

2024年2月29日 第18回宇宙天気ユーザーズフォーラム

宇宙天気ミニ講座

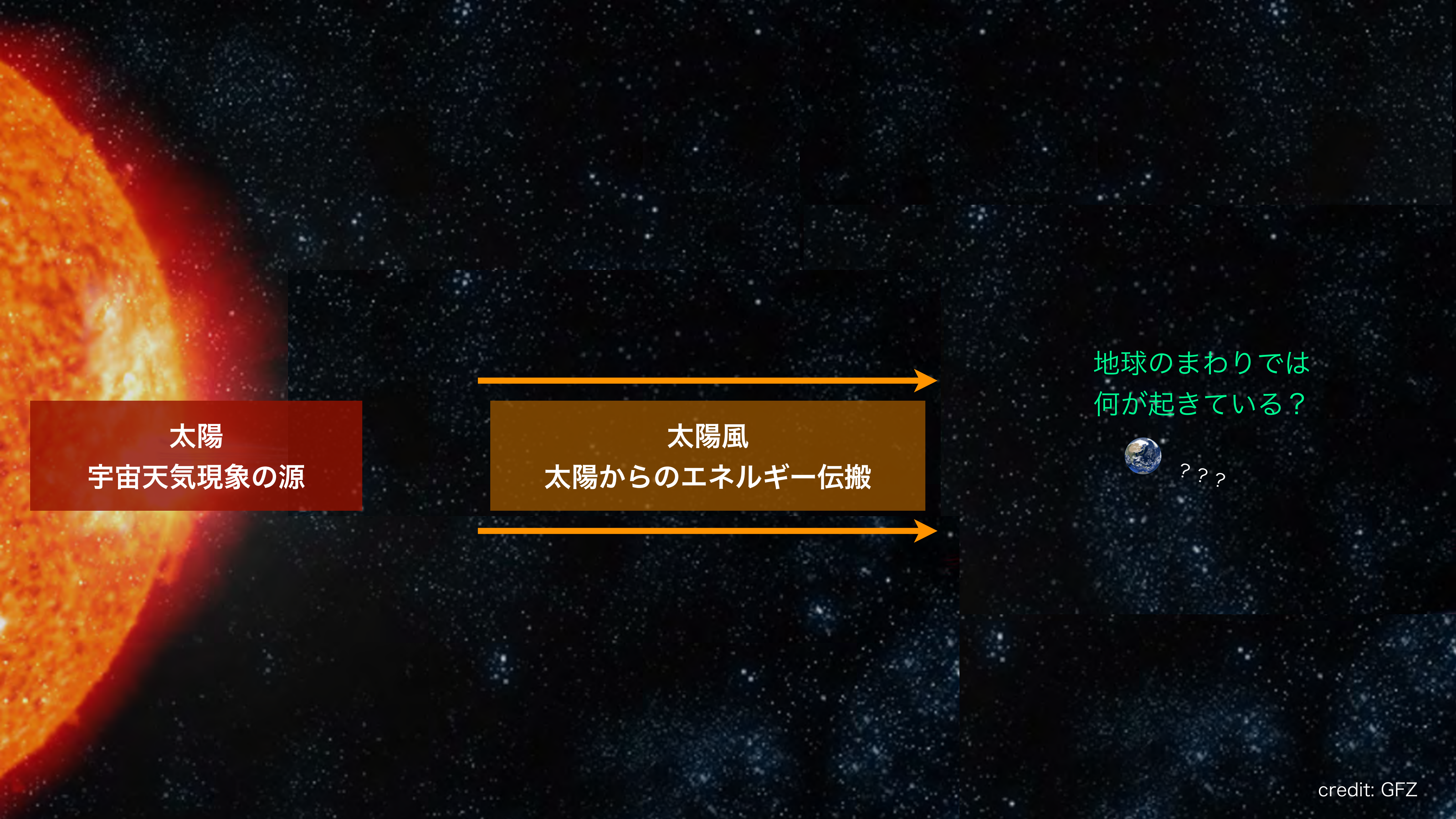
磁気圏編

国立研究開発法人情報通信研究機構

電磁波研究所 電磁波伝搬研究センター 宇宙環境研究室

高橋 直子





The diagram illustrates the flow of solar energy from the Sun to Earth. On the left, a large, glowing orange and red Sun is partially visible. Two parallel orange arrows point from the Sun towards the right. The top arrow is positioned above a brown rectangular box, and the bottom arrow is positioned below it. This box contains the text '太陽風' (Solar Wind) and '太陽からのエネルギー伝搬' (Energy transfer from the Sun). To the right of this box, the text '地球のまわりでは何が起きている?' (What is happening around Earth?) is written in green. Below this text is a small image of Earth, followed by three question marks '???' in white. The background of the entire slide is a dark blue space filled with numerous small white stars.

太陽
宇宙天気現象の源

太陽風
太陽からのエネルギー伝搬

地球のまわりでは
何が起きている？



磁気圏とは

About the Magnetosphere

地球は **磁場** をもつ惑星

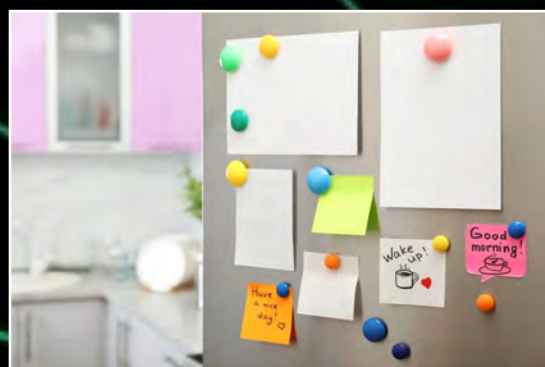
地球表面の赤道付近
0.3ガウス=0.03ミリテスラ

北極：S極

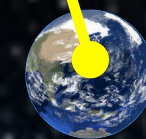
北向きの磁場を
形成

一般的な磁石
5ミリテスラ程度

MRI
1.5 ~ 3 テスラ



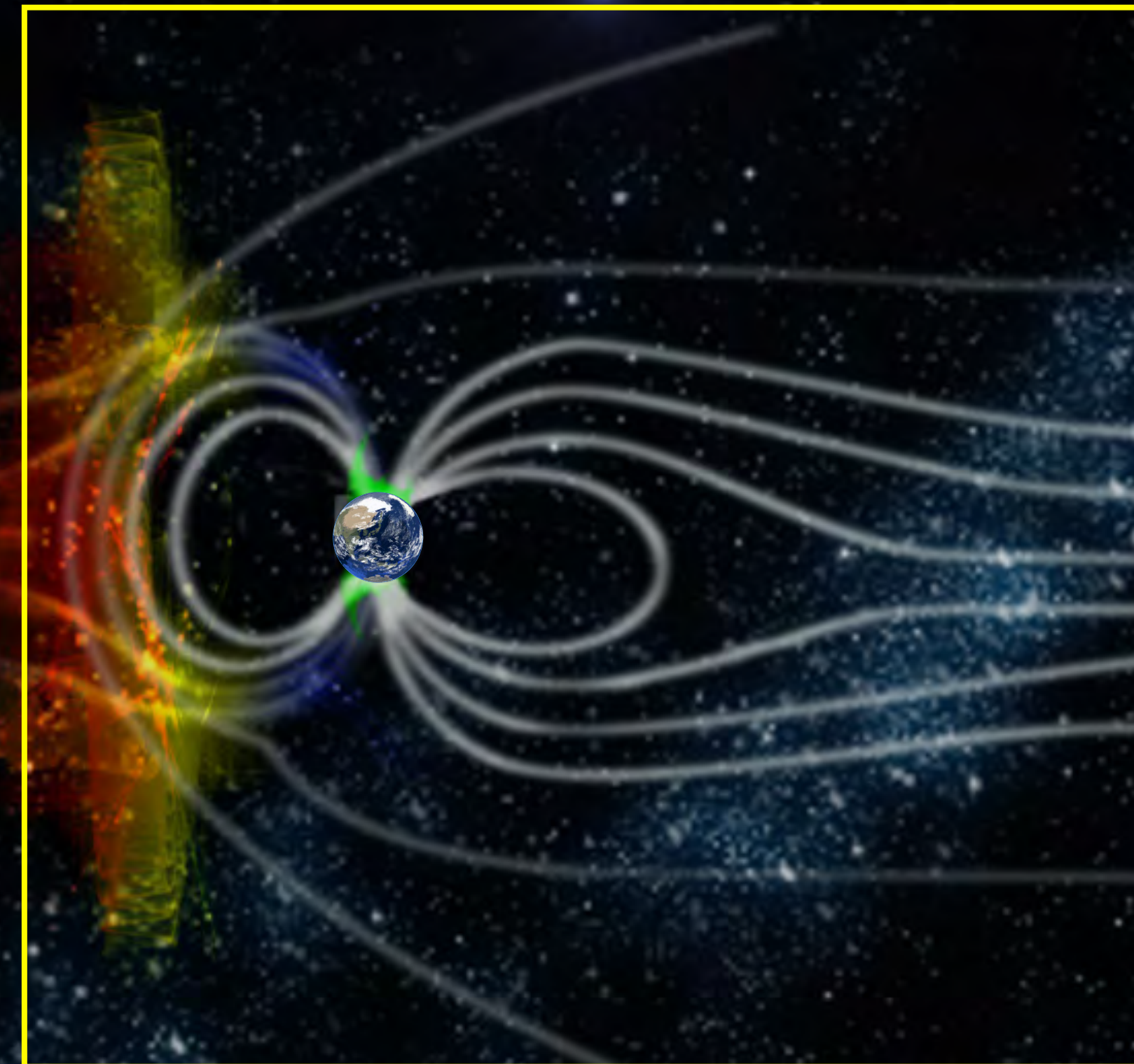
南極：N極



磁気圏とは地球磁場の影響がおよぶ範囲

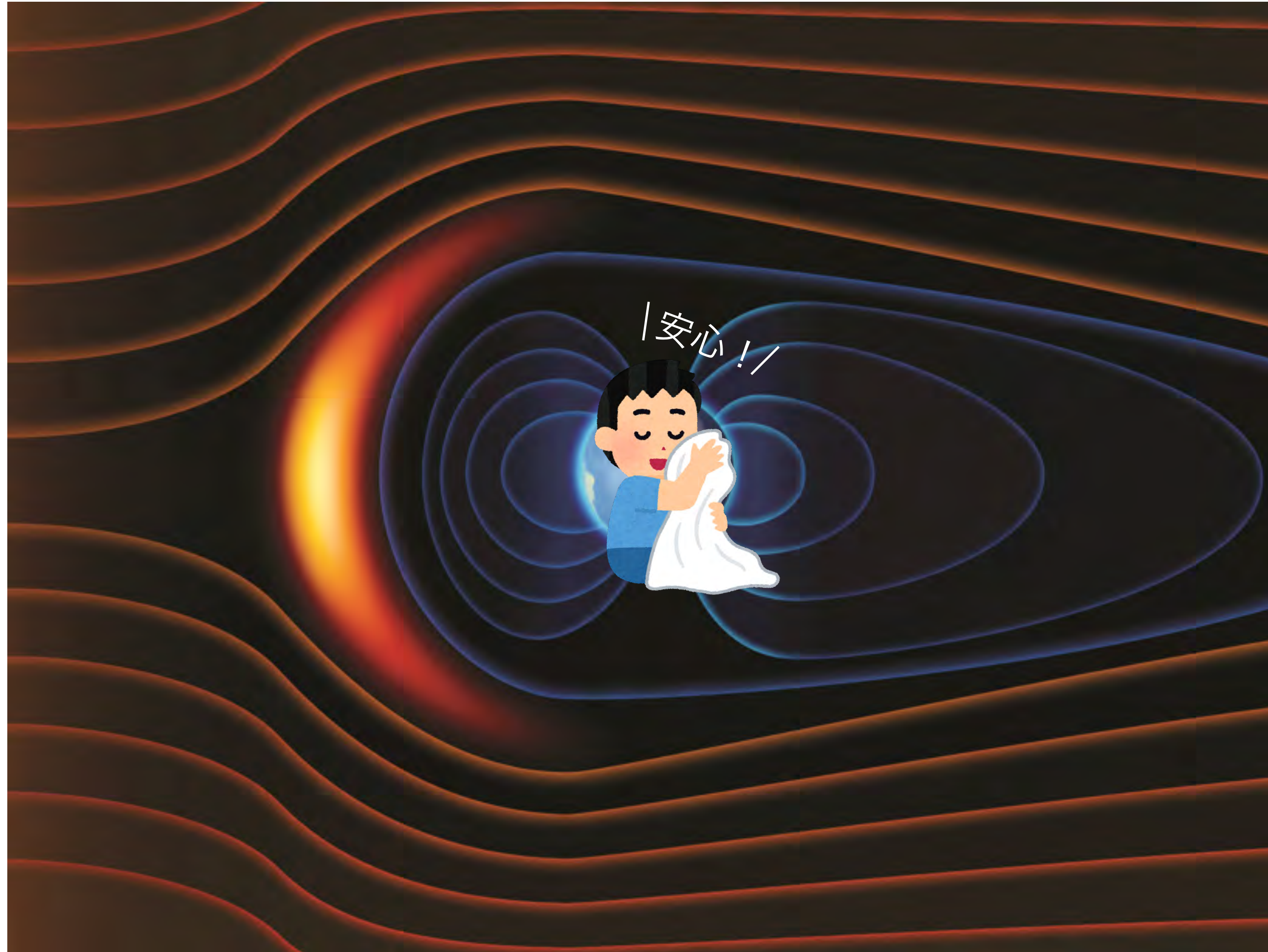
About the Magnetosphere

- ❖ 太陽風に吹き流されている
 - ➔ 太陽側は圧縮、反対側は引き伸ばされた形
- ❖ 宇宙空間では **微量の電気を帯びた粒子**（荷電粒子）が飛び交う
 - 荷電粒子が集まった集合体＝プラズマ
- ❖ 荷電粒子の進行方向は磁場によって曲げられる



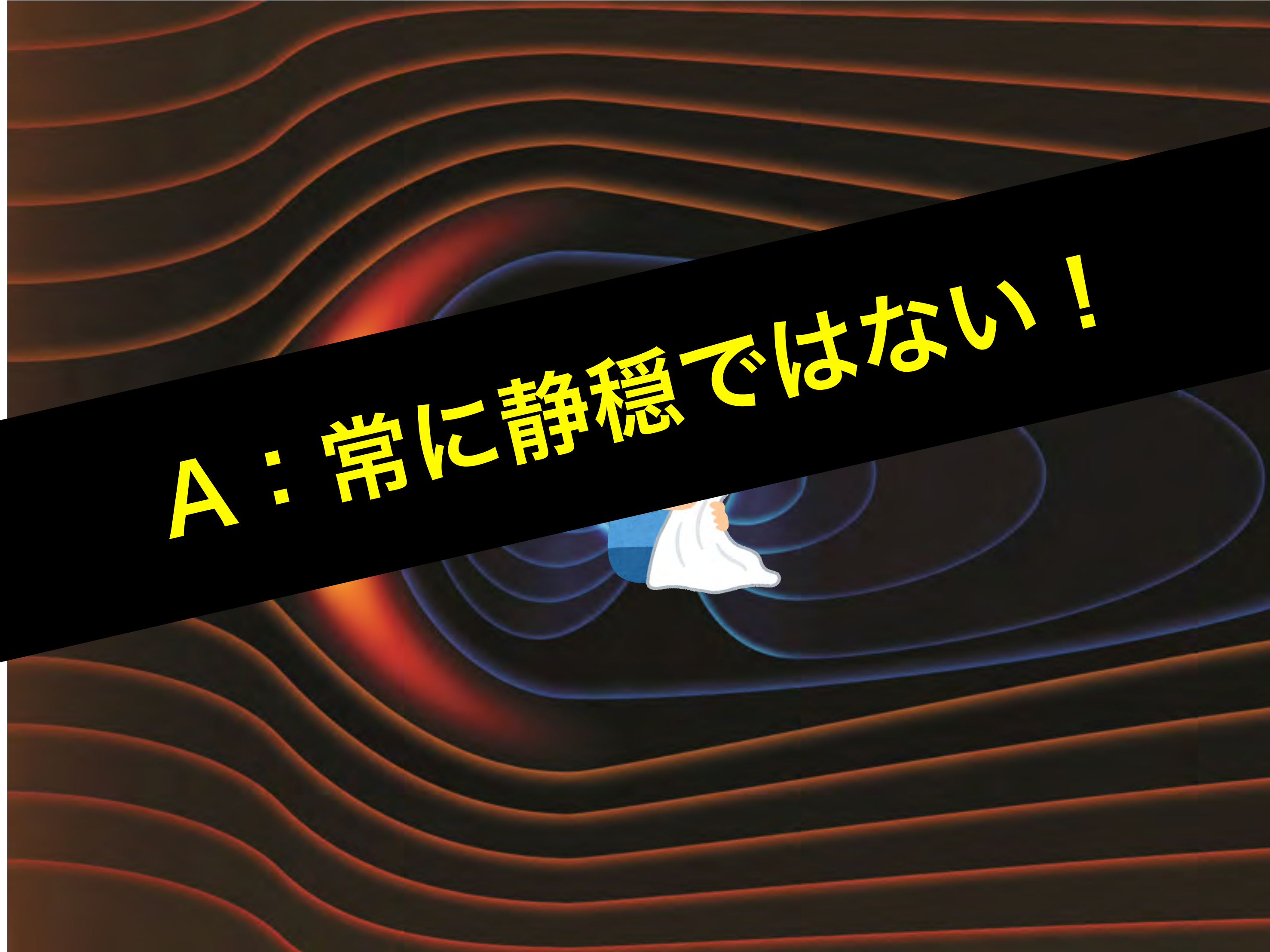
磁気圏＝太陽からやってくるプラズマに対する防護壁

Q：磁場でできた防護壁「磁気圏」の中には常に静穏…？



Q：磁場でできた防護壁「磁気圏」の中には常に静穏…？

A：常に静穏ではない！

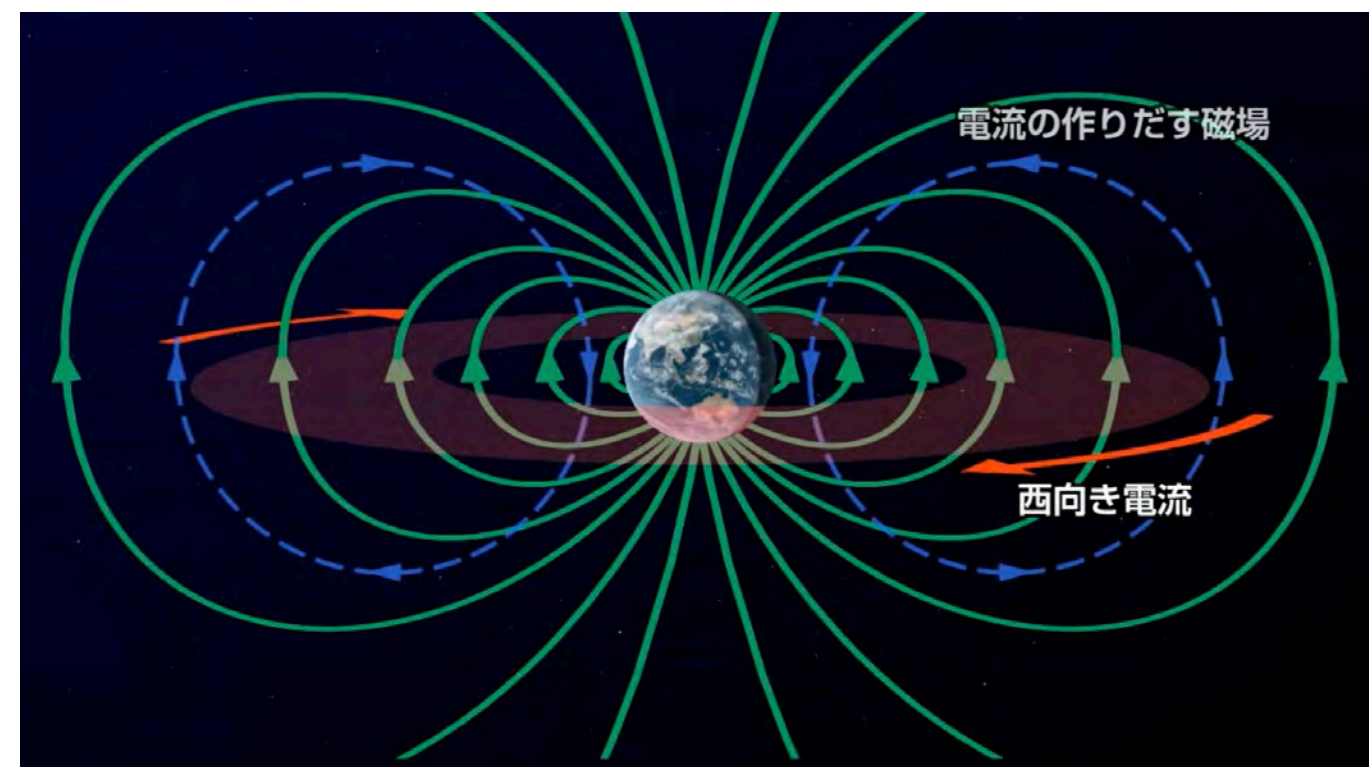


磁気圏の中はむしろ 激しく変化する 環境

磁気圏の変動に関連して起こること

磁気嵐

地球磁場の乱れ



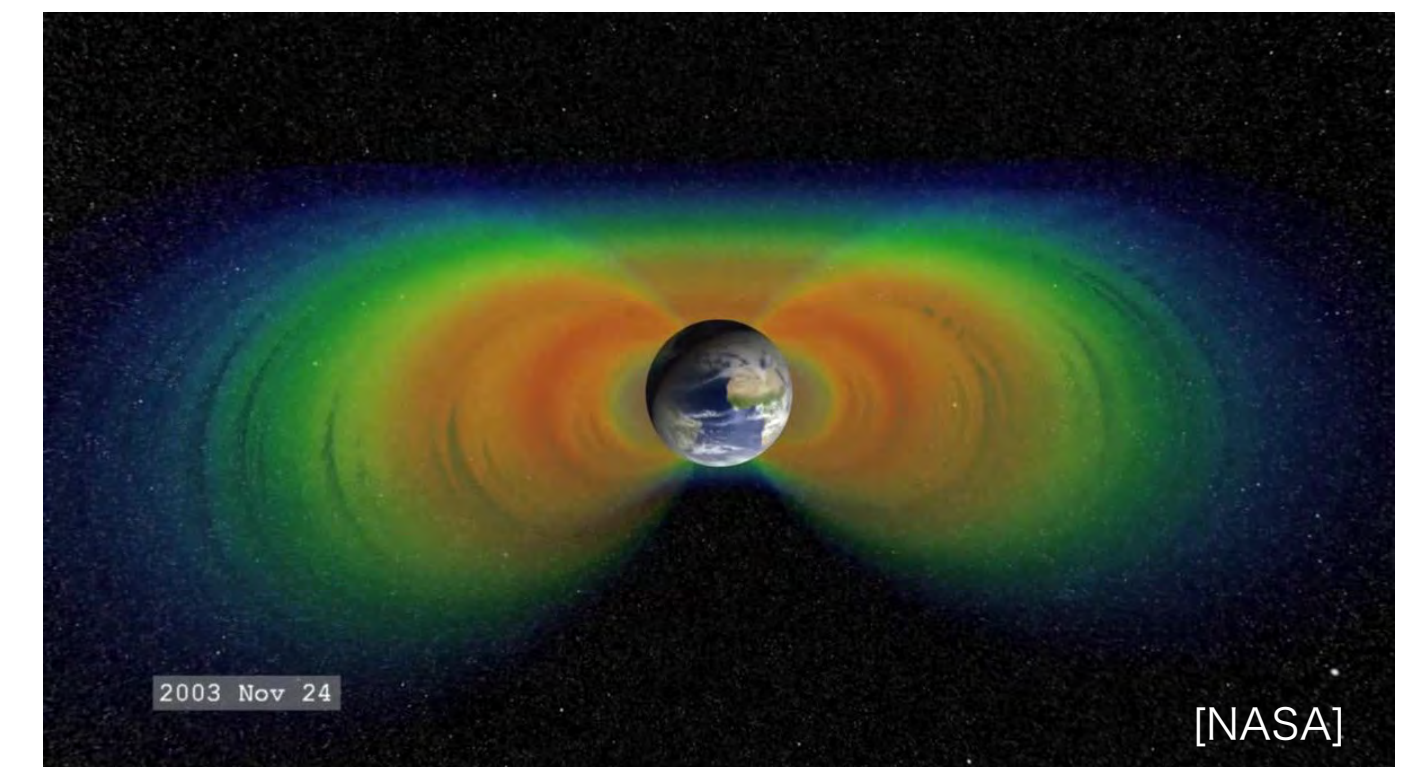
オーロラ

電子の降り込みによる発光現象



放射線帯変動

高エネルギー電子の急激な変化

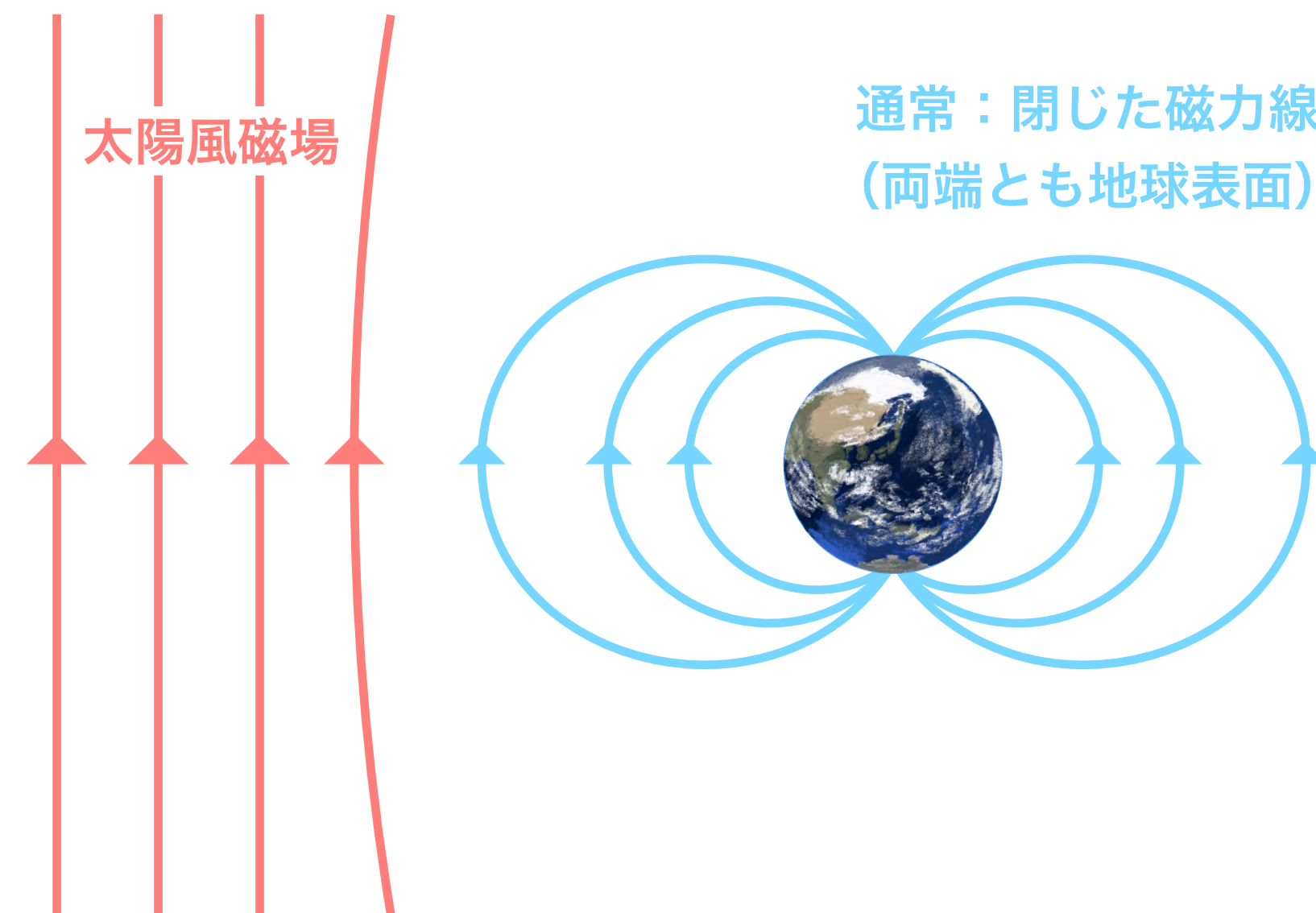


日々の磁気圏環境に応じてこれらの現象が発生

磁気圏変動のきっかけ：太陽風エネルギーの流入

エネルギー流入効率は太陽風磁場の大きさと向きに依存する

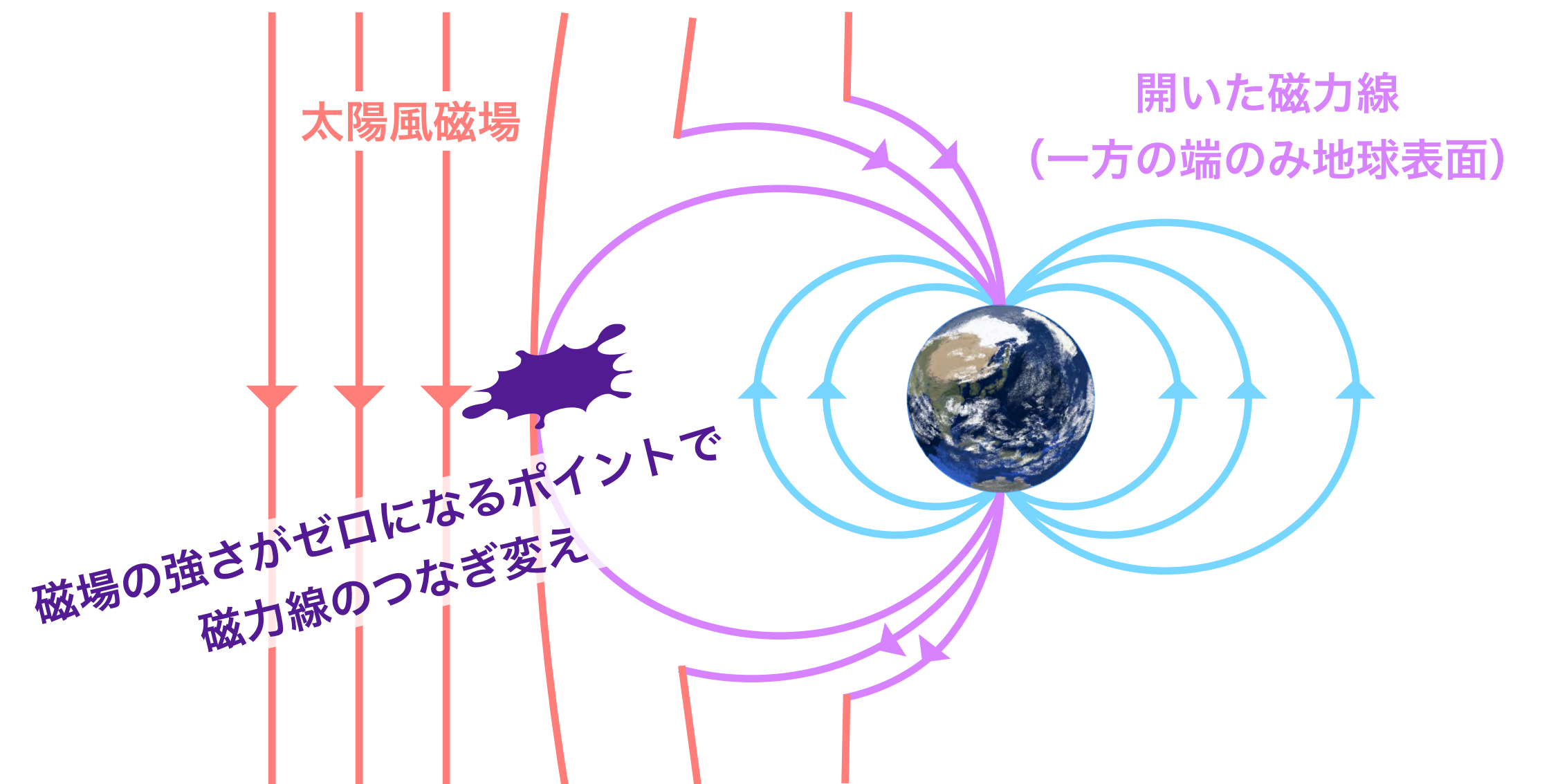
❖ 太陽風磁場が**北向き**の場合



前面で斥力を受ける

→ 太陽風は磁気圏の上下左右へと流れる

❖ 太陽風磁場が**南向き**の場合



太陽風と地球磁場の向きが反平行

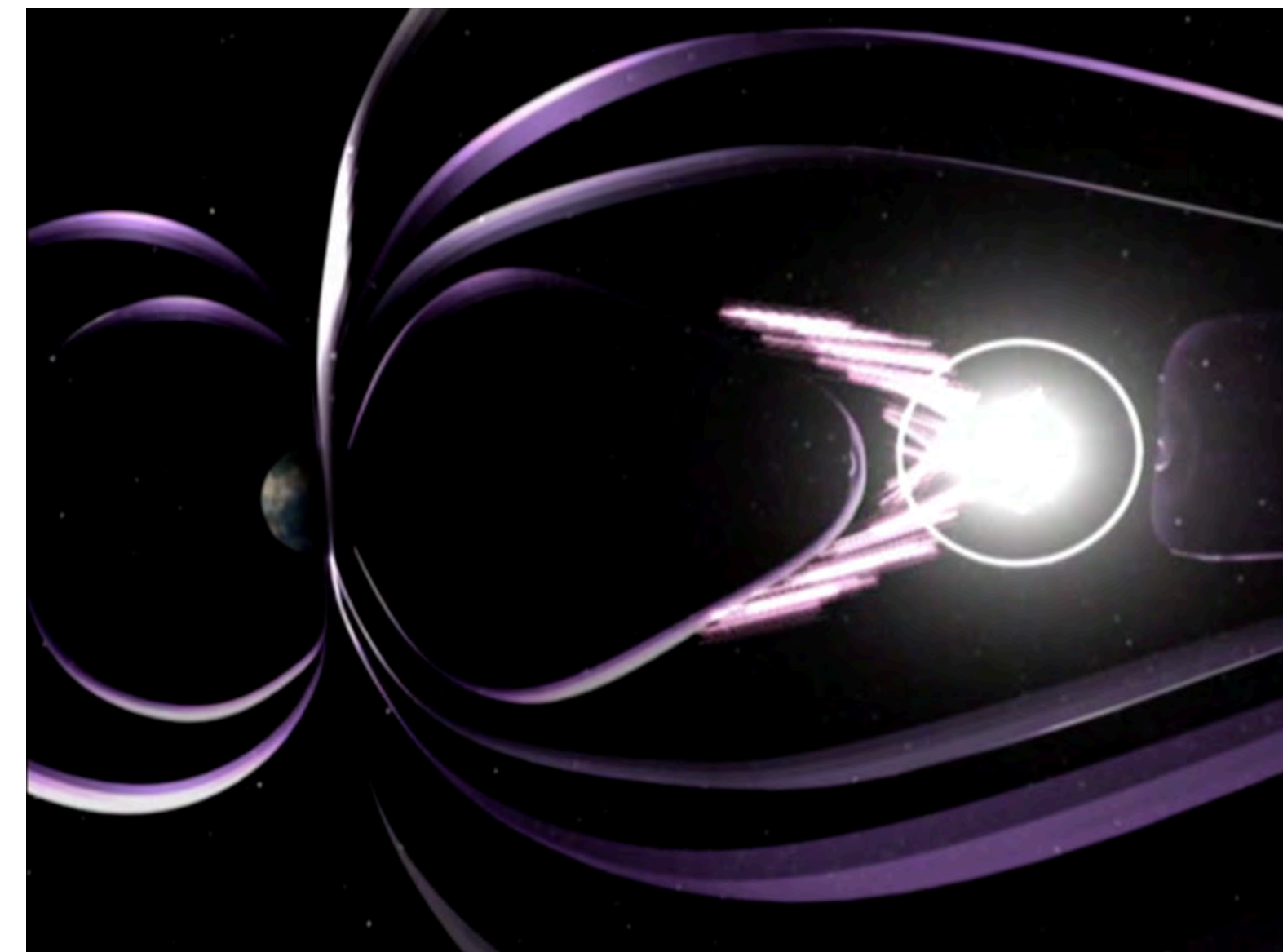
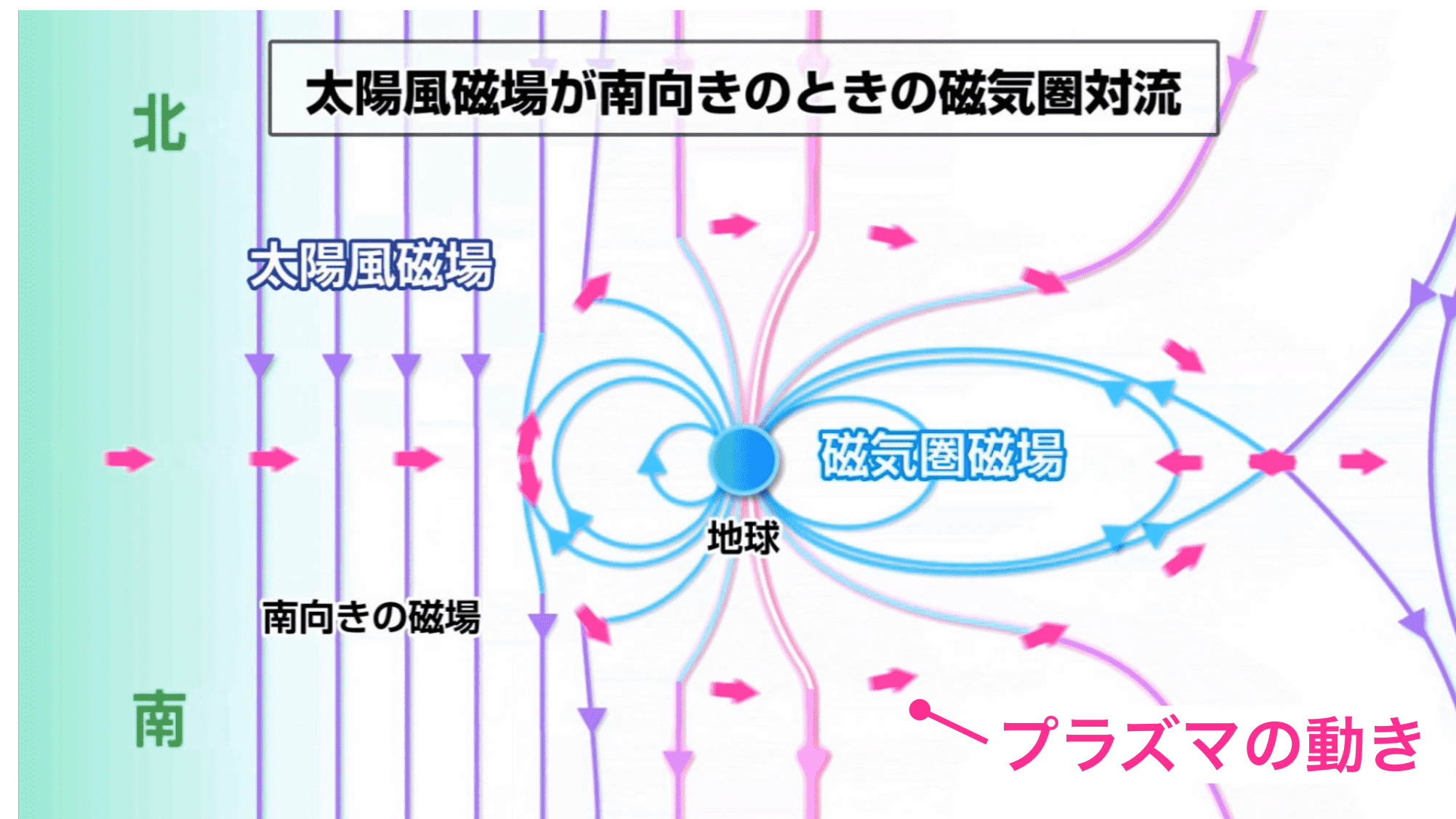
(=磁場が打ち消し合う箇所がある)

→ **磁気リコネクション** (磁力線のつながり変え) 発生

→ 「開いた磁力線」が生成

磁気圏変動のきっかけ：太陽風エネルギーの流入

- ❖ 「開いた磁力線」は太陽風に引っ張られて夜側へと流れる
- ❖ 夜側で磁気リコネクション発生、本来の磁場構造に戻ろうとするために地球方向へと移動



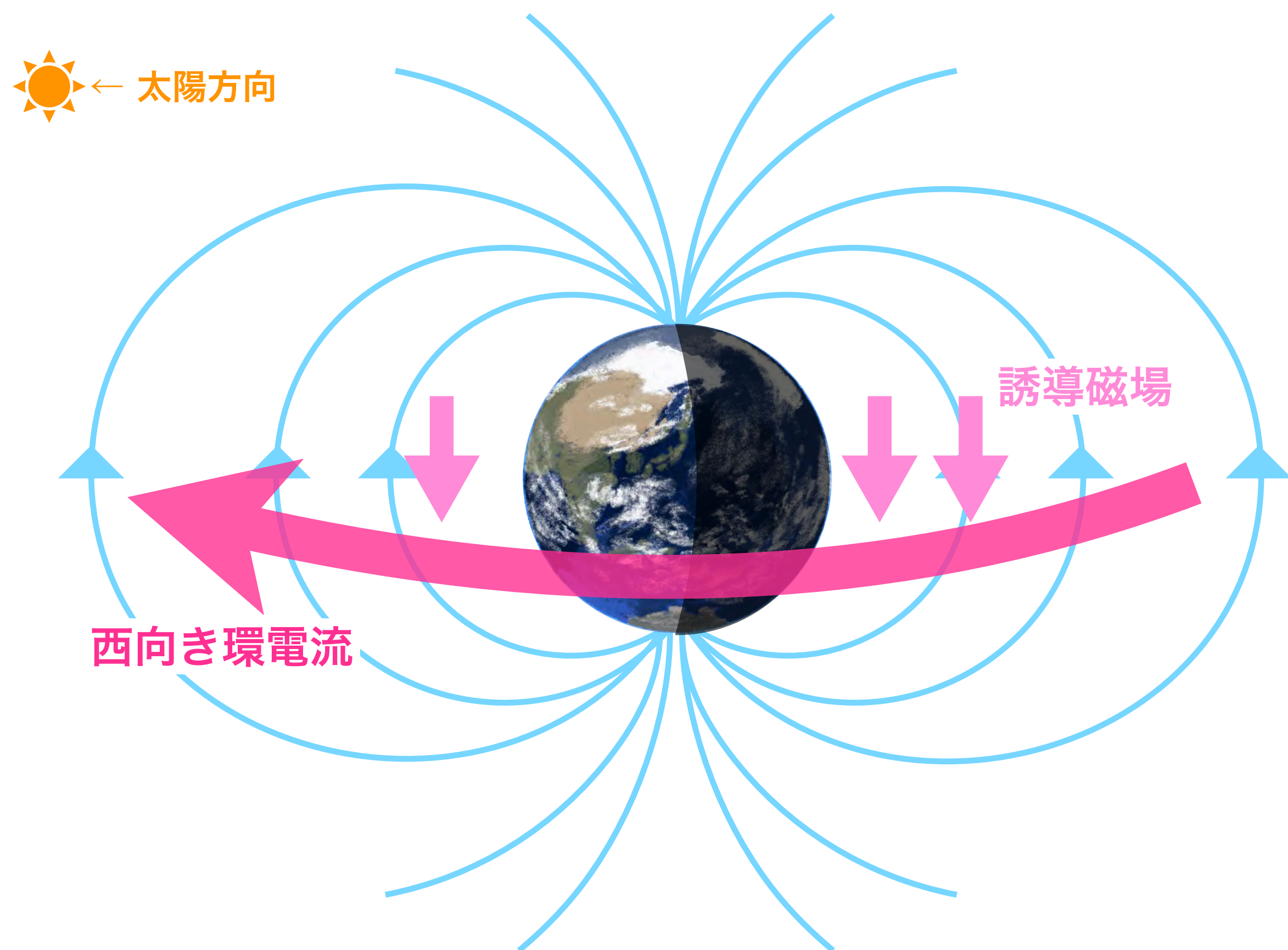
[NASA]

磁力線の動きとともにプラズマも動く (=エネルギー流入)

➡ オーロラ嵐 (サブストーム)

より地球に近い宇宙空間では何が起こる？

太陽風エネルギーの流入が大きい場合：南向きの太陽風磁場が強い、高速太陽風など



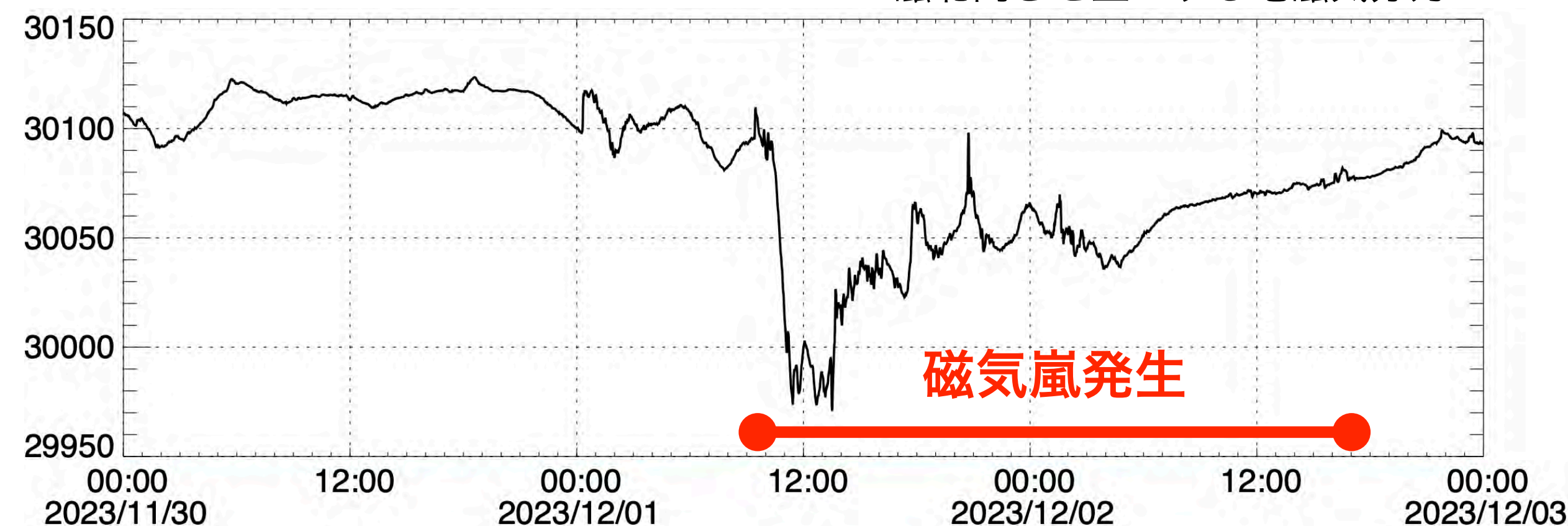
1. 磁気嵐の発生

❖ 西向きの環電流が発達

→ 誘導磁場（=南向き）により地球磁場が弱められる

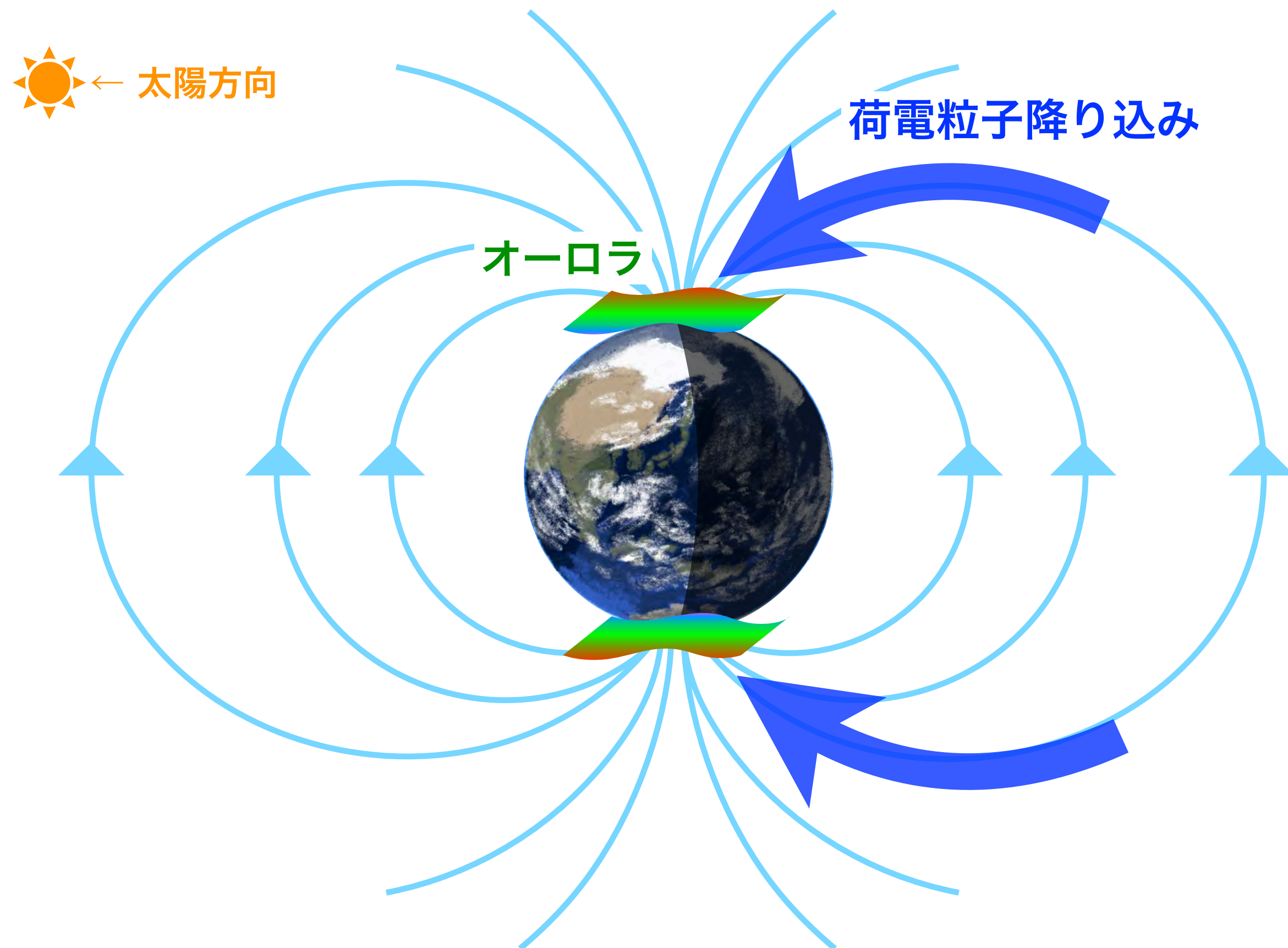
2023年11月30日～12月3日の地磁気水平成分* [nT]

*磁北向きを正とする地磁気分力



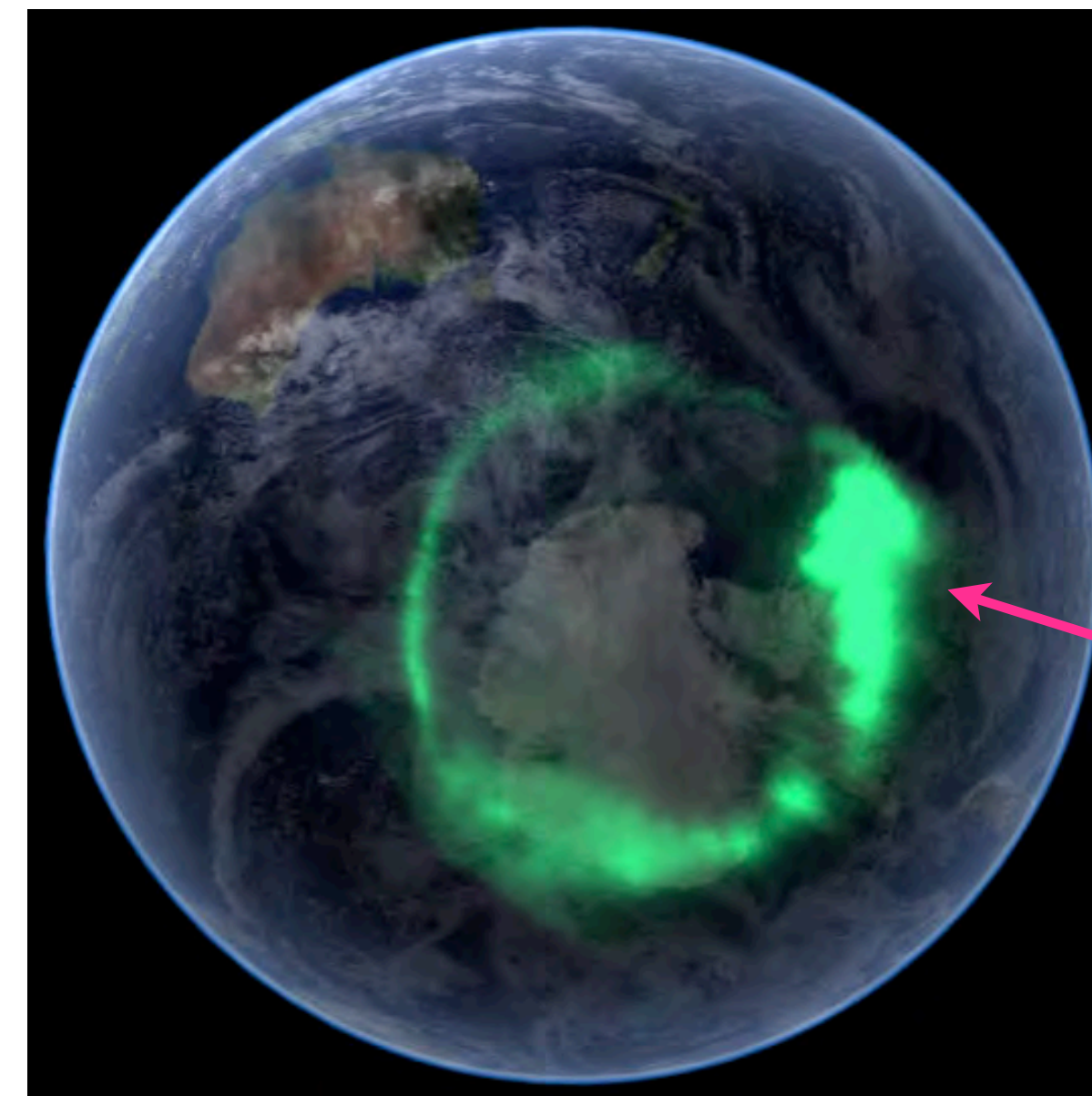
より地球に近い宇宙空間では何が起こる？

太陽風エネルギーの流入が大きい場合：南向きの太陽風磁場が強い、高速太陽風など



2. オーロラの発生

- ❖ 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



南極上空の宇宙空間から
撮像されたオーロラ

極を中心に環状に発光
= オーロラオーバル

[NASA]

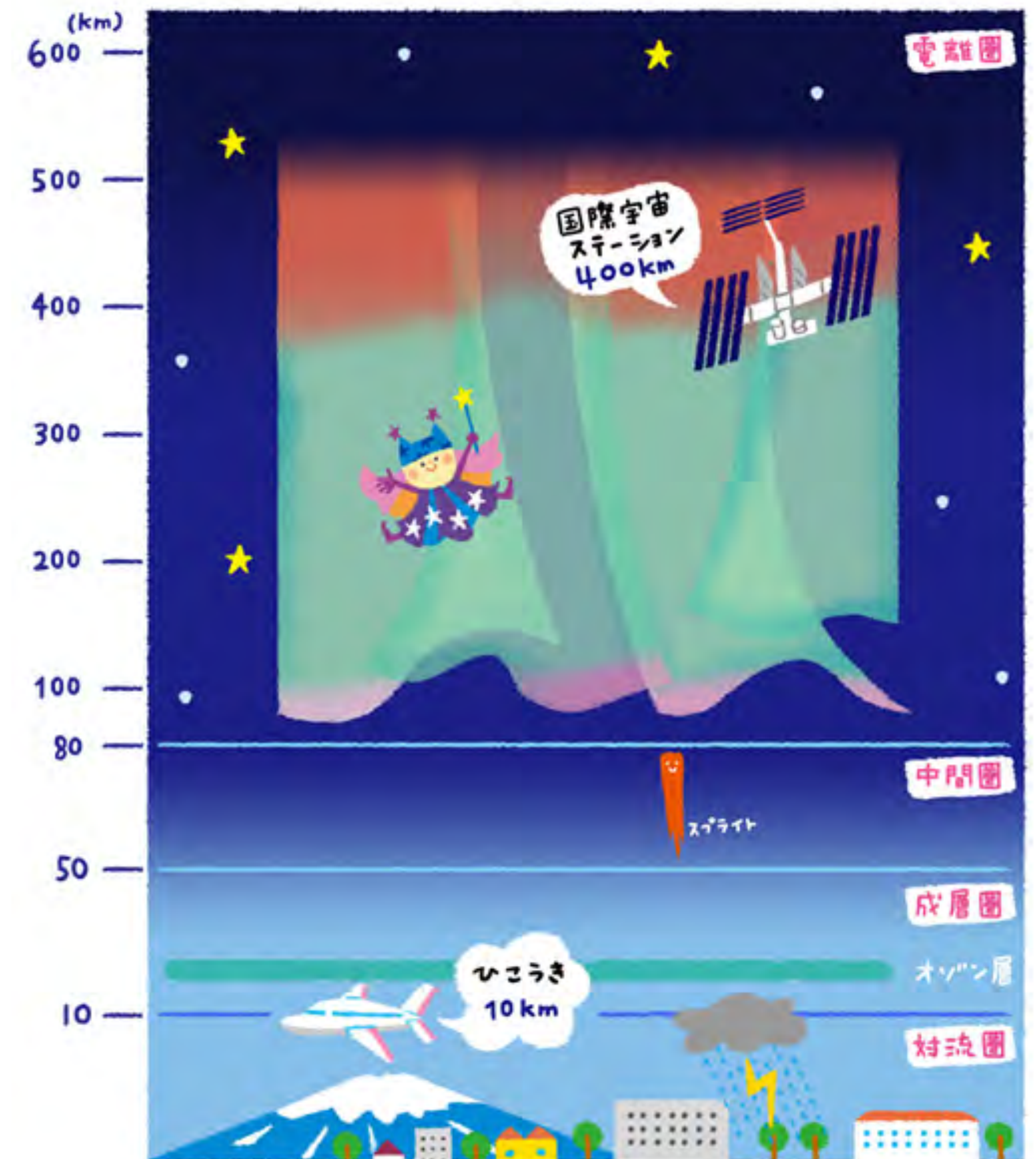
オーロラ：荷電粒子の降り込み

- ❖ 極域への電流にともない加速された荷電粒子が地球大気と衝突し、発光
- ❖ エネルギーが高いほどより深くまで降り込む
- ❖ 発光高度の大気組成によってオーロラの色が変わる

国際宇宙ステーションから見たオーロラ（北米上空）



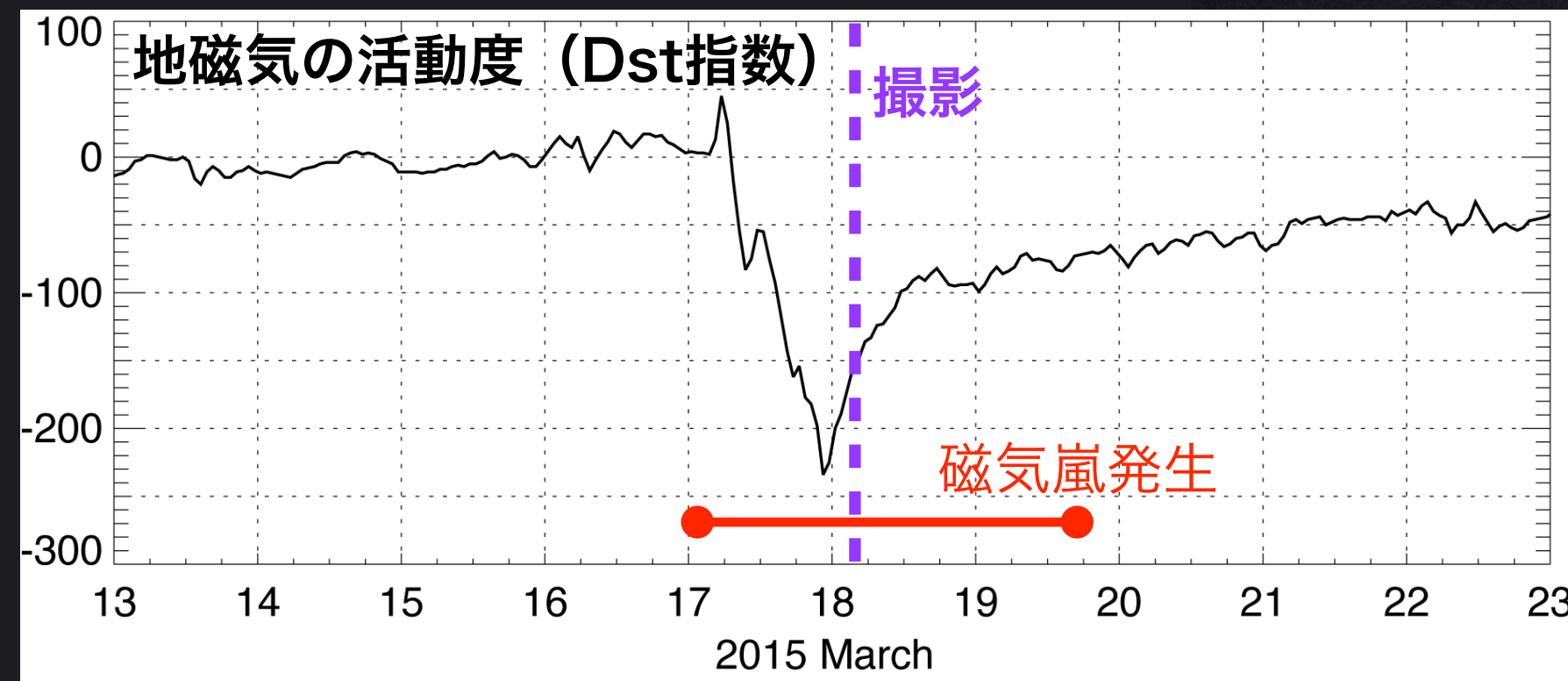
[NASA]



[http://aurora3d.jp/aurora_model/]

磁気嵐などによって荷電粒子が大量に降り込むと低緯度でオーロラが見えることも

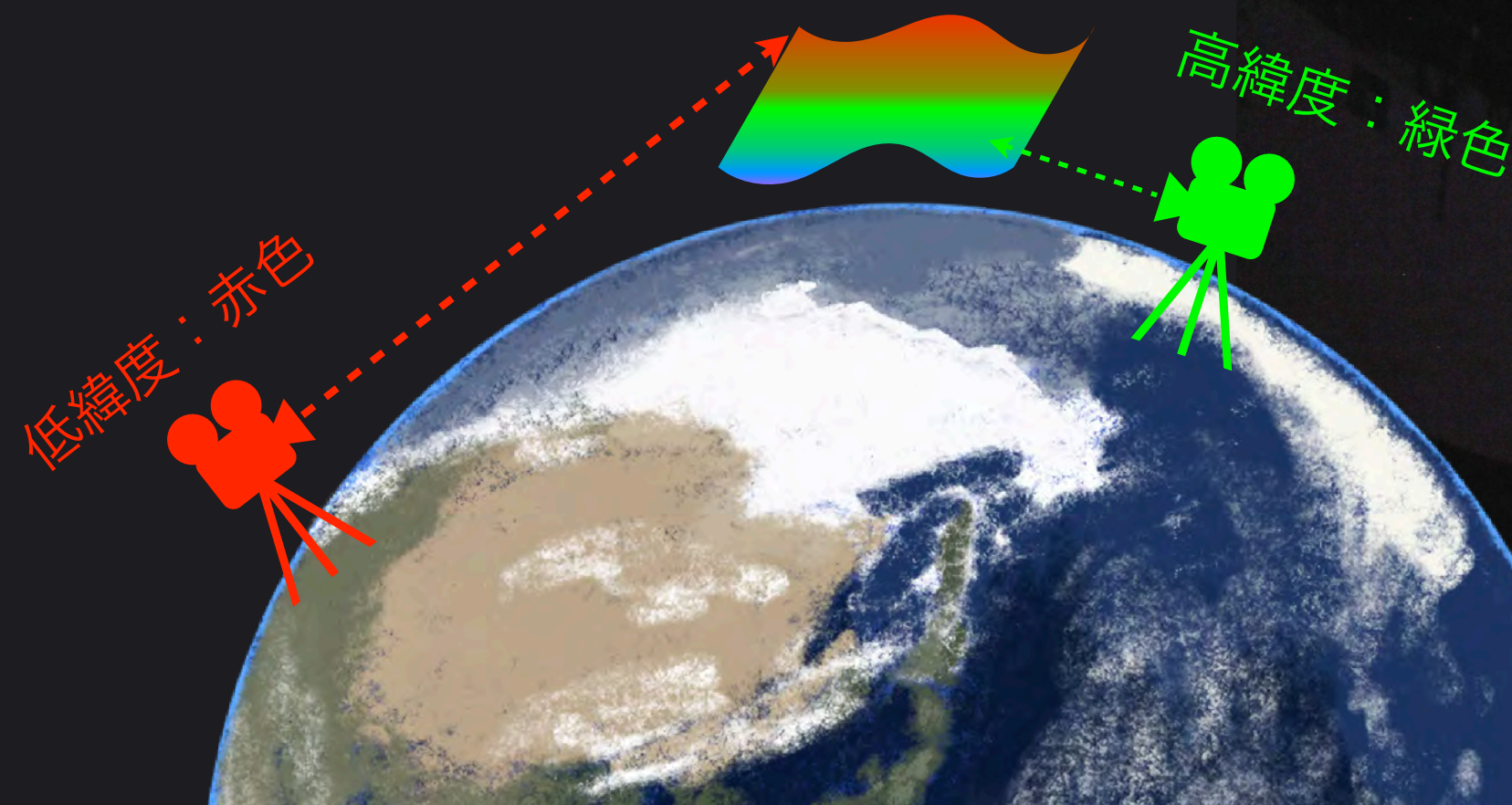
情報通信研究機構 稚内観測所 2015年3月18日 04時22分（日本時間）撮影



オーロラ発生領域が拡大

→ 低緯度からだとオーロラの上部が見える

→ 赤色のオーロラが低緯度で観測



低緯度オーロラ

信号機

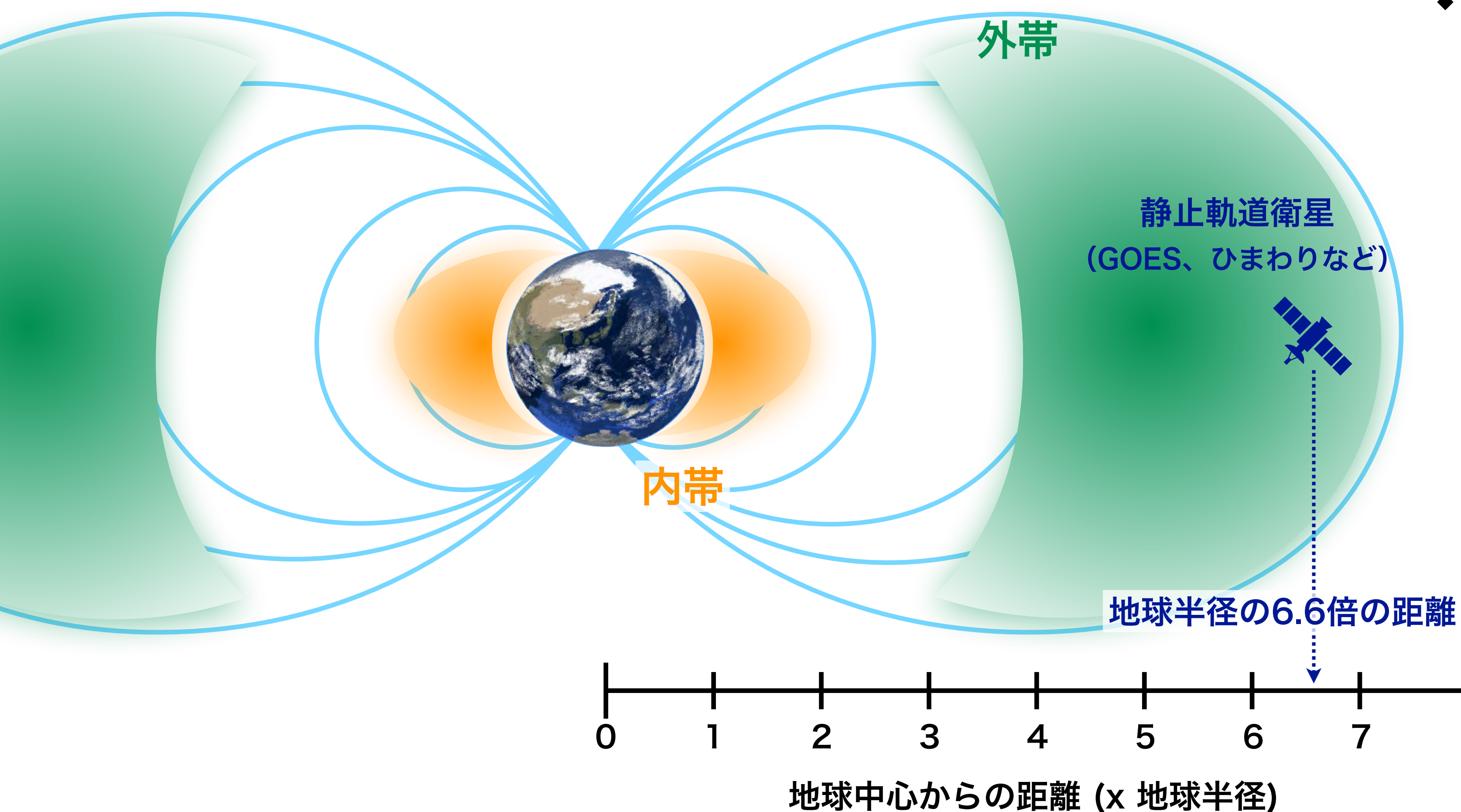
最近の観測事例

2023年12月1日 磁気嵐 → 北海道でオーロラ観測

磁気嵐時のDst指数最小値：-107 nT

放射線帯：高エネルギー粒子の溜まり場

高エネルギーの電子や陽子が地球の磁場に関じ込められている領域、ドーナツ状に分布



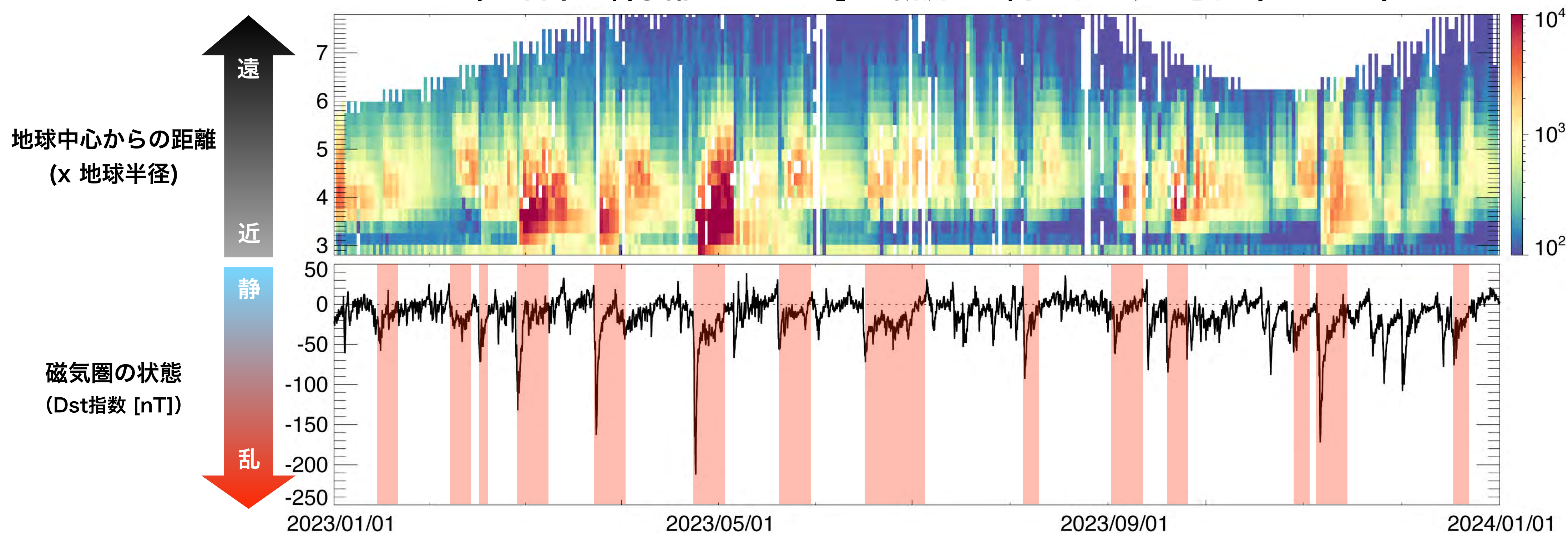
- ❖ 1958年にアメリカ初の人工衛星
エクスポローラーによって発見
 - ・ 発見者の名前から
ヴァン・アレン帯とも呼ばれる



放射線帯：高エネルギー粒子の溜まり場

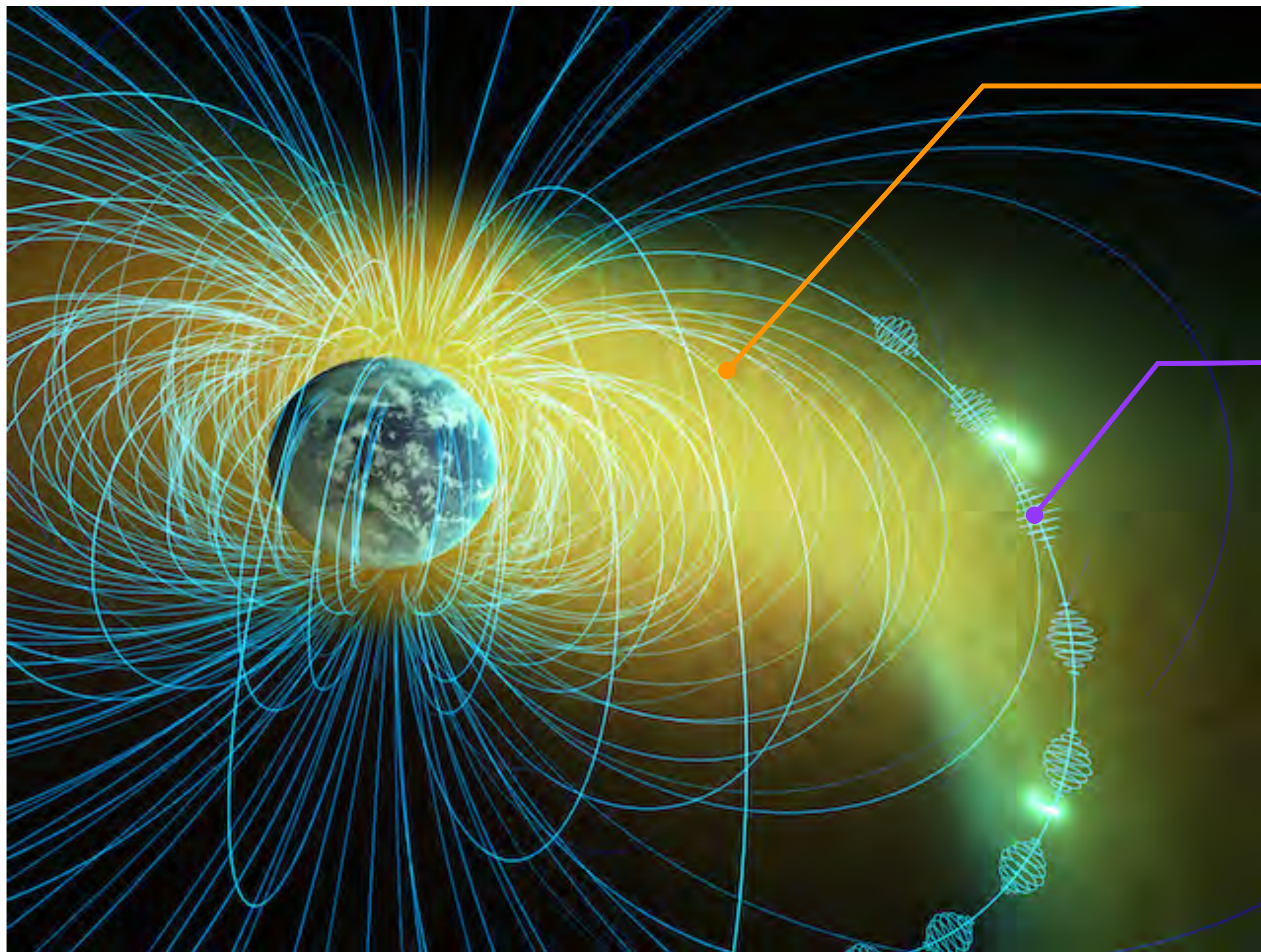
磁気圏が乱れる → 広い範囲で電子数が10～1000倍以上増える

2023年に日本の科学衛星「あらせ」が観測した高エネルギー電子 (>1MeV) の量



赤：磁気圏が乱れている期間（代表的な期間を抽出）

高エネルギー電子が増えるきっかけ：プラズマの "波" との共鳴



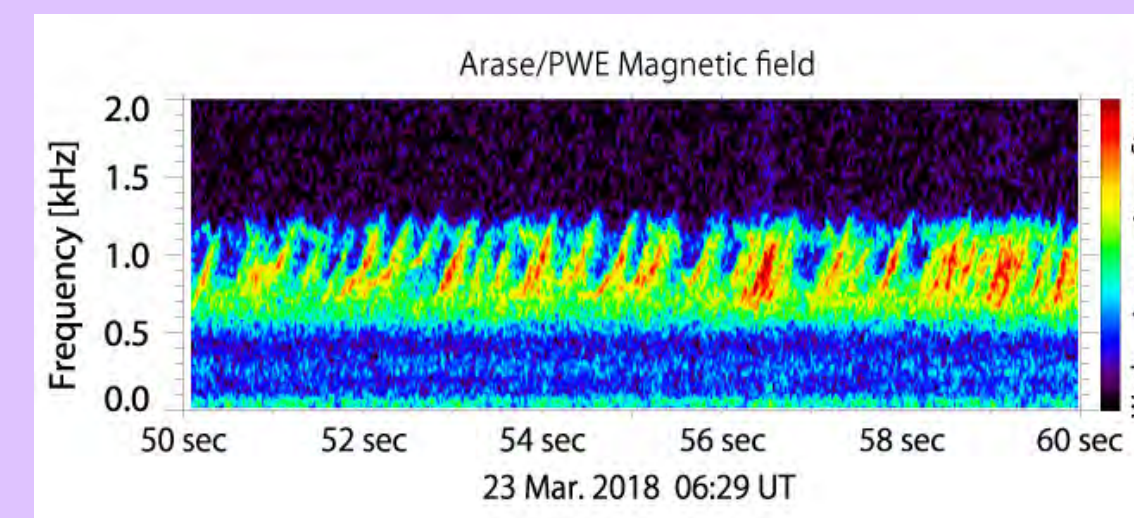
1. 磁気圏全体の揺れ

- ❖ 数mHz程度の磁場変動と共鳴して電子が移動する

2. 局所的なプラズマの揺れ

- ❖ 可聴域の周波数帯の波動と共鳴して電子が加速される

音声データにすると小鳥の声のように聴こえるので
宇宙のさえずりと呼ばれることも



鳥をクリックすると
音声 flows



磁気圏現象が関連する「宇宙天気災害」

磁気嵐・オーロラ嵐

送電施設トラブル

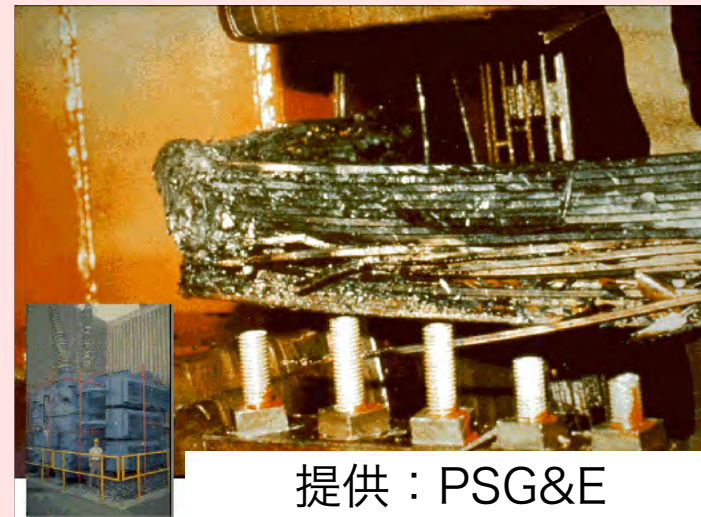
地磁気の大きな乱れにより地磁気誘導電流（GIC）発生
➡ GICがトリガーとなり送電施設に障害が発生する場合も

1989年3月：カナダ

- ・ 9時間にわたる変圧器ダメージ
- ・ 600万人に影響

2003年10月：スウェーデン

- ・ 約5万人に影響



提供：PSG&E

GICがトリガーとなり破損した発電所のトランス

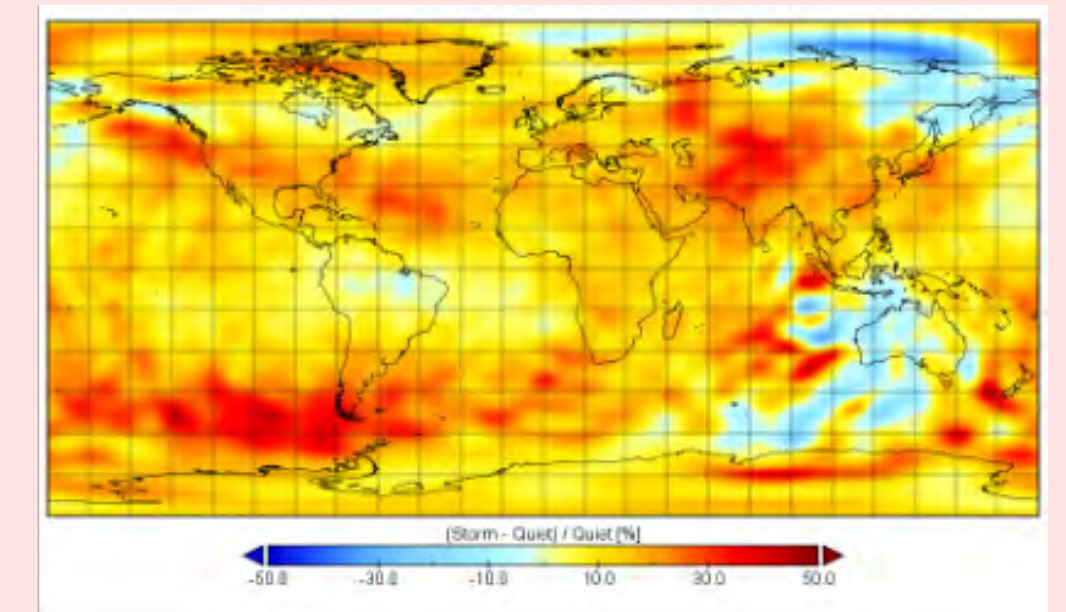
大気加熱

磁気嵐により極域に強い電流
➡ 大気加熱、膨張

2022年2月：Starlink衛星消失

- ・ 大気の抵抗が想定以上に増大
- ・ 目標高度に到達できず、大気圏に再突入

磁気嵐後の大気密度
(静穏時との差分)



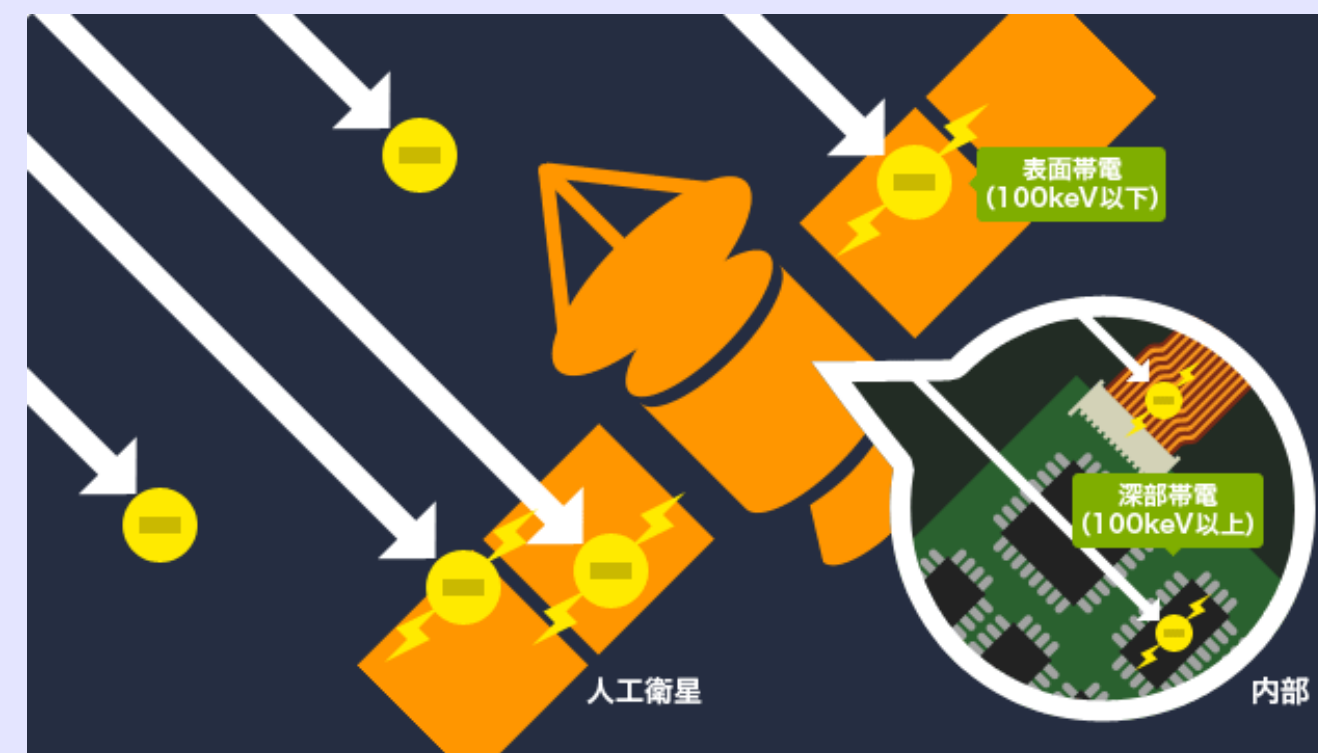
衛星帯電

低エネルギー電子（＜数10keV）

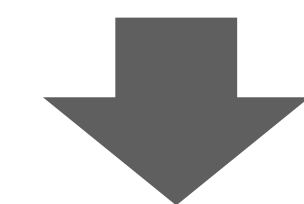
- ・ 人工衛星表面に帯電、放電による電磁波ノイズにより障害発生リスク

高エネルギー電子

- ・ 衛星内部まで侵入、回路基盤や配線に帯電
- ➡ 放電により搭載機器の誤動作や故障に



磁気圏現象は
広範囲に影響を及ぼす



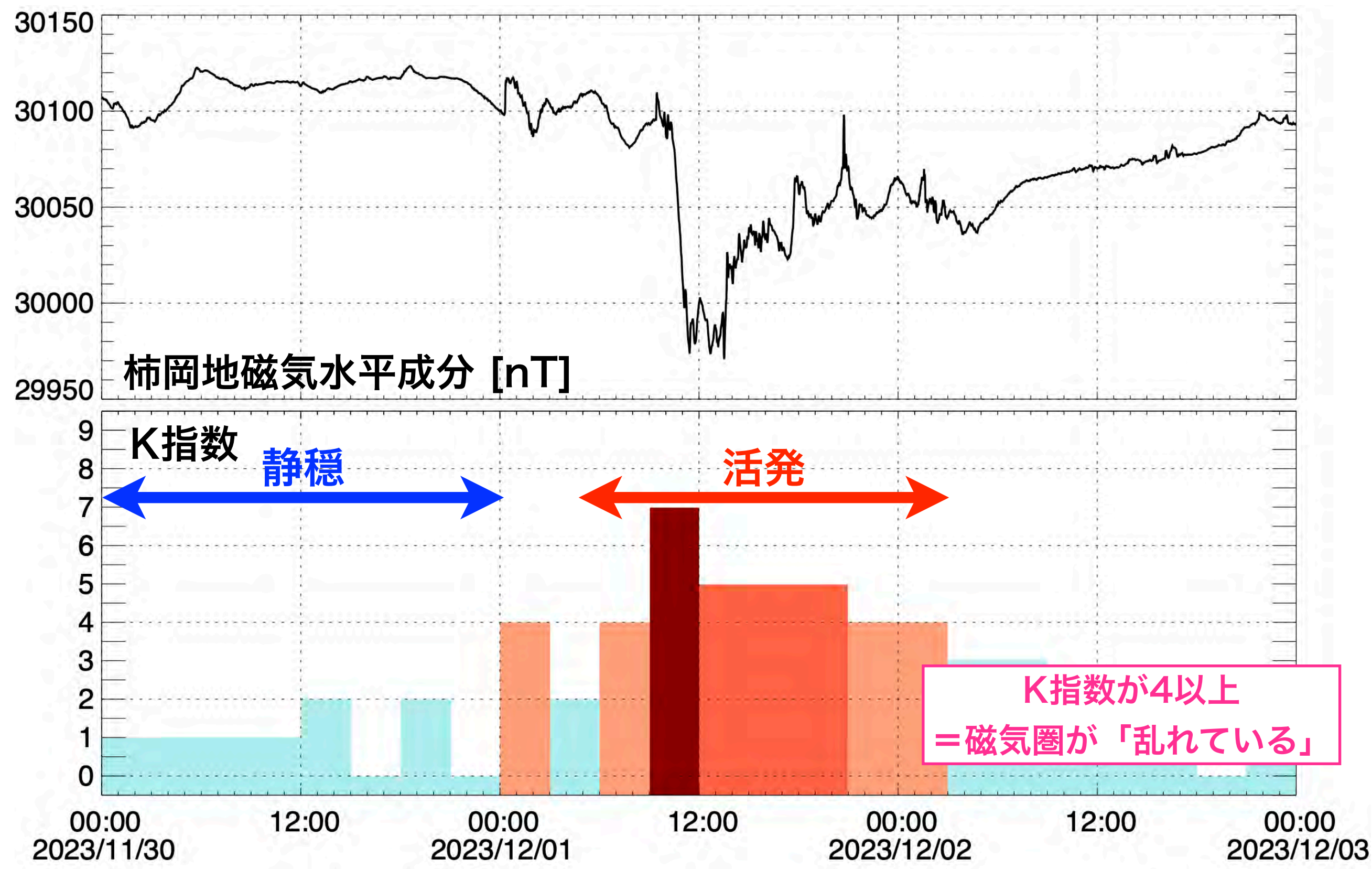
社会インフラに甚大な障害が
発生することも

放射線帯変動

NICT宇宙天気予報における磁気圏現象の取り扱い

地磁気擾乱（じょうらん）：磁気圏が「乱れている」状態にあるかどうか

❖ 気象庁地磁気観測所（茨城県石岡市柿岡）のデータをもとに予報



K指数
静穏日曲線からのずれを準対数目盛で
0～9の10段階に分けたもの。
3時間ごとに算出。

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

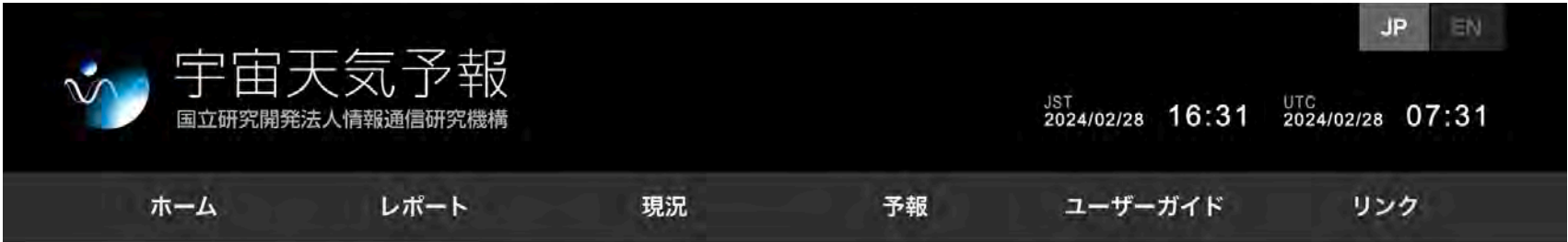
NICT宇宙天気予報における磁気圏現象の取り扱い

高エネルギー電子：放射線帯の状態について

❖ 静止軌道の高エネルギー電子（>2 MeV）の24時間フルエンス（積分値）をもとに予報

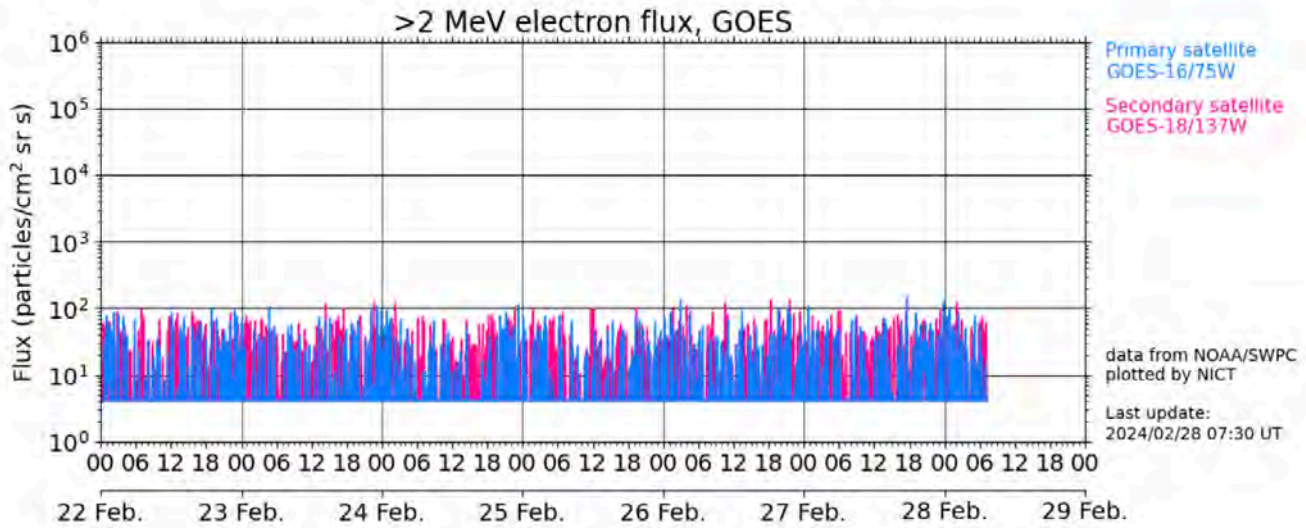
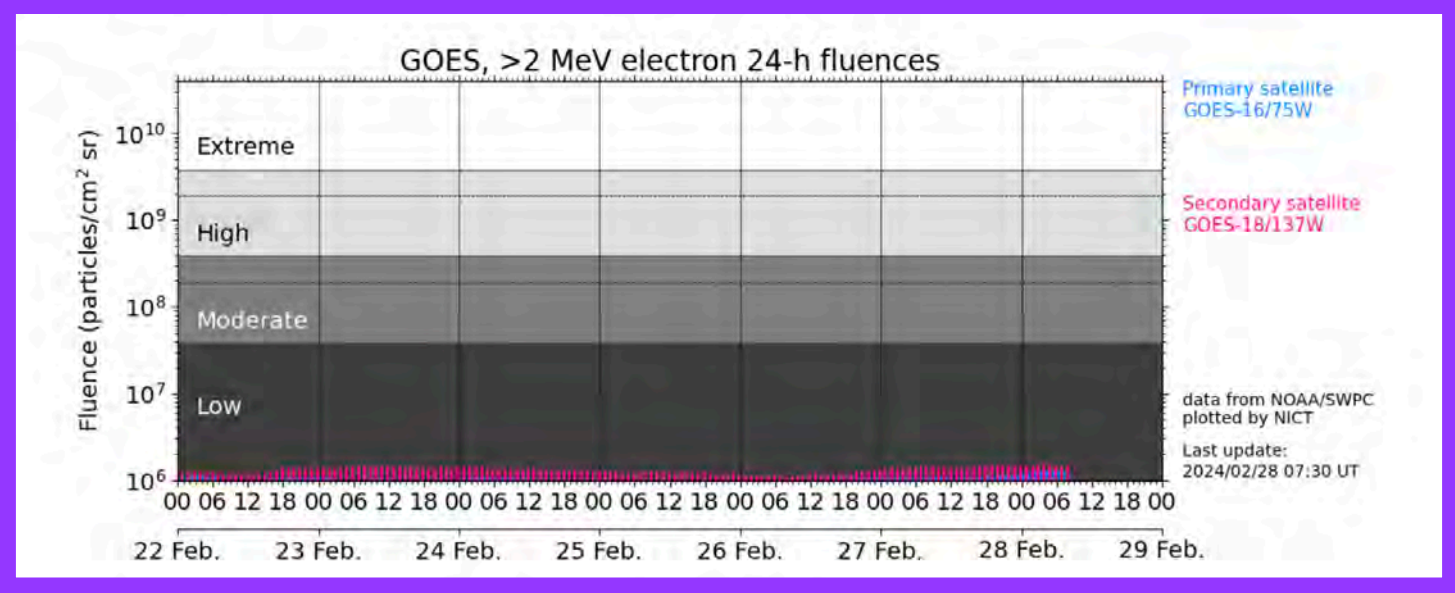
レベル	表記	説明
1	静穏	24時間フルエンスが 3.8×10^7 [/cm ² sr] 未満
2	やや高い	24時間フルエンスが 3.8×10^7 以上 3.8×10^8 [/cm ² sr] 未満
3	高い	24時間フルエンスが 3.8×10^8 以上 3.8×10^9 [/cm ² sr] 未満
4	非常に高い	24時間フルエンスが 3.8×10^9 [/cm ² sr] 以上

現在はGOES衛星のデータを参照



放射線帯電子

静止軌道の高エネルギー電子



静止気象衛星ひまわり10号（2028年打上予定）

- ▶ 高エネルギー電子・陽子を計測する装置を搭載

RMS/Himawari10

Radiation Monitors for Space weather
measure radiation belt electrons
solar and galactic protons

RMS-p target:
Energetic protons
(10 MeV to 1 GeV)

- Single event effects (SEEs)
- Total ionizing dose (TID)
- Astronauts/Air crew exposure
- Polar cap absorption (PCA)

RMS-e target:
Energetic electrons
(50 keV to 5 MeV)

- Spacecraft charging and electrostatic discharge (ESD)
- Total ionizing dose (TID)

Conceptual design
2020~

EM
development
2021~

FM
development
2024~

PFT 2027~

Launch

Operation
2029~

まとめ

磁気圏の中は時々刻々と激しく変化する環境
その影響は地球大気から宇宙空間まで広範囲にわたる

磁気嵐・オーロラ嵐

放射線帯変動

誘導電流

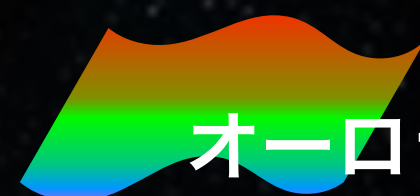
荷電粒子の
降り込み

表面帯電

深部帯電



電力システム
障害



オーロラ発生



衛星帯電

日々の予報はこちらから
<https://swc.nict.go.jp>

