

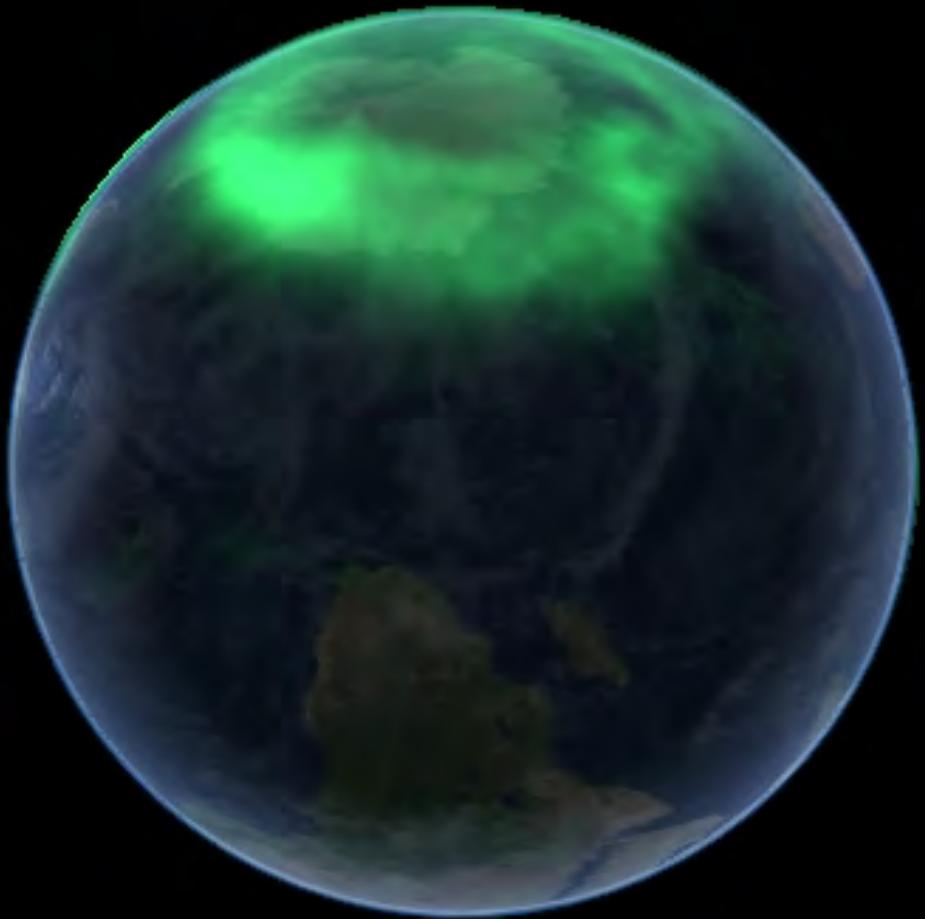
宇宙天気ミニ講座—磁気圏編—

情報通信研究機構 電磁波研究所 宇宙環境研究室

中溝 葵

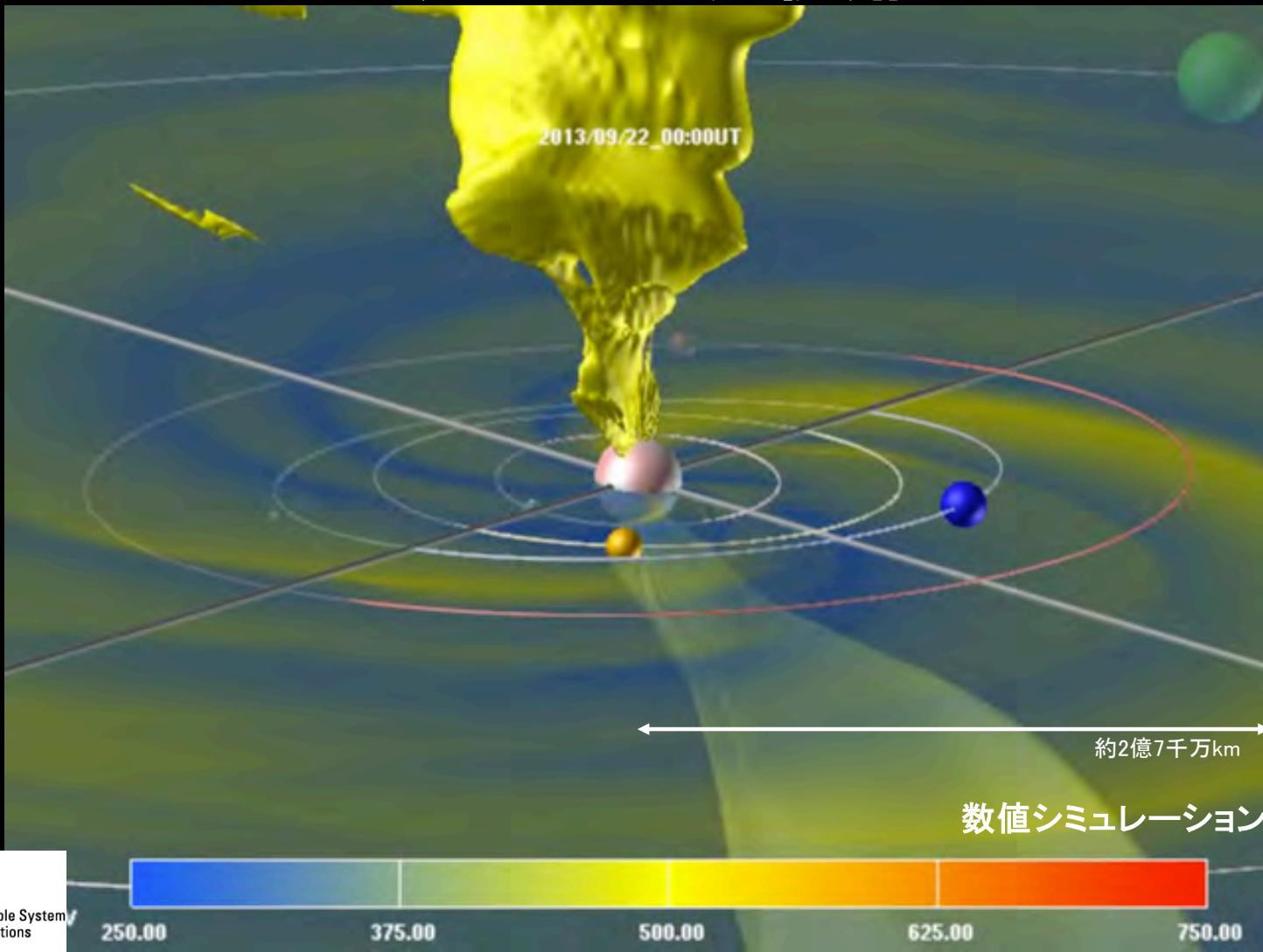
第15回宇宙天気ユーザーズフォーラム 2020年11月11日





IMAGE衛星で撮像されたオーロラ(<https://www.nasa.gov/>)

太陽風の大規模構造



SUSANOO
Space-weather-forecast-Usable System
Anchored by Numerical Operations
and Observations

動画

磁気圏の形成

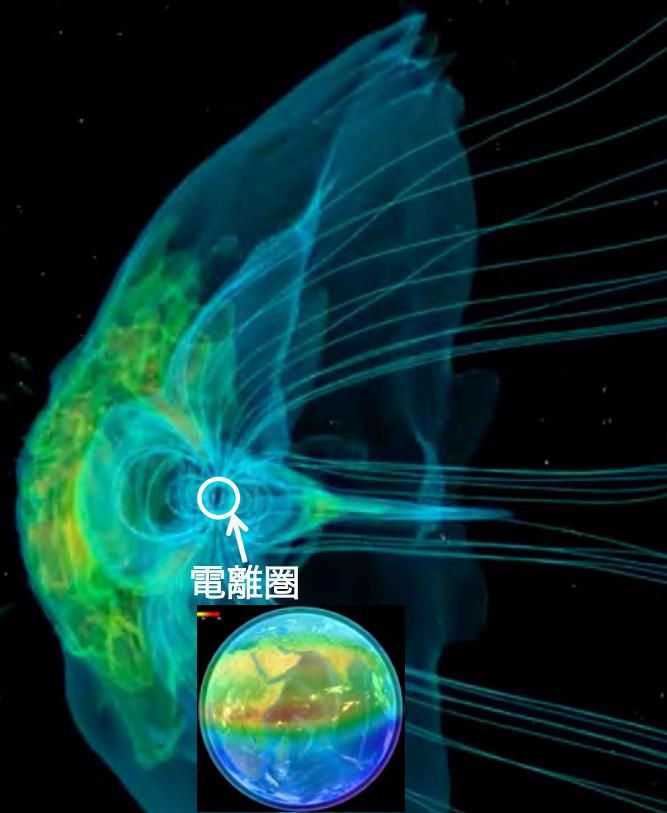
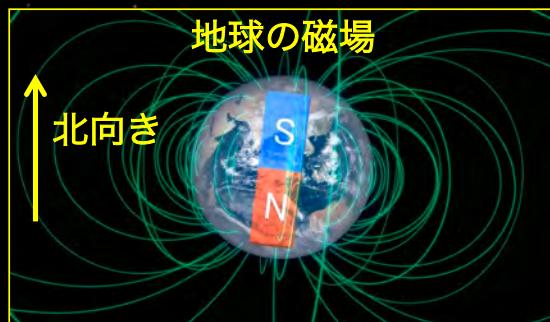


地球の磁場：双極子磁場（南極はN極、北極はS極）。
太陽風により変形（前面は圧縮・反対側は伸びている）。地球磁場の勢力範囲 = 磁気圏
磁気圏によって生命に有害な高エネルギー粒子の侵入が遮られている。

電離圏：太陽X線や紫外線から生命を守るバリア
磁気圏：太陽風・宇宙線から生命を守るバリア
太陽風エネルギーの流入・蓄積・解放→さまざまな宇宙天気現象が発生。

動画

磁気圏の形成



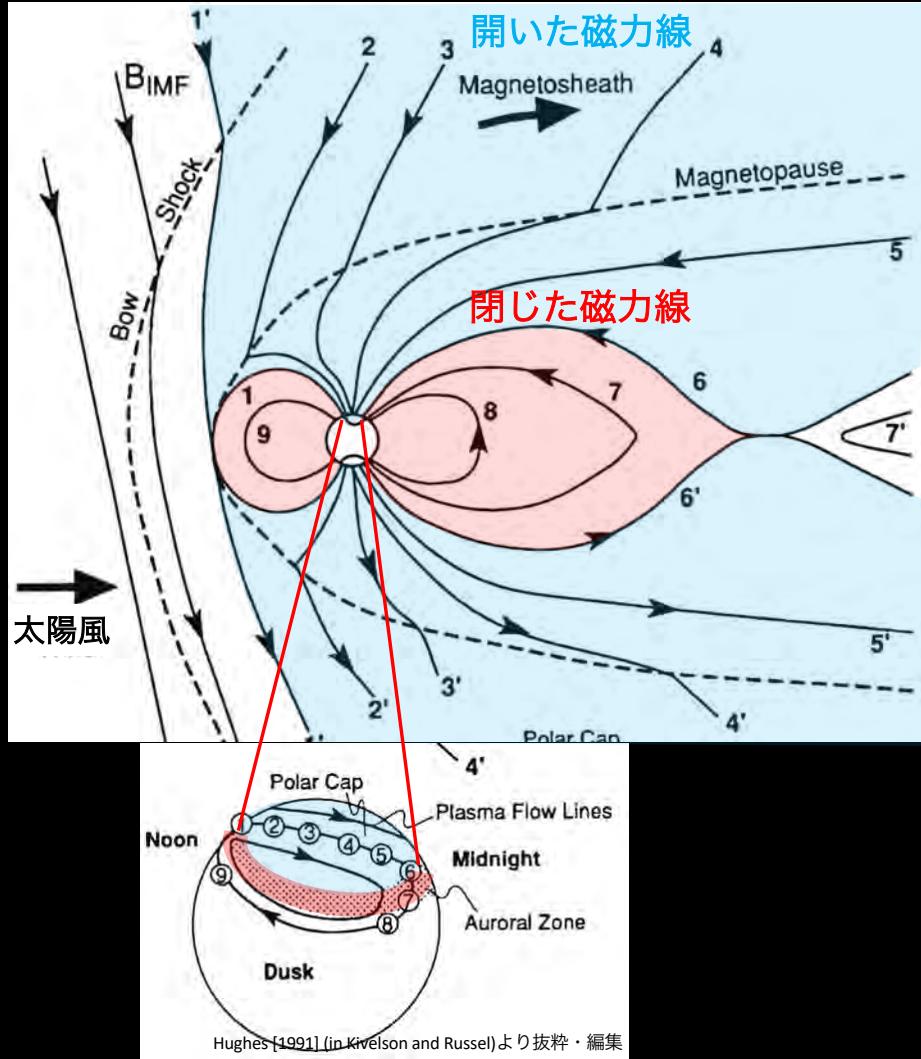
地球の磁場：双極子磁場（南極はN極、北極はS極）。
太陽風により変形（前面は圧縮・反対側は伸びている）。地球磁場の勢力範囲 = 磁気圏
磁場によって生命に有害な高エネルギー粒子の侵入が遮られている。

電離圏：太陽X線や紫外線から生命を守るバリア

磁気圏：太陽風・宇宙線から生命を守るバリア

太陽風エネルギーの流入・蓄積・解放→さまざまな宇宙天気現象が発生。

太陽風エネルギーの入り方

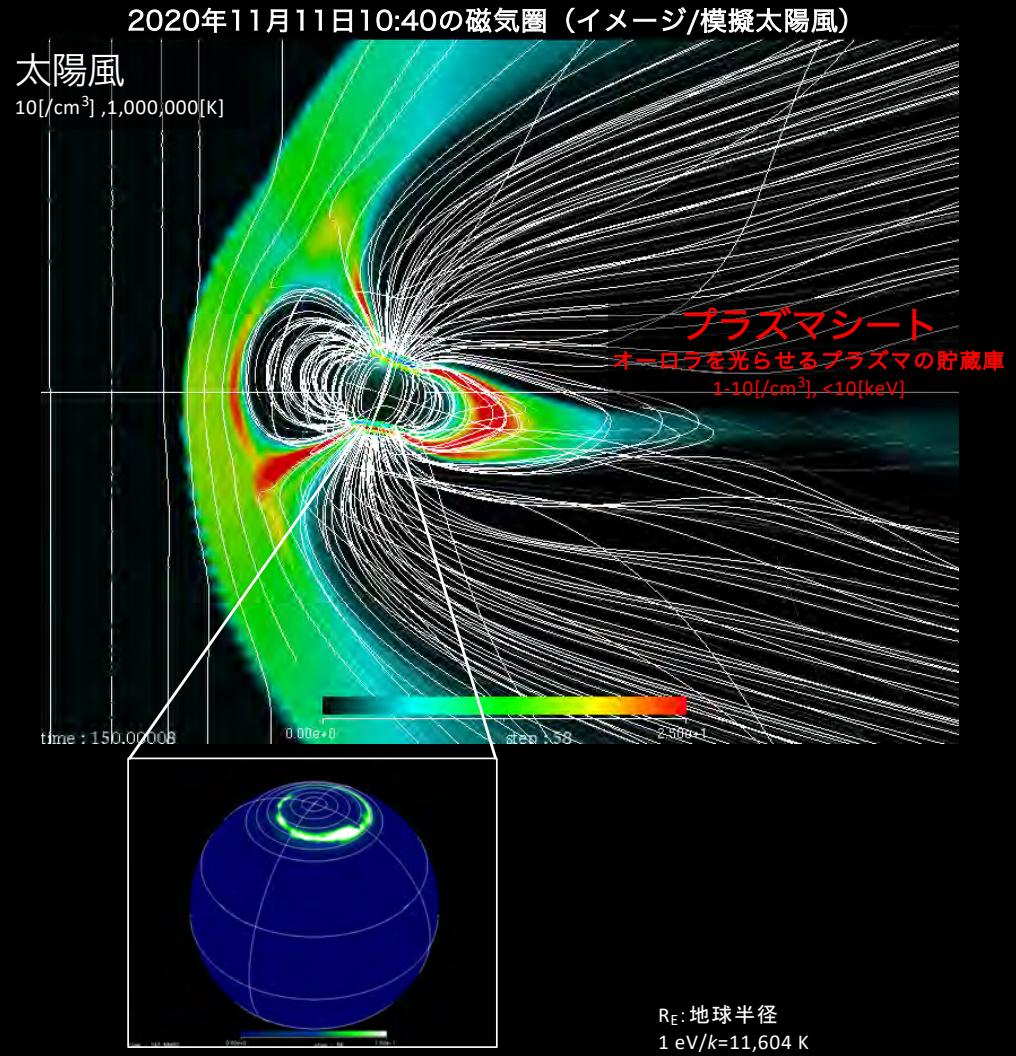
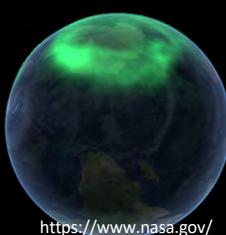
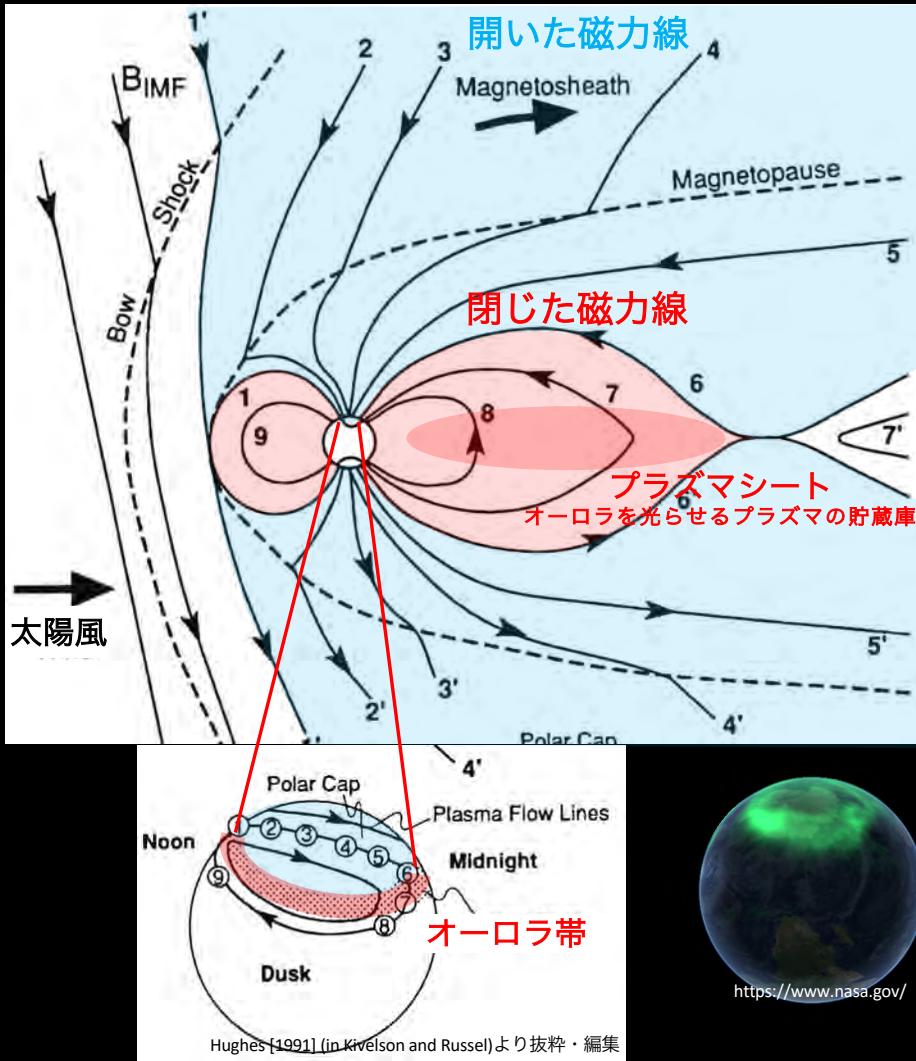


太陽風磁場が南向き成分を持つと…

1. 磁気圏前面で太陽風磁場と地球磁場は反平行：磁力線が繋ぎ替わる
太陽風プラズマが磁気圏に入る
2. 一方の端が太陽風とつながった開いた磁力線が生成
3. ↓
4. 「開いた磁力線」は太陽風とともに尾部（後方）に運ばれる
5. ↓
6. 尾部で南北の開いた磁力線が近づく(反平行)
磁力線が繋ぎ替わり閉じた磁力線に
7. ↓
8. 閉じた磁力線は元に戻ろうとする力によって地球の方に移動
9. ↓

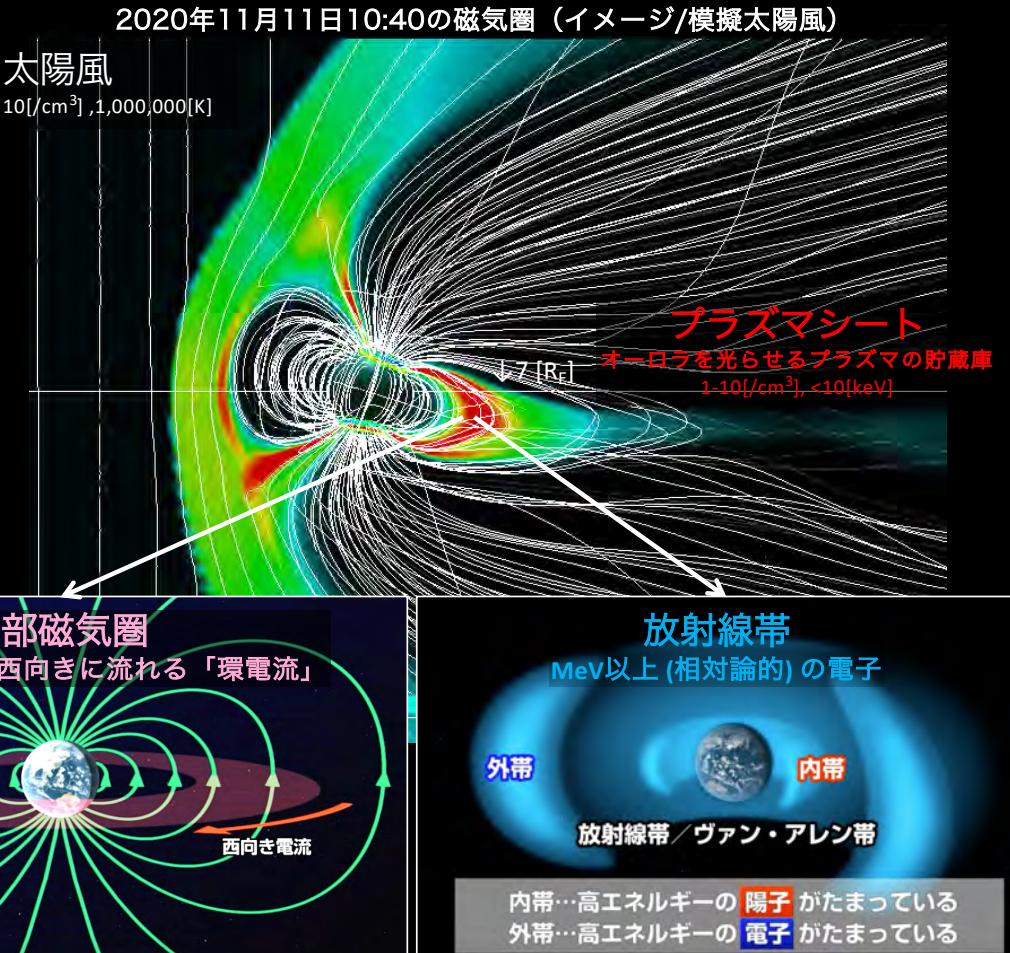
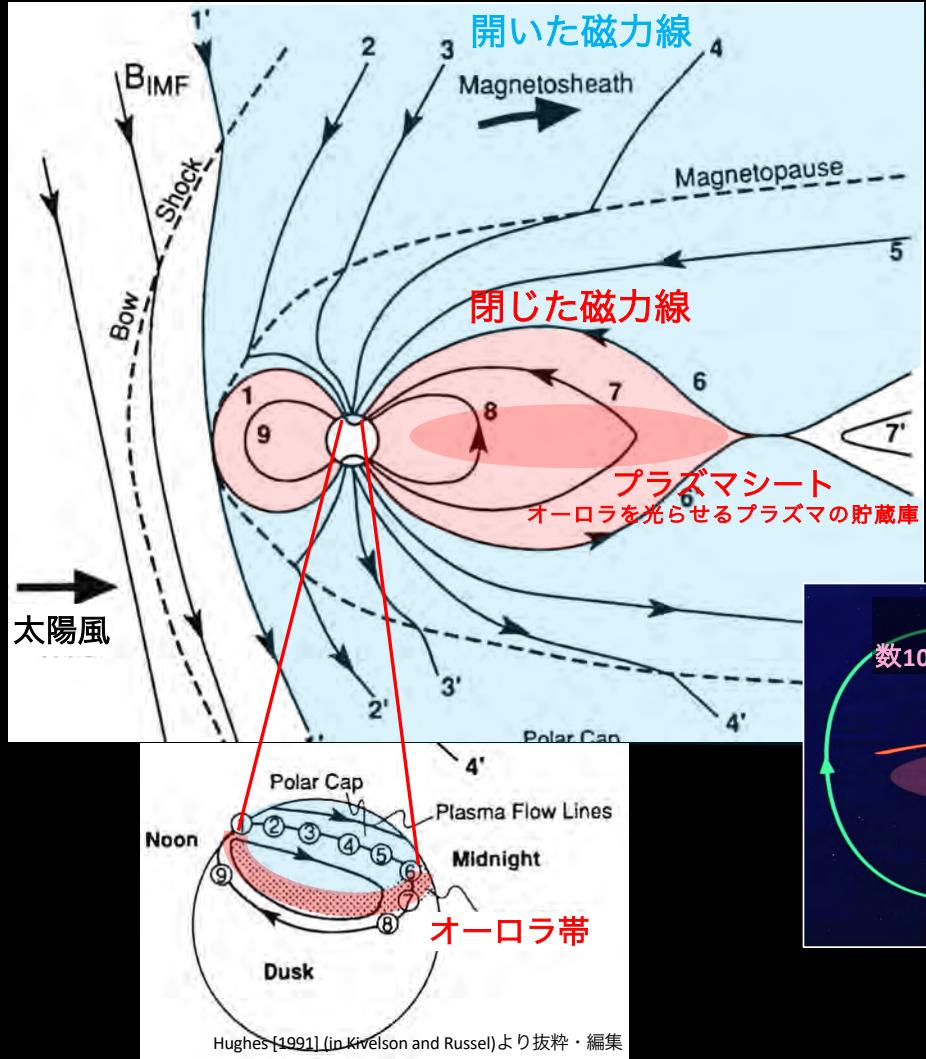
磁力線と一緒に太陽風起源のプラズマも磁気圏内を移動
電磁場の作用を受けさまざまな領域を形成
(一連の磁場・プラズマの循環：磁気圏対流)

さまざまな領域

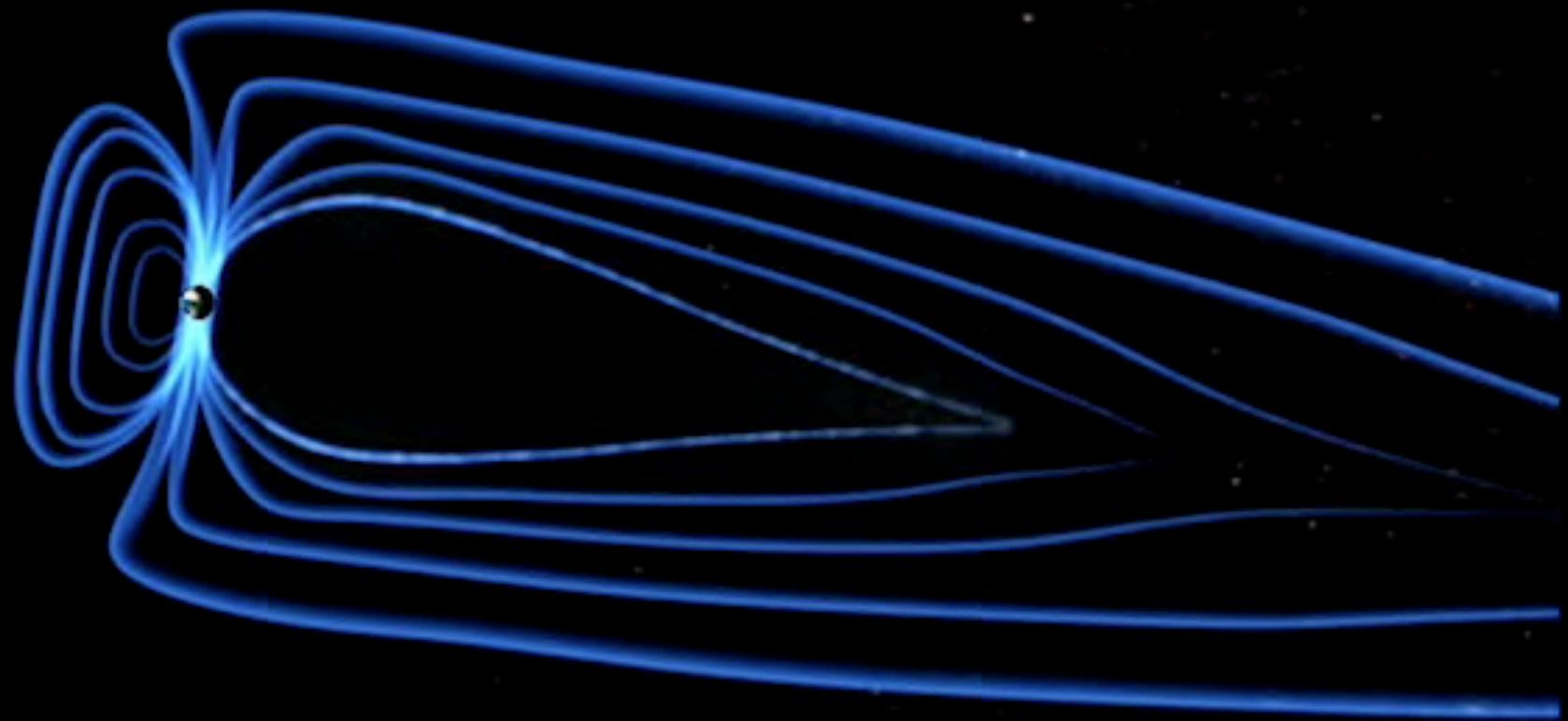


R_E : 地球半径
 $1 \text{ eV}/k = 11,604 \text{ K}$
 k (ボルツマン定数) = $8.617 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$

さまざまな領域



オーロラ嵐「サブストーム」



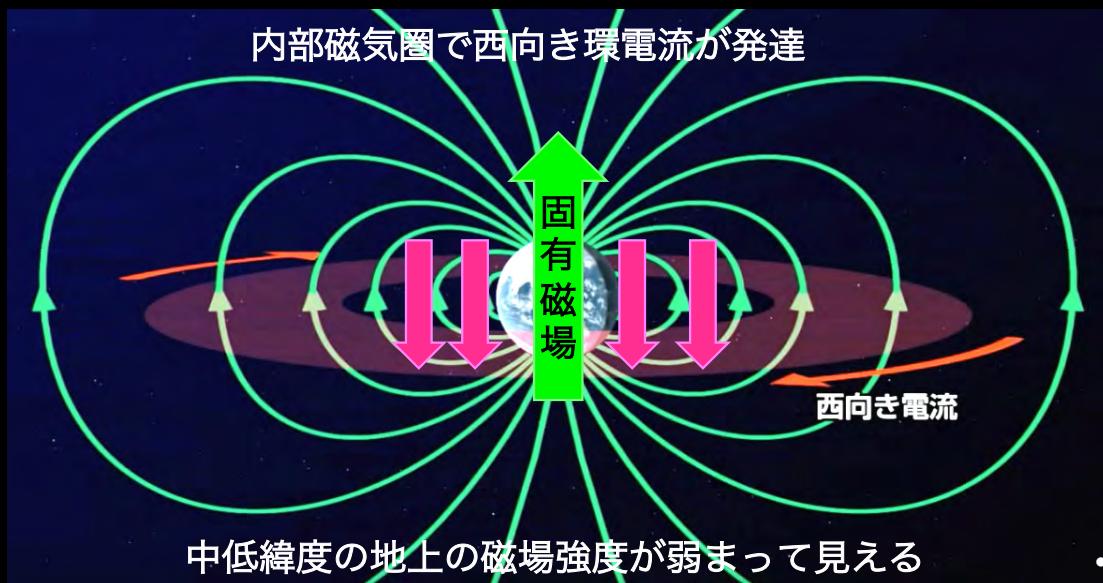
©THEMIS, NASA

動画

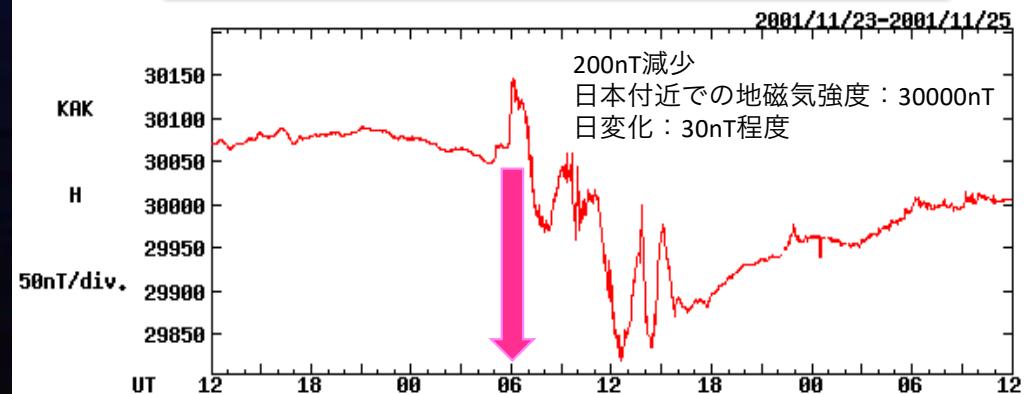
磁気嵐

太陽風エネルギー流入がさらに大きい場合（太陽風南向き磁場がとても強い・高速太陽風）

- ・ 強いサブストームが頻発→オーロラ帯に強い電流が流れる
- ・ 西向き環電流が発達

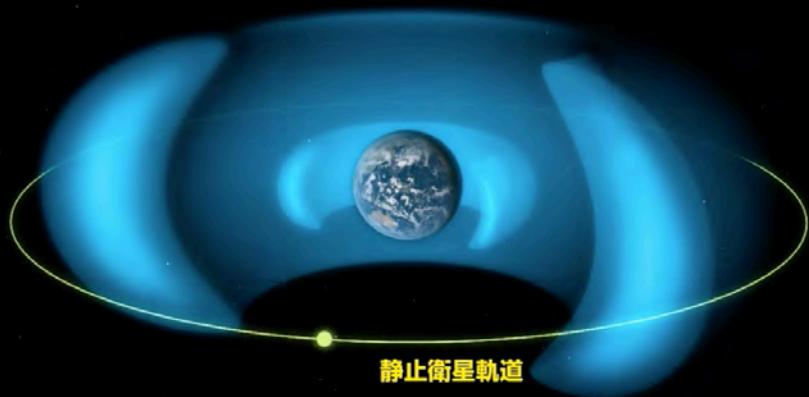


気象庁柿岡地磁気観測所（茨城県柿岡データ）

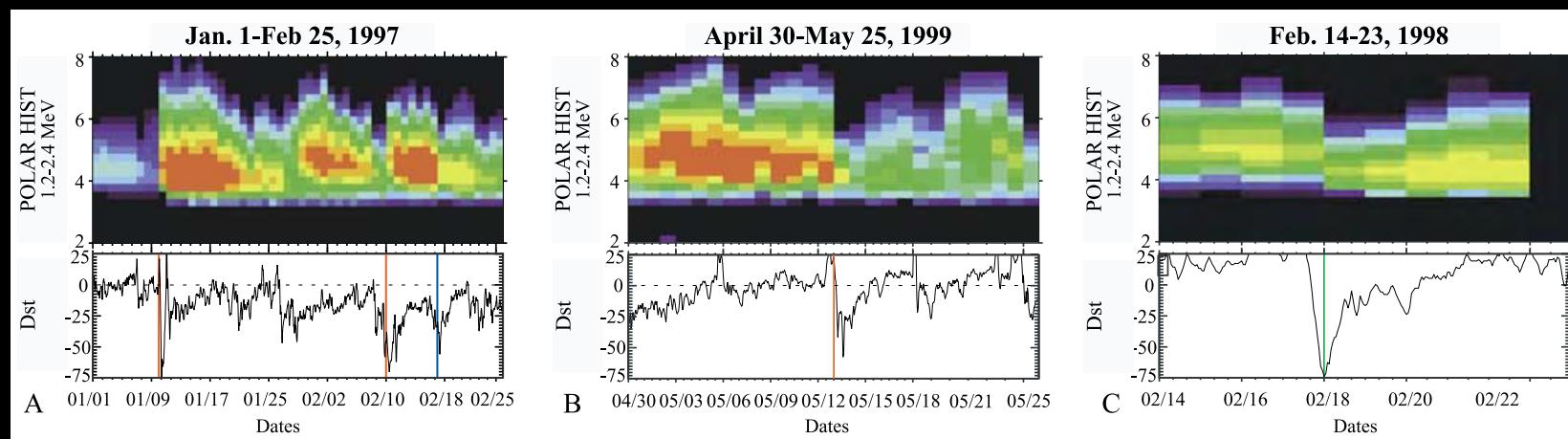


- ・ 地磁気擾乱（サブストーム・磁気嵐）の基準
気象庁地磁気観測所データ（K指数）
- ・ NICT宇宙天気予報でも地磁気観測所のデータを地磁気擾乱レベルの基準として利用させていただいている。

放射線帯変動



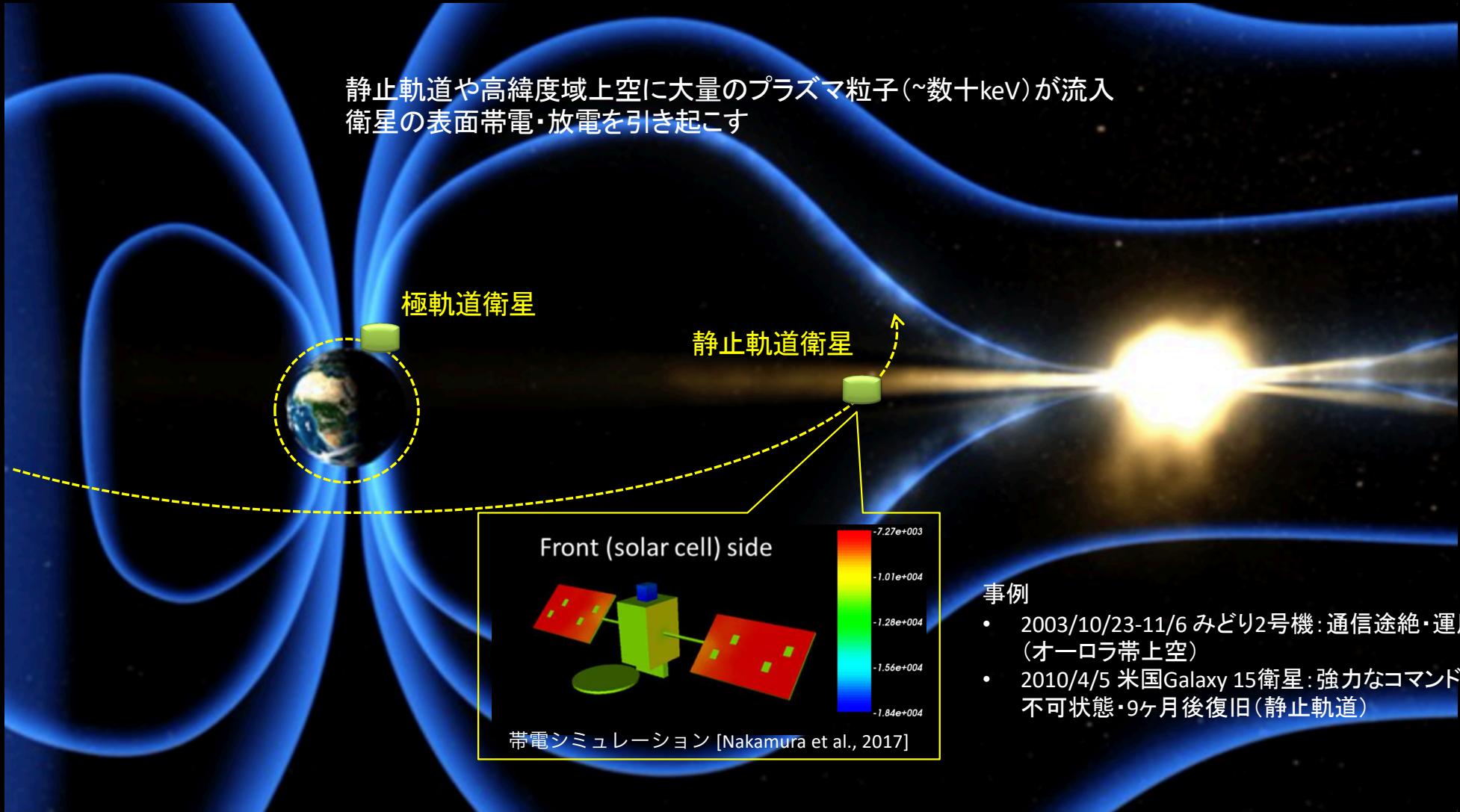
- 磁気嵐の発生に伴い放射線帯も大きく変動
- 増加自体は、太陽風南向き磁場の大きさよりも高速風が影響していると考えられている。
- 必ずしも増加するわけではない。
 - 減る = 磁気圏外へ逃げる or 電離圏へ降下
 - 増える = 低エネルギーの電子が加速される



[Reeves et al. 2003]

オーロラ嵐「サブストーム」

表面帯電

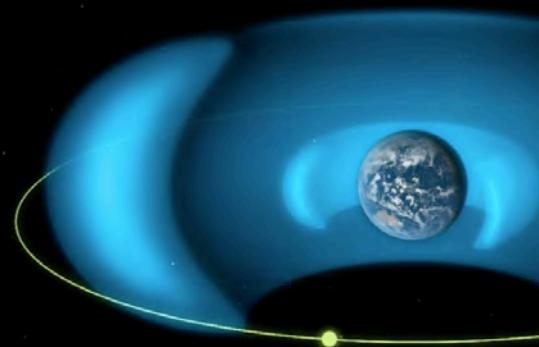


放射線帯変動

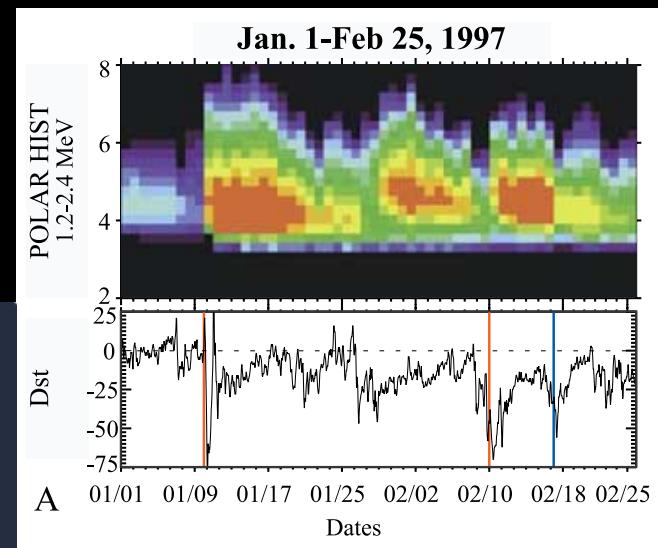
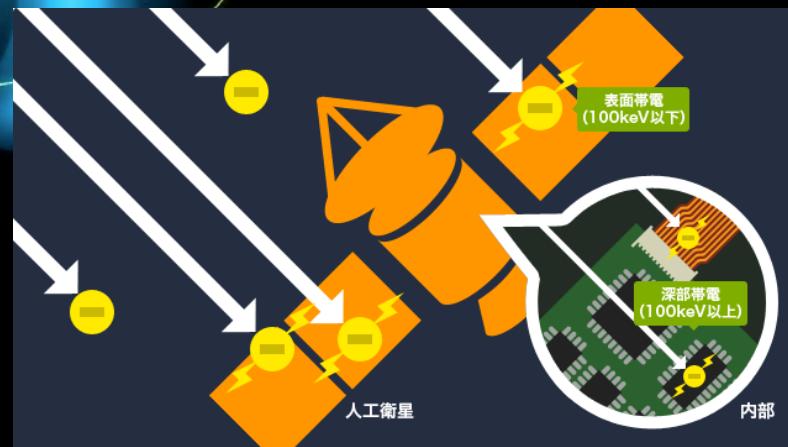
深部帶電

静止衛星は放射線外帯の外側境界付近、放射線帯の増減が人工衛星の不具合につながることがある。

放射線帯電子：数100keV~MeV > サブストーム電子：数~数10keV



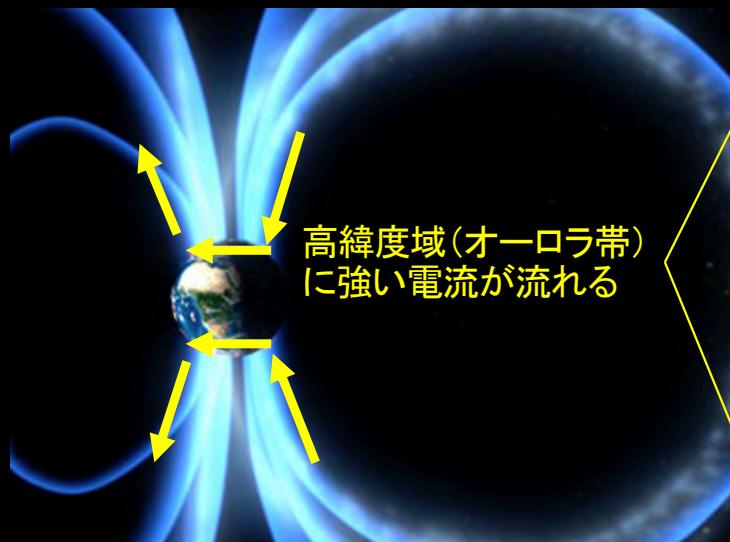
静止衛星軌道



高エネルギー電子は衛星構体を貫通、衛星内部に蓄積(深部帶電)
耐電圧を越えると放電、ハード・ソフト両方にダメージ

磁気嵐 / 強いサブストーム

大気加熱・GIC



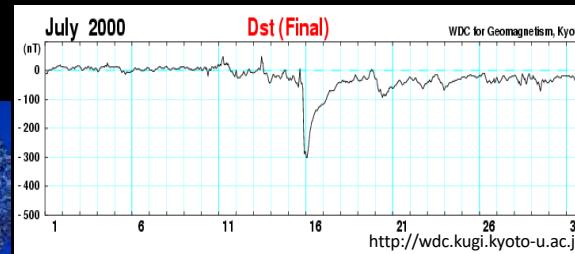
高緯度域(オーロラ帯)
に強い電流が流れる

大気加熱・膨張

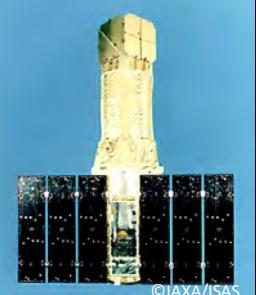
2000年7月太陽面爆発・強い磁気嵐発生

→電離圏に強いオーロラ電流

→大気加熱・膨張→**大気摩擦**→あすか衛星制御不能



X線天文衛星あすか



GIC(地磁気誘導電流)

大規模磁気嵐

→電離圏に強いオーロラ電流

→強い誘導電流

→変圧器のダメージにつながる

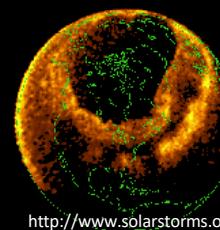
1989年3月13-14日カナダケベック州での大停電

9時間にわたる変圧器ダメージ

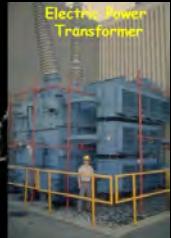
600万人に影響、復興に数ヶ月

2003年10月30日スウェーデン・マルメでの停電

約5万人に影響



Geomagnetic Storm Effects
March 1989
Hydro Quebec Loses Electric Power for 9 Hours



Transformer Damage

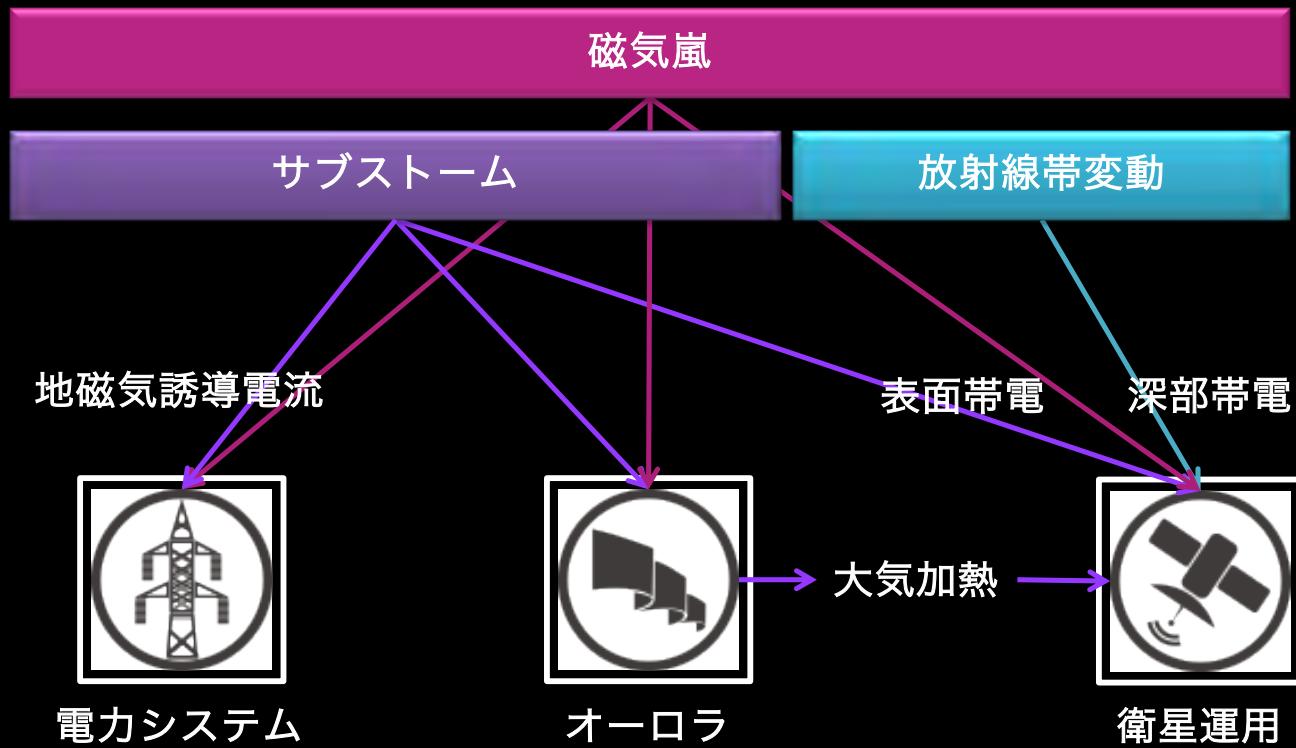
1989年3月に発生した過去50年間で最大級の強い地磁気嵐伴う誘導電流のために焼損した米国ニュージャージー州の発電所のトランス



<https://smd-prod.s3.amazonaws.com/>
Photos courtesy of PSE&G (<https://science.nasa.gov/>)

*オーロラ帯の電流だけではなく、磁気圏電流で誘導されることも。

磁気圏擾乱の影響



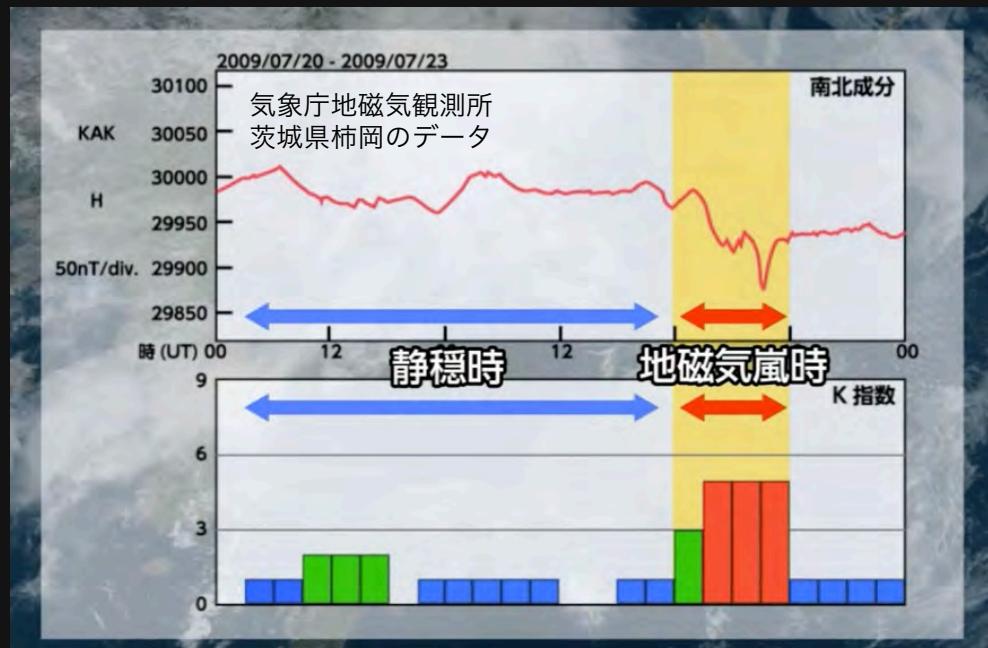
* 電離圏への電磁エネルギー流入は電離圏変動の主要因の一つ

K指数と地磁気擾乱レベル

予報情報

K指数：気象庁地磁気観測所

地磁気活動が静かな日の日変化曲線からのずれの程度を
準対数目盛で0-9の10階級で分類・3時間値



NICT宇宙天気予報の地磁気擾乱レベル

気象庁地磁気観測所による柿岡の観測値（K指数）を地磁気擾乱
レベルの基準にしています。

レベル	表記	説明
1	静穏	地磁気K指数（柿岡）の最大値が4未満
2	やや活発	地磁気K指数（柿岡）の最大値が4
3	活発	地磁気K指数（柿岡）の最大値が5
4	非常に活発	地磁気K指数（柿岡）の最大値が6
5	猛烈に活発	地磁気K指数（柿岡）の最大値が7以上

放射線帯電子レベル

予報情報

レベル	表記	説明
1	静穏	高エネルギー電子 (>2 MeV) の24時間フルエンスが 3.8×10^7 [/cm ² sr] 未満
2	やや高い	高エネルギー電子 (>2 MeV) の24時間フルエンスが 3.8×10^7 以上 3.8×10^8 [/cm ² sr] 未満
3	高い	高エネルギー電子 (>2 MeV) の24時間フルエンスが 3.8×10^8 以上 3.8×10^9 [/cm ² sr] 未満
4	非常に高い	高エネルギー電子 (>2 MeV) の24時間フルエンスが 3.8×10^9 [/cm ² sr] 以上

国立研究開発法人情報通信研究機構
宇宙天気予報センター
International Space Environment Service (ISES), Regional Warning Center Japan

はじめに ▶ JP EN
JST 2020/11/10 UTC 2020/11/10
16:23. 07:23.

ホーム レポート 現況 予報 ユーザーガイド リンク

予報 2020/11/10 15:00 JST ~ 2020/11/11 14:59 JST

太陽フレア プロトン現象 地磁気擾乱 放射線帯電子 電離圏嵐 デリジット現象 スポットイグゼ

静穏 静穏 静穏 静穏 静穏 静穏

Lv.1 Lv.1 Lv.1 Lv.1 Lv.1 Lv.1

概況・予報 2020/11/10 09:00 JST 更新
太陽活動は静穏でした。引き続き今後1日間、太陽活動は静穏な状態が予想されます。地磁気活動は静穏でした。引き続き今後数日間、地磁気活動は静穏な状態が予想されます。

詳しくはこちら ➔

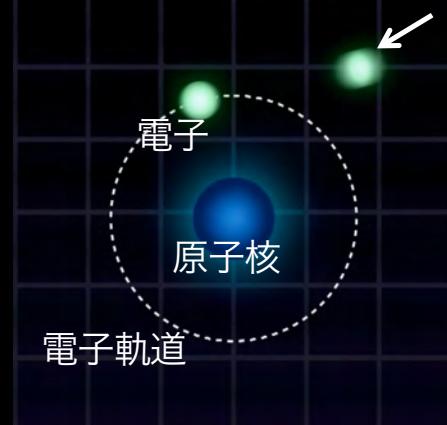
<https://swc.nict.go.jp>

オーラミニ知識

オーロラ発光（ミクロの世界）

イメージ（酸素原子）

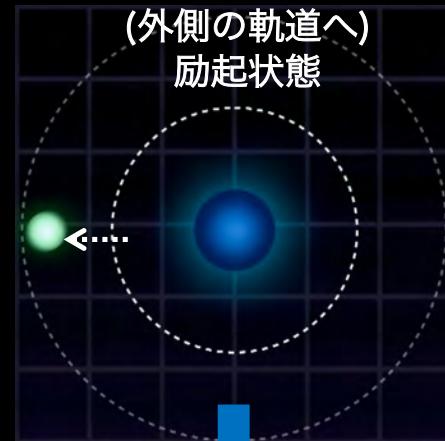
磁気圏から降込んでくる電子



衝突



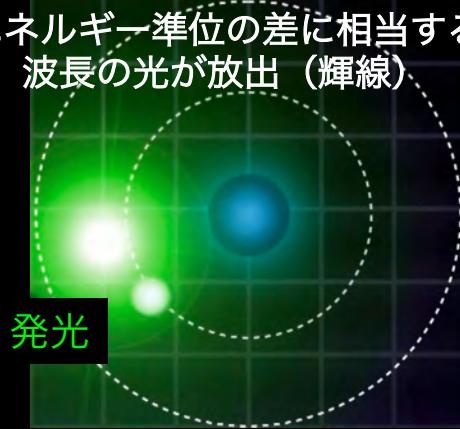
電子が高いエネルギー準位へ移動
(外側の軌道へ)
励起状態



電子が元のエネルギー準位に
戻る時…



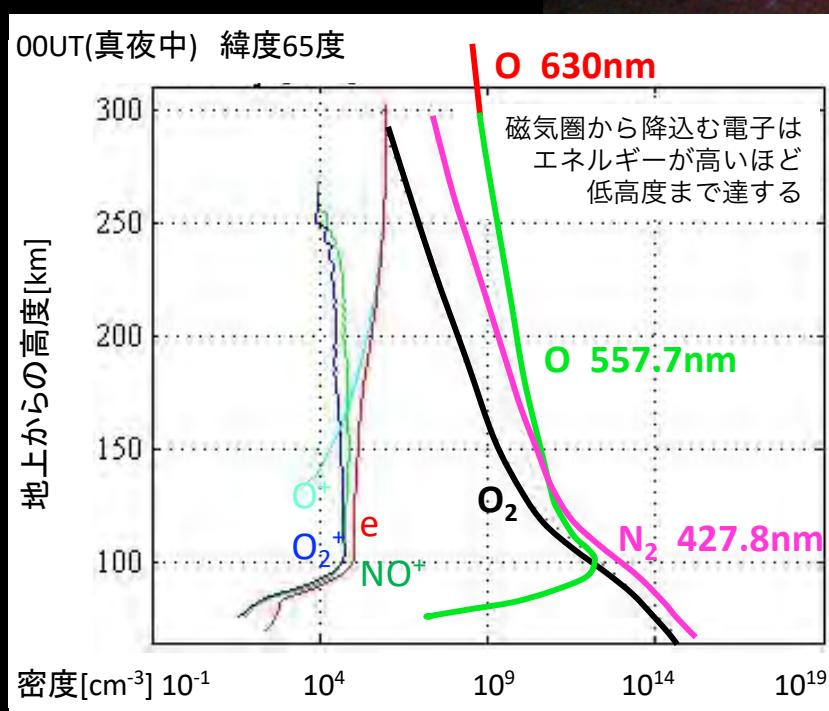
エネルギー準位の差に相当する
波長の光が放出（輝線）



酸素原子：
630.0nm, 557.7nm

窒素分子：
427.8nm

オーロラの色・高度

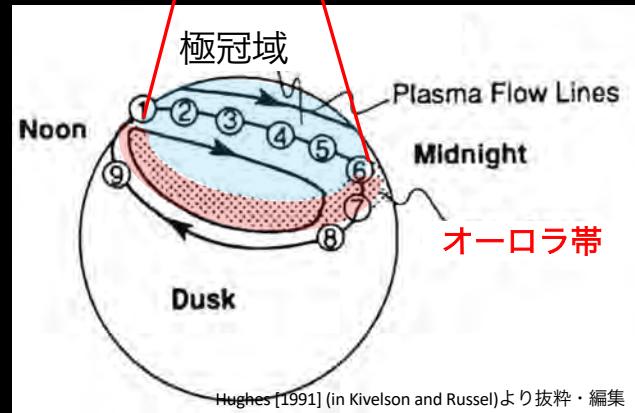
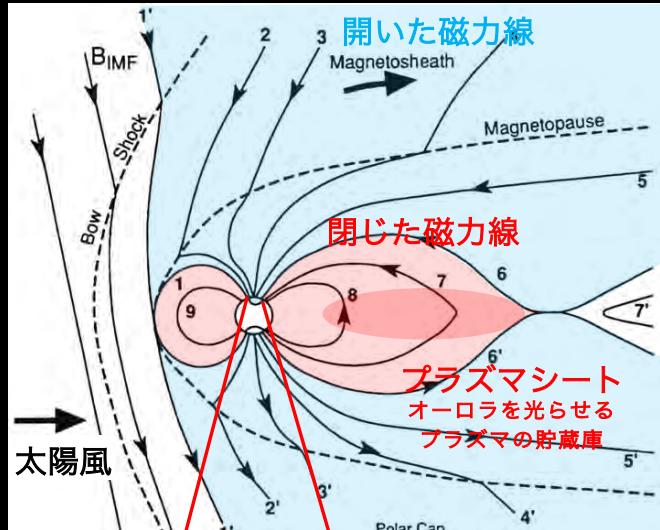


>200km:
大気密度が低い。主に酸素原子。
低エネルギー電子が酸素原子を励起。

100-200km:
大気密度が高い。主に酸素原子。
高エネルギー電子が酸素原子を励起。

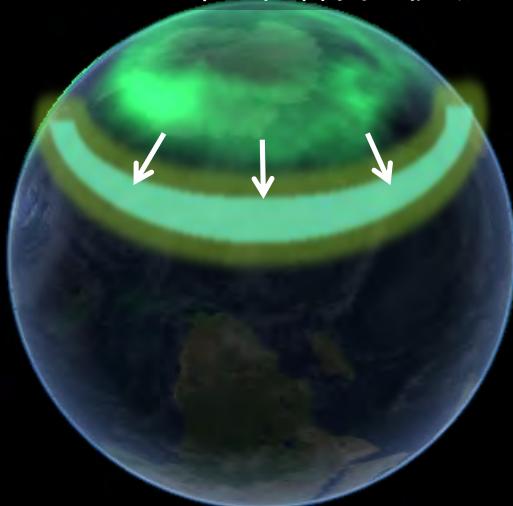
90-100km:
大気密度がとても高い。窒素分子が多い。
非常に高エネルギーの電子が窒素原子を励起。

オーロラが見える場所



Hughes [1991] (in Kivelson and Russell)より抜粋・編集

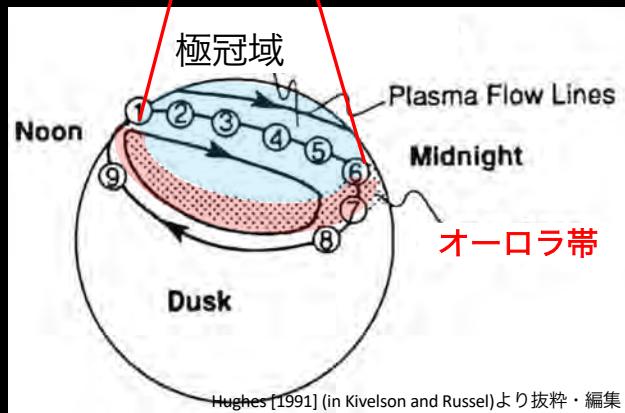
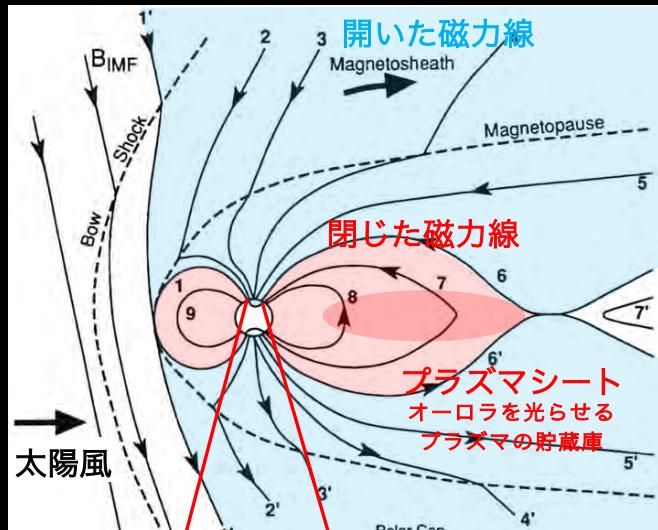
太陽風磁場が強い南向き
↓
多くの磁力線が開く
↓
オーロラ帯が低緯度へ移動



<https://www.nasa.gov>

磁気緯度: 60-70度
(北欧、カナダ、南極大陸....)

日本でオーロラが見えるのは…

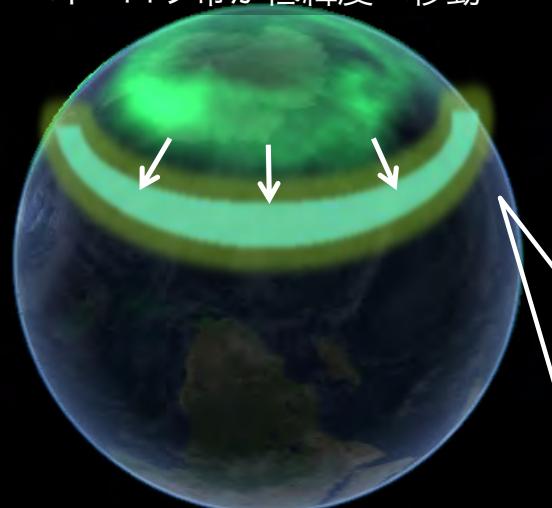


Hughes [1991] (in Kivelson and Russell) より抜粋・編集

太陽風磁場が強い南向き

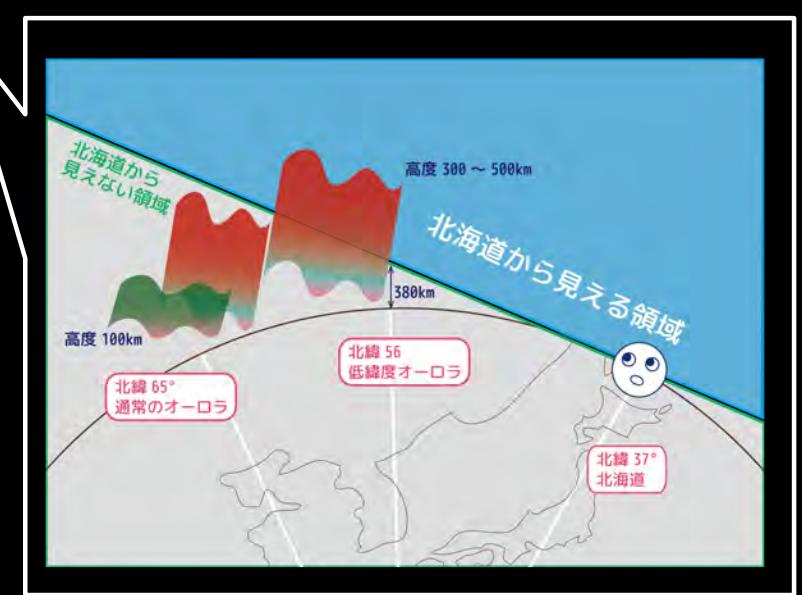
多くの磁力線が開く

オーロラ帯が低緯度へ移動



<https://www.nasa.gov>

磁気緯度: 60-70度
(北欧、カナダ、南極大陸....)



磁気圏編：まとめ



*電離圏への電磁エネルギー流入は電離圏変動の主要因の一つ