

スーパーコンピュータ による宇宙天気予報

深沢圭一郎^{1, 2, 3}

1. 九州大学情報基盤研究開発センター
2. 九州大学宙空環境研究センター
3. CREST, JST

2011年12月17日

本日の話の内容

1. 宇宙天気とは？

- 宇宙天気の影響
- 宇宙天気が変わる原因

2. 地球の宇宙天気シミュレーション

3. 木星の宇宙天気シミュレーション

- 周期的なプラズマ塊の観測結果とシミュレーションによる再現

4. 土星の宇宙天気シミュレーション

- 渦構造とオーロラの関係

5. まとめ

宇宙(空間)とはどこを指す？

◆月の辺りは宇宙？



◆スペースシャトルは宇宙を飛んでいる？



◆国際宇宙ステーション(きぼう)は宇宙にある？



◆オーロラは宇宙で光っている？



宇宙は高度で定義

- ◆ 高度100kmより上空が宇宙
- ◆ 月は38万km地球から離れています。
- ◆ 太陽は1億5千万km離れています。
- ◆ 中間圏から上空を電離圏とも言います。

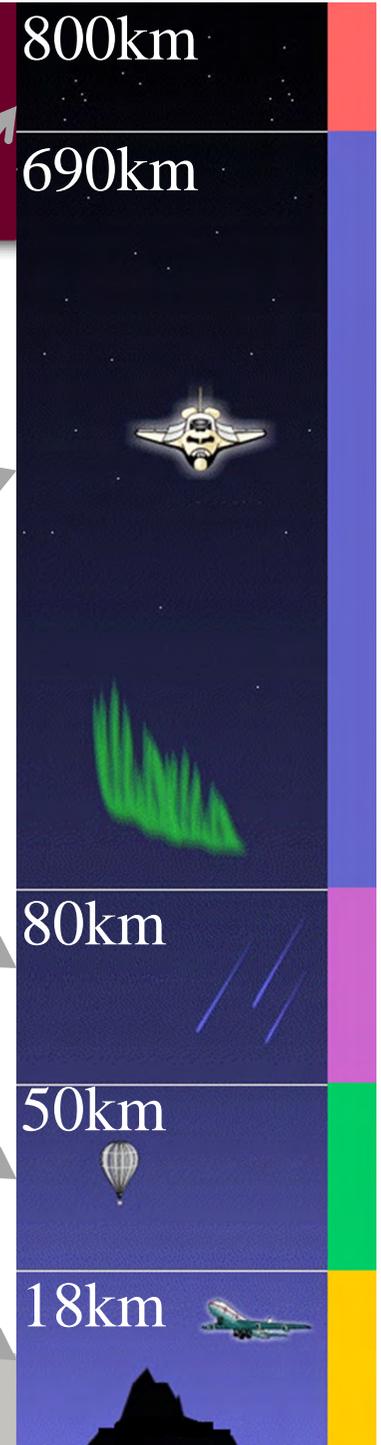
外気圏

熱圏

中間圏

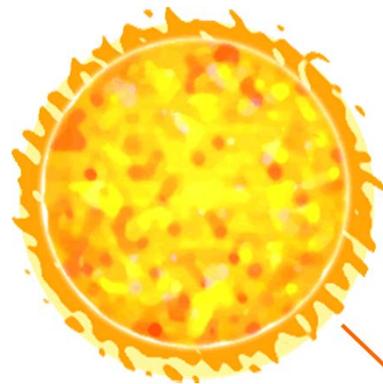
成層圏

対流圏



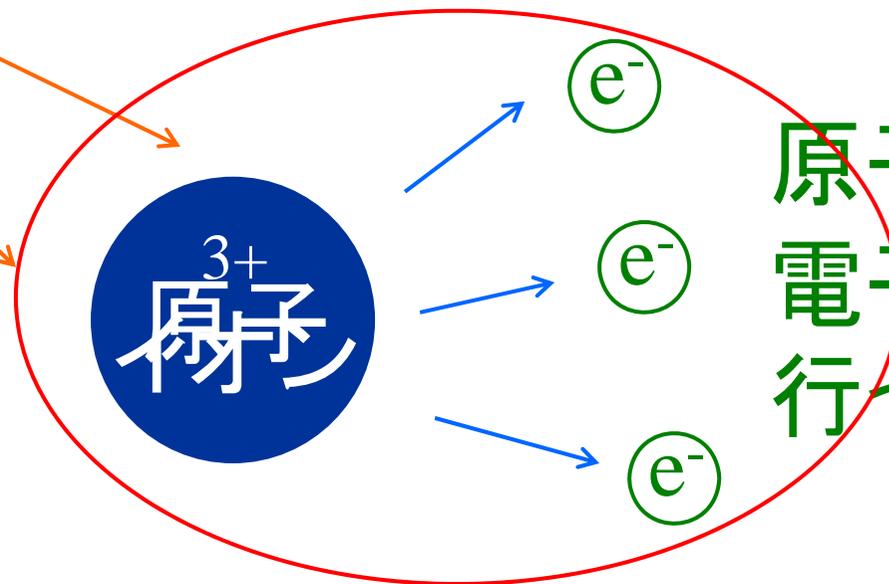
電離、プラズマとは？

◆原子がイオンと電子に分かれること



紫外線・X線などが当たると

電子とイオンが分布している状況をプラズマと呼びます



原子から電子が出て行ってしまふ



なぜ宇宙の予報をするのか

- ◆地上には影響ないだろう
- ◆宇宙飛行士やスペースシャトル向け?
- ◆生活の役に立つのか

実は、思っているより身近なことに影響しています。



ここで、クイズを

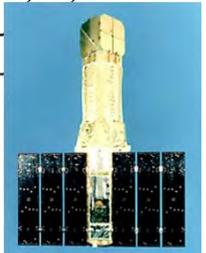
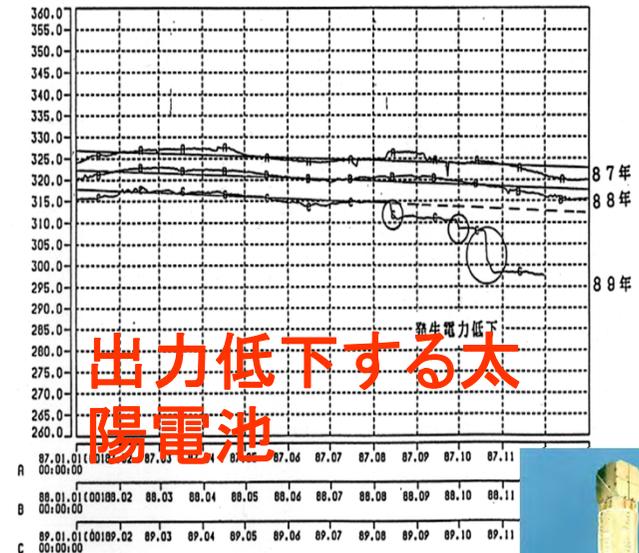
◆宇宙の天気が荒れると、以下のうちどれかが起きることがあります。どれでしょうか。

1. 台風
2. 停電
3. 地震
4. 断水



宇宙天気起因する障害

- ◆ 国際線航空機に用いる短波通信が太陽フレアによるデリンジャ-現象のために通信不能となる。2001年4月には航空機が40分間行方不明になる。
- ◆ 太陽プロトンイベントにより衛星の太陽電池パネル出力が低下したり、衛星の姿勢が不安定になる。
- ◆ 通信衛星が太陽高エネルギー粒子、放射線帯粒子により機能停止した。
- ◆ 2000年7月の電離圏嵐により超高層大気が加熱膨張し衛星ドラッグが増加し、X線天文衛星“あすか”の姿勢が不安定になった。2001年3月に回復不能で落下。



2001年3月、X線天文衛星「あすか」が姿勢制御不能となり、約4年間のミッションを終了し、大気圏に再突入した。この衛星は、日本の「お家」であるX線天文学に空白が生じることになる。

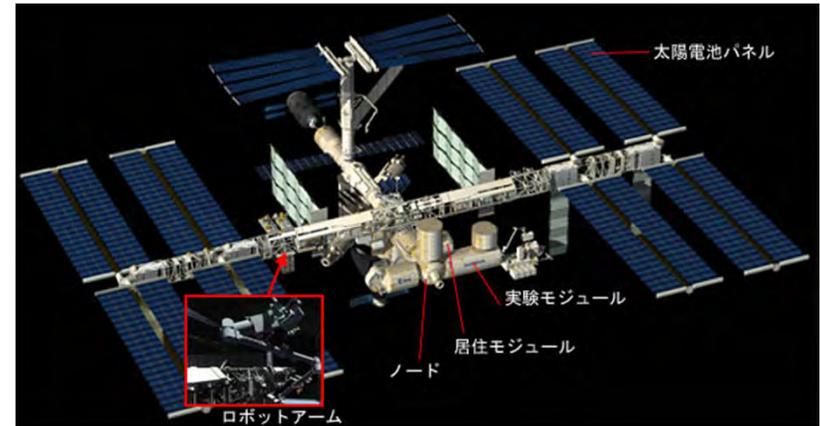
2001年3月、太陽活動の影響で昨年夏から観測不能になっていた文部科学省宇宙科学研究所(宇宙研)のX線天文衛星「あすか」が回復せず、二月末から三月初めの間に落下することが、二十六日明らかになった。次世代の衛星を積んだM5ロケットの打ち上げも昨年二月に失敗しており、次の打ち上げまで約四年間、日本の「お家」であるX線天文学に空白が生じることになる。

あすか 結局落下へ



宇宙天気起因する障害

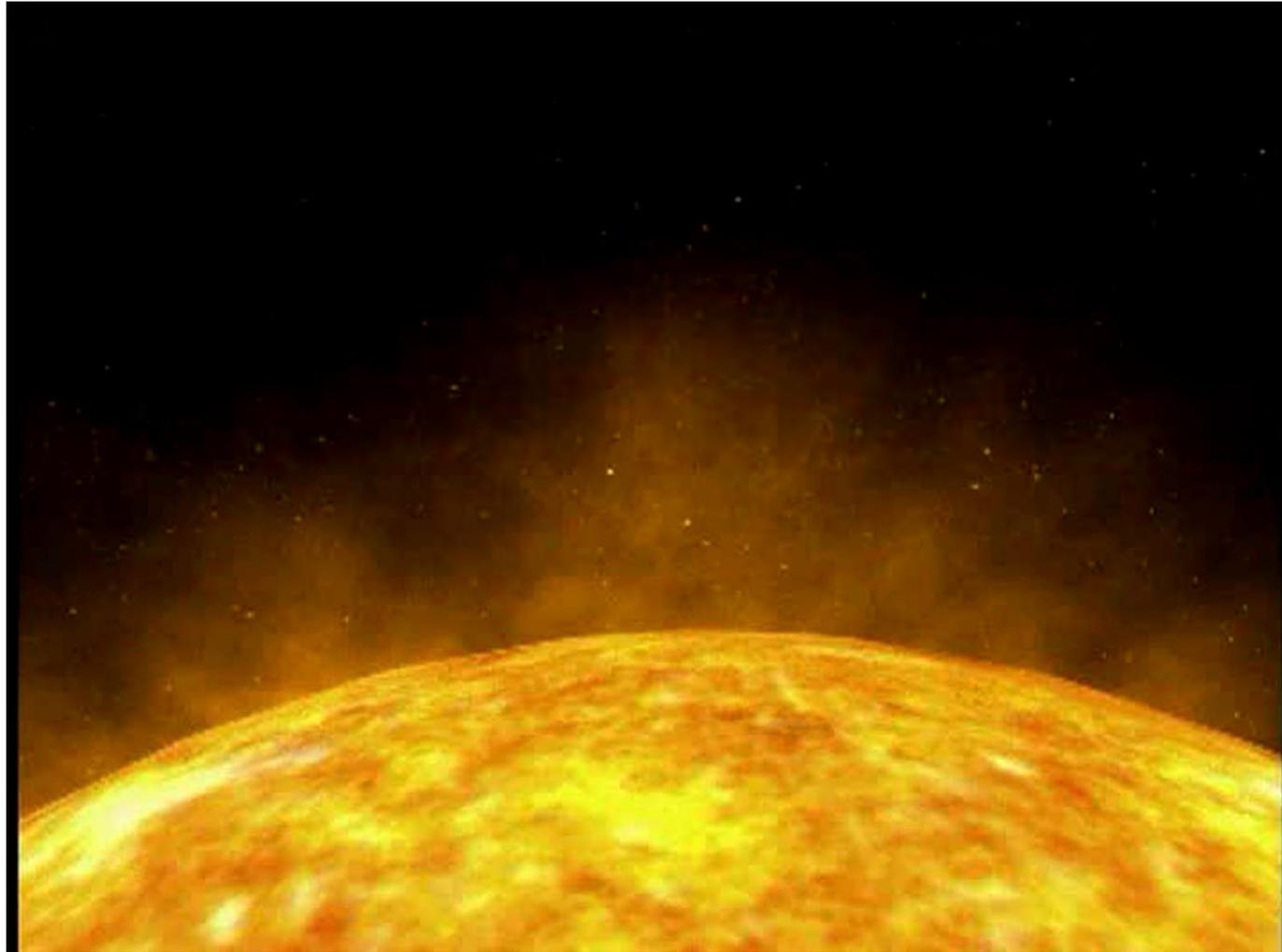
- ◆ 宇宙飛行士や北極回り国際線クルーは放射線被爆の心配があり、安全基準が論議されている。
- ◆ 1989年3月13日、地磁気嵐の誘導電流によりカナダケベック州で9時間にわたり100万人が停電被害を被った。トランスが焼損した。
- ◆ 2002年6月ワールドカップ日本戦でスプラディックE層によるテレビ電波の散乱により画像が乱れた。Es層は6-9月に良く現れる。
- ◆ 衛星電波が電離圏擾乱によってシンチレーションを受け、気象衛星画像劣化や衛星測位(GPS)誤差が発生する。
- ◆ 2010年アメリカの通信衛星Galaxy-15という通信衛星が故障し、静止軌道上を漂流。



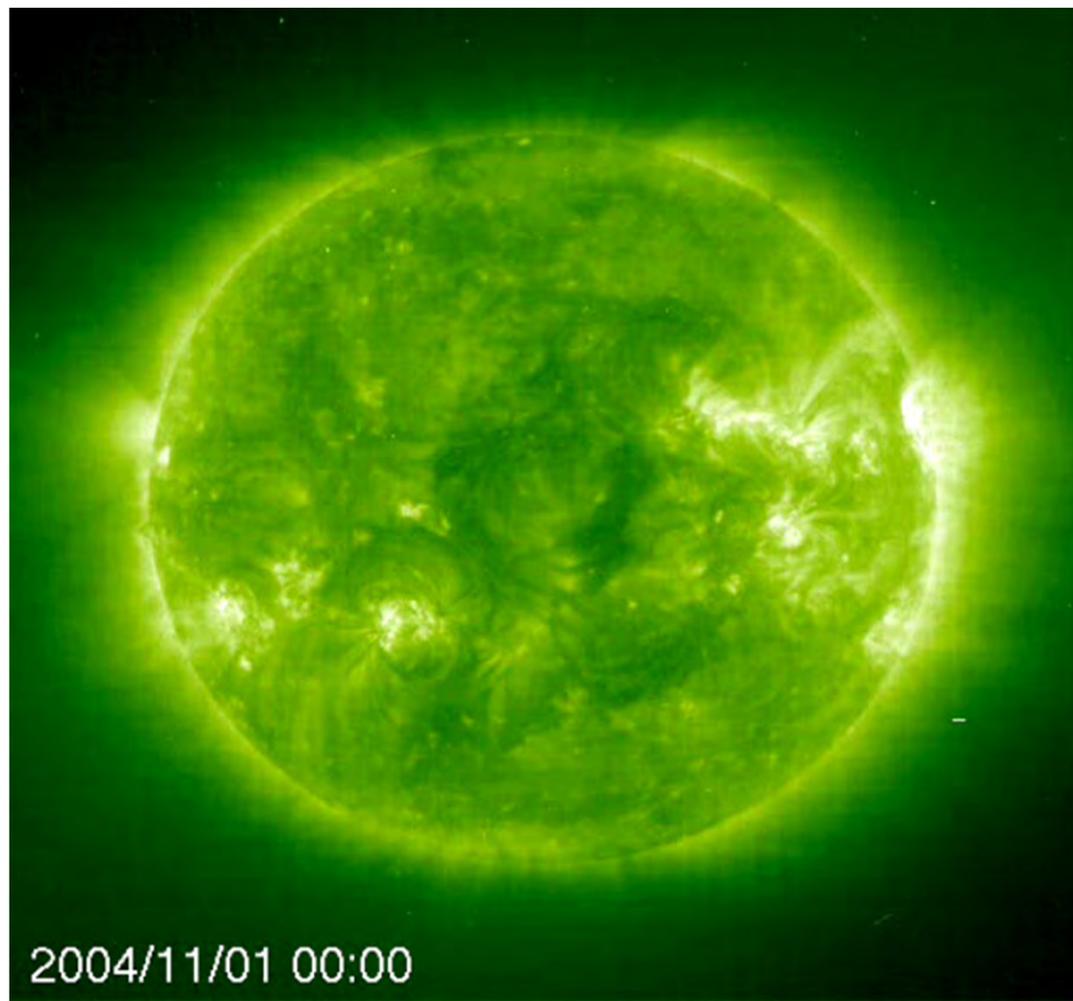
国際宇宙ステーション



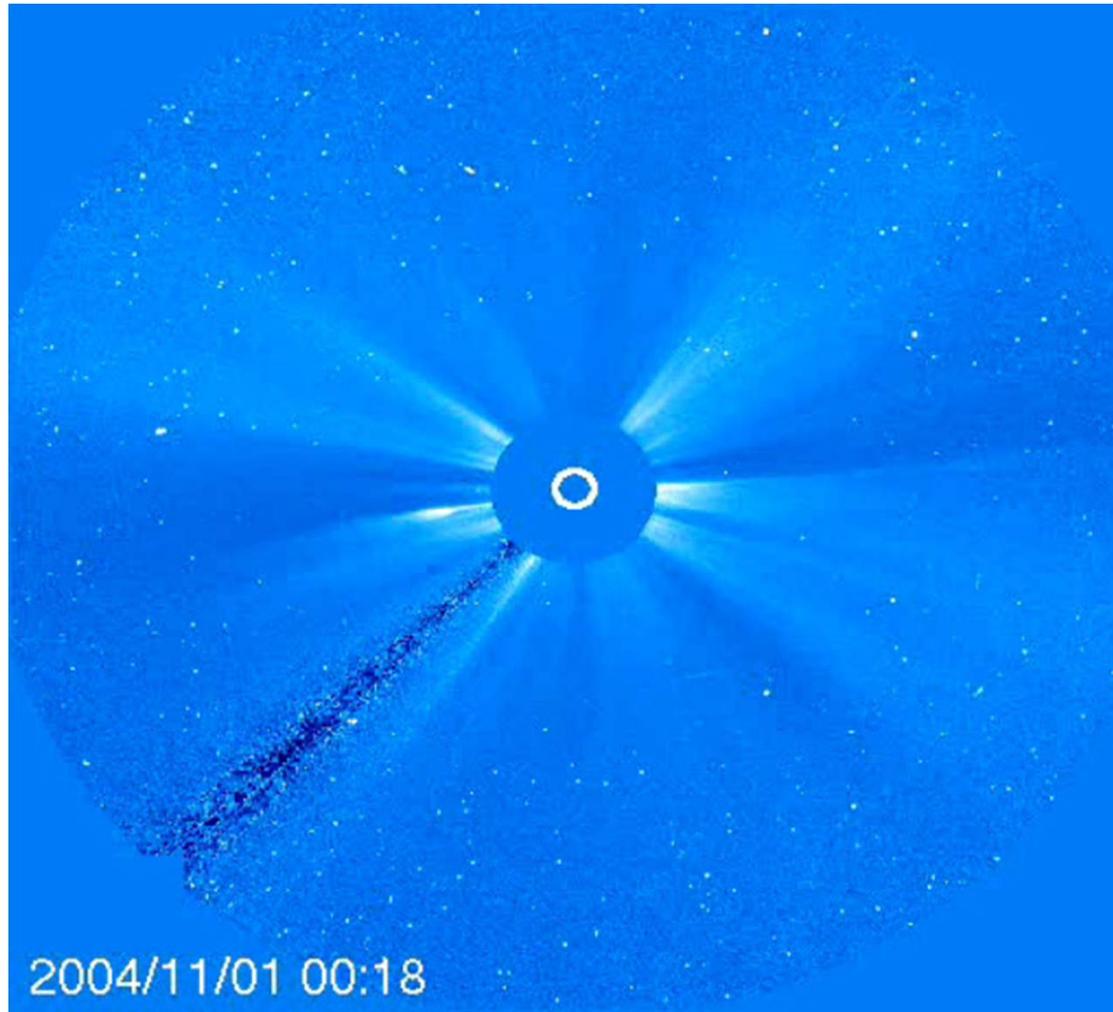
宇宙の嵐



極端紫外線による観測



コロナ大規模ガス噴出現象



巨大な黒点群



黒点の発生周期

- ◆黒点が全く表れなかった時期も過去には存在します。1640年から1715年が最も最近で、地球は寒冷化しました（弱氷河期）。
- ◆太陽活動と地球温暖化が関係しているという説もあり、これからますます重要な研究になっていくと考えられます。

<http://solarscience.msfc.nasa.gov/>

NASA/MSFC/NSSTC/HATHAWAY 2008/06





フレア
Flare

CME
コロナホール
Cornal hole

コロナホール
Cornal hole

高エネルギー粒子線
Energetic particles

地球到達時間
Delay time

30 min~ 2 days

フレアX線放射
Flare X-rays

8 min

太陽風
Solar wind

太陽風じょう乱
Solar wind disturbance

2~ 3 days

衛星障害
Satellite anomaly

放射線帯変動
Changes in radiation belt

衛星軌道変動
Satellite orbit fluctuation

熱圏じょう乱
Thermospheric disturbance

オーロラ活動
Auroral activity

地磁気じょう乱
Geomagnetic storms

電離圏
Ionosphere

地球

電離圏じょう乱
Ionospheric disturbance

放射線帯
Radiation belt

誘導電流
Current induction

衛星被曝
Satellite exposure

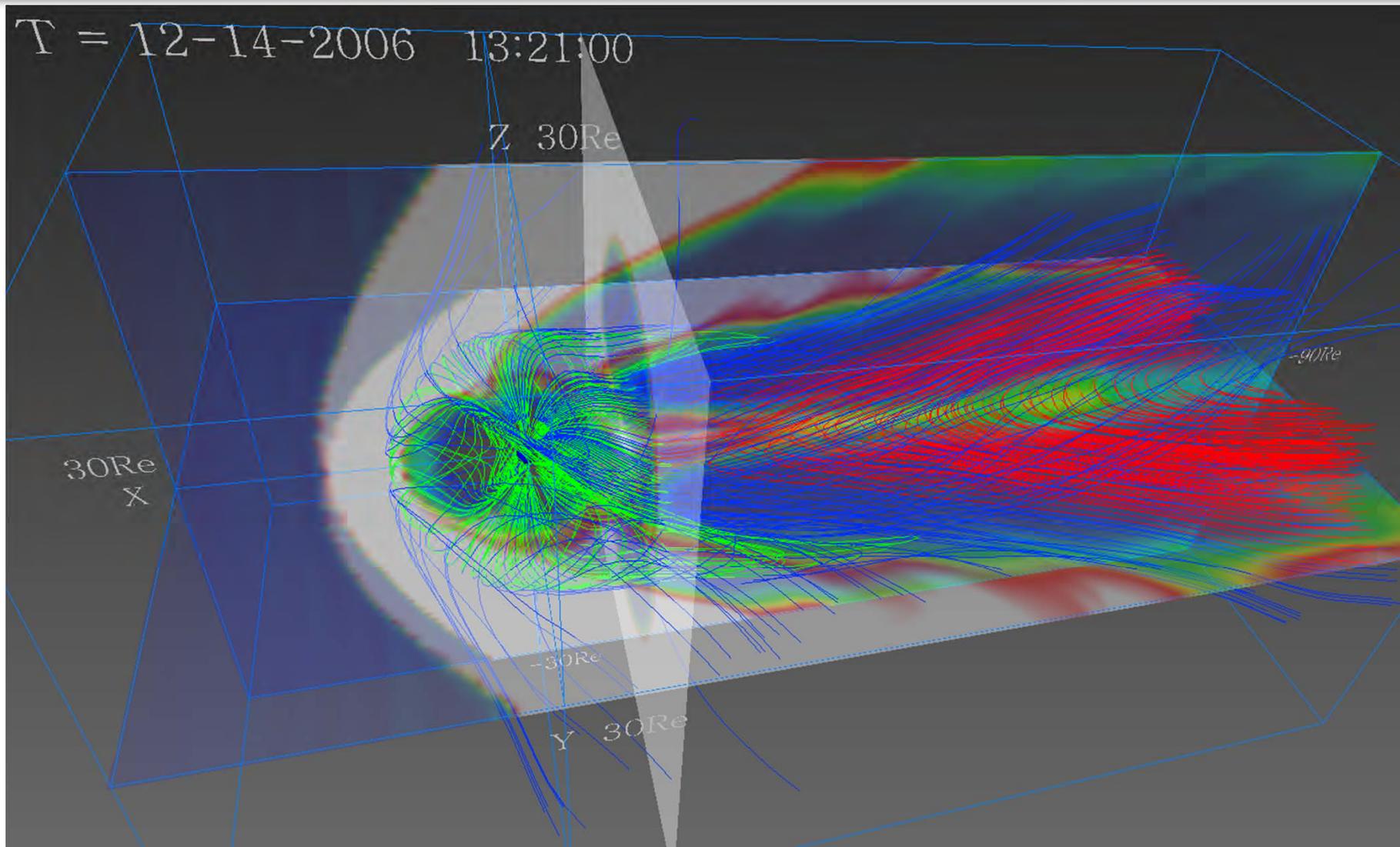
宇宙飛行士被曝
Astronaut exposure

通信障害
Communications trouble

Space weather: cause and effect 宇宙環境擾乱の発生と障害

磁気圏
Magnetosphere

地球のシミュレーション



宇宙天気シミュレーションの計算式

◆宇宙プラズマを取り扱う方程式 (少し複雑ですが)

□Vlasov (ブラソフ) 方程式

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \frac{\partial f}{\partial \mathbf{x}} + \frac{q}{m} (\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot \frac{\partial f}{\partial \mathbf{v}} = 0$$

しかし、 $f(x, y, z, v_x, v_y, v_z, t)$ を計算するには
現在のコンピュータではメモリ不足
(たとえば、 $1000^6=8\text{PB}$ のメモリ)。



宇宙天気シミュレーションの計算式

◆宇宙プラズマを取り扱う方程式

□そこで、簡略化したMHD方程式を利用

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\nabla \cdot (\mathbf{v}\rho)$$

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} = -(\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \frac{1}{\rho} \mathbf{J} \times \mathbf{B}$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -(\mathbf{v} \cdot \nabla) p - \gamma p \nabla \cdot \mathbf{v}$$

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B})$$

MHD方程式の場合、
1000³ × 8 = 64GBの
メモリで
計算ができる。



計算に必要なコンピュータ

◆MHDシミュレーションで正確な宇宙天気シミュレーションを行うためには

– $10000^3 \times 8$ の計算格子が必要。

→ 計算に利用する一時的なメモリを含めると1PB

→ 京をすべて利用してぎりぎり計算が可能なサイズ

◆簡略化する前のVlasov方程式は京でも計算できない(1EBのメモリが必要)

– 京の次のエクサスケール級で初めて可能？

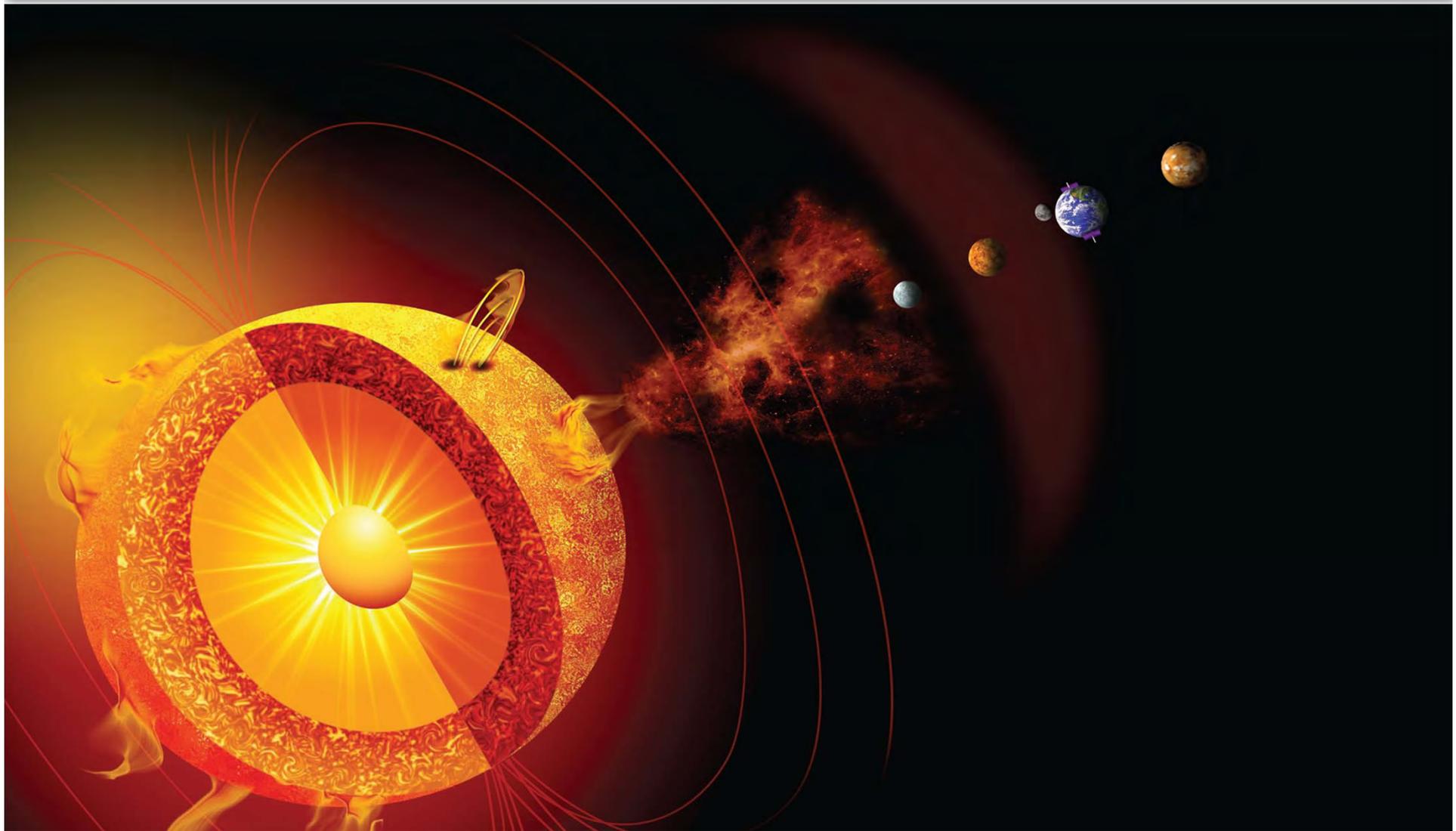


今の計算は意味が無いのか？

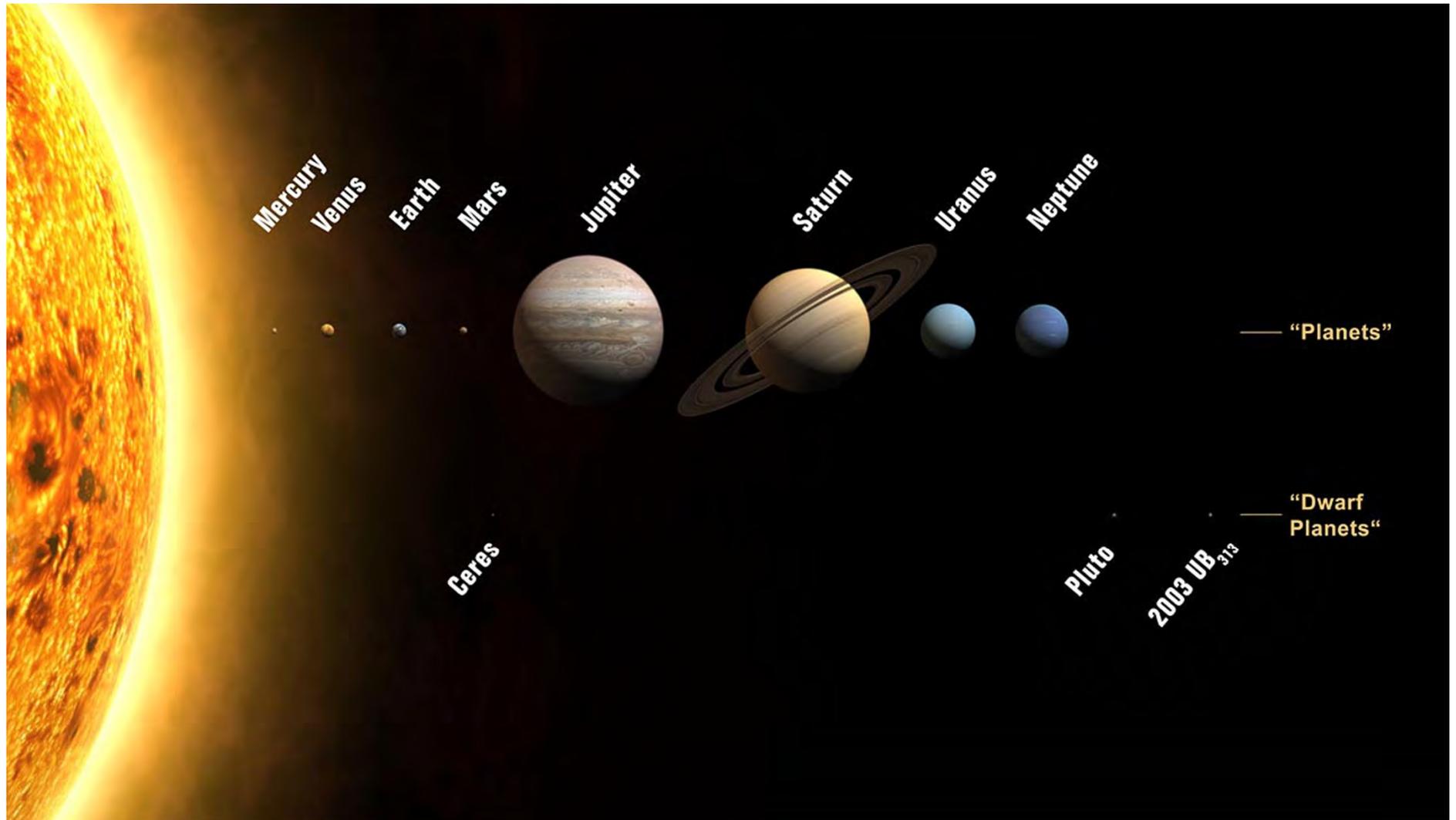
- ◆大規模な構造は再現できている。
- ◆コンピュータパワーが無いからこそ頭を使って技術を発展させられる。
- ◆上記を含めて経験が無いと、いきなり高速なコンピュータを与えられても使えない(使えても非効率)。
- ◆海外任せで良いとすると、将来の自分たちの頭の上を安全に守れるか不安。



ほかの惑星の宇宙天気シミュレーション



太陽系の惑星など



意外に異なる惑星の性質

◆地球、木星、土星における電磁気的特徴

	木星	土星	地球
磁場 [nT]	420,000	21,000	31,000
極性	北向き	北向き	南向き
自転周期 [hr]	10	10.65	24
プラズマ源	イオ、 電離圏	エンセラダス、 電離圏	電離圏
赤道半径 [km]	71,492	60,268	6378
太陽からの距離 [A.U.]	5.2	9.55	1



過去とこれからの惑星探査

◆ 8機の探査機が木星を観測

- Pioneer10 (1973), Pioneer11 (1974), Voyager1 (1979), Voyager 2 (1979), Ulysses (1992), Galileo (1995-2003), Cassini (2000), and New Horizon (2007)

◆ 4機の探査機が土星を観測

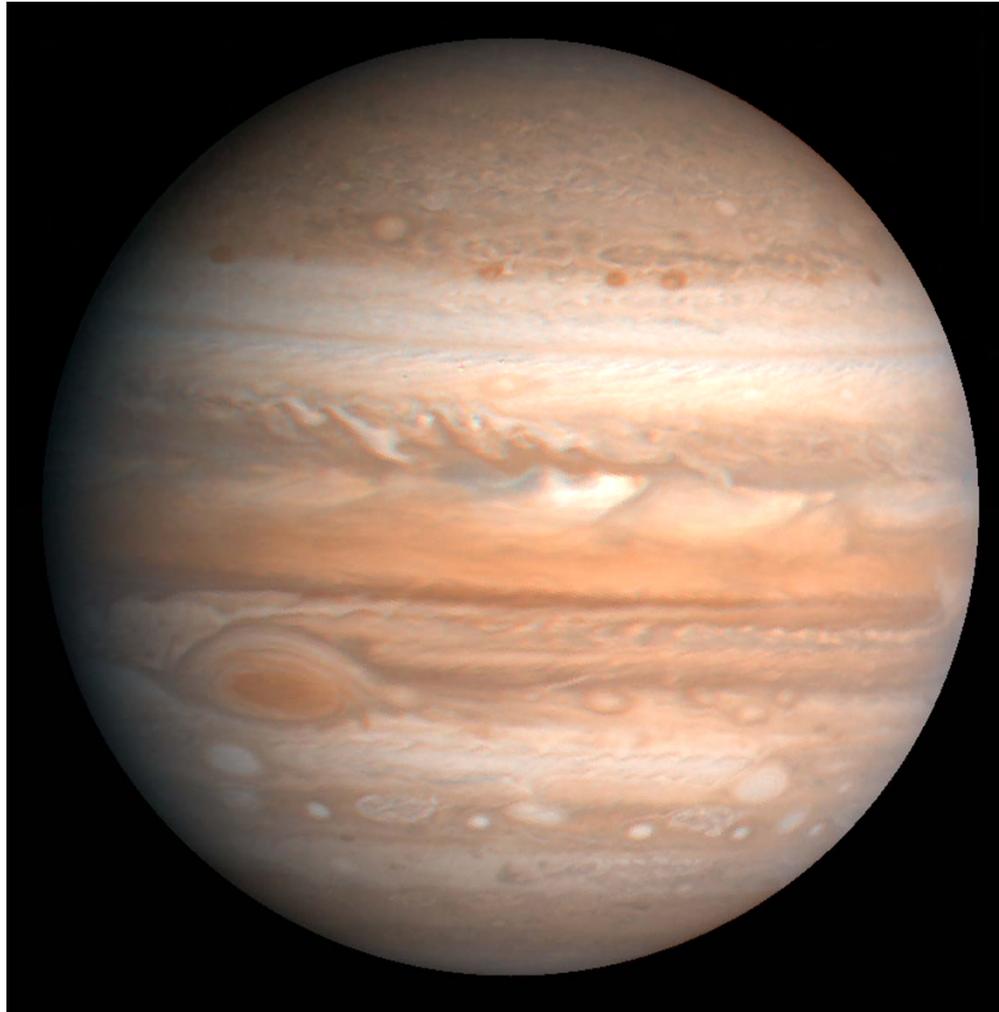
- Pioneer11 (1979), Voyager1 (1980), Voyager 2 (1981), Cassini (2004 - now)

◆ 将来計画

- JUNO (launch at 2011, arrive at Jupiter in 2016)
- EJSM (Jupiter mission: launch after 2020)
- TANDEM (Saturn mission: launch after 2020)

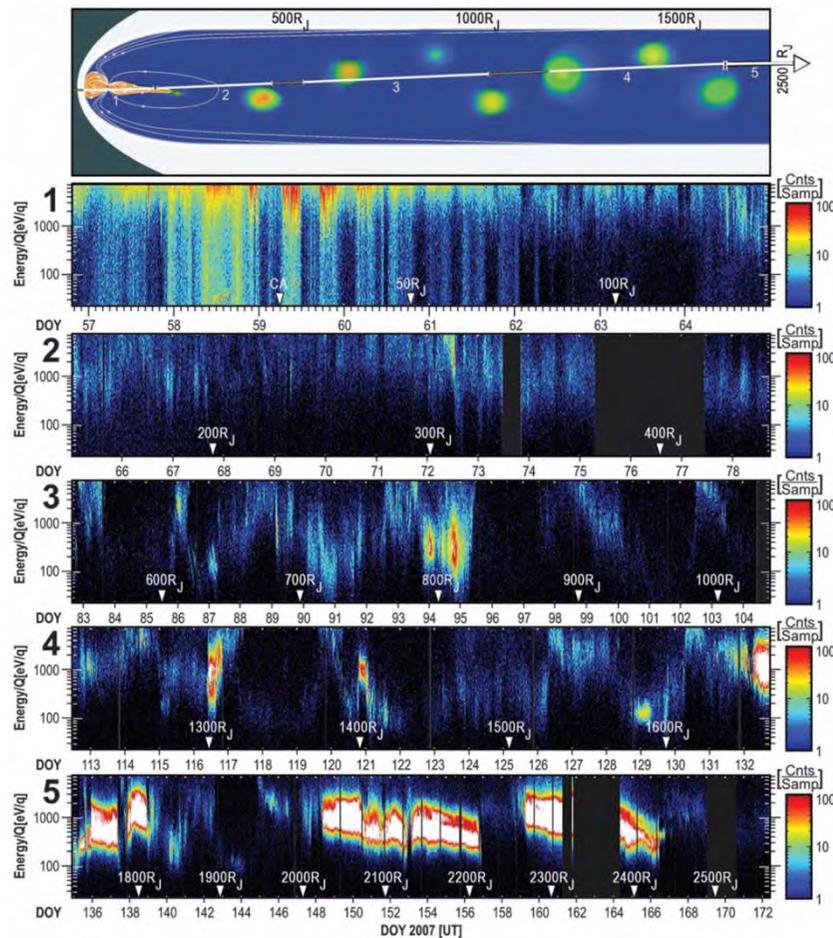


木星宇宙天気シミュレーション



木星におけるおもしろい観測結果

◆ New Horizonの観測結果



2007年2月に
New Horizon探査機が
木星で複数の
プラズマの塊を観測した

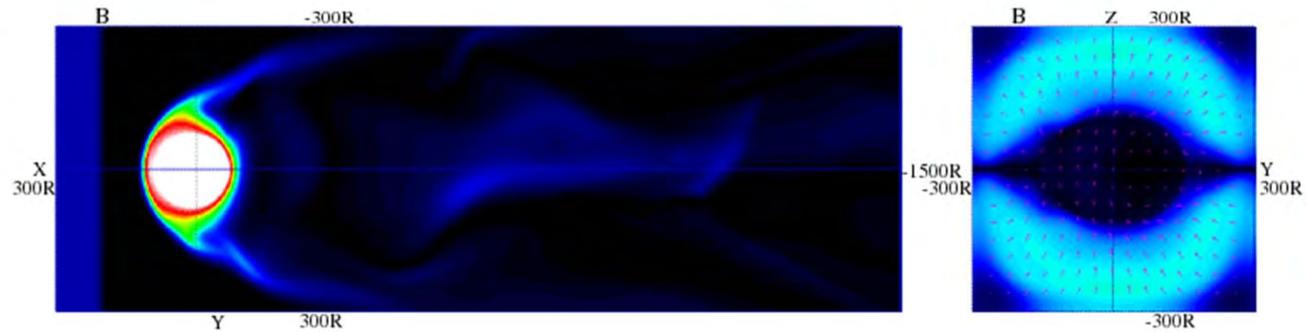
Fig. Plasma observations from just after NH's inbound crossing of Jupiter's magnetopause late on DOY 56, through closest approach at $\sim 32 R_J$, and back down the magnetotail to $>2500 R_J$. [McComas *et al.*, 2007]



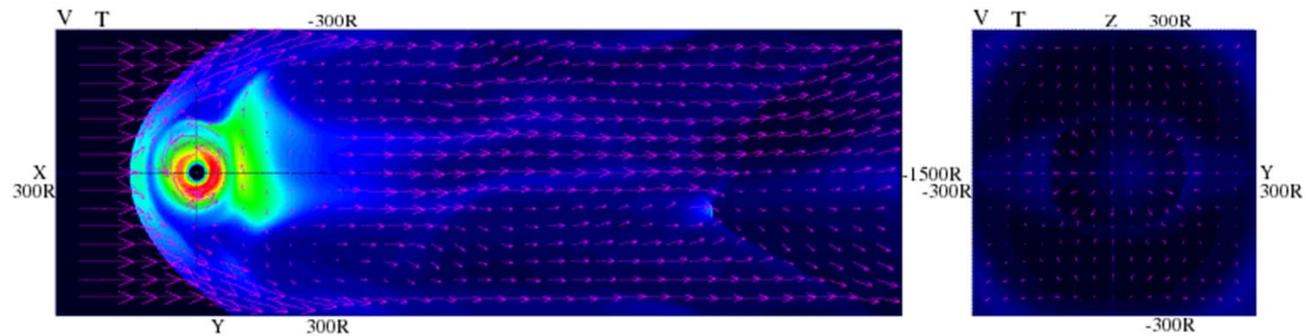
木星シミュレーションムービー

Distant tail of Jovian Magnetosphere
 $B_z = 0.105 \text{ nT}$ $D_{sw} = 0.01125 \text{ nPa}$ $t = 1323 \text{ hours}$

磁場



プラズマの
温度



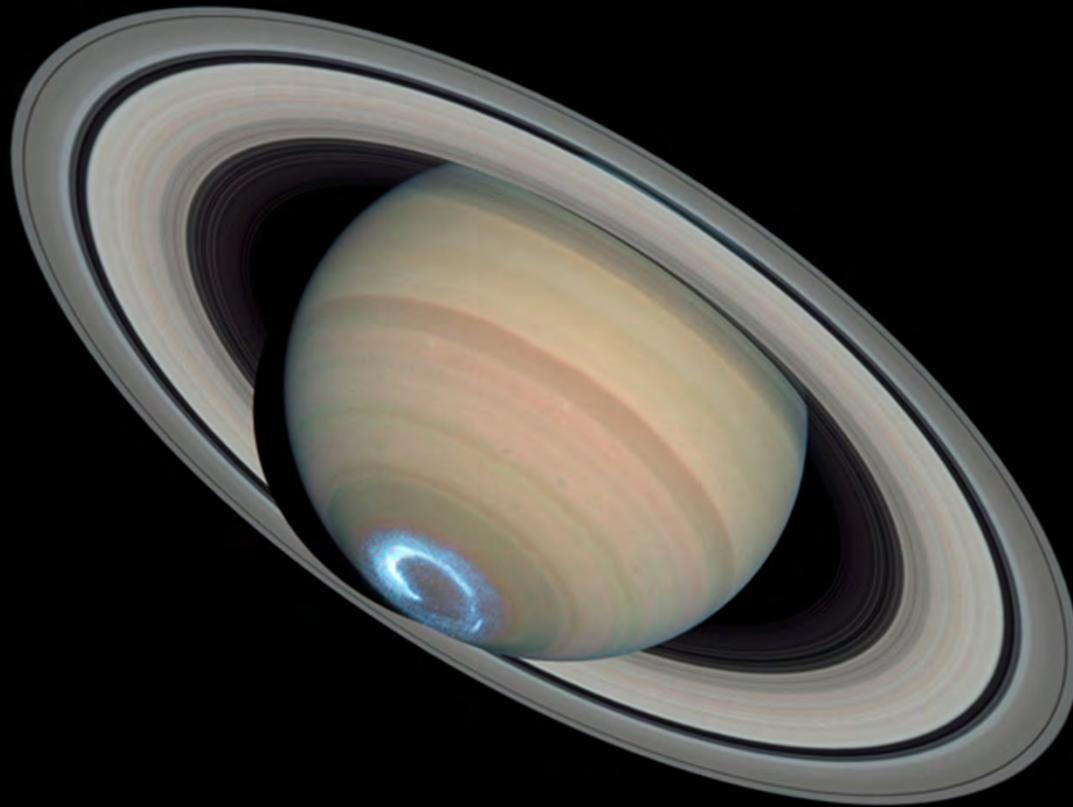
last= 20 ii= 1 nxp= 400 nr=1200

x = -1200.0Rj

[Fukazawa et al., JGR, 2010]



土星宇宙天気シミュレーション



土星のおもしろい観測結果1

◆ハッブル宇宙望遠鏡とCassiniの同時観測(2004年)

□Cassiniが太陽風を観



土星磁気圏の乱れた対流構造、渦構造に関係するのでは？

□オーロラの増光が見られるが原因は不明。

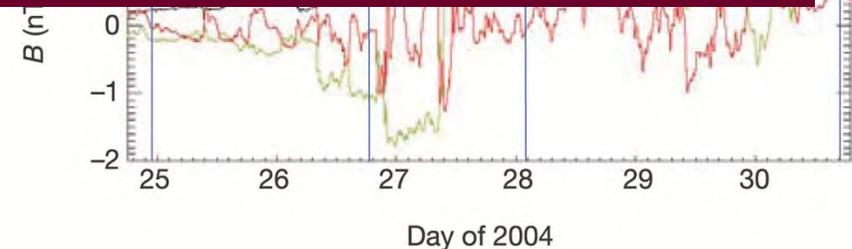
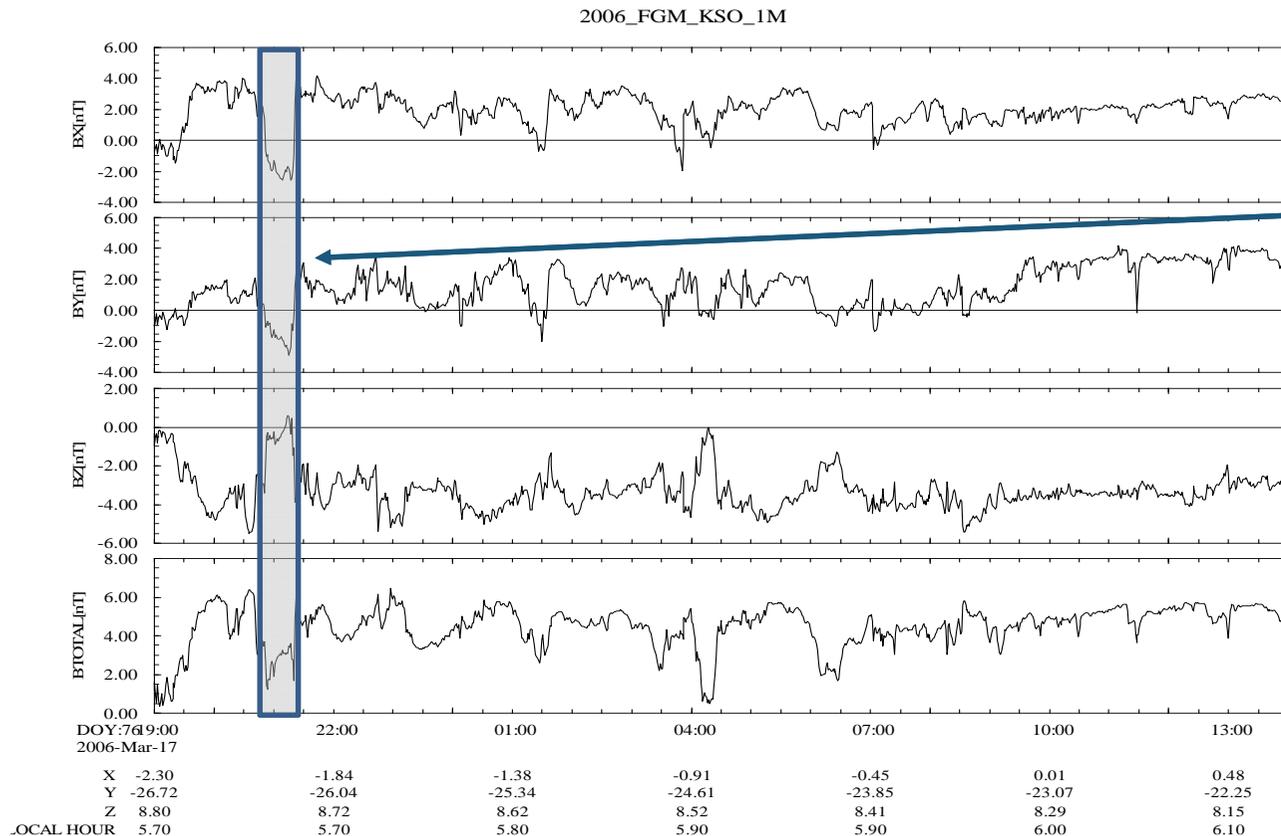


Fig. Comparison between HST images and solar wind conditions propagated to Saturn for the period 25–30 January 2004 [Crary *et al.*, 2005]



土星のおもしろい観測結果2

◆ Cassiniによって観測された渦構造



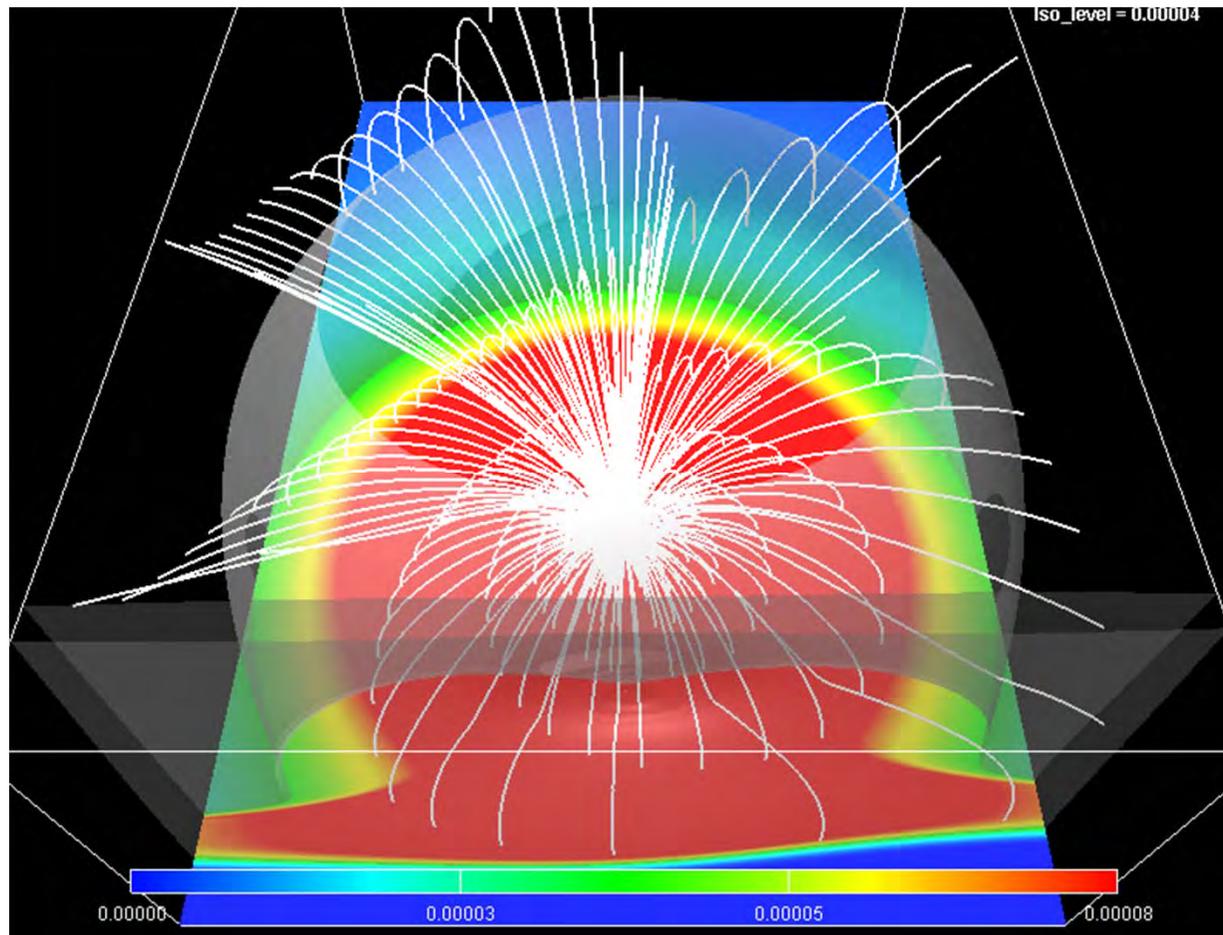
この磁場変化は磁気圏内における渦構造を示していると言われている

Fig. One minute averages of Cassini magnetic field observations in KSO coordinates (X – Saturn to Sun, Z-upward normal to Saturn’s orbital plane, Y – completes a right handed system) on March 17 and 18, 2006 [Walker et al., 2011].



土星シミュレーションムービー

◆土星磁気圏大規模シミュレーション



世界最大規模
の計算により、
渦構造と
オーロラの関係
を調べている。

Fig. 土星磁気圏赤道面における磁場強度[Fukazawa et al., JGR, 2011, revised]

土星のオーロラシミュレーション

◆土星から流れる電流の構造

□電流はオーロラの輝きと関連がある

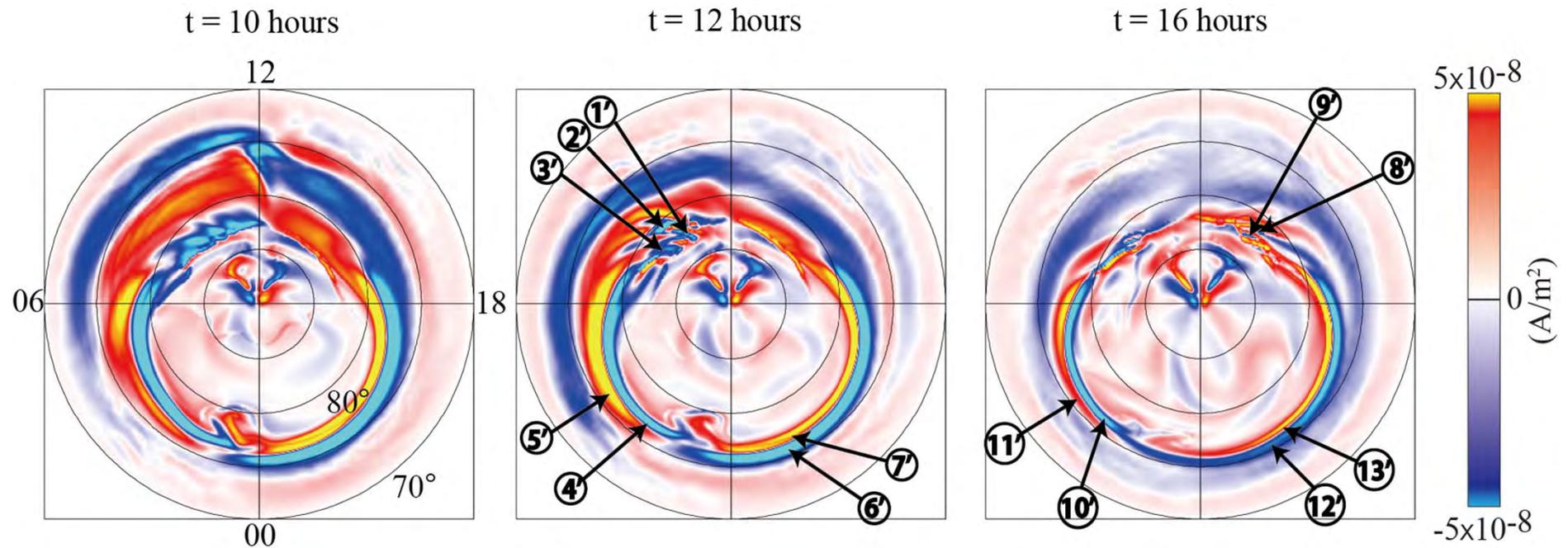
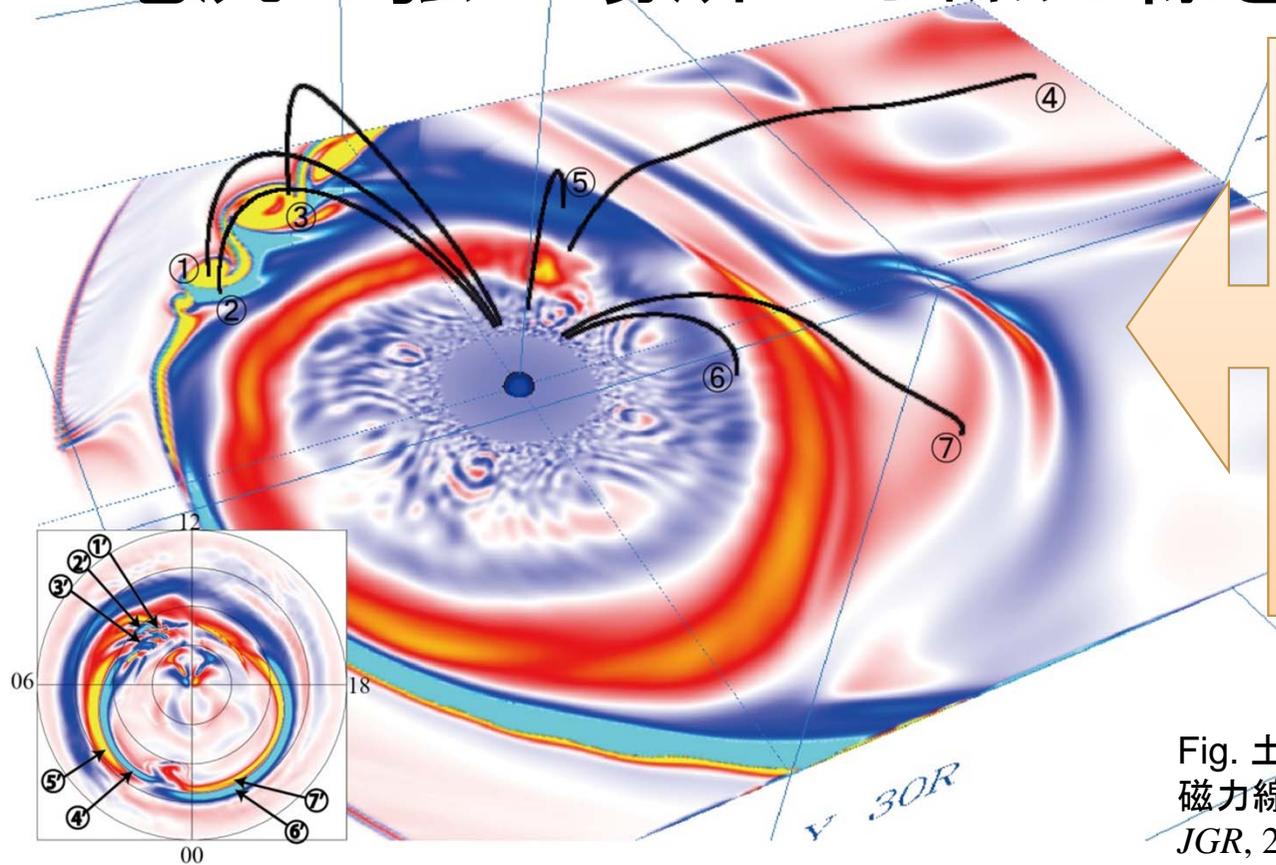


Fig. 土星磁気圏における沿磁力線電流の構造[Fukazawa et al., JGR, 2011, revised]

オーロラは渦から来ている？

◆電流と渦構造の関係

□電流の強い場所から磁力線を伸ばすと…



大規模計算による高精度なシミュレーションにより、土星渦構造とオーロラの構造の関連性を初めて示唆。

Fig. 土星磁気圏における渦構造と沿磁力線電流の関係[Fukazawa et al., JGR, 2011, revised]



まとめ

- ◆宇宙天気は意外に身近にある。
- ◆現在の宇宙天気シミュレーションはまだ計算パワー不足。
- ◆計算技術経験はいつでも必要。
- ◆木星、土星でも観測結果を再現できるようになってきた。
- ◆将来に向けてさらに研究開発を進める。

