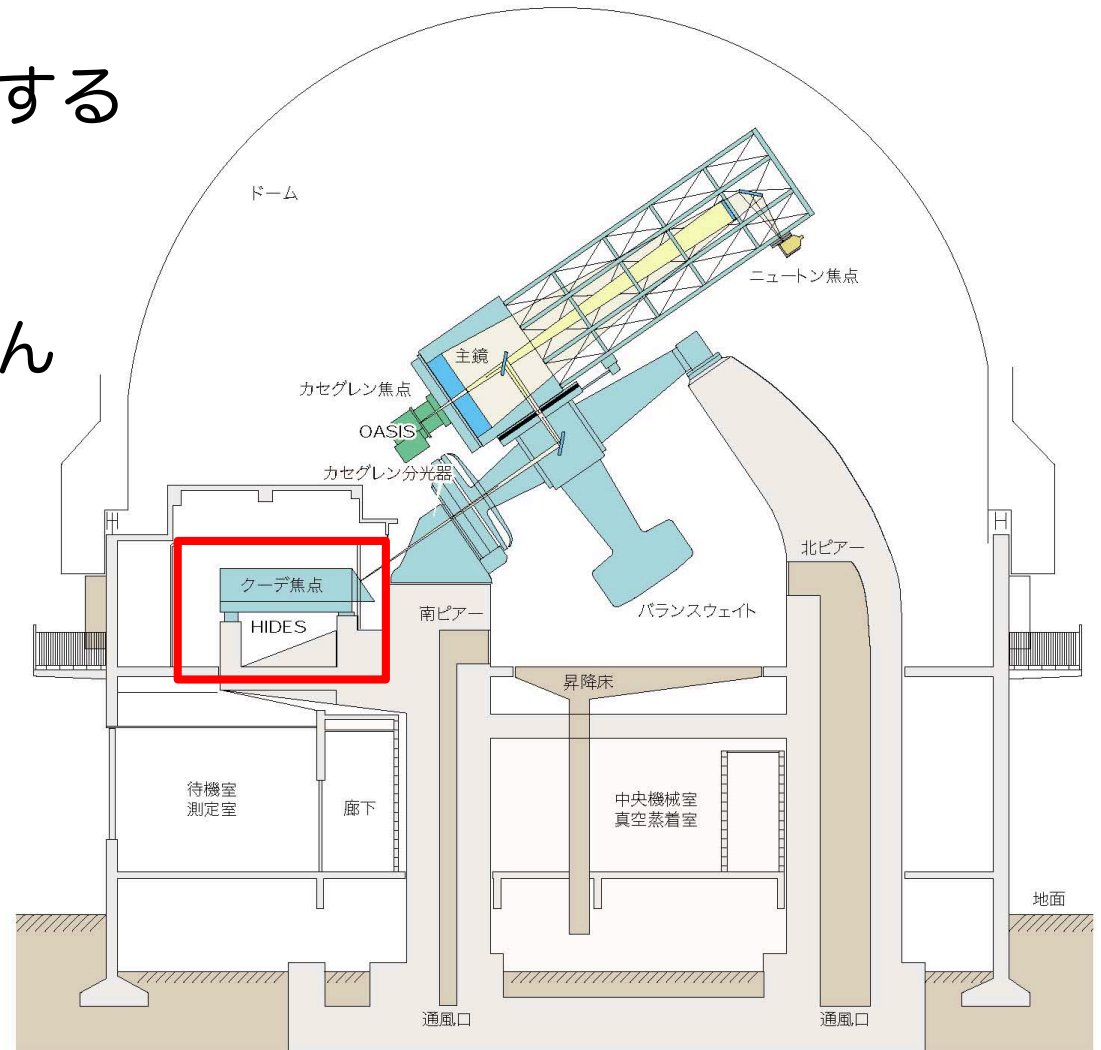


図2-1 188cm反射望遠鏡ドーム概略図

まとめ

- 木星内部の組成分布には不明な点が多く、それが木星の起源・進化の理解を妨げている
- 重力場観測に基づいた現行の内部構造推定法では、深部の情報は取れない
- 星震学の手法を木星に適用すること(木震学)で、深部の組成情報を得ることが出来る
- 188cmを用いたネットワーク観測(JOVIAL)を提案したい