

地球・惑星・宇宙と計算科学1

惑星磁気圏MHDシミュレーション

深沢 圭一郎

京都大学学術情報メディアセンター



本日の講義内容

惑星磁気圏とは？

- 扱う宇宙のイントロ、宇宙天気、磁気圏

惑星磁気圏シミュレーション

- MHDシミュレーションで磁気圏を解く

最新惑星磁気圏シミュレーション

- 地球、木星、土星磁気圏



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た？



- 国際宇宙ステーションは宇宙にある？



- オーロラは宇宙で光っている？



宇宙は高度で定義される

- 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。
- 宇宙は電離したガスが充満しています。

外気圏

熱圏

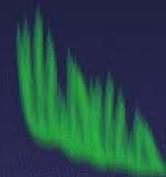
中間圏

成層圏

対流圏

800km

690km



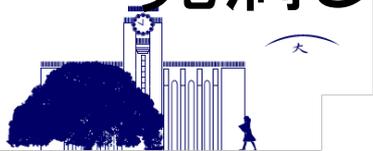
80km



50km

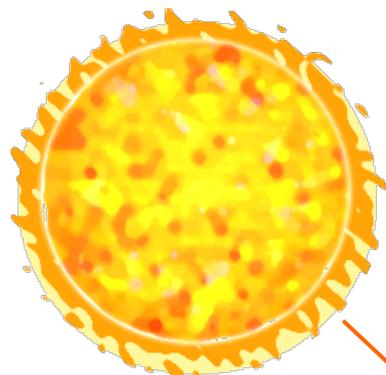


18km



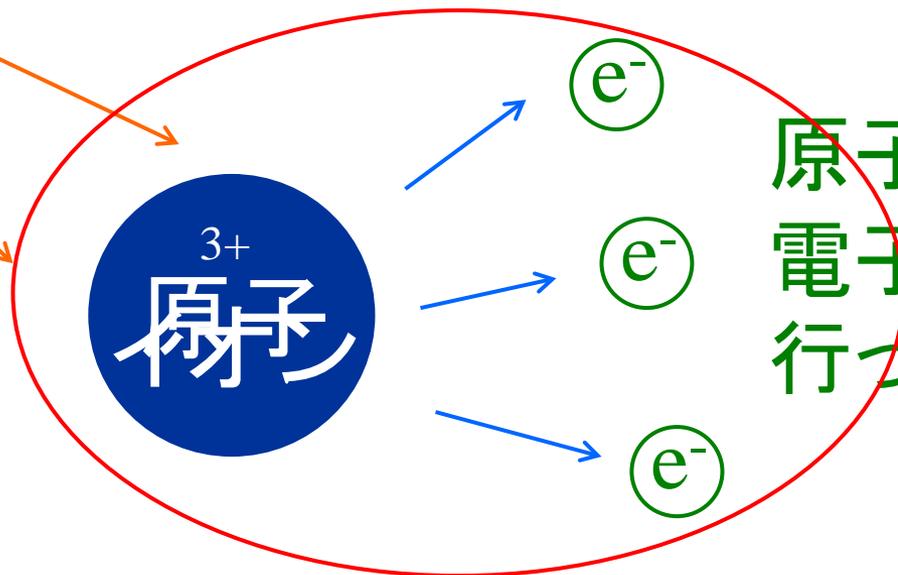
電離、プラズマとは？

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



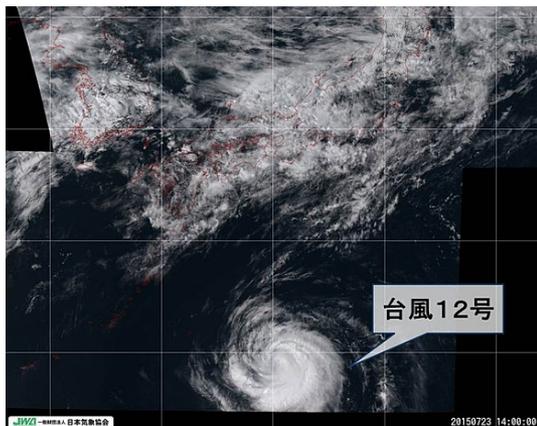
宇宙天気とは？

現象

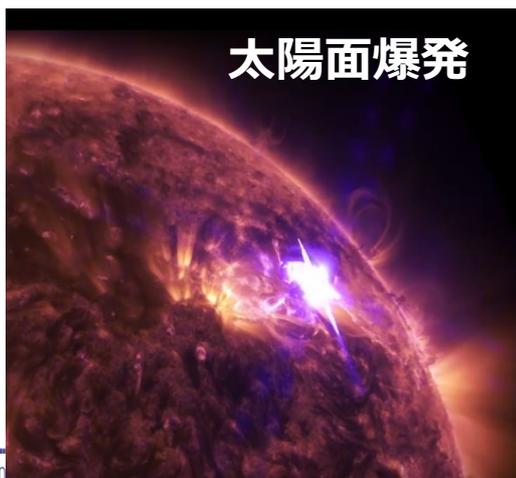
影響

予報

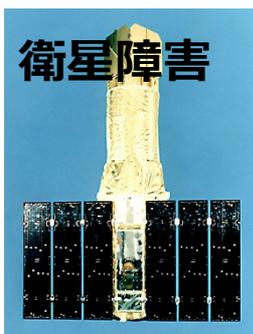
天気



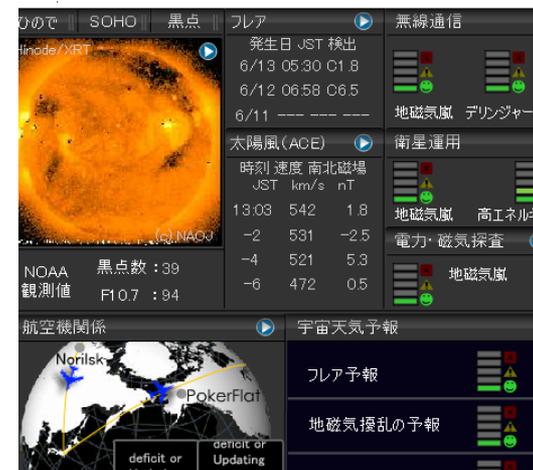
宇宙
天気



衛星障害



通信・
測位障害





太陽



地球



光エネルギー
X線・紫外線





光エネルギー
X線・紫外線



1つ目のバリア
大気圏





光エネルギー
X線・紫外線



1つ目のバリア
電離圏の形成





太陽

高温プラズマ
高エネルギー粒子

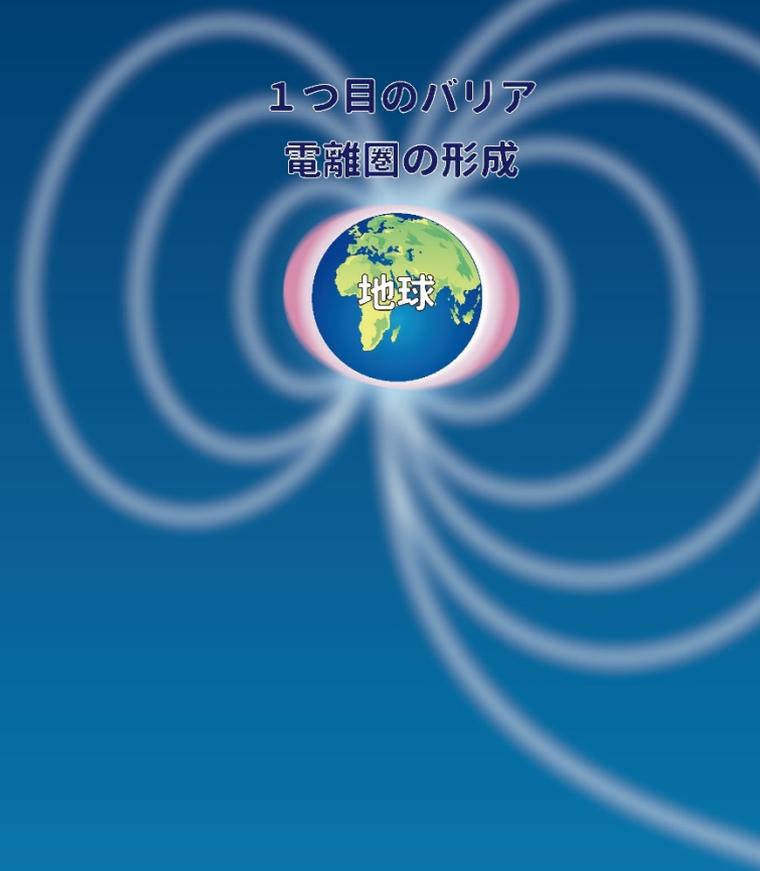


2つ目のバリア
地磁気

1つ目のバリア
電離圏の形成



地球





太陽

高温プラズマ
高エネルギー粒子



1つ目のバリア
電離圏の形成



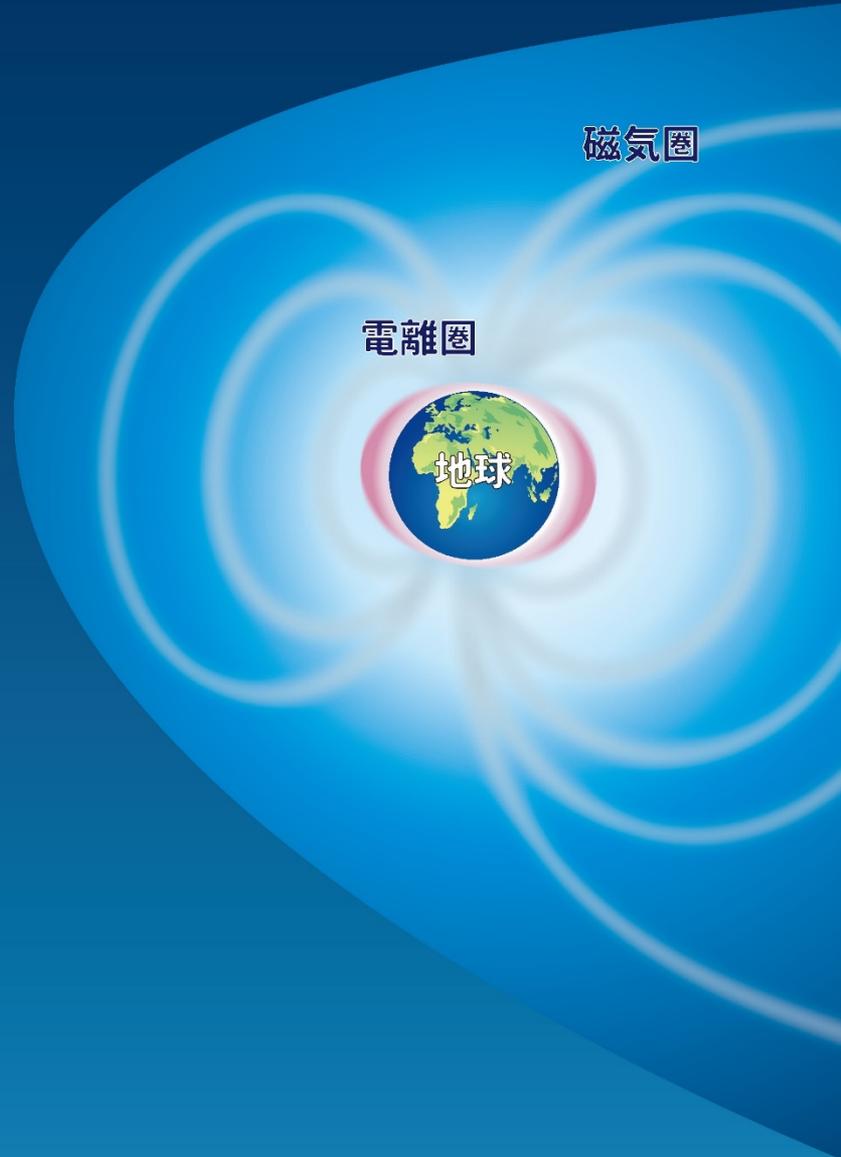
地球

2つ目のバリア
磁気圏の形成





太陽



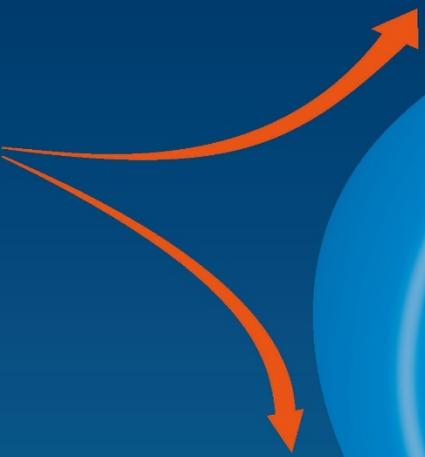
磁氣圈

電離圈

地球



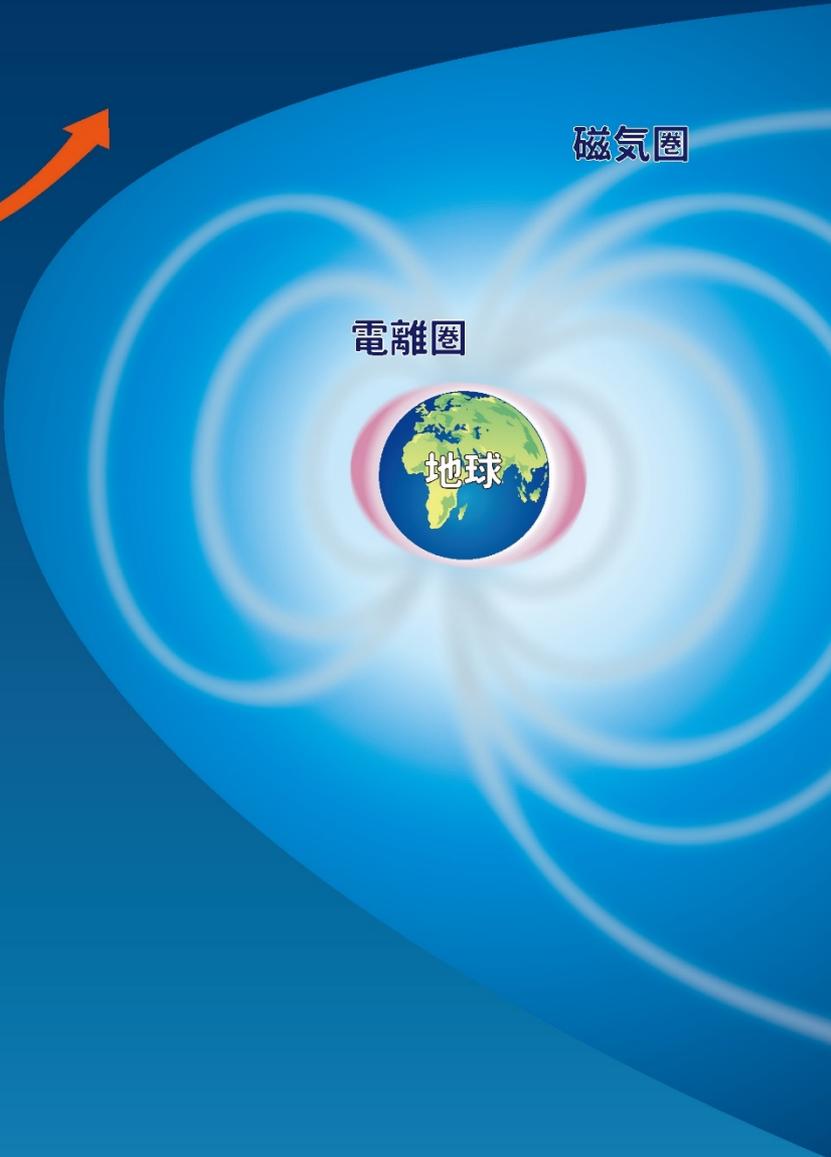
太陽風



電離圈



磁氣圈





CME
フレア

高エネルギー粒子

地球到達時間
30分～2日

フレアX線放射 8分

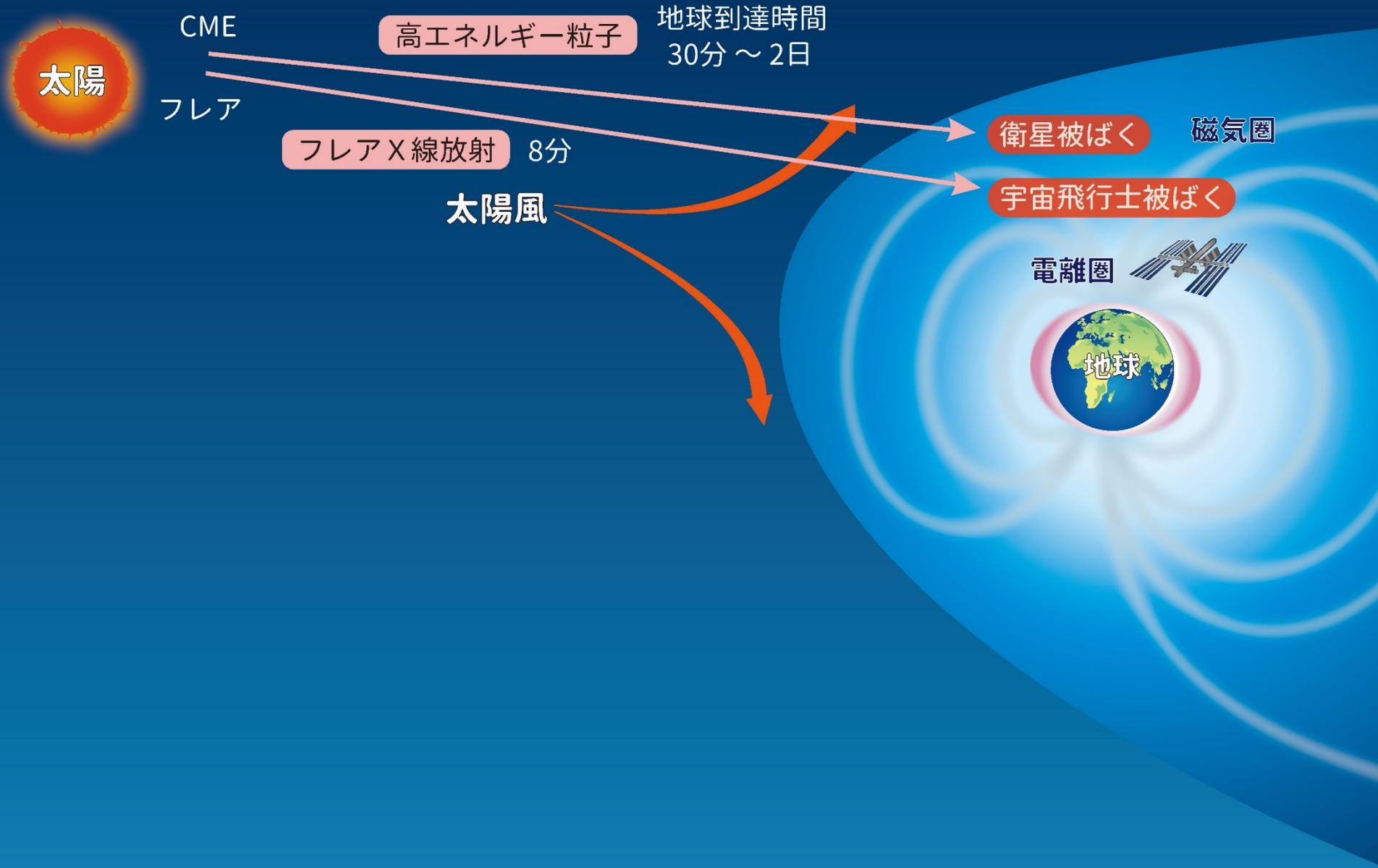
太陽風

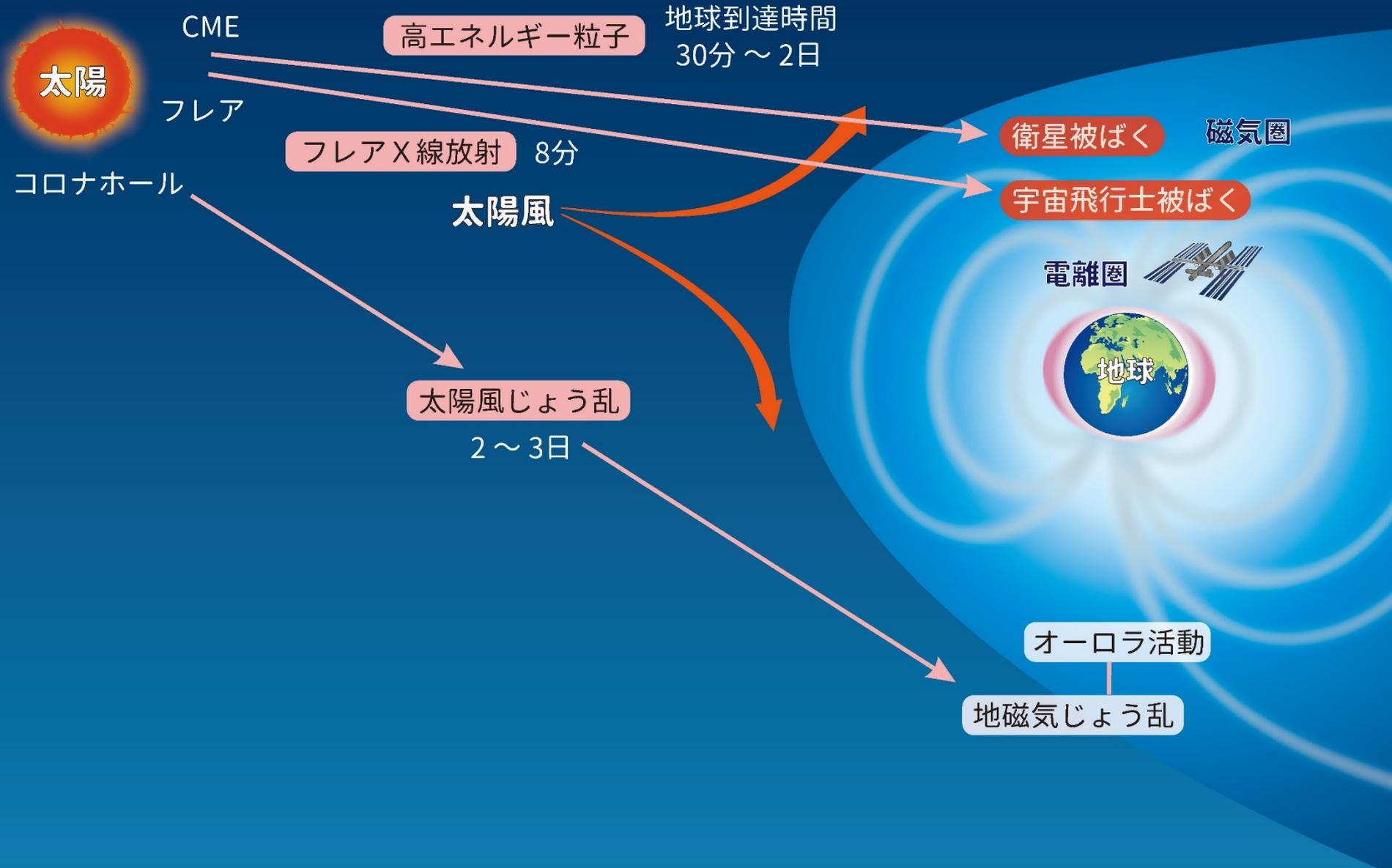
衛星被ばく

磁気圏

宇宙飛行士被ばく

電離圏





太陽

CME

高エネルギー粒子

地球到達時間
30分～2日

フレア

フレアX線放射 8分

衛星被ばく

磁気圏

コロナホール

太陽風

宇宙飛行士被ばく

電離圏



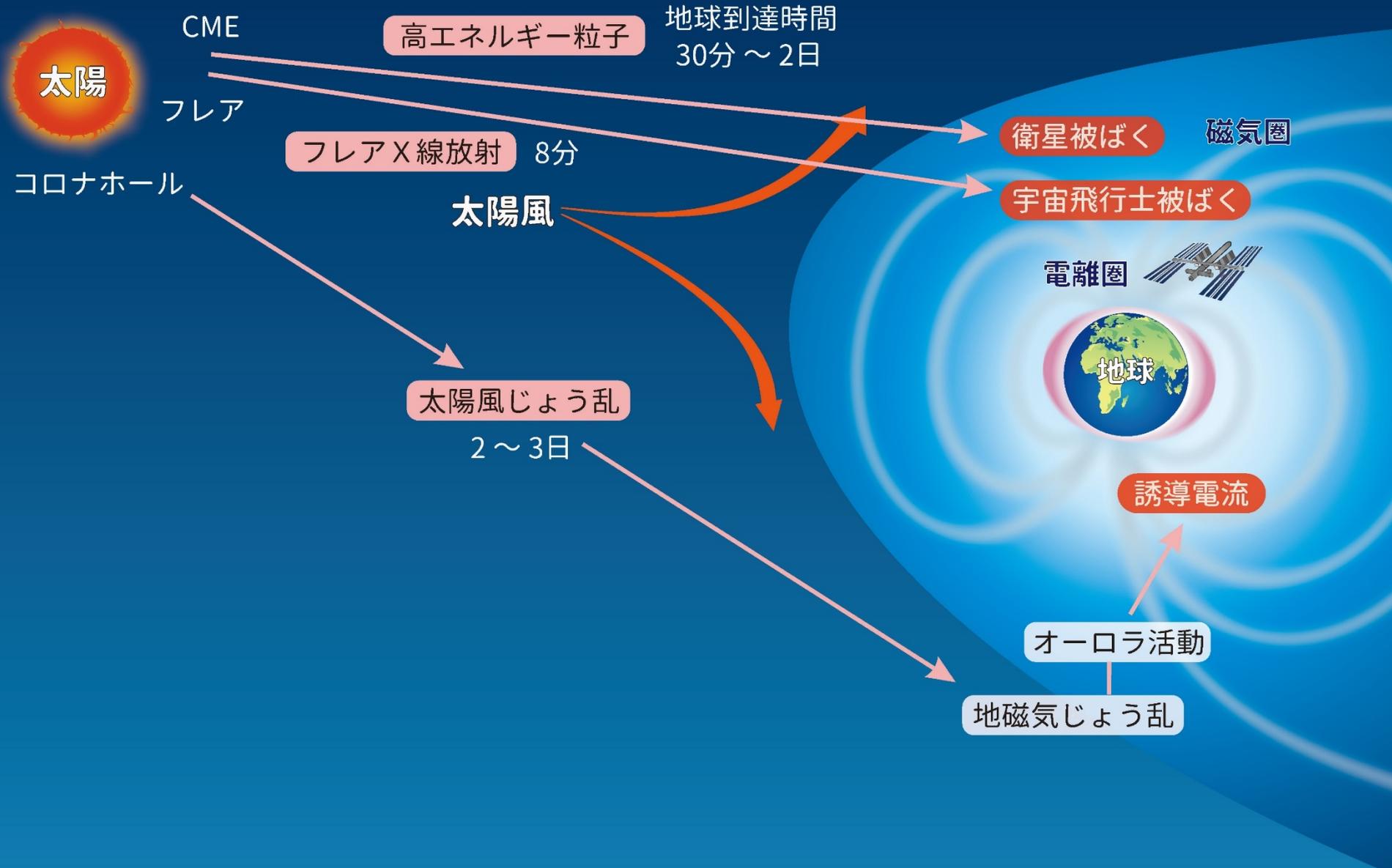
地球

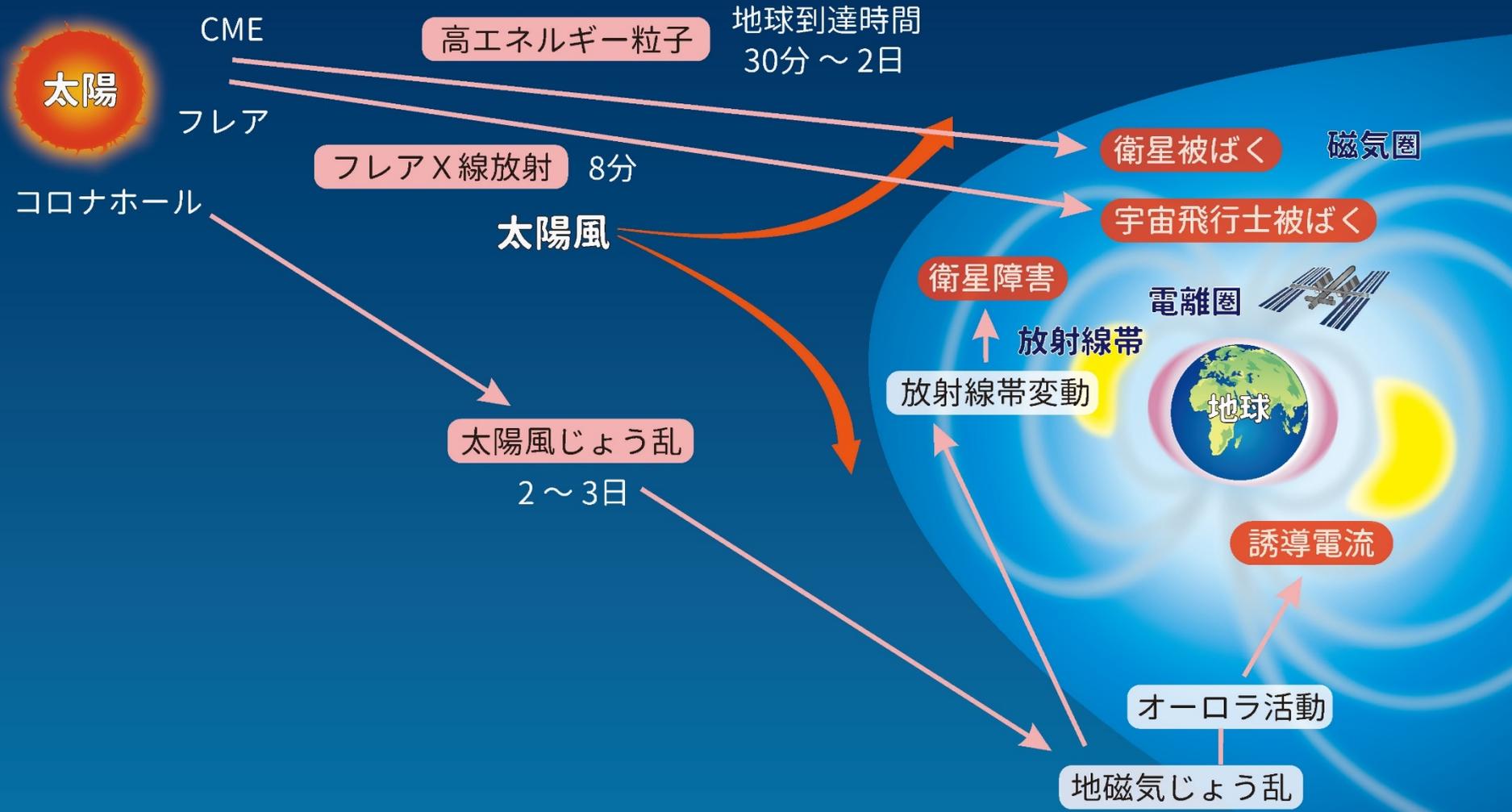
太陽風じょう乱

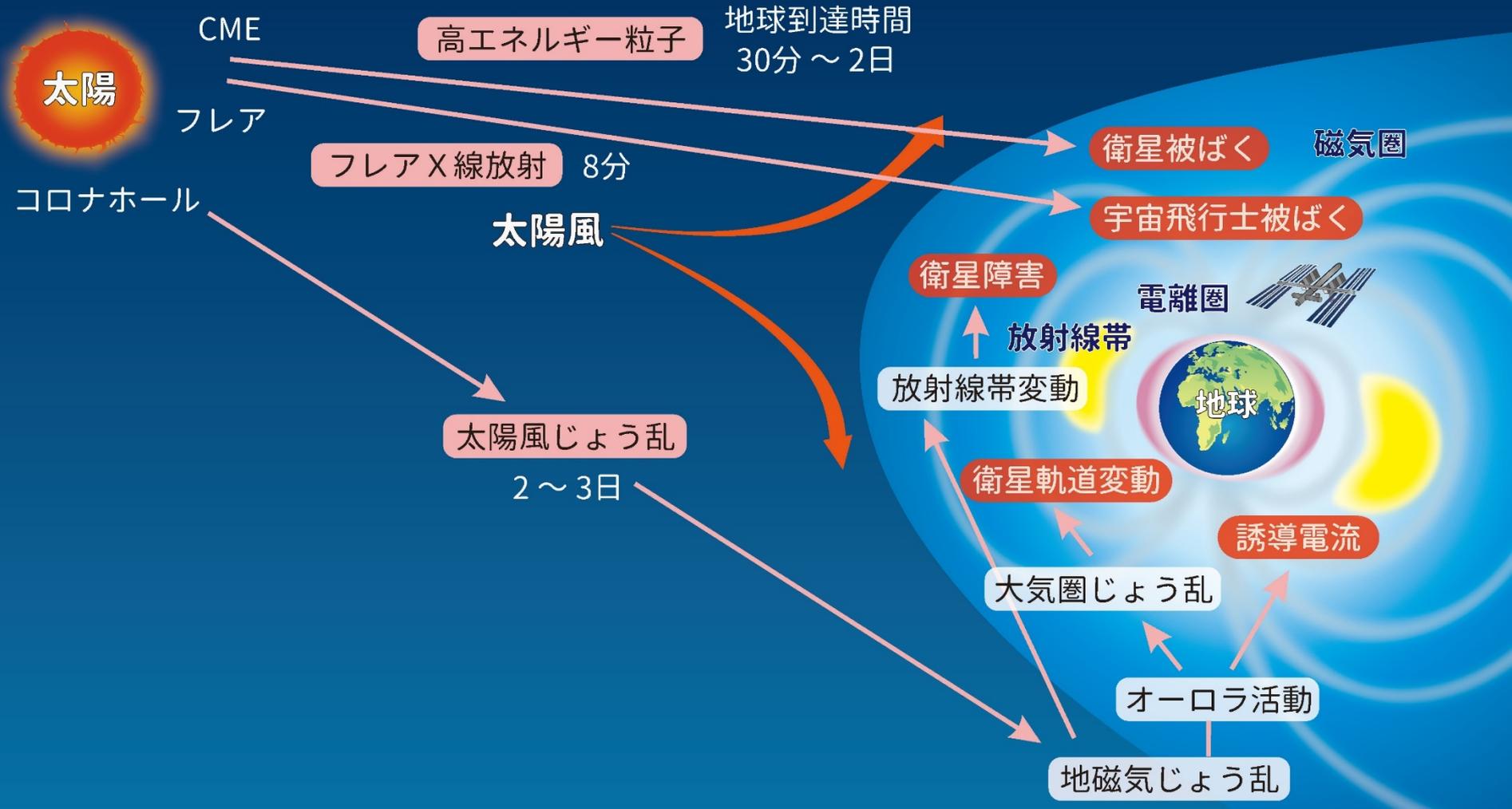
2～3日

オーロラ活動

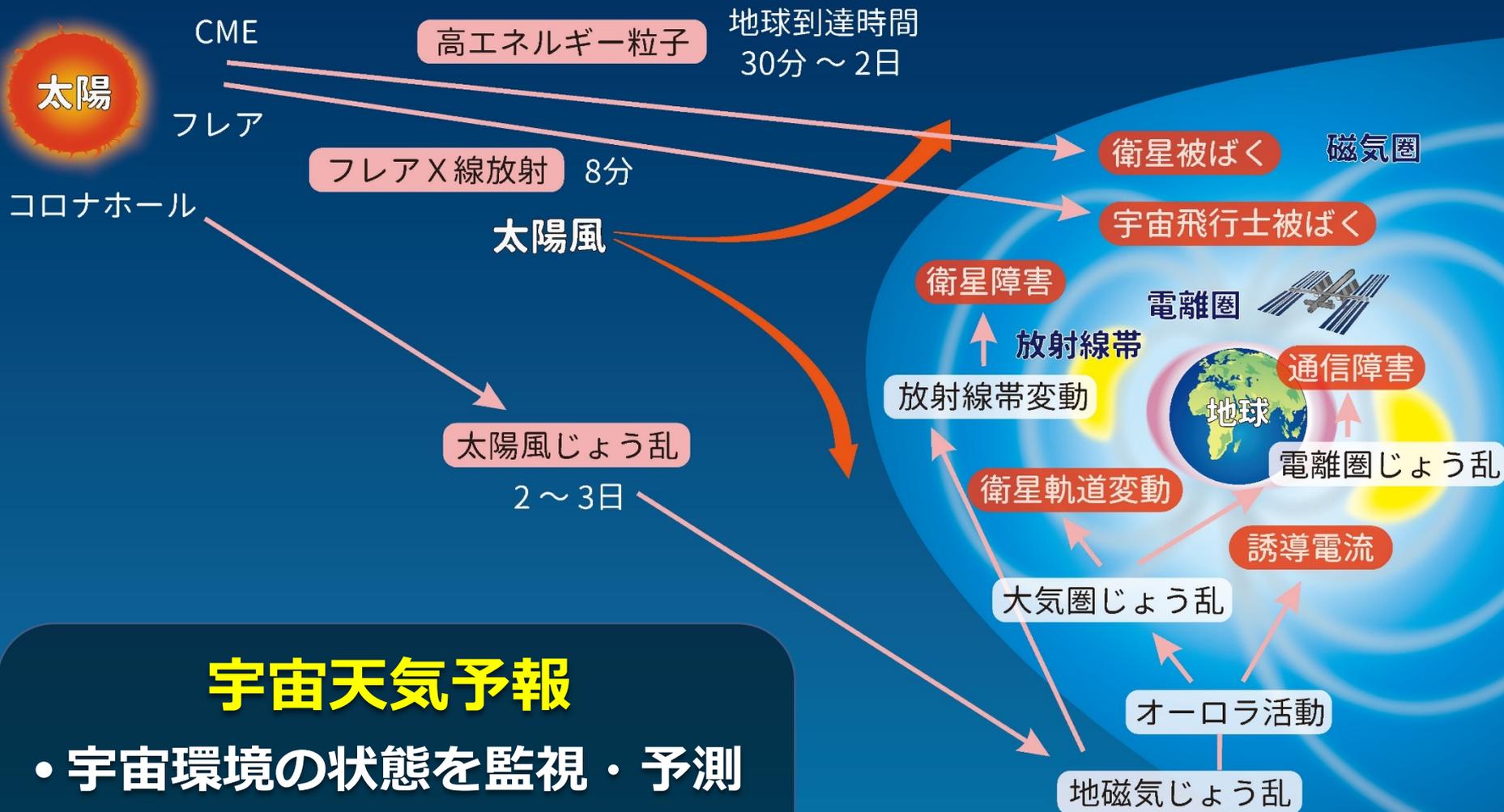
地磁気じょう乱







宇宙天気現象の発生と障害



宇宙天気予報

- 宇宙環境の状態を監視・予測
- 宇宙や電波を利用する社会インフラへのリスクを軽減

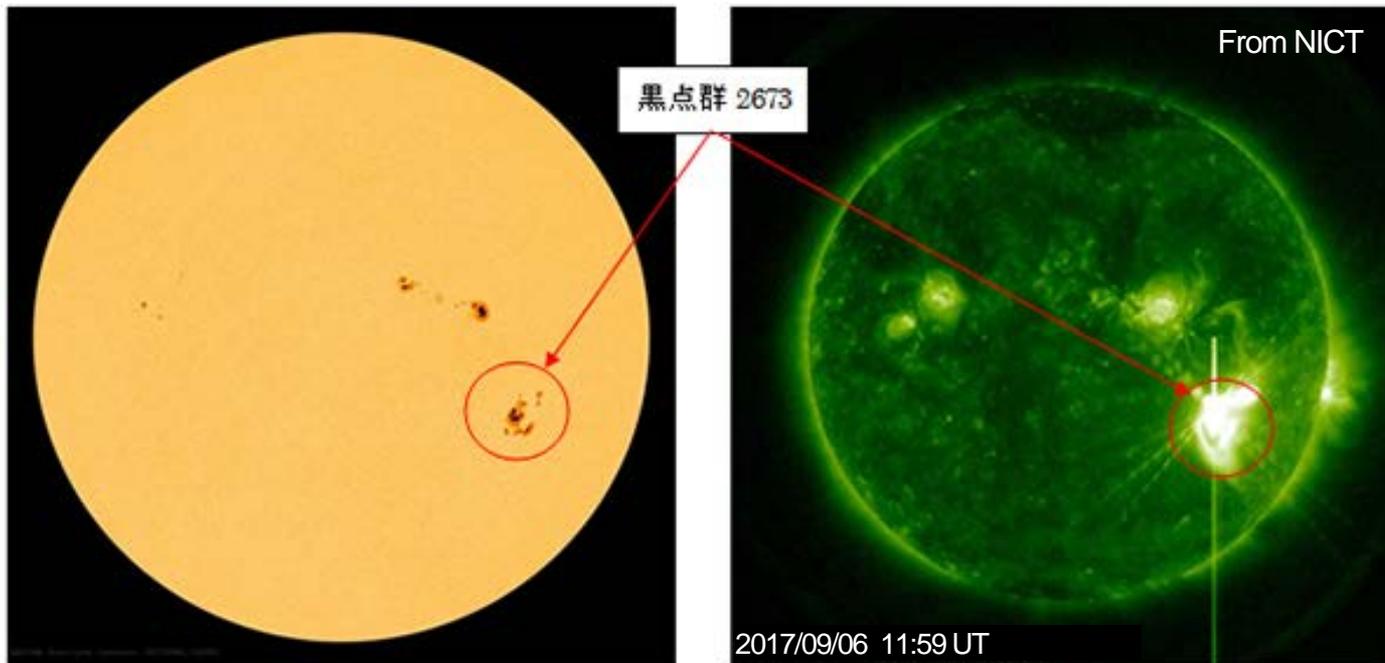
目に見える宇宙天気現象：オーロラ



2016年6月11日 南極昭和基地のオーロラ

- オーロラ --- 高さ 100-500 km
- 国際宇宙ステーション --- 高さ 400 km
- 電離圏 --- 高さ 60 - 1000 km

最近の大きなフレア



日本でもオーロラが見える

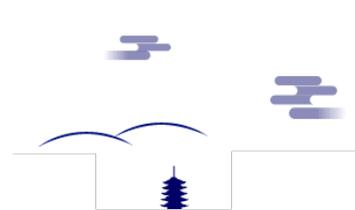
高緯度地方

日本

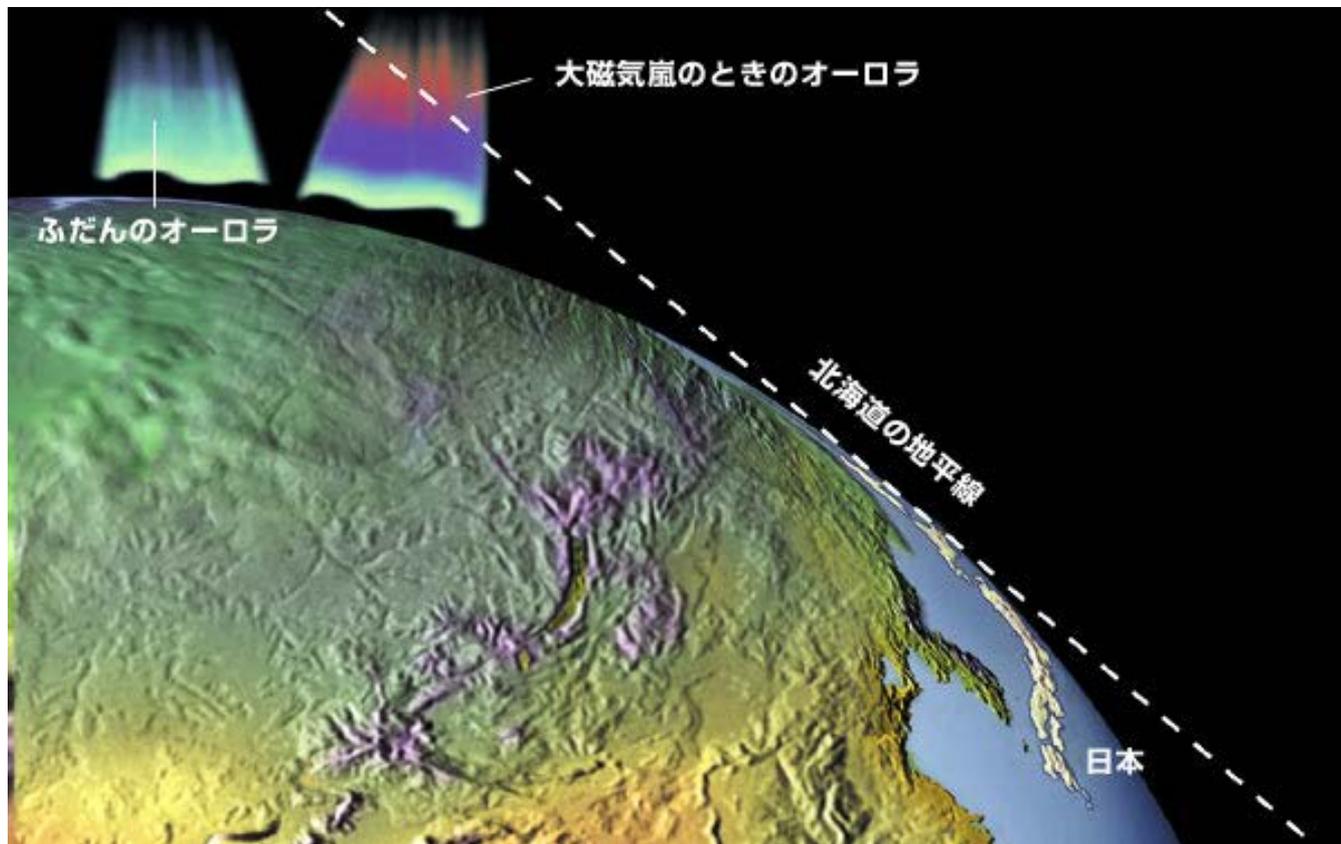


ノルウェー トロムソ
(名古屋大学STEL提供)

2003/10/29 23:40北海道陸別町
(陸別天体観測所)

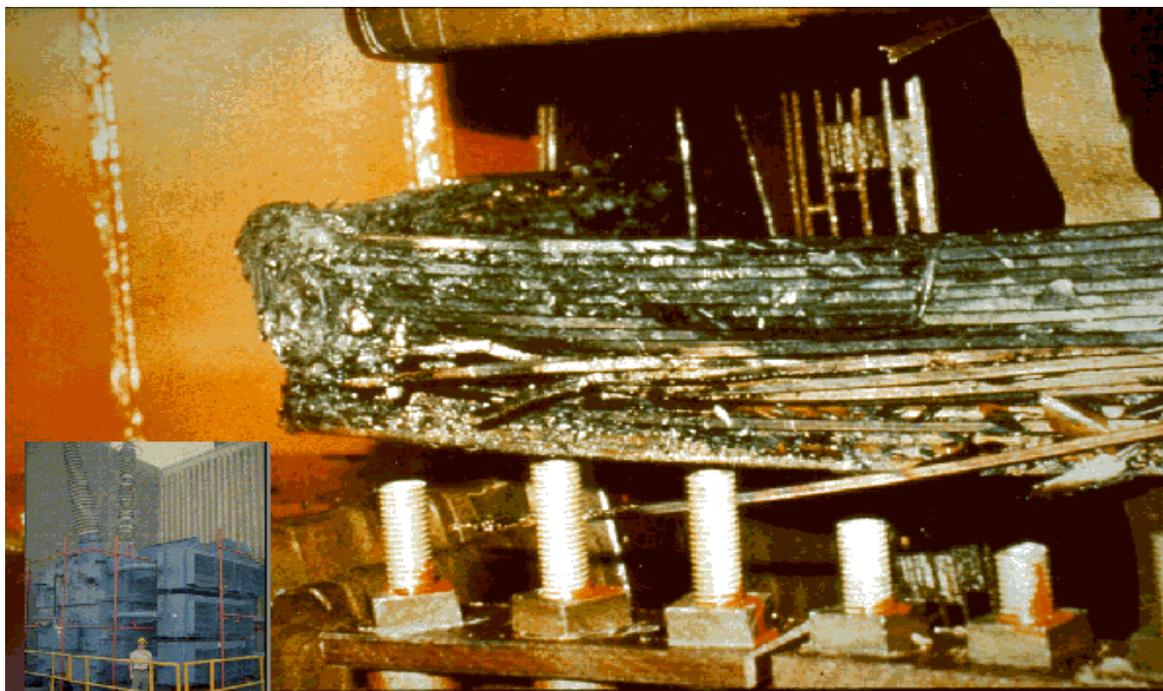


赤い色の理由

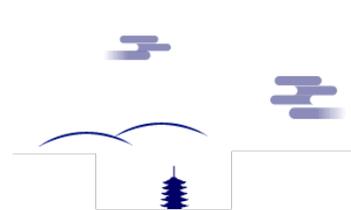
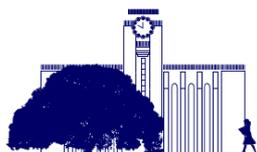


宇宙天気の影響

2003年10月の大きな宇宙嵐の際、
スウェーデンで停電が発生しました。

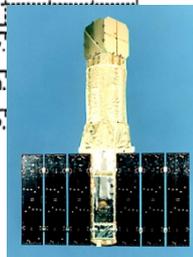
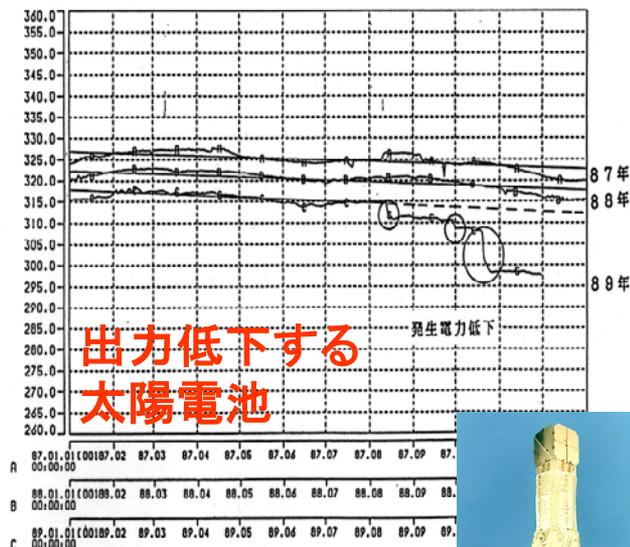


Geomagnetic Storm Induced Transformer Damage



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ー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。

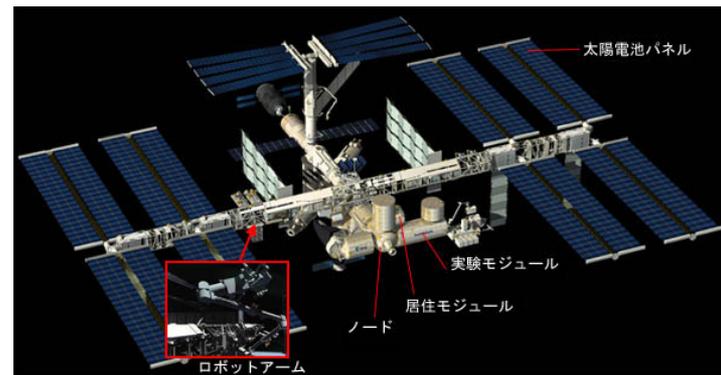


「あすか」結局落下へ
太陽活動の影響で昨年夏から観測不能になっていた文部科学省宇宙科学研究所(宇宙研)のX線天文衛星「あすか」が回復せず、二月末から三月初めの間に落下することが、二十六日明らかになった。次世代の衛星を積んだM5ロケットの打ち上げも昨年二月に失敗しており、次の打ち上げまで約四年間、日本の「お家芸」であるX線天文学に空白が生じることになる。



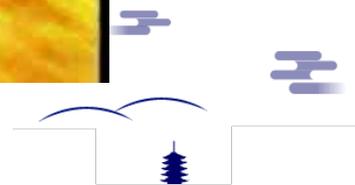
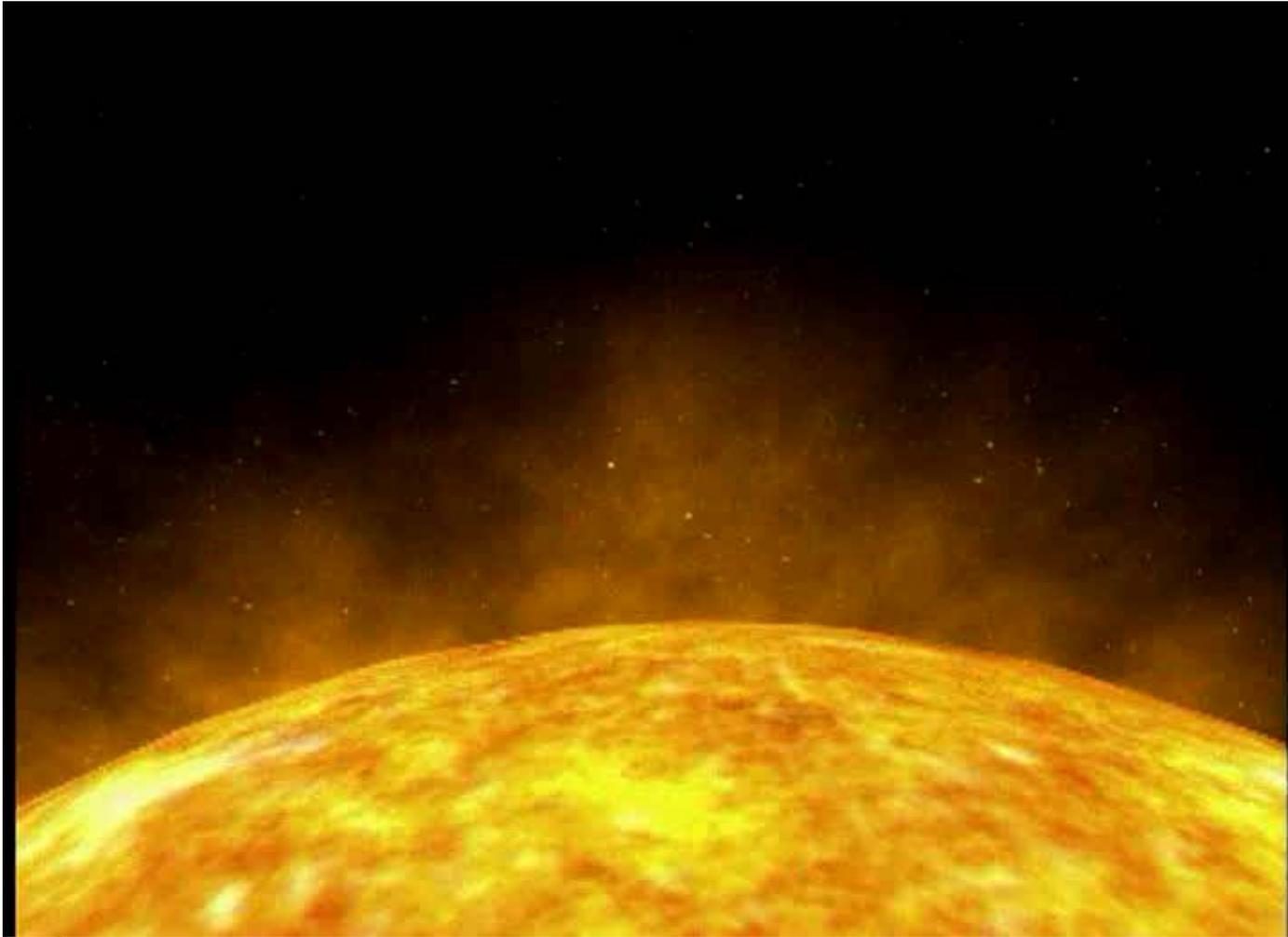
宇宙天気起因する障害

- 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。

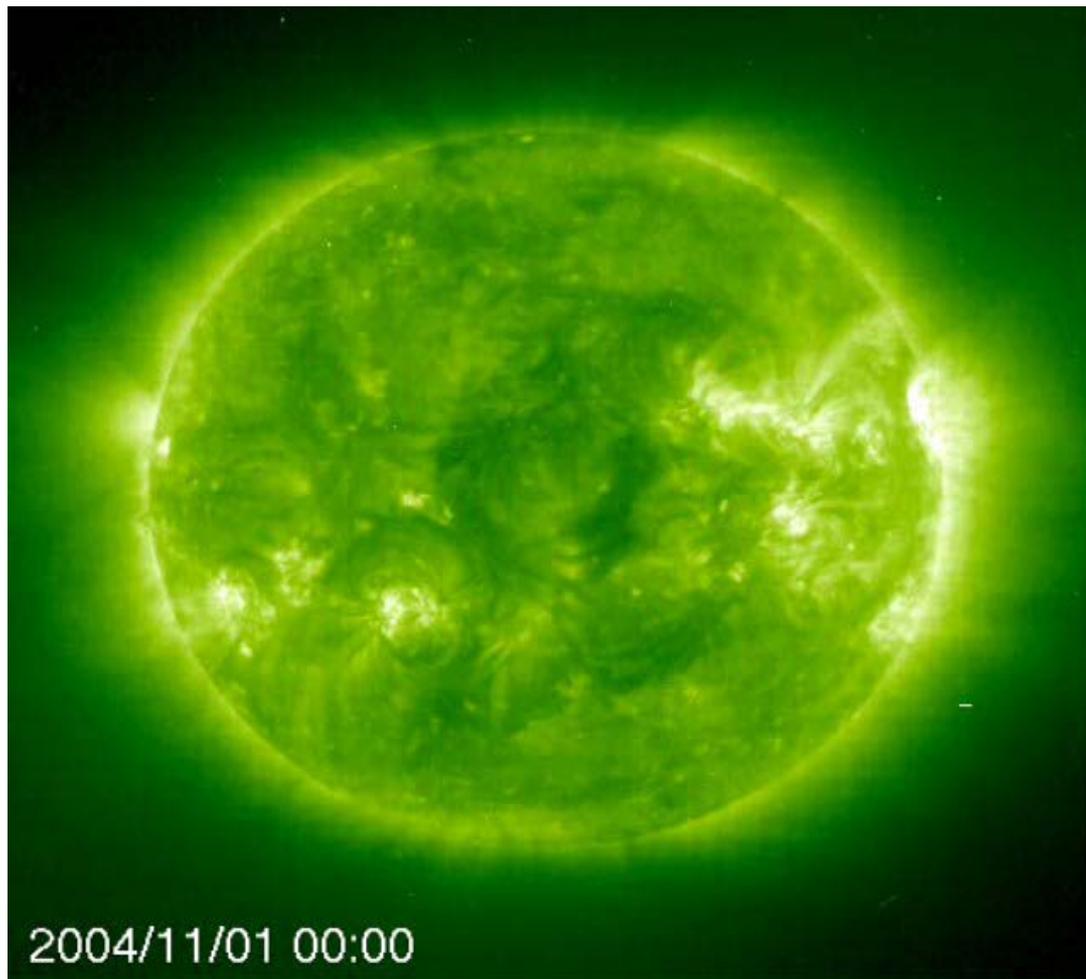


国際宇宙ステーション

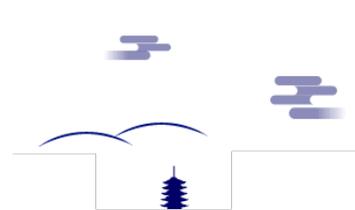
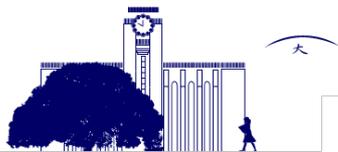
宇宙の嵐



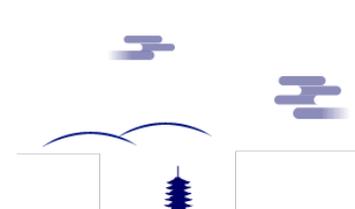
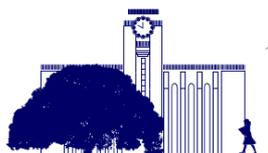
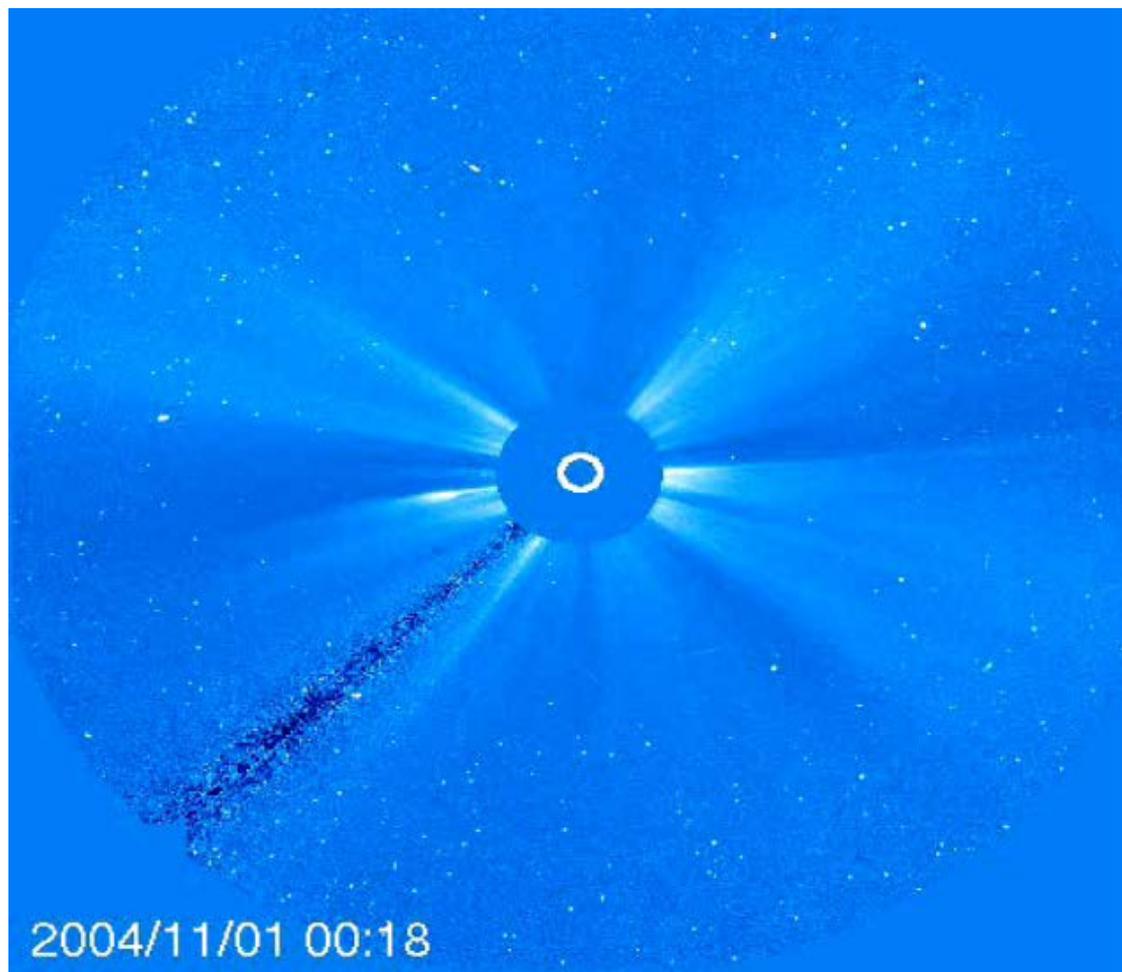
極端紫外線による観測



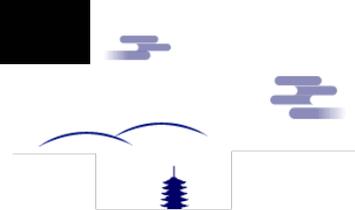
2004/11/01 00:00



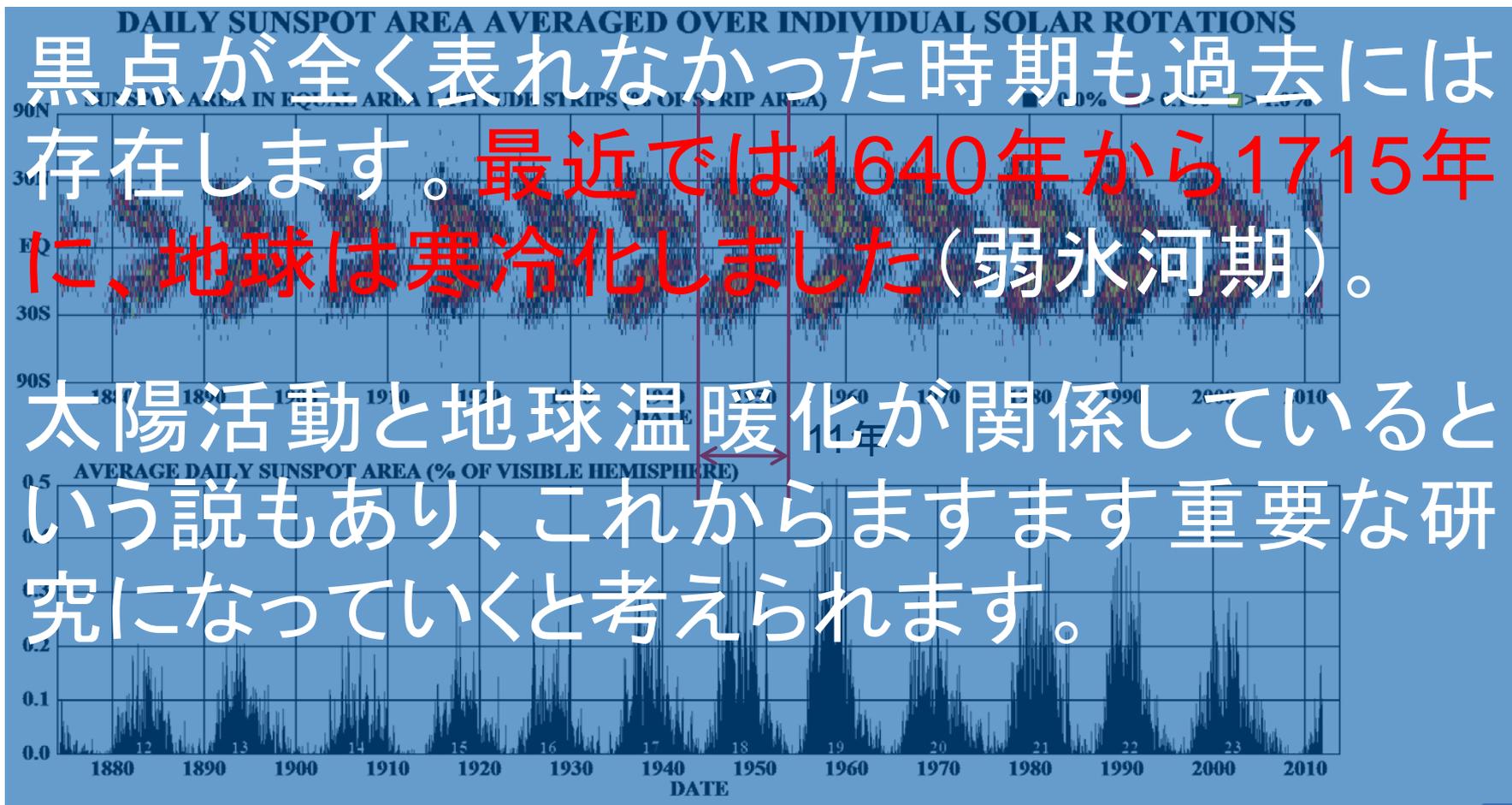
コロナ大規模ガス噴出現象



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。最近では1640年から1715年に、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/>

HATHAWAY/NASA/MSFC 2012/02

このような現象を調べるには

- 観測では、時空間分離が難しく、3次元構造の把握も難しい。
- 探査機や衛星を上げるには、時間とお金がかかる。

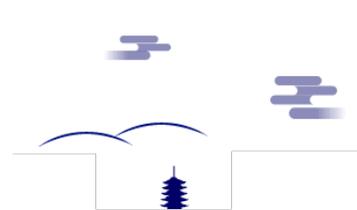


計算機シミュレーションによって、この領域を再現すれば良い。

なぜ数値シミュレーション

巨大で複雑な惑星磁気圏を調べるには 計算機シミュレーションが最適

- 惑星の100倍以上に広がる磁気圏全体を見るにはシミュレーションしか無い。
- 観測ではある時間の空間一点しかわからず、物理現象の理解が難しい。
- 磁気圏は $10\text{m} \sim 10^9\text{m}$ スケールまでの現象を含むマルチスケール環境であり、シミュレーションに最適。
- 最終的には人類が宇宙空間に出て行く際に安全な情報を提供できれば最高！



科学シミュレーションで注意すること

計算結果を疑う(信用しない)

数値シミュレーションは近似解

- 解く方程式が扱える物理を正確に把握する(流体近似など)
- 使う数値計算手法の特徴を把握する(衝撃波など)
- コンピュータの誤差も把握する(丸め誤差)
- 上記を考慮して計算結果を見る

すべてのアプリで↑を考えないと科学では使えない

- 市販アプリでの可視化やデータ解析など
- 観測結果のキャリブレーションも同様
- ボタン一つで近似直線など怖すぎる



科学シミュレーション

物理法則を利用し、現象の振る舞いを計算

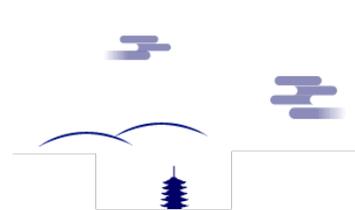
例えば、高校物理で習う加速度運動では

- $v = v_0 + at$, $x = v_0t + 1/2at^2$
- 加速度 a で動いている場合、 t 秒後には速度がどうなって、位置 x がどこなのかが分かる。

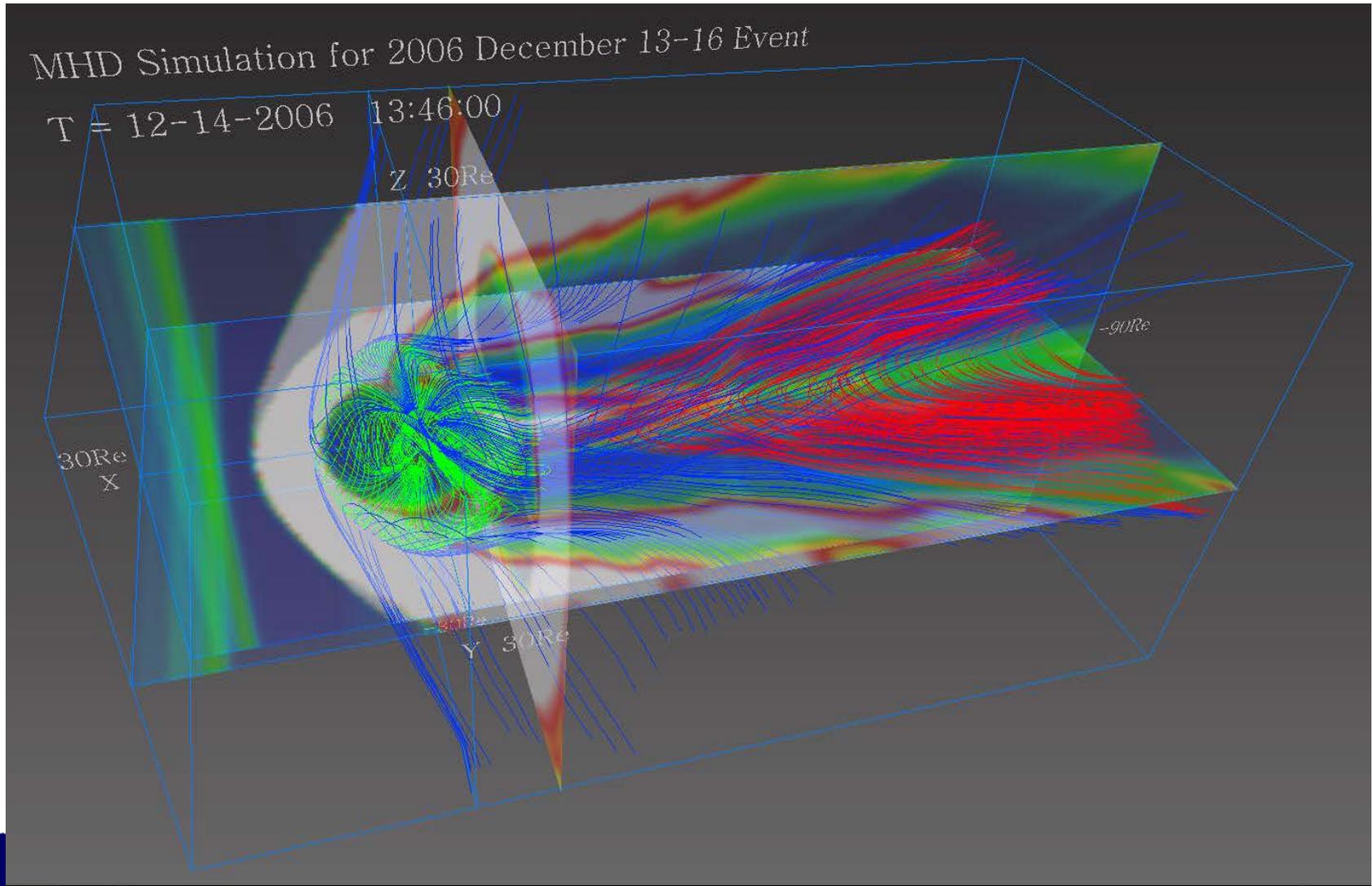
さらに運動方程式では

- $F = ma$
- F という力が質量 m にかかると、加速度 a がかかると分かる。

このように、ある条件下でどんな動きをするのかを計算して、明らかにする。



地球磁気圏のシミュレーション



惑星磁気圏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

シミュレーションするにはその物理を支配する法則を知っていないといけない

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)。



惑星磁気圏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。
(実際は作業配列など
必要ですが)

この偏微分方程式を計算機で解くには、
四則演算に落とす必要がある



基本的な数値解法(陽解法)

移流方程式を差分化した場合($du/dt + c du/dx=0$)

- FTCS (Forward in Time and Central Difference in Space)

$$u_i^{t+1} = u_i^t - \frac{1}{2}v(u_{i+1}^t - u_{i-1}^t)$$

- Leap-Frog

$$u_i^{t+1} = u_i^{t-1} - v(u_{i+1}^t - u_{i-1}^t)$$

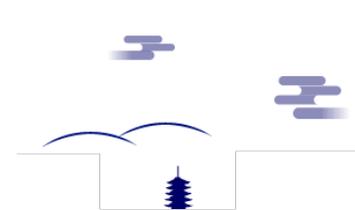
- Lax-Wendroff

$$u_i^{t+1} = u_i^t - \frac{1}{2}v(u_{i+1}^t - u_{i-1}^t) + \frac{1}{2}v^2(u_{i+1}^t - 2u_i^t + u_{i-1}^t)$$

- 単純な有限体積法 ($f=cu$)

$$u_i^{t+1} = u_i^t - \frac{\Delta t}{\Delta x}(f_{i+1/2}^t - f_{i-1/2}^t)$$

$v=c(\Delta t/\Delta x)$ で、クーラン数と呼ばれる。これが1を超える場合は解が不安定確実。



数値シミュレーションコード

- いろいろ計算手法はありますが、自分のMHDコードは「Modified Leap frog (MLF)法」[Ogino et al., 1992]を使っています。
- MLF法はtwo-step Lax-Wendroff法とLeap frog法の組み合わせ手法。
- 組み合わせることで、数値安定性と数値非拡散性をバランス良く取り込んでいる。

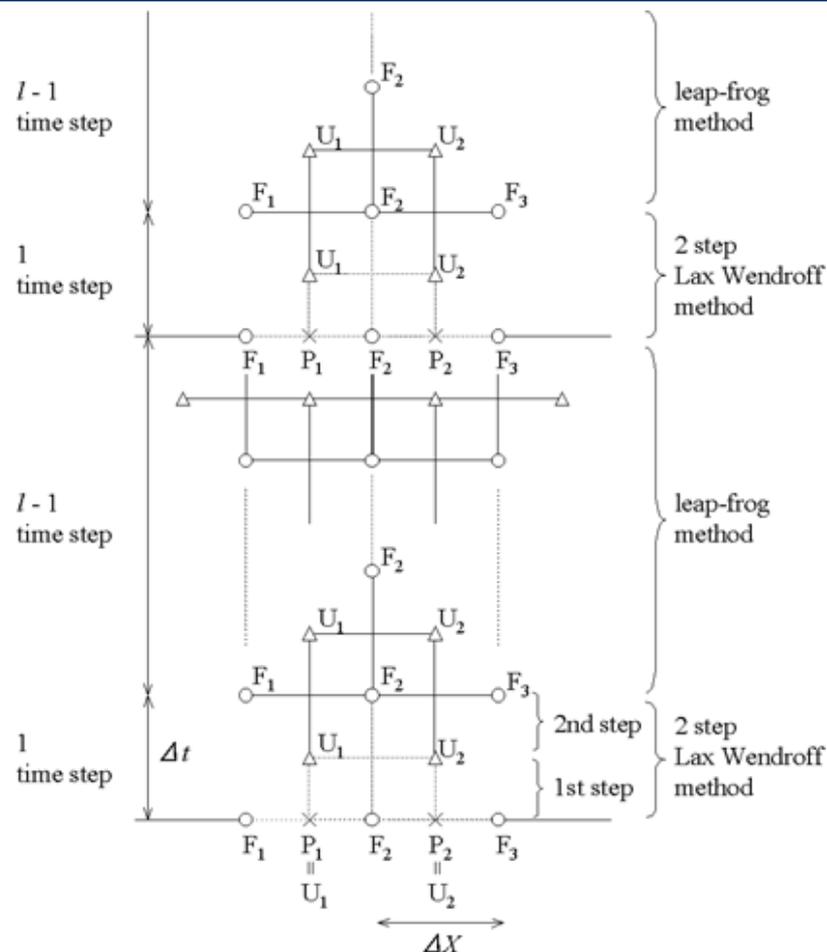


Fig. 1. Diagram of Modified Leap frog method



計算に必要なコンピュータ

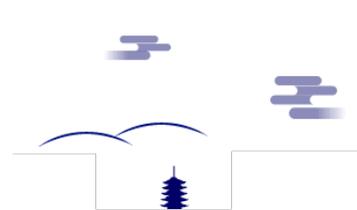
MHDシミュレーションで正確な地球磁気圏シミュレーションを行うためには $10,000^3 \times 8$ の計算格子が必要。

→ 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？



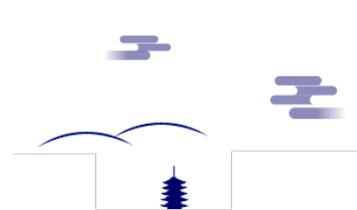
今の計算は意味が無いのか？

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。



最新の地球磁気圏計算結果

京を利用して、MHDシミュレーション。
京の2,016ノード(全体の1/40)を使って、計算サイズは、
6,000 × 4,000 × 4,000 (3TB)程度で2年程度の期間計算。

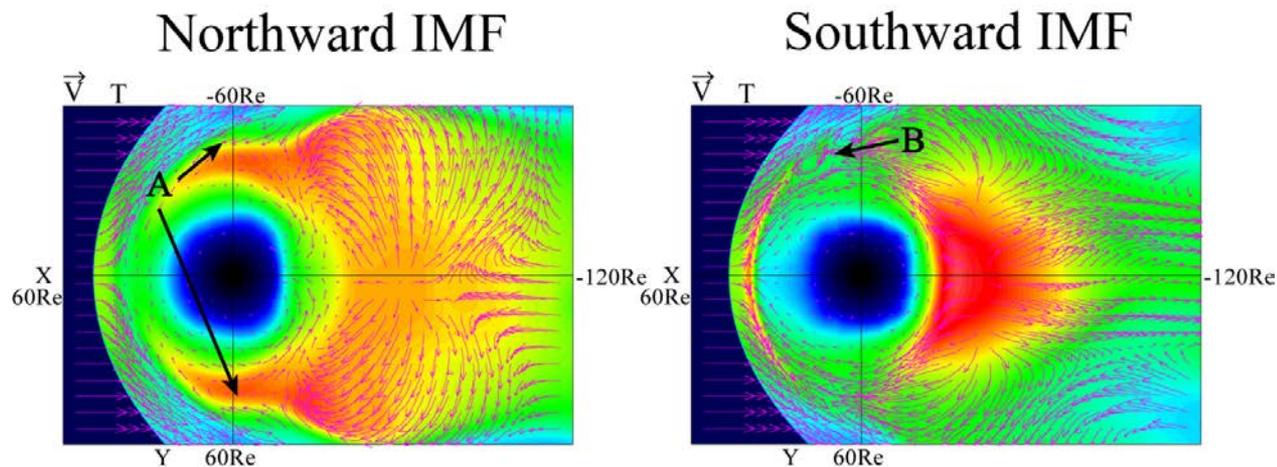


Fig. 磁気圏シミュレーション結果(赤道面におけるプラズマ温度とプラズマの動き)



京大スパコン(2016年10月~)

© 2016 H. Nakashima

Camphor 2



CRAY XC40

Xeon Phi KNL @ 1.4GHz/68c
3.05TFlops : (16+96)GB : 15.8GB/s
→ 5.48PFlops (1,800n / 122,400c) :
197TB : 15.5TB/s
DATAWARP (burst buffer)
230TB, 200GB/sec

Camellia



CRAY XC30

Xeon Phi KNC + Xeon
@ 1.053GHz/60c + 2.5GHz/10c
1.21TFlops : (8+32)GB
→ 583.6TFlops(482n/33,740c):
18.8 TB

Storage



ExaScaler
16+8PB, 100+50GB/sec
 IME (burst buffer)
230TB, 250GB/sec

InfiniBand FDR/EDR (6.8/12.1GB/s•link)

Laurel 2



CRAY CS400 2820X1

Xeon Broadwell @ 2.1GHz/18c x 2
1.21TFlops : 128GB : 12.1GB/s
→ 1.03PFlops (850n / 30,600c) : 106TB

Cinnamon 2



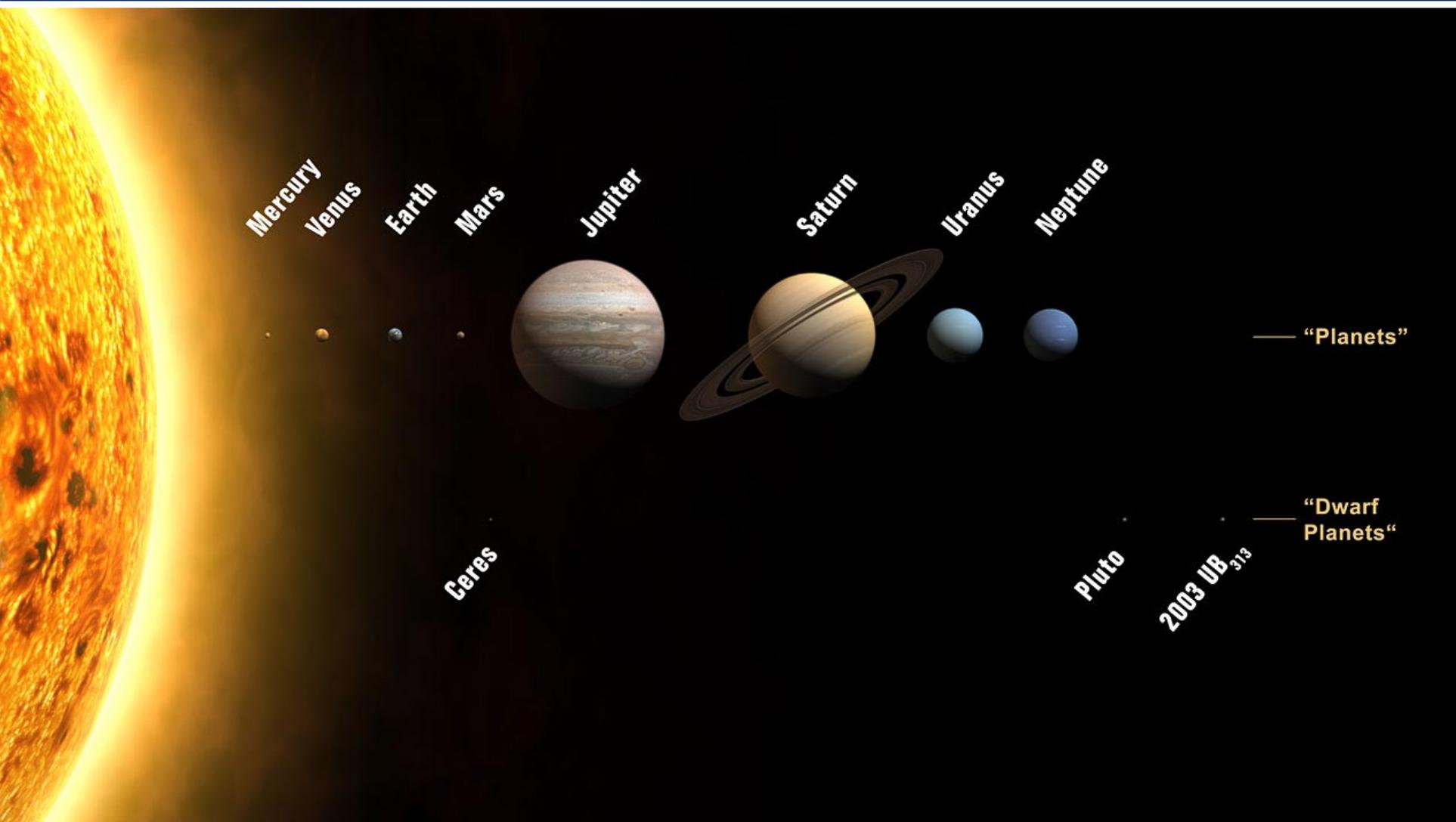
CRAY CS400 4840X

Xeon Haswell @ 2.3GHz/18c x 4
2.65TFlops : 3TB : 24.2GB/s
→ 42.3TFlops (16n / 1,152c) : 48TB

Omni-Path (12.1GB/s•link, BB= 5.15TB/s)



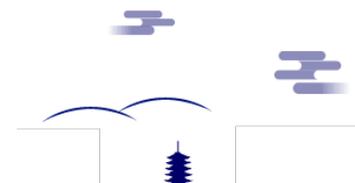
地球以外の磁気圏



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

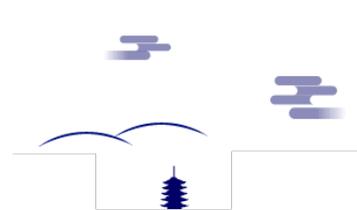
- Pioneer10 (1973), Pioneer11 (1974), Voyager1 (1979), Voyager 2 (1979), Ulysses (1992), Galileo (1995-2003), Cassini (2000), and New Horizon (2007)

4機の探査機が土星を観測

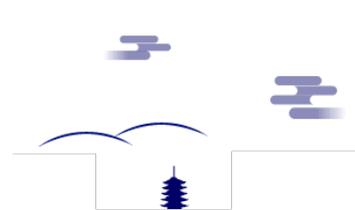
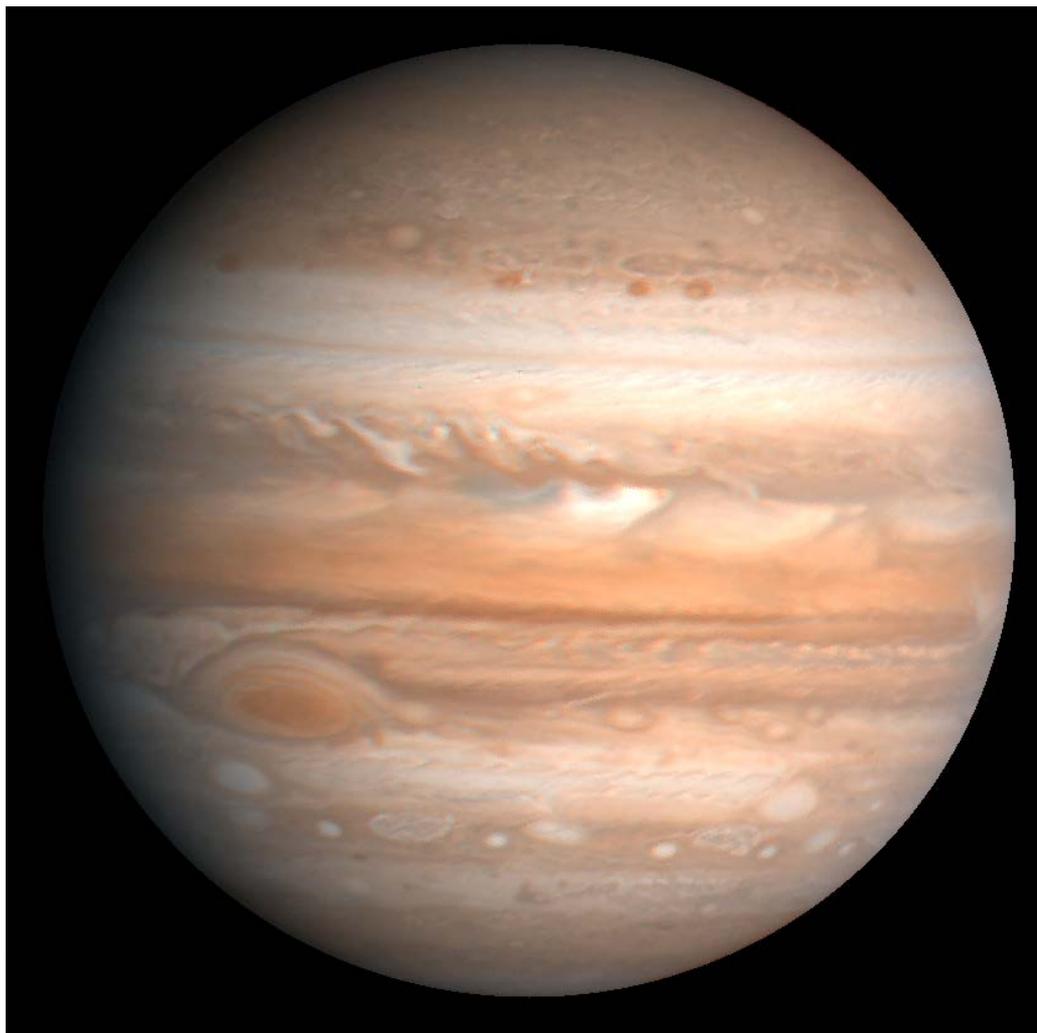
- Pioneer11 (1979), Voyager1 (1980), Voyager 2 (1981), Cassini (2004 - 2017)

将来探査

- JUNO (launched in 2011, arrived at Jupiter in 2016)
- JUICE (launch in 2020)

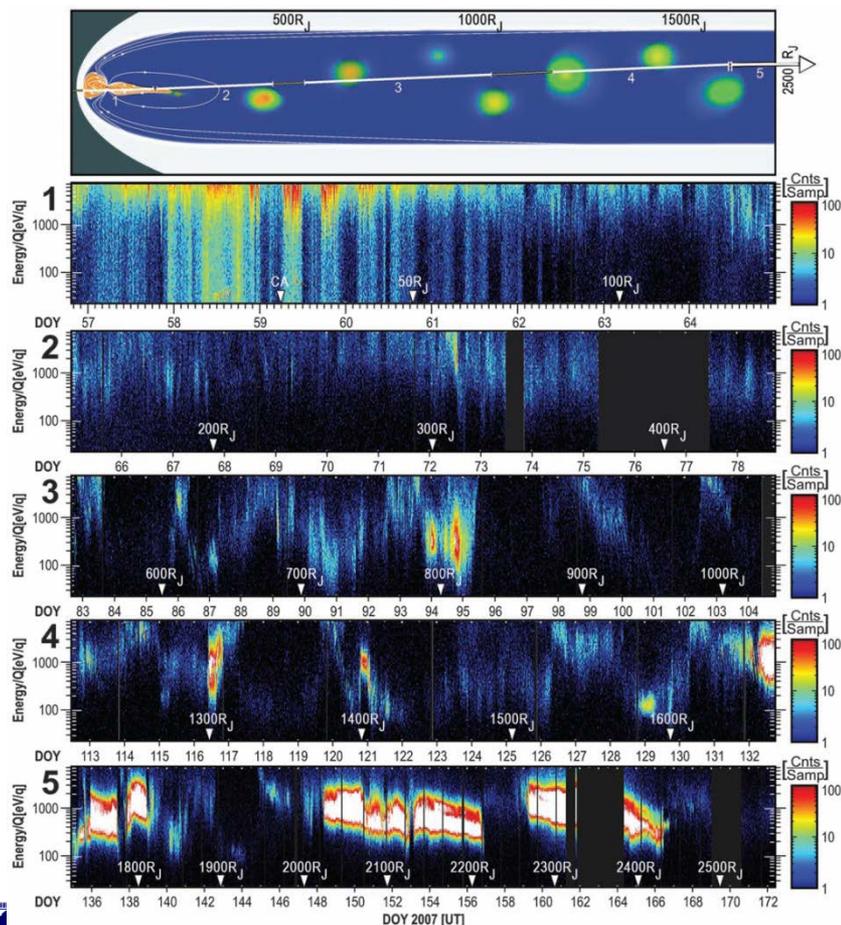


木星磁気圏シミュレーション



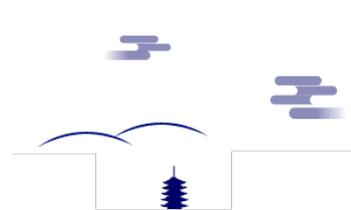
木星におけるおもしろい観測結果

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

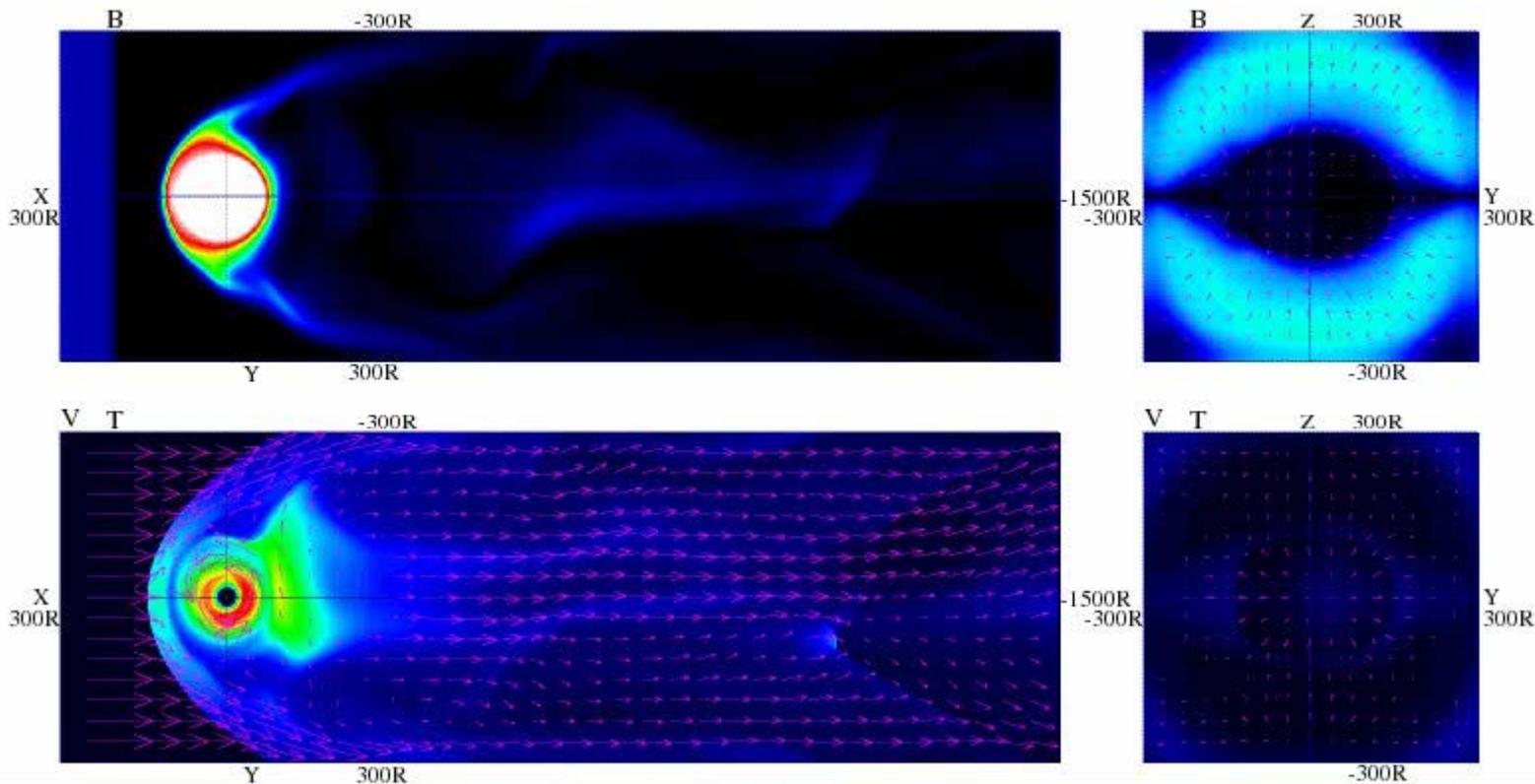
Fig. Plasma observations from just after NH's inbound crossing of Jupiter's magnetopause late on DOY 56, through closest approach at $\sim 32 R_J$, and back down the magnetotail to $>2500 R_J$. [McComas et al., 2007]



木星シミュレーションムービー

Distant tail of Jovian Magnetosphere

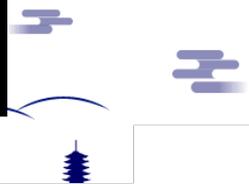
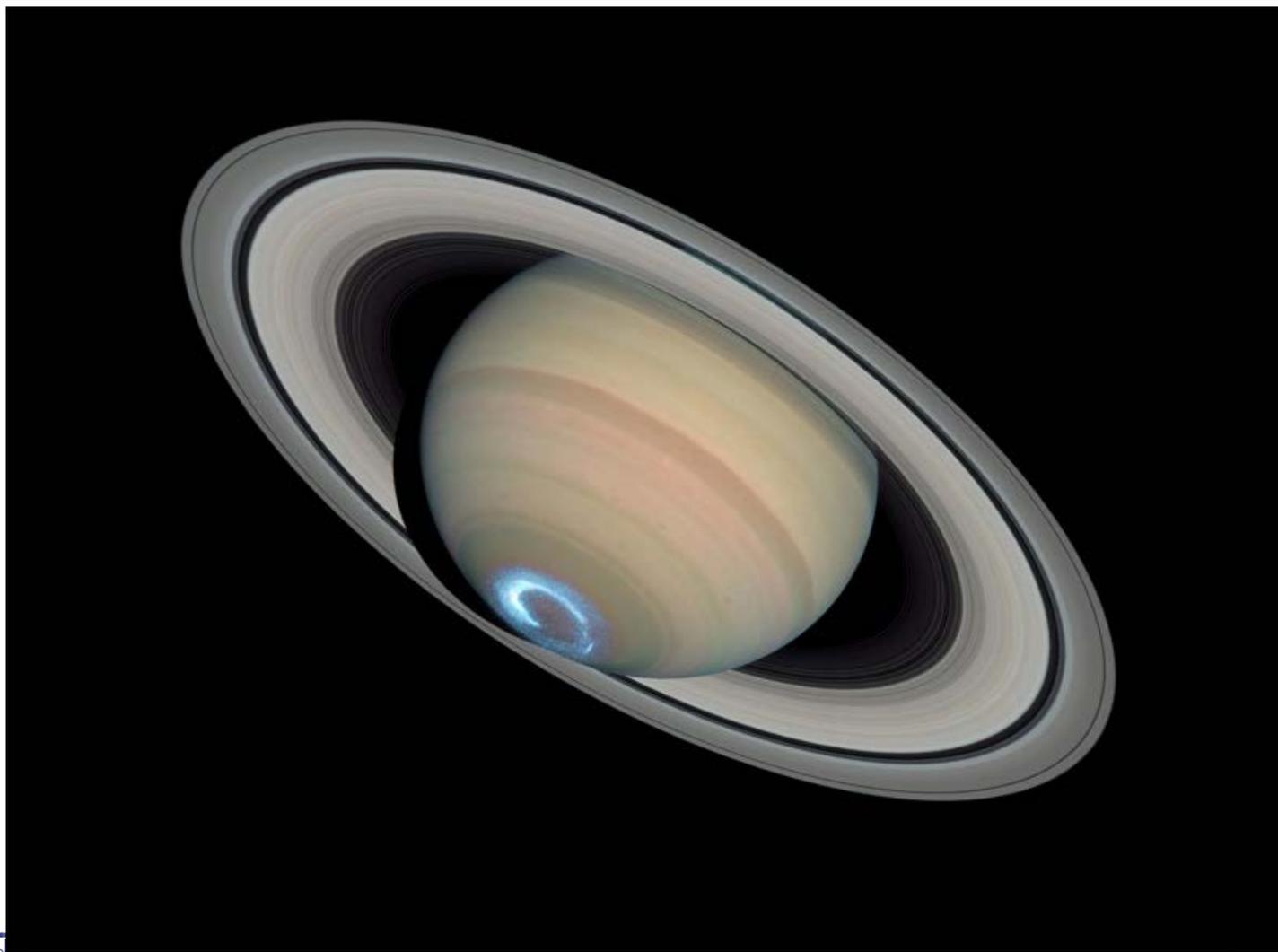
$B_z = 0.105 \text{ nT}$ $D_{sw} = 0.01125 \text{ nPa}$ $t = 1323 \text{ hours}$



計算サイズ $1200 \times 400 \times 400 = 6\text{GB} \times 300 = 1.8\text{TB} @ 2008\text{年}$



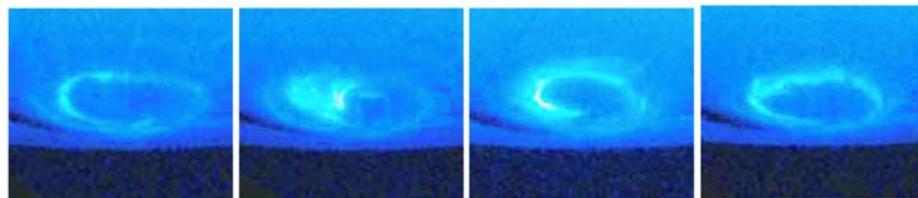
土星磁気圏シミュレーション



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

Cassiniが太陽風を観測して、ハッブルが土星のオーロラを撮像。



土星磁気圏の乱れた対流構造、
渦構造に関係するのでは？
オラられるか原因は不明。

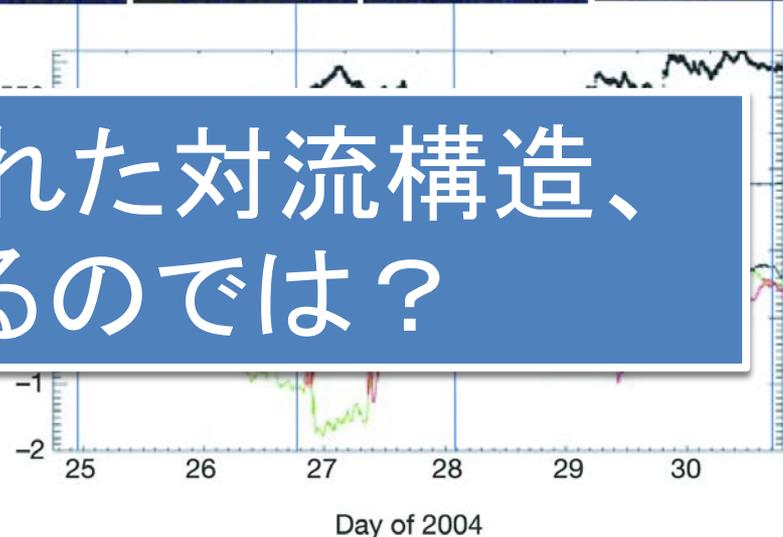


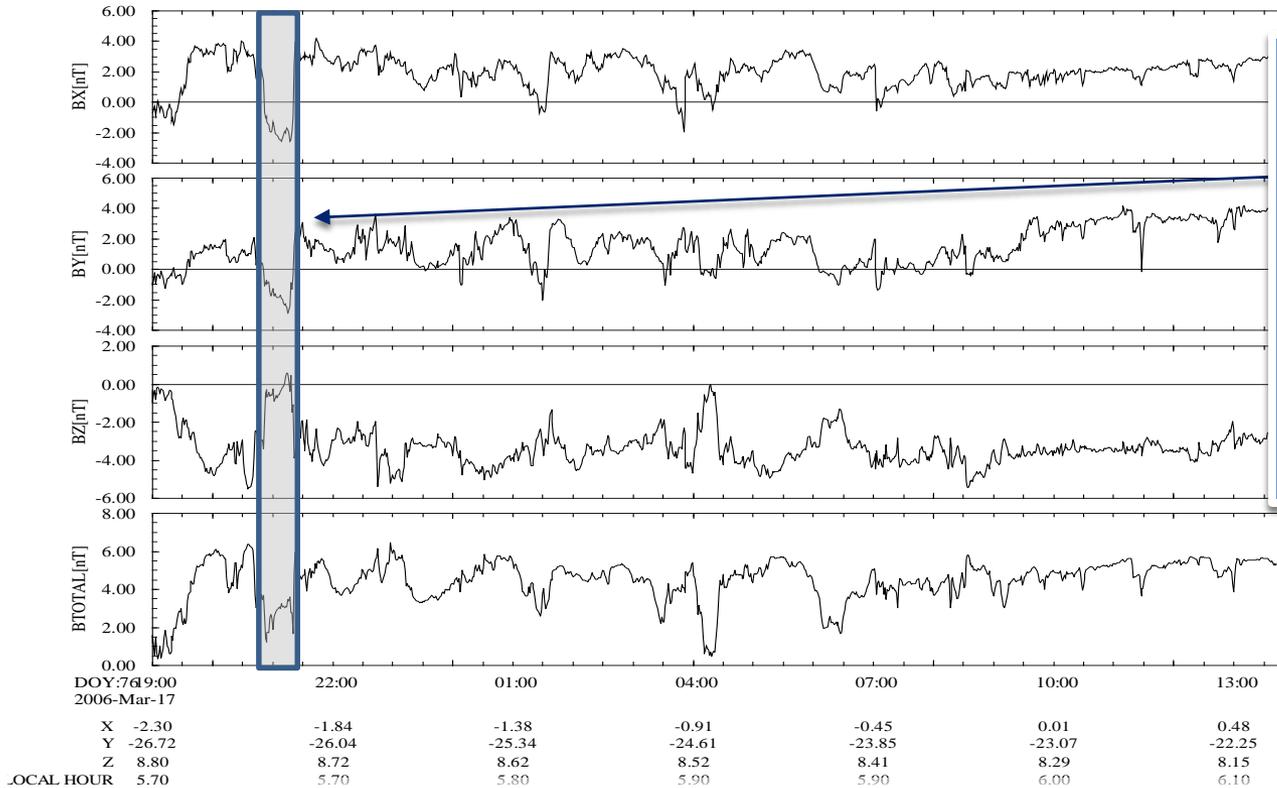
Fig. Comparison between HST images and solar wind conditions propagated to Saturn for the period 25–30 January 2004 [Crary *et al.*, 2005]



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

2006_FGM_KSO_1M

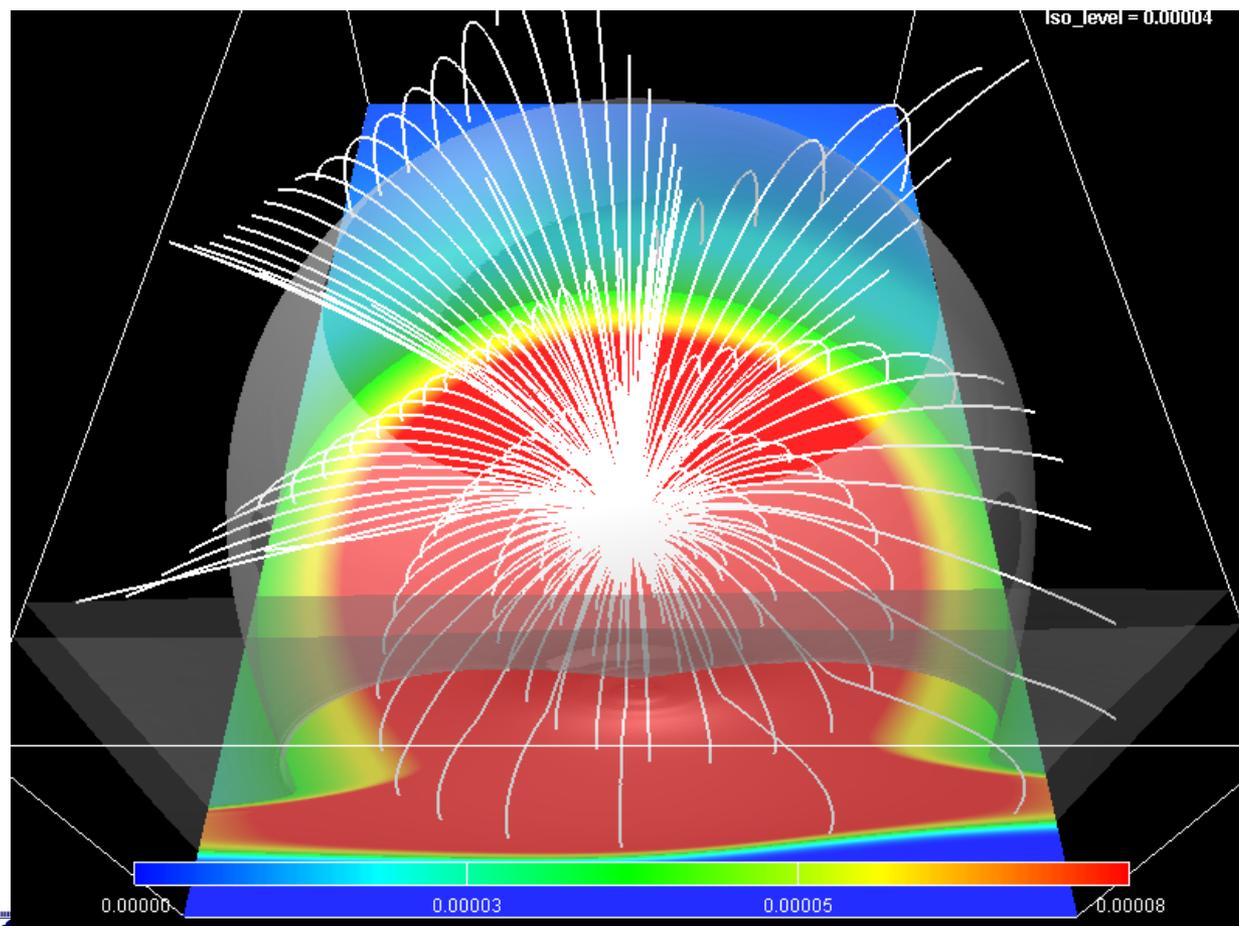


この磁場変化は磁気圏内における渦構造を示していると言われている

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



当時世界最大規模の計算により、渦構造とオーロラの関係調べている。

Fig. 土星磁気圏赤道面における磁場強度[Fukazawa et al., JGR, 2012]

計算サイズ 3000×2000×100=155GB×300=46TB@2012年

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

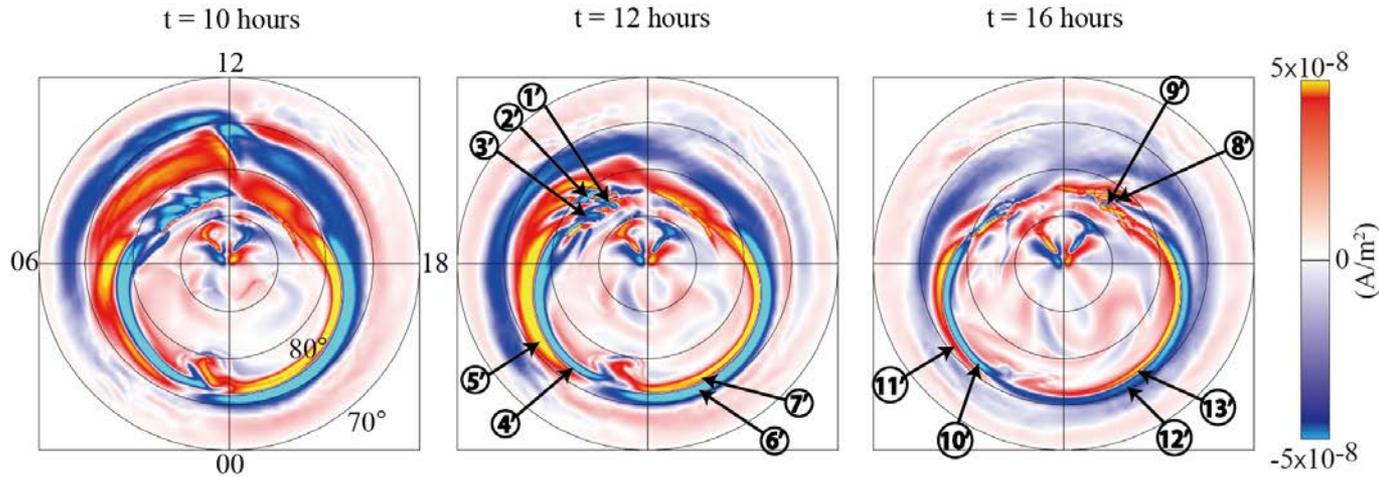


Fig. 土星磁気圏における沿磁力線電流の構造 [Fukazawa et al., JGR, 2012]

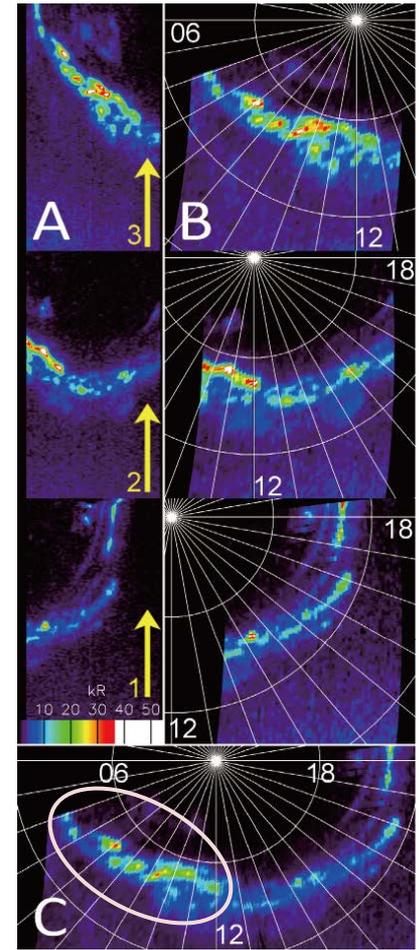
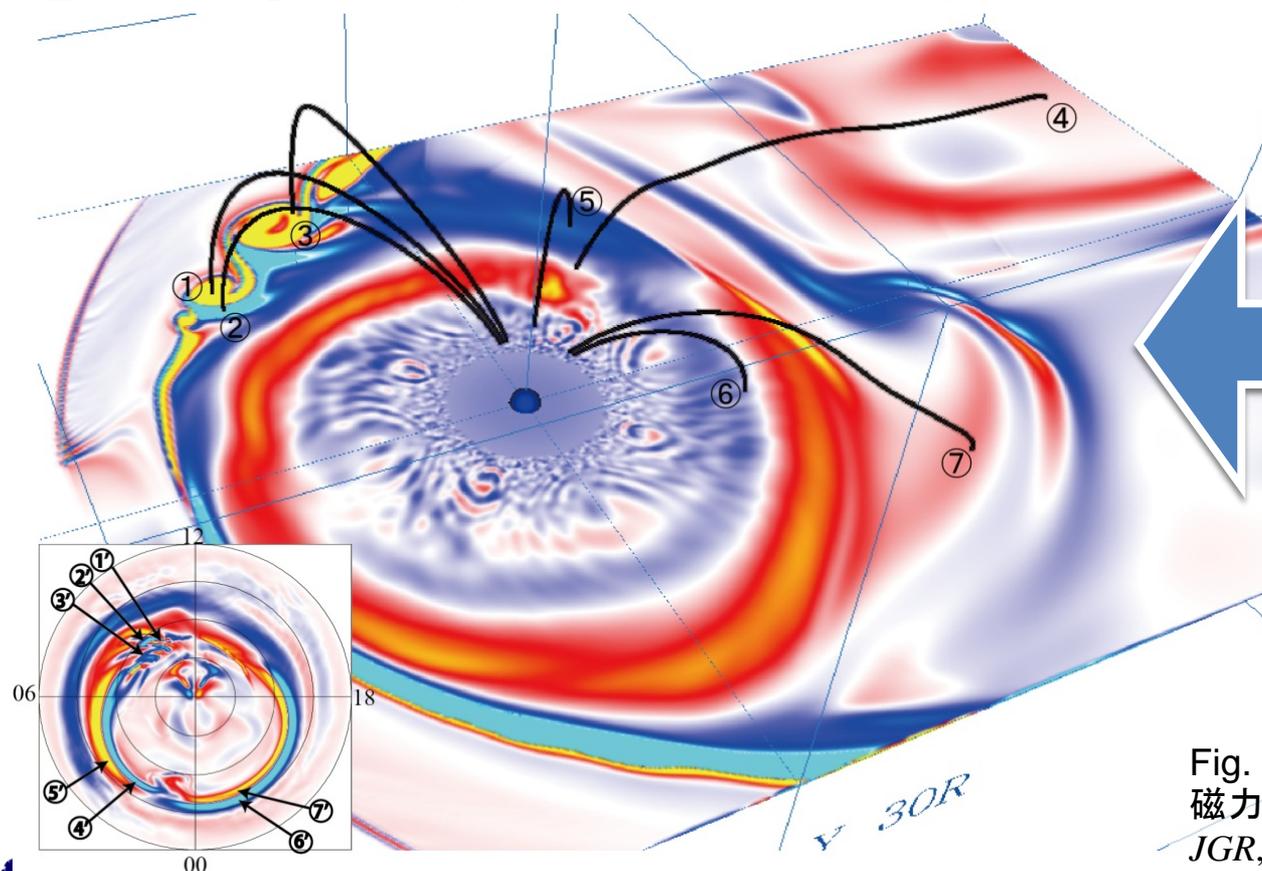


Fig. Pseudoimages obtained with the FUV channel of the Cassini - UVIS spectro - imager on DOY 239 (26 August) of 2008 [Grodent et al., 2011].

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, 2012]

最新の土星シミュレーション

58

シミュレーションの設定 (@FX10)

Grid size

- $3000 \times 2000 \times 2000 \times 8 \rightarrow$ about 700GB
- シミュレーションを実行するには上記の7倍のメモリが必要 (5TB)
- 空間の解像度は $0.06R_s$ (3600km)

Time scale

- Time stepは 0.0666sec、データ書き出し頻度は0.24hours毎
- 35時間分を計算するのに2年程度かかっている。
- 時間発展分を合わせて $(150+100+100) \times 700\text{GB} = 245\text{TB}$

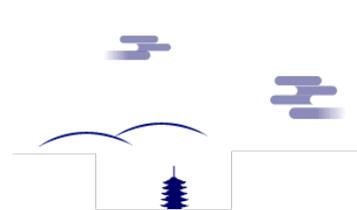


計算結果ムービー



まとめ

- ✓ 宇宙天気は意外と身近にある。
- ✓ 現在の惑星磁気圏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必要あり。



レポート

磁気圏のシミュレーションは、精度が足りない部分もあるが、現在宇宙天気におけるさまざまな擾乱を調べることに、予報することに利用されている。

今後より高い精度で計算可能となった場合、現在の予報ではなく、何か新しい磁気圏シミュレーションの利用方法を考えよ。

