

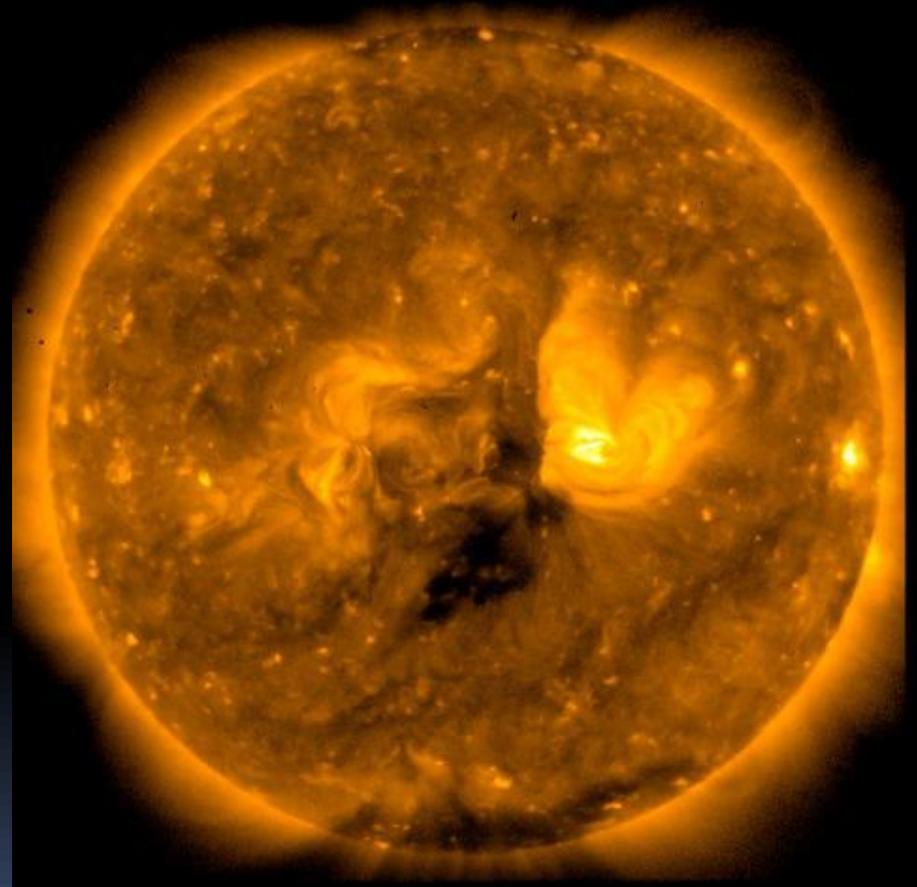
# 地球惑星科学 II

## 第7回

北海道大学大学院理学研究院  
高木聖子(代講)

2019年11月28日

# 太陽の基本情報



- 地球から1億5千万 km (1AU)
- 直径: 140万 km (地球の109倍)
- 重量:  $2 \times 10^{30}$  kg (地球の33万倍)
- 平均密度:  $1.4 \text{ g/cm}^3$  (地球の1/4倍)
- 現在の年齢: 約46億歳
  - あと50億年ほどで水素を使い果たし、赤色巨星→白色矮星へ
- 自転周期: 約27日

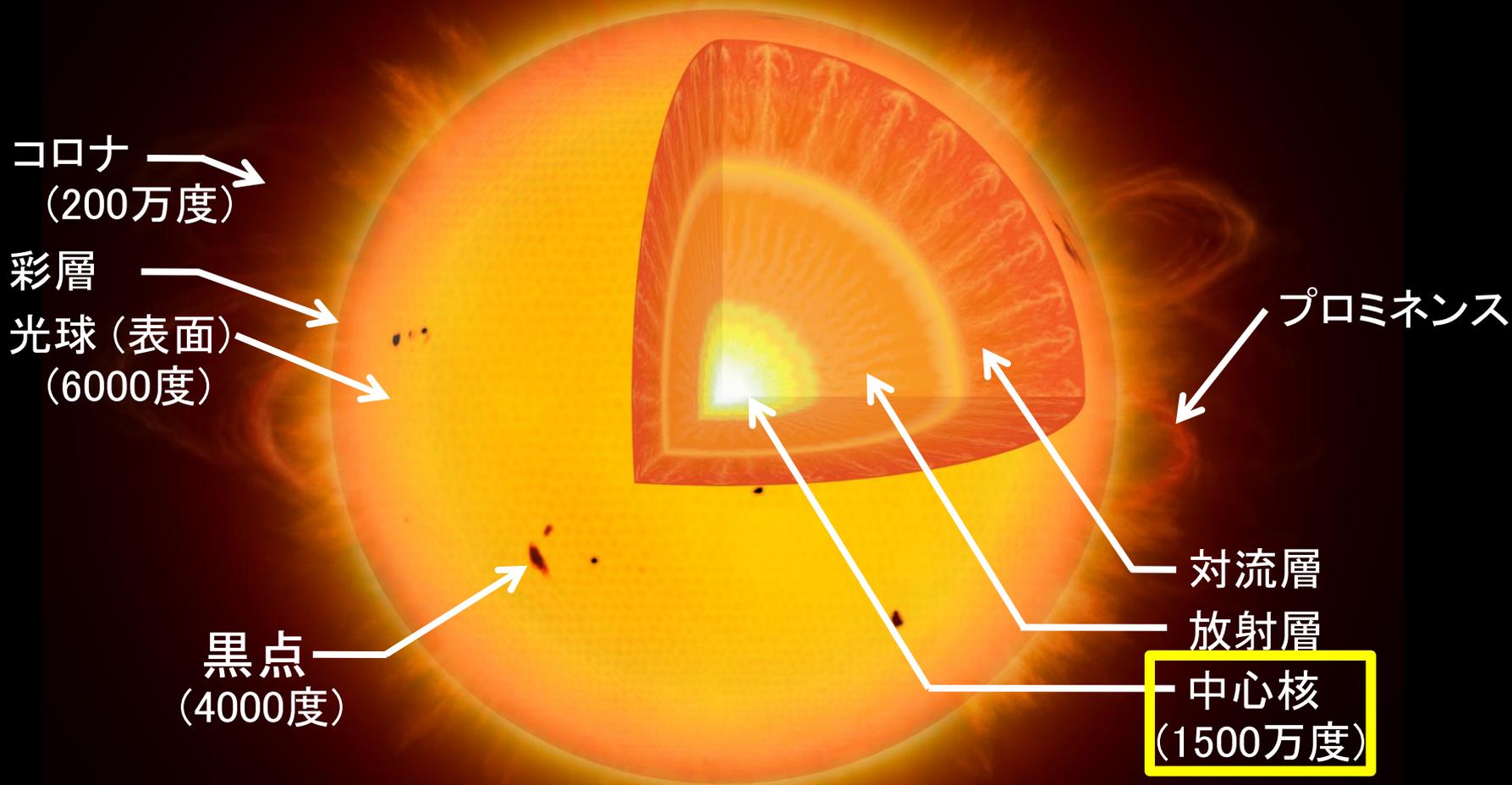
# 太陽の自転

約27日で1周



Hinode/XRT: 2007-01-03 16:19:08UT

# 太陽の構造



# 中心核では核融合反応が起きている

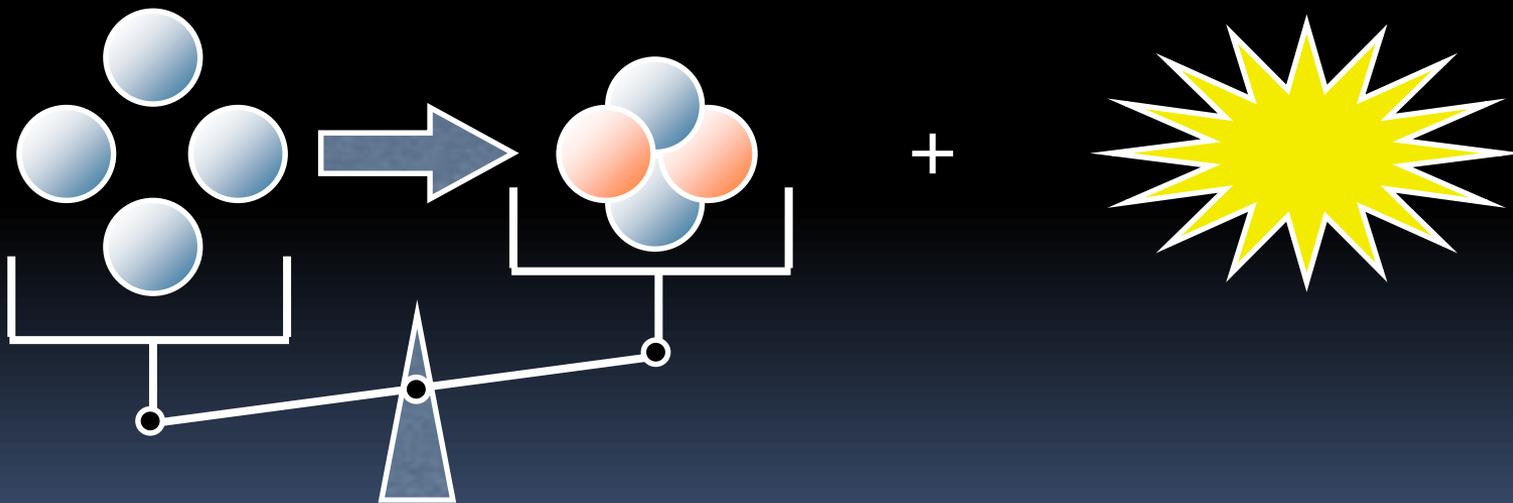


太陽内部のガスはほとんどが プラズマ状態  
陽子(+)と電子(-)が自由に動き回る

水素の原子核  
陽子4個

ヘリウム原子核  
1個

エネルギー



## 主系列星

# 太陽の一生

## Life Cycle of the Sun



分子雲から原始星へ

# 太陽の一生

Life Cycle

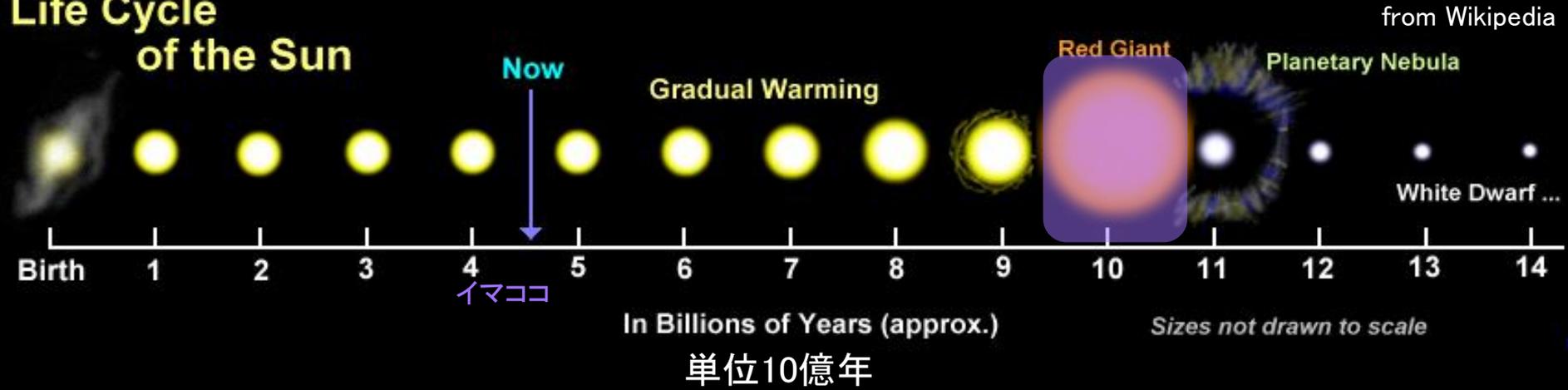


分子雲から原始星へ

水素の核融合が始まり、主系列星に

# 太陽の一生

## Life Cycle of the Sun



分子雲から原始星へ

水素の核融合が始まり、主系列星に

水素の核融合が終わり、赤色巨星に

# 太陽の一生

## Life Cycle of the Sun



分子雲から原始星へ

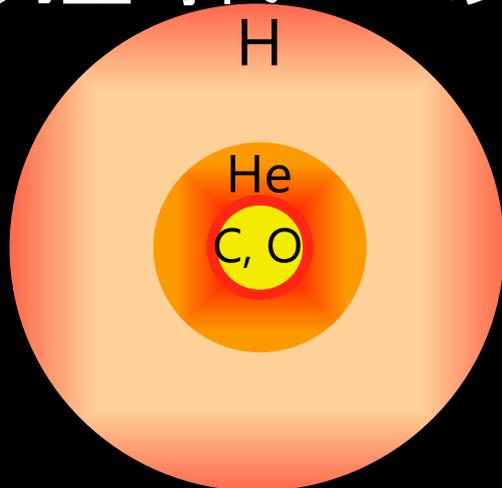
水素の核融合が始まり、主系列星に

水素の核融合が終わり、赤色巨星に

外層のガスが放出されて惑星状星雲に

# 星の最期

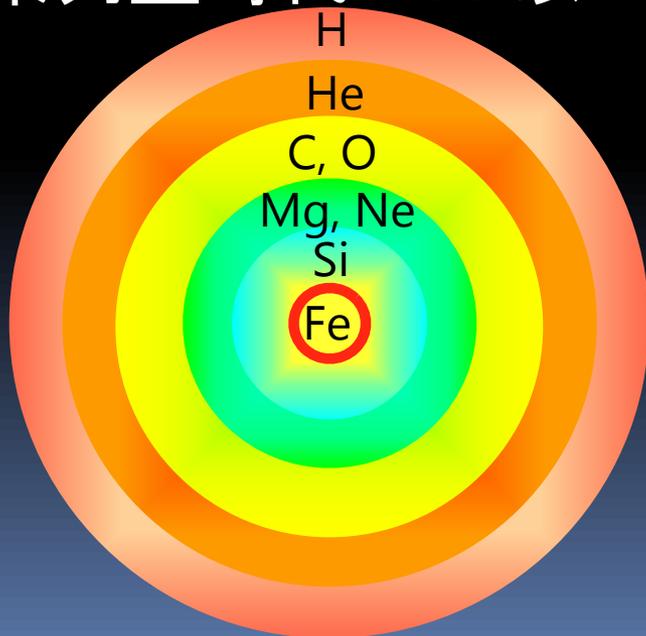
主系列星時代:  $8M_{\odot}$ 以下



→ 中心: 白色矮星

→ 外側: 惑星状星雲

主系列星時代:  $8M_{\odot}$ 以上



→ 中心: 中性子星

→ 外側: 超新星残骸

→  $30M_{\odot}$ 以上: ブラックホール

# 太陽の一生

## Life Cycle of the Sun



分子雲から原始星へ

水素の核融合が始まり、主系列星に

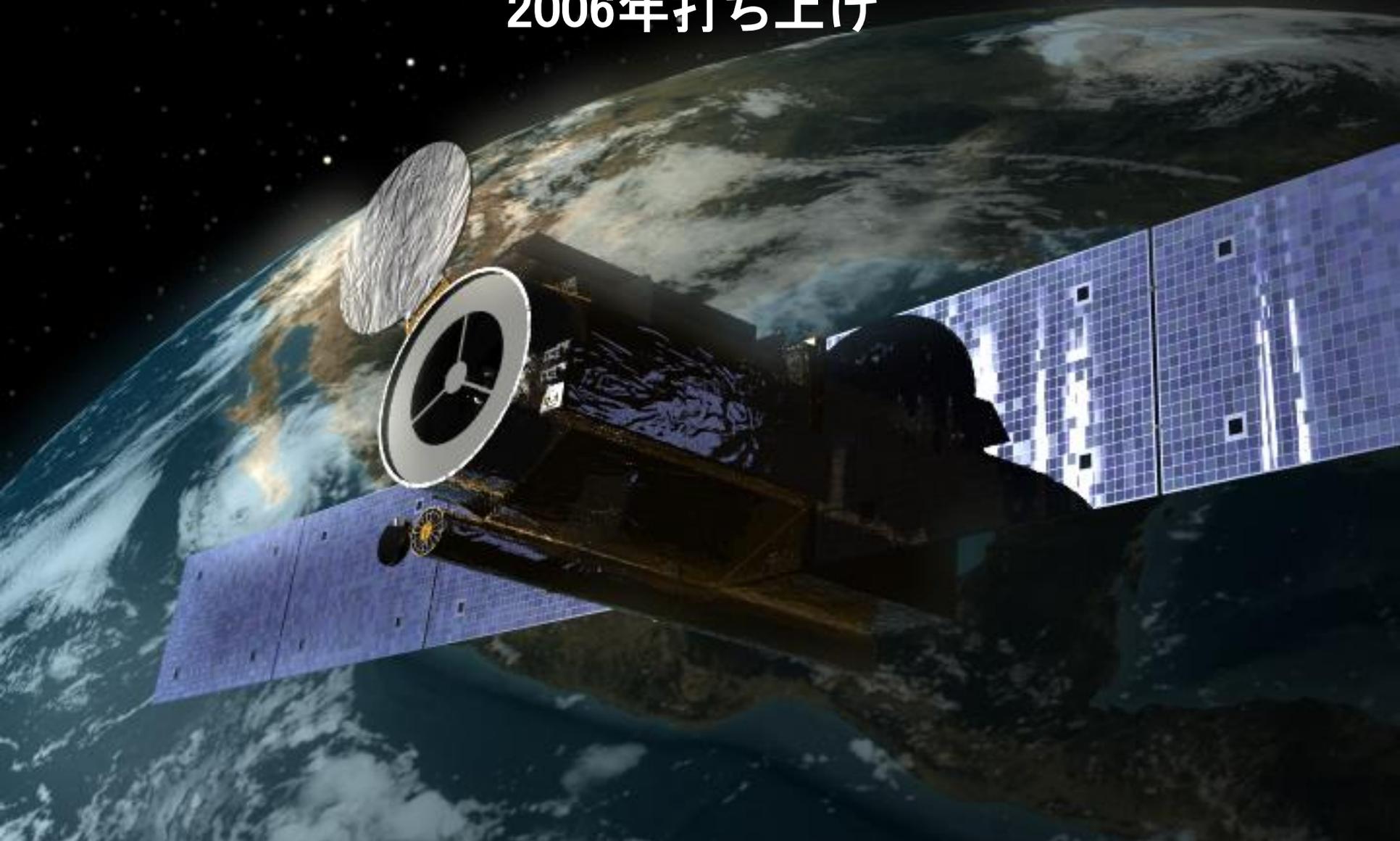
水素の核融合が終わり、赤色巨星に

外層のガスが放出されて惑星状星雲に

中心の炭素・酸素核が白色矮星に

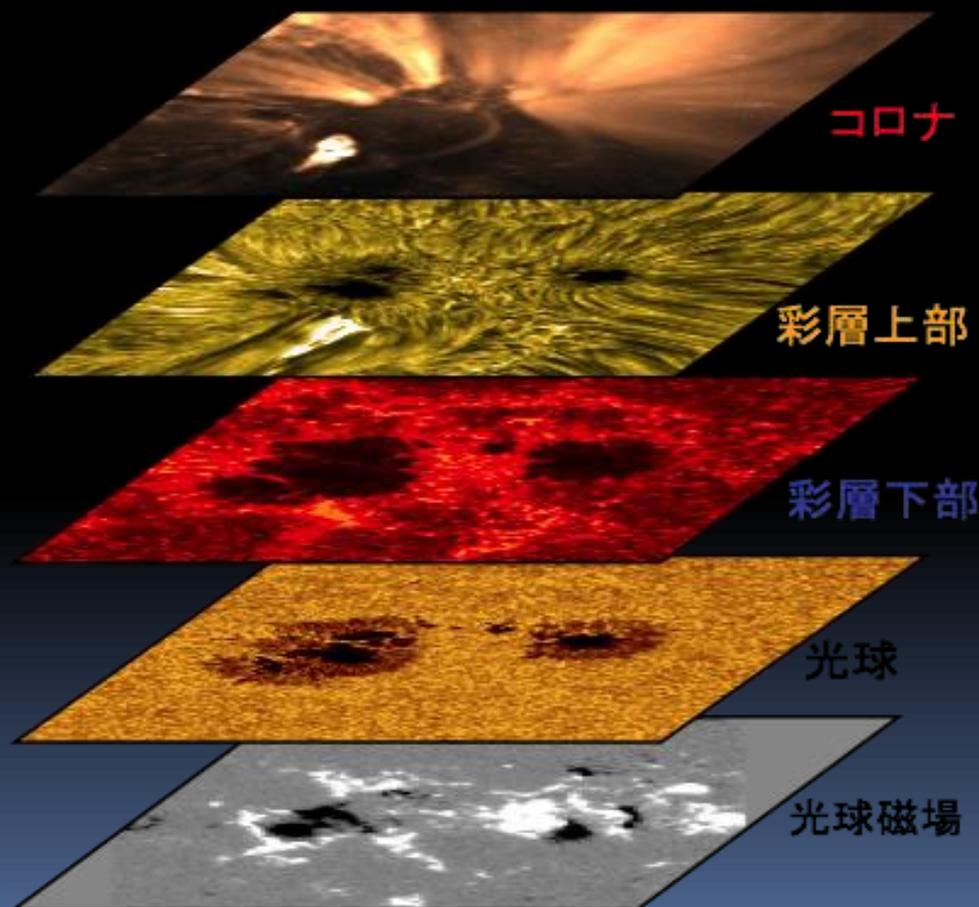
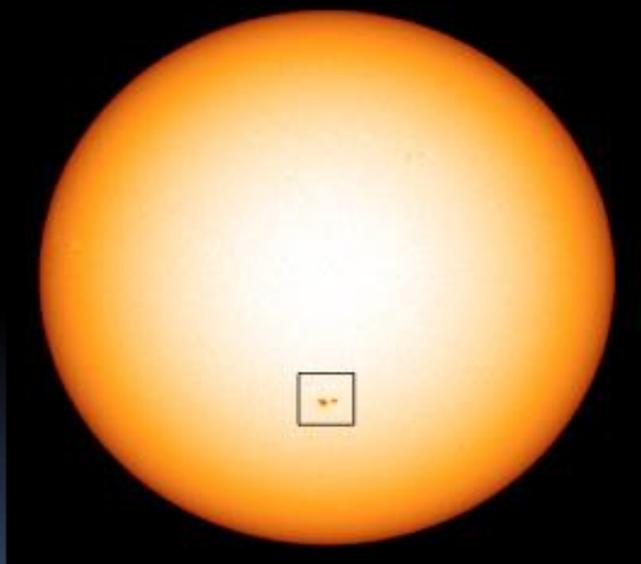
# 太陽観測衛星「ひので」

2006年打ち上げ

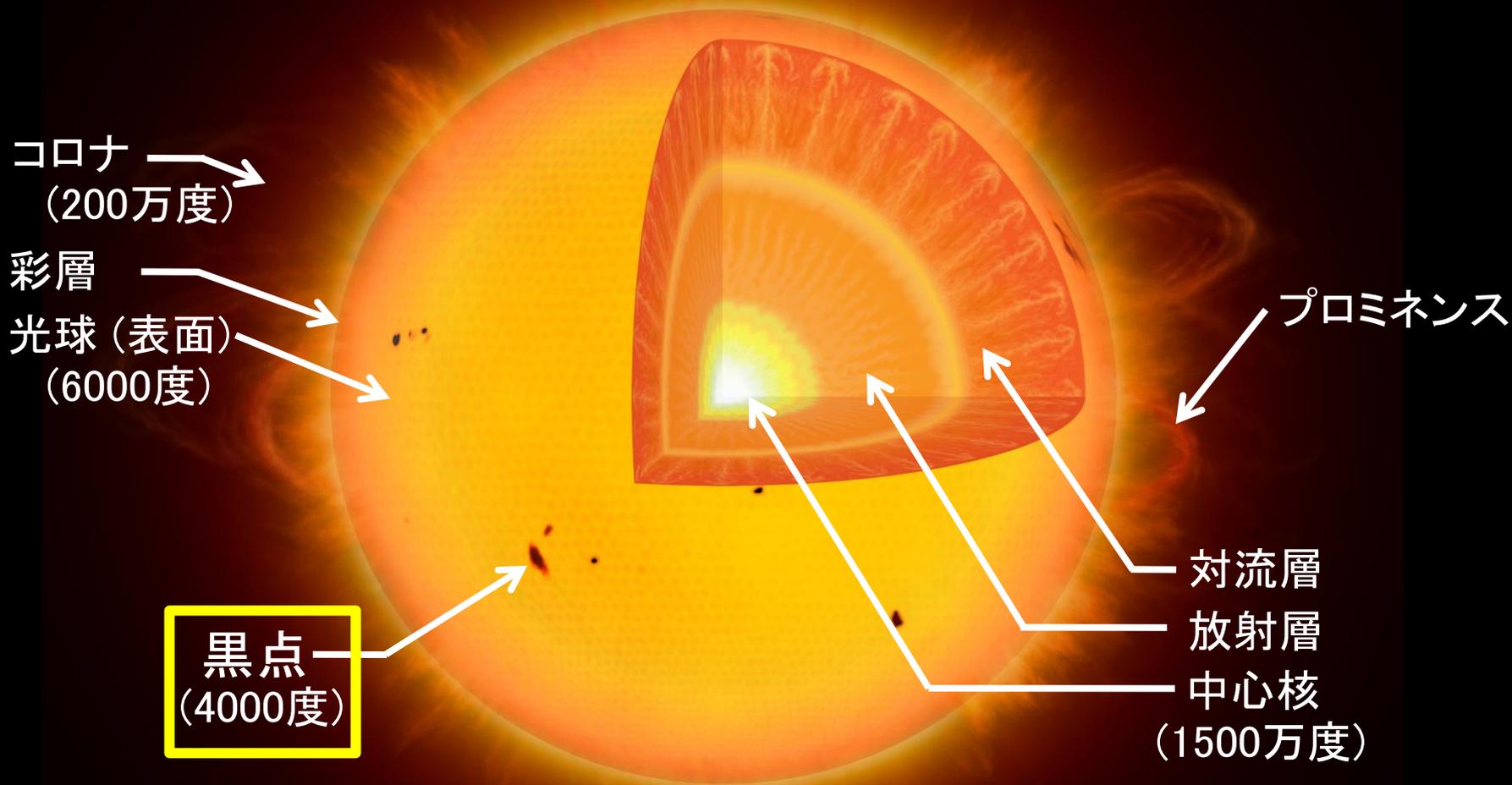


# 「ひので」の特徴

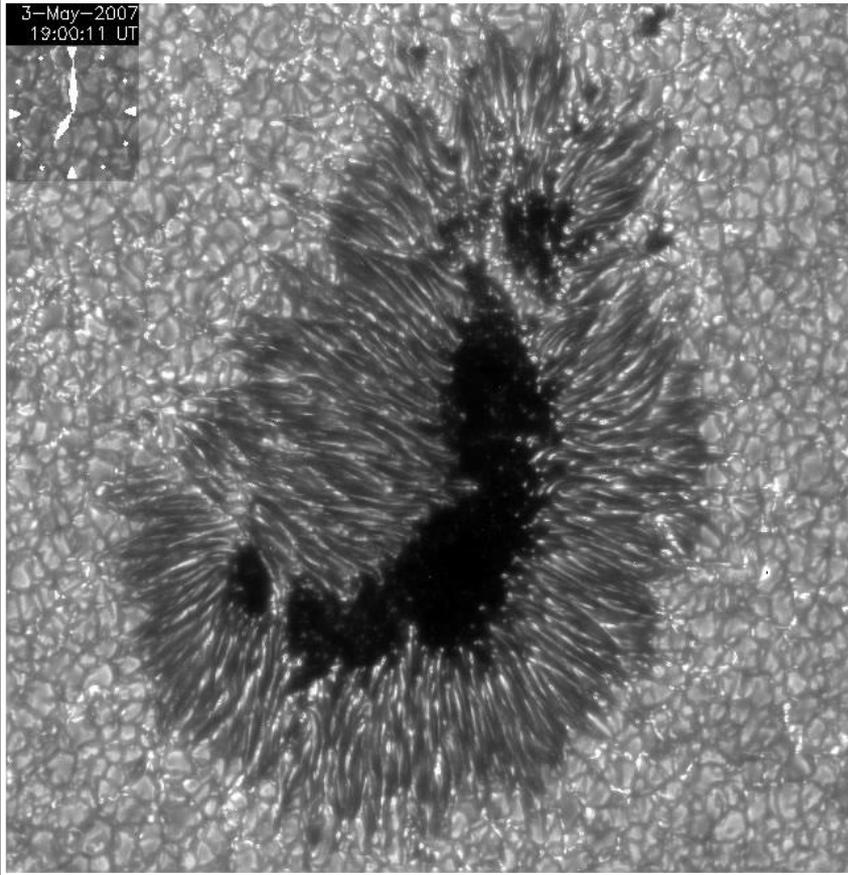
- 色々な波長で観測
- 波長を変えて見ると異なる高さの大気構造がわかる



# 太陽の構造



# 太陽黒点

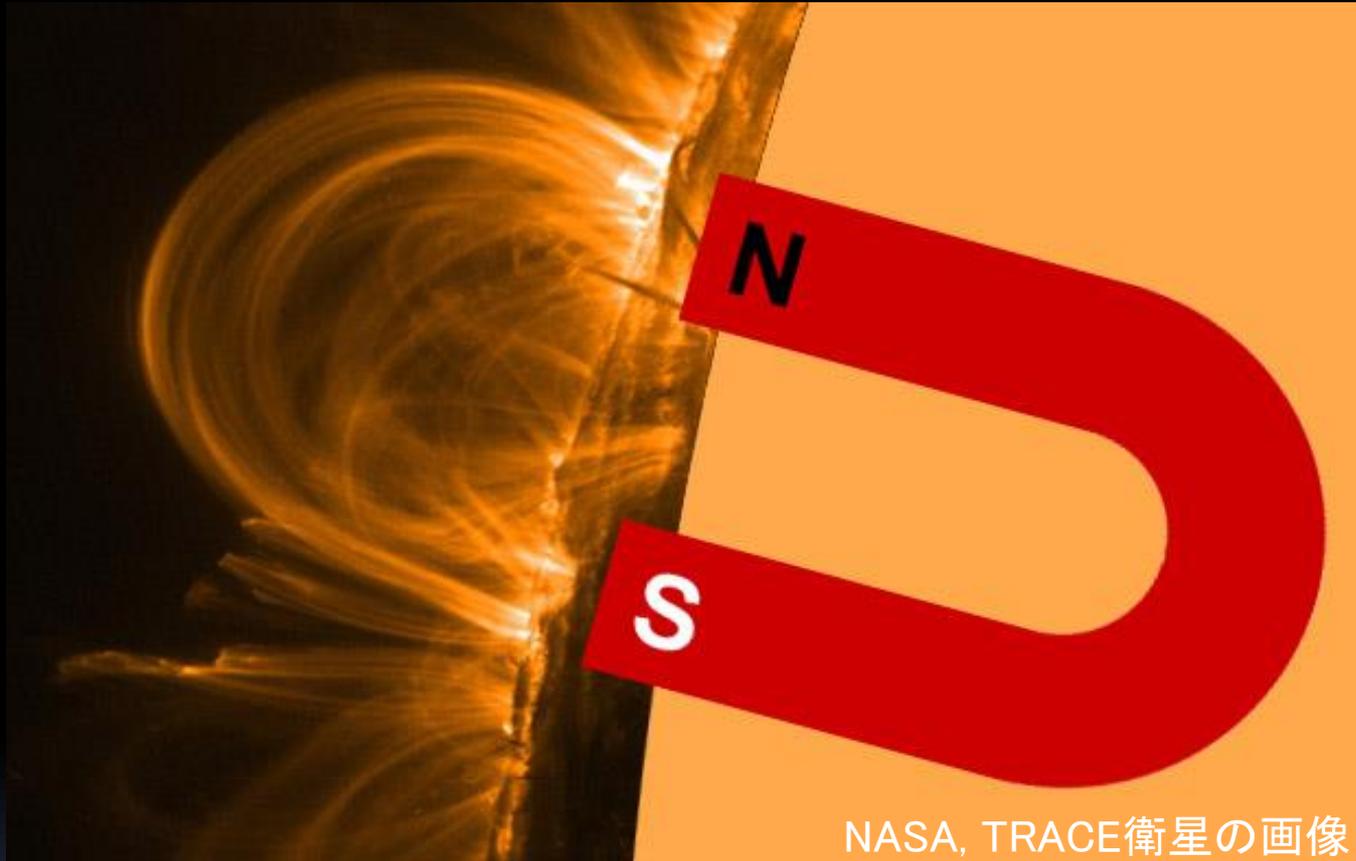


- 太陽表面にある周囲より暗い領域
- 温度: 4000度
  - 周りより温度が低い (太陽表面: 6000度)
- 直径数10 km ~ 10万 km
  - 地球が4-5個入ることも
- 寿命: 数日 ~ 1ヶ月
- 磁場が非常に強い
- 黒点数は約11年周期で増減する

黒点は太陽の自転に伴って  
徐々に形を変えていく



# 黒点を作る磁場



NASA, TRACE衛星の画像

[http://www.windows2universe.org/sun/atmosphere/sunspot\\_magnetism.html](http://www.windows2universe.org/sun/atmosphere/sunspot_magnetism.html)

- ほとんどの黒点はN極S極が対になっている
- 磁場が大きくねじ曲げられている分のエネルギーを溜め込んでいる
- フレアと呼ばれる爆発現象を引き起こす

# 太陽活動11年周期

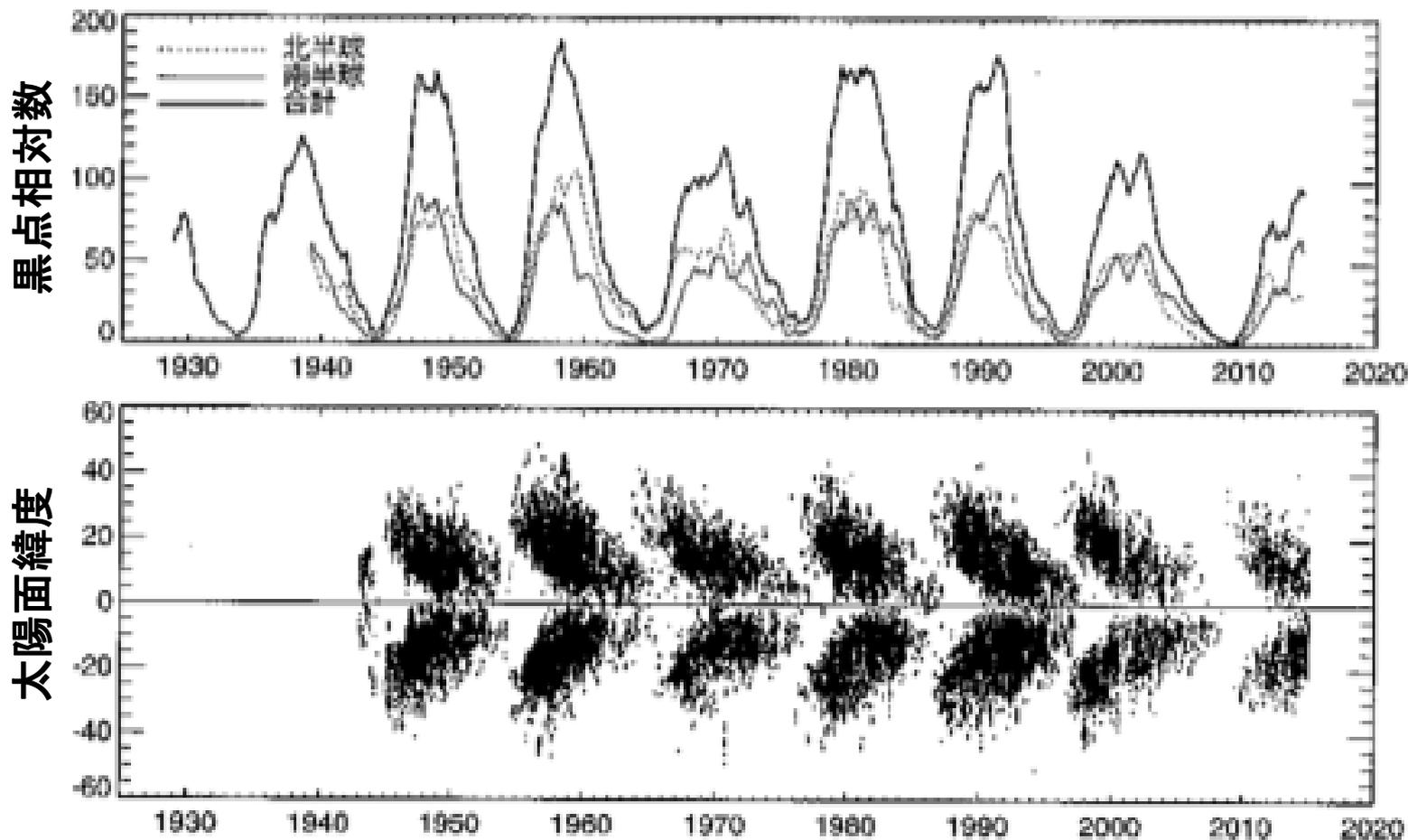
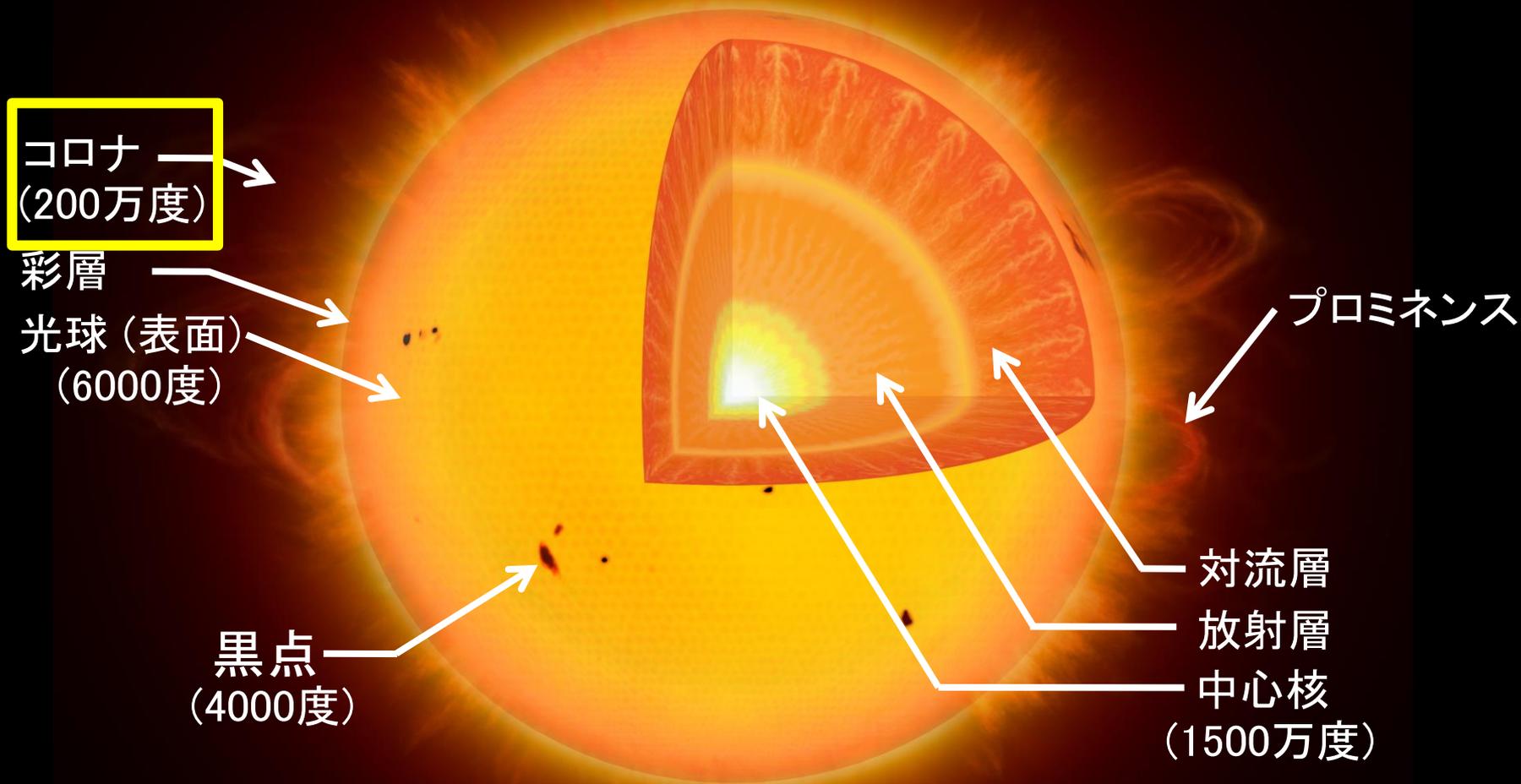


図2 国立天文台の観測による黒点相対数(上図)と蝶型図(下図)

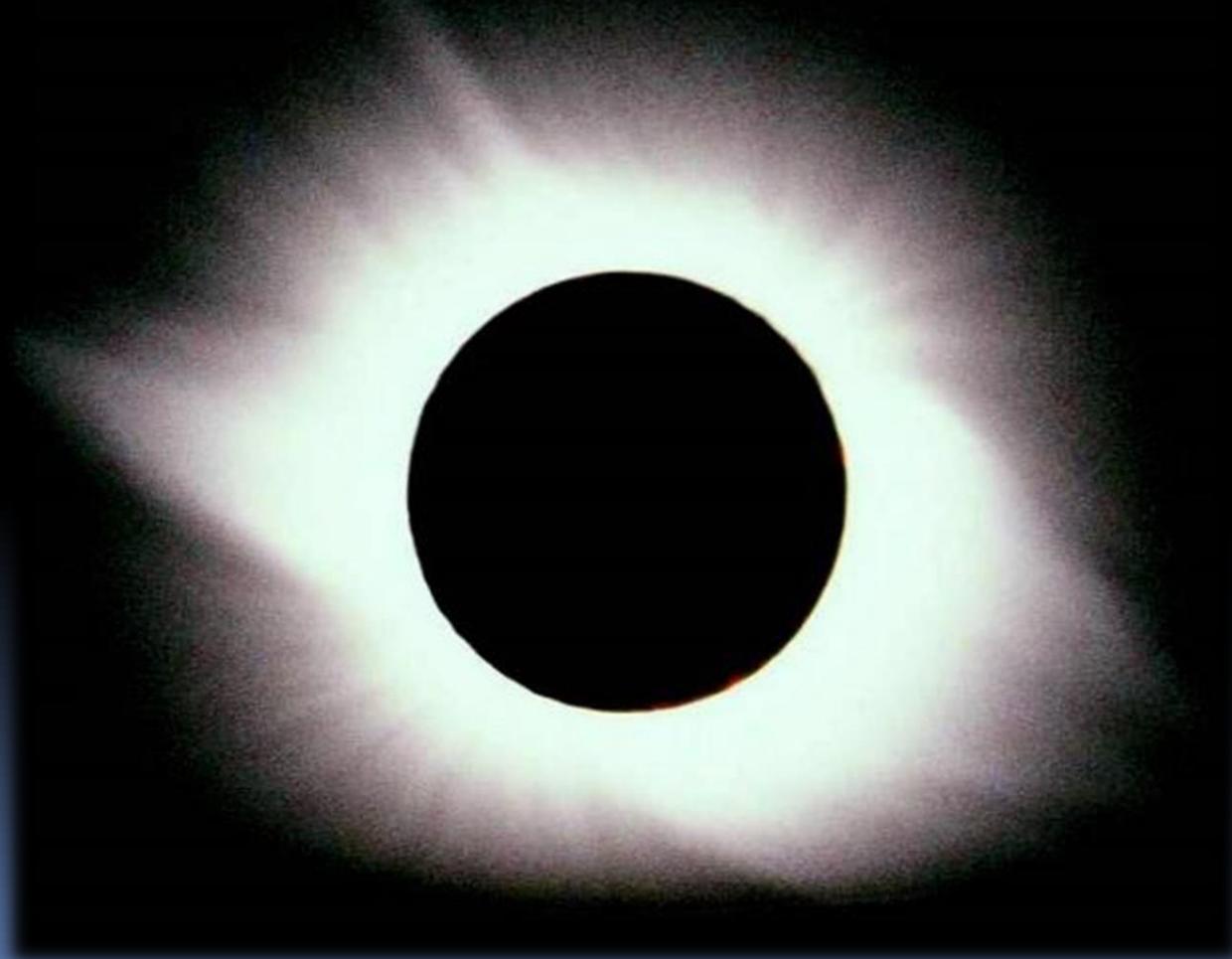
天文年鑑より

# 太陽の構造

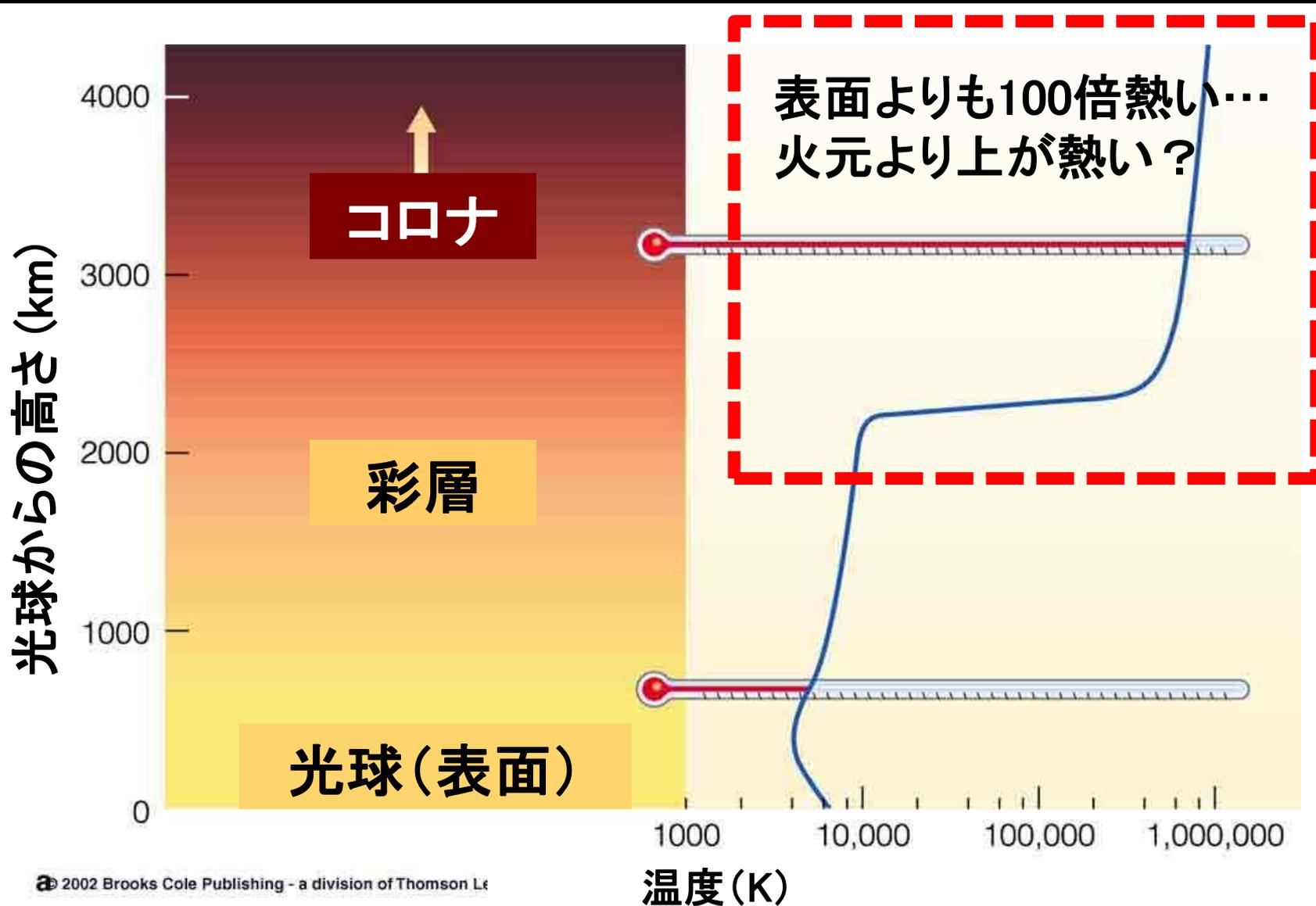


# 太陽コロナ

- プラズマが太陽半径の数倍のところまで広がっている
- 通常は光球が明るすぎるため見えない(皆既日食のとき見える)
- 温度は100万度を超える

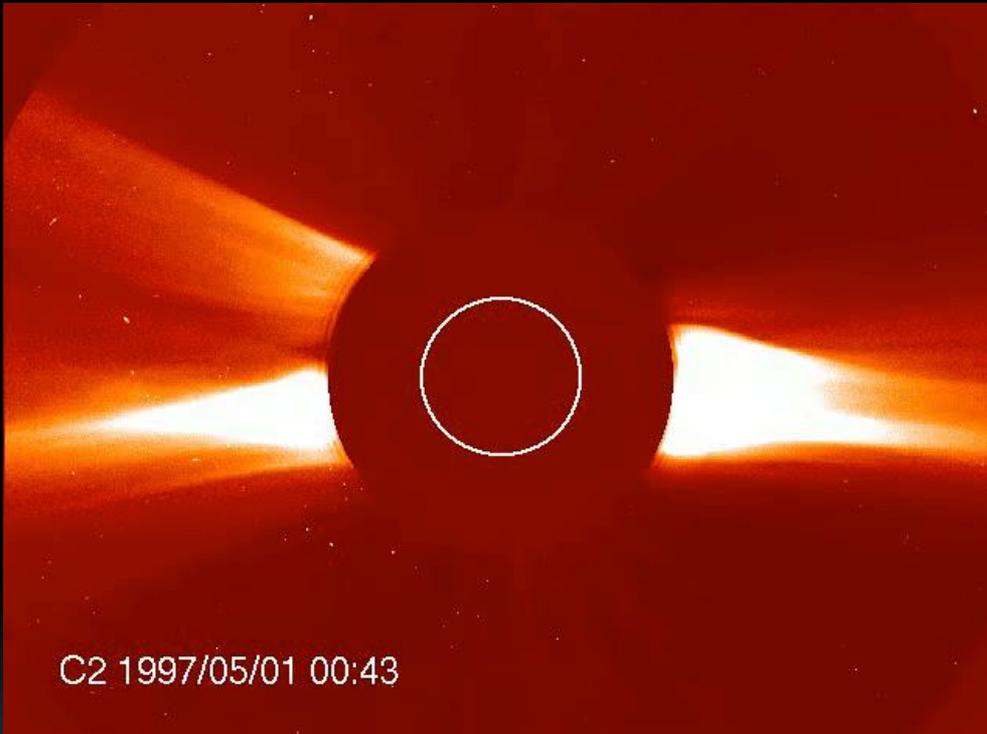


# コロナ加熱問題



その他の現象

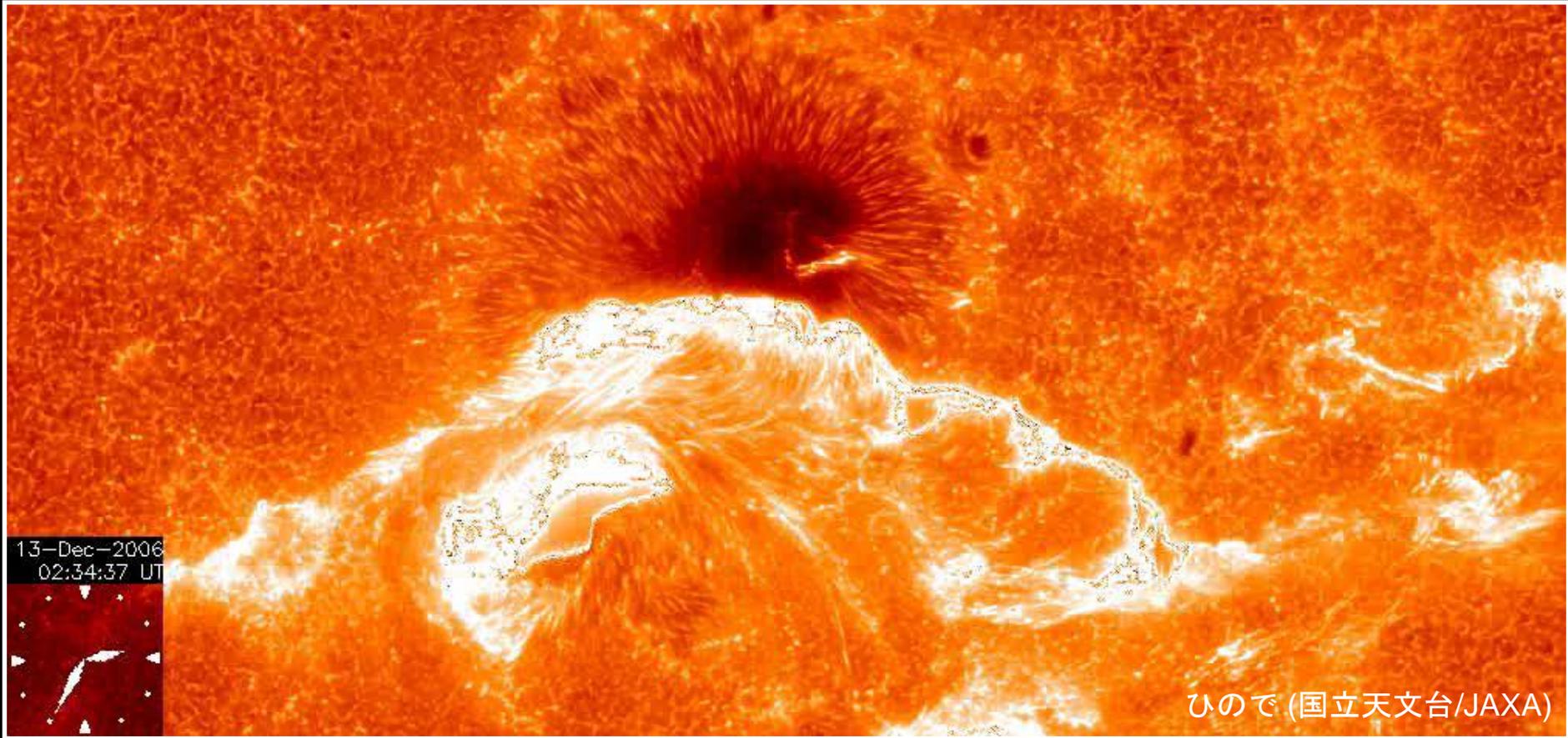
# 太陽風



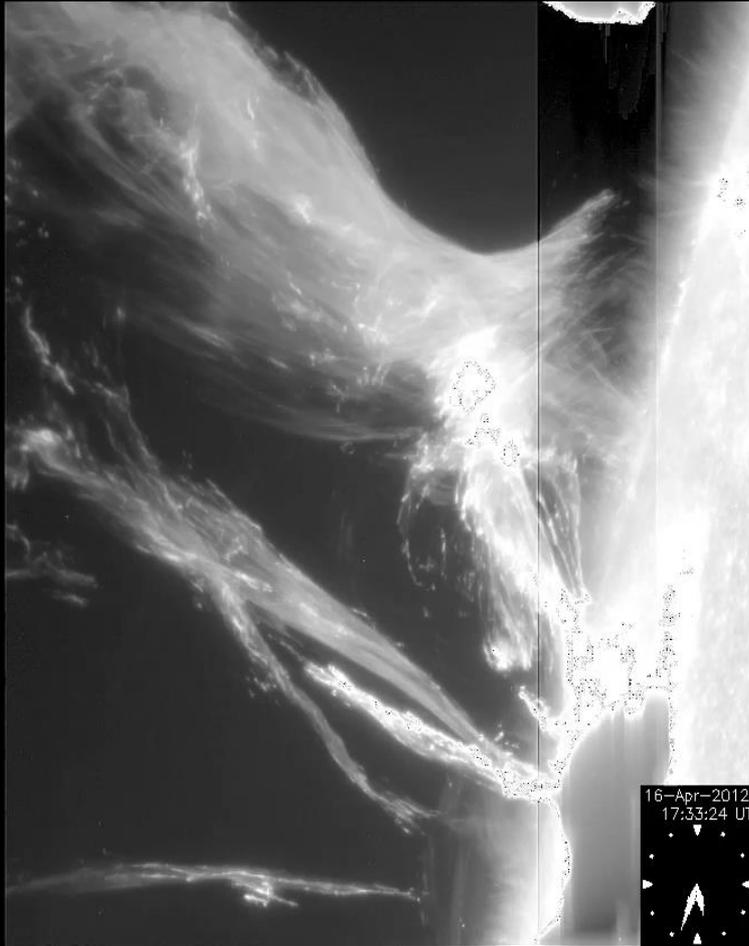
- コロナの中で高速に飛び回るプラズマが太陽の引力を振り切り惑星間空間へ飛び出している
- 温度: 約10万度
- 速度: 300–800 km/s
- 2～3日で地球に到達

SOHO衛星/LASCO

# 太陽フレア

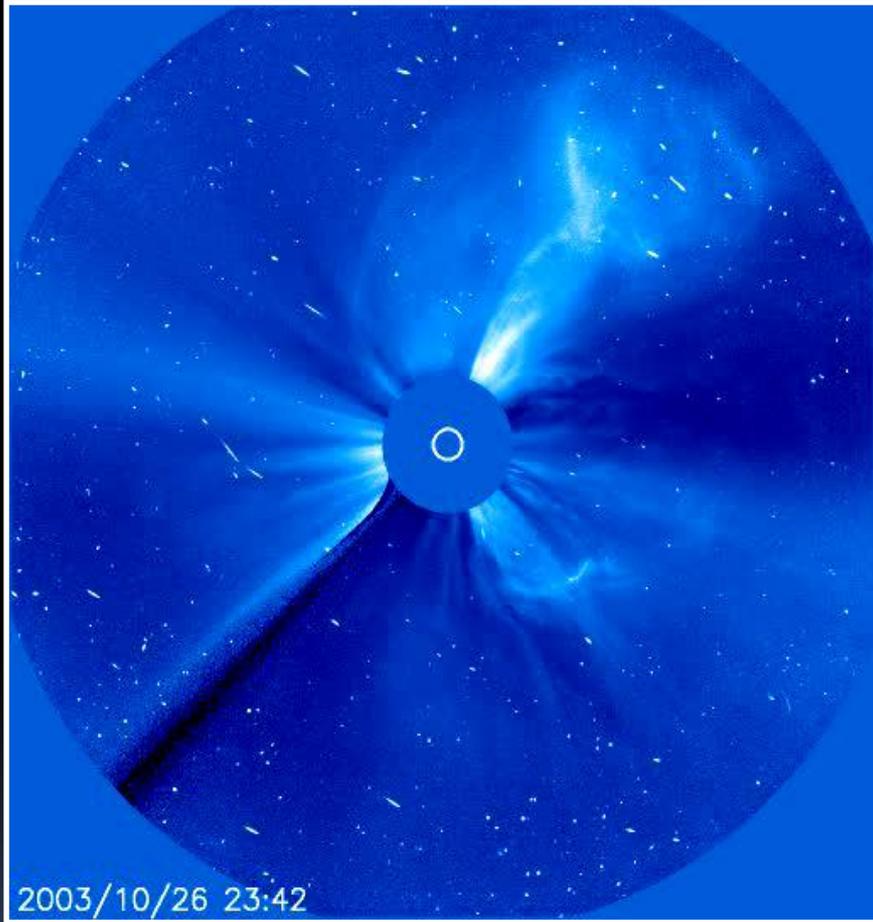


# 太陽フレア



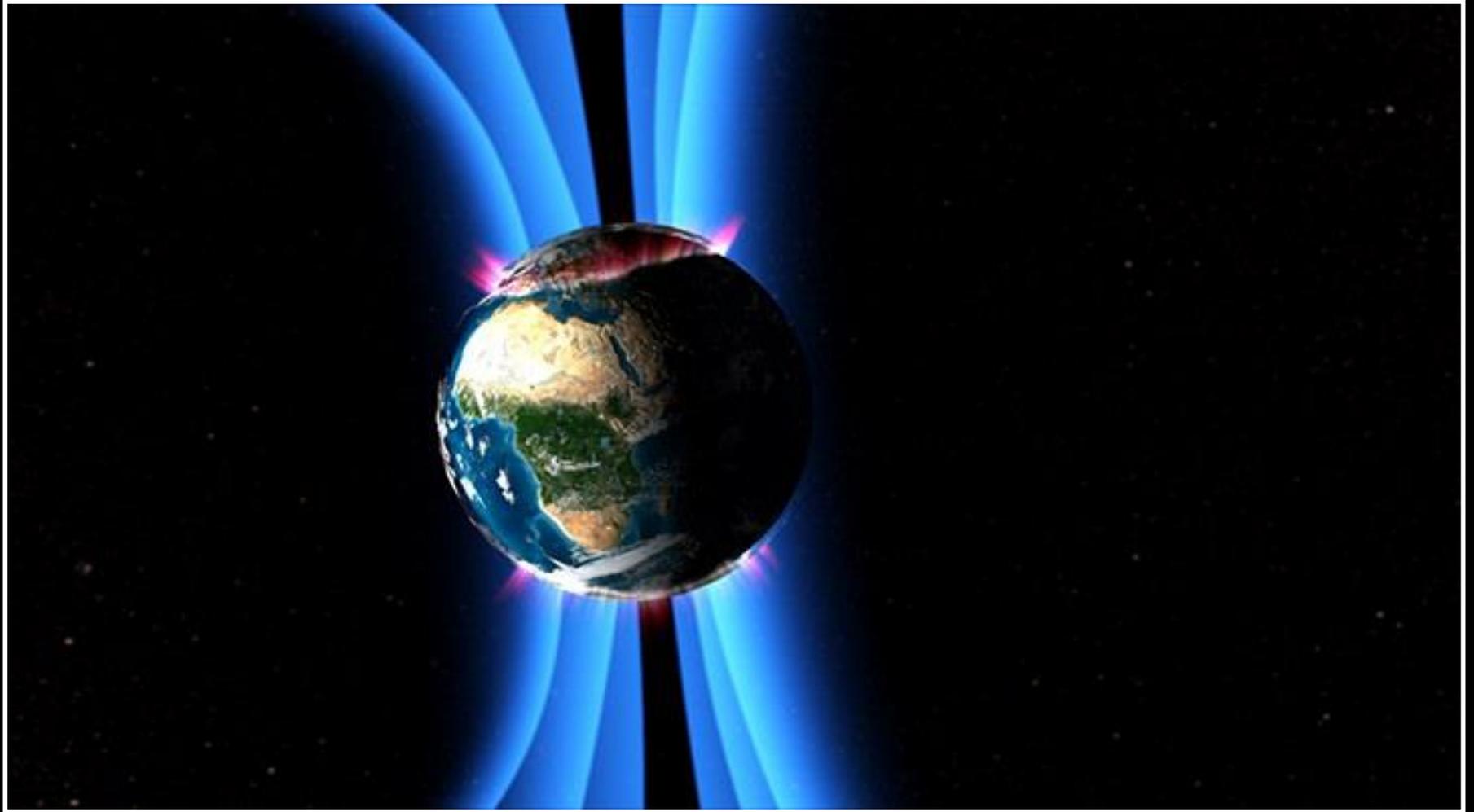
- 太陽系で最大のエネルギー解放現象
- 磁場エネルギーが突然解放され、電磁波が放出される(増光)
- 数秒で立ち上がり、数十分～数時間継続
- 温度: 数千万度まで加熱
- コロナ中のプラズマが宇宙空間へ放出され、太陽風となって地球へ到達

# コロナ質量放出 (CME)



- フレア同様、磁場エネルギーが突然解放される
- コロナ中のプラズマが放出される
- 一回のCMEが放出するプラズマの質量は10億トン
- 前面に衝撃波を作る
- 放出されたプラズマの太陽風は秒速1000 kmを超えることもある

# フレア・CMEの影響



# 国際宇宙ステーション(ISS)から見た オーロラ



NASA提供

# 地球から見たオーロラ



# オーロラ

・高緯度地方の夜空に現れる高層大気の発光現象  
(ノルウェー、スウェーデン、カナダ、アラスカ、アイスランド、  
南極、、、)



# 様々な形

- ディスクリートオーロラ
  - カーテン状のはっきりオーロラ
- ディフューズオーロラ
  - ぼんやりしたオーロラ
- パルセーティングオーロラ
  - 高速で瞬くオーロラ



ディスクリートオーロラ  
Wikipedia提供

パルセーティングオーロラ

Live!オーロラ提供



ディフューズオーロラ

<http://aten.igpp.ucla.edu/gemwiki/>

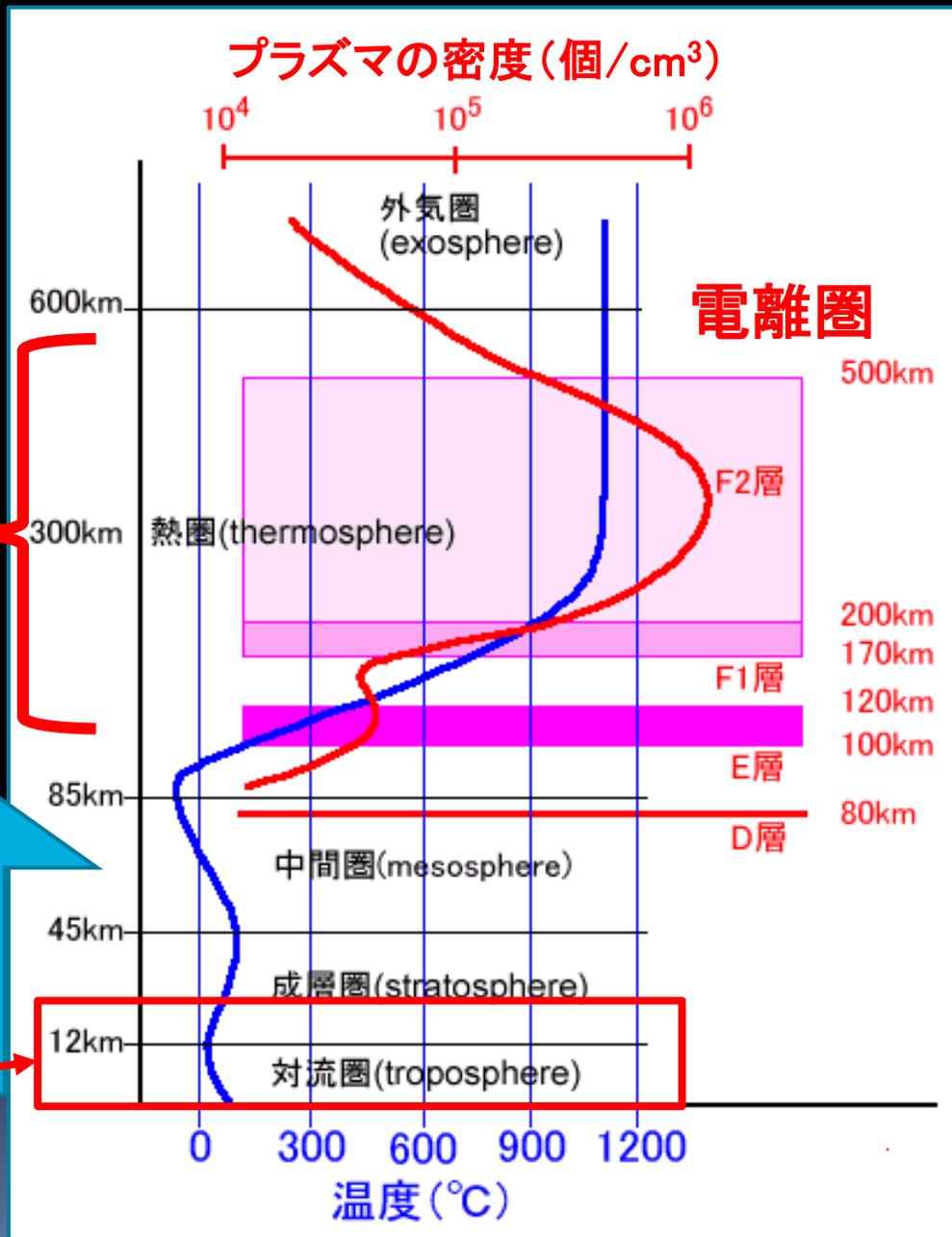
# どんな所？

- 温度が高い
  - 1000度近い
- プラズマの密度が高い
  - 電気を帯びた粒がたまって層になっている

電離圏

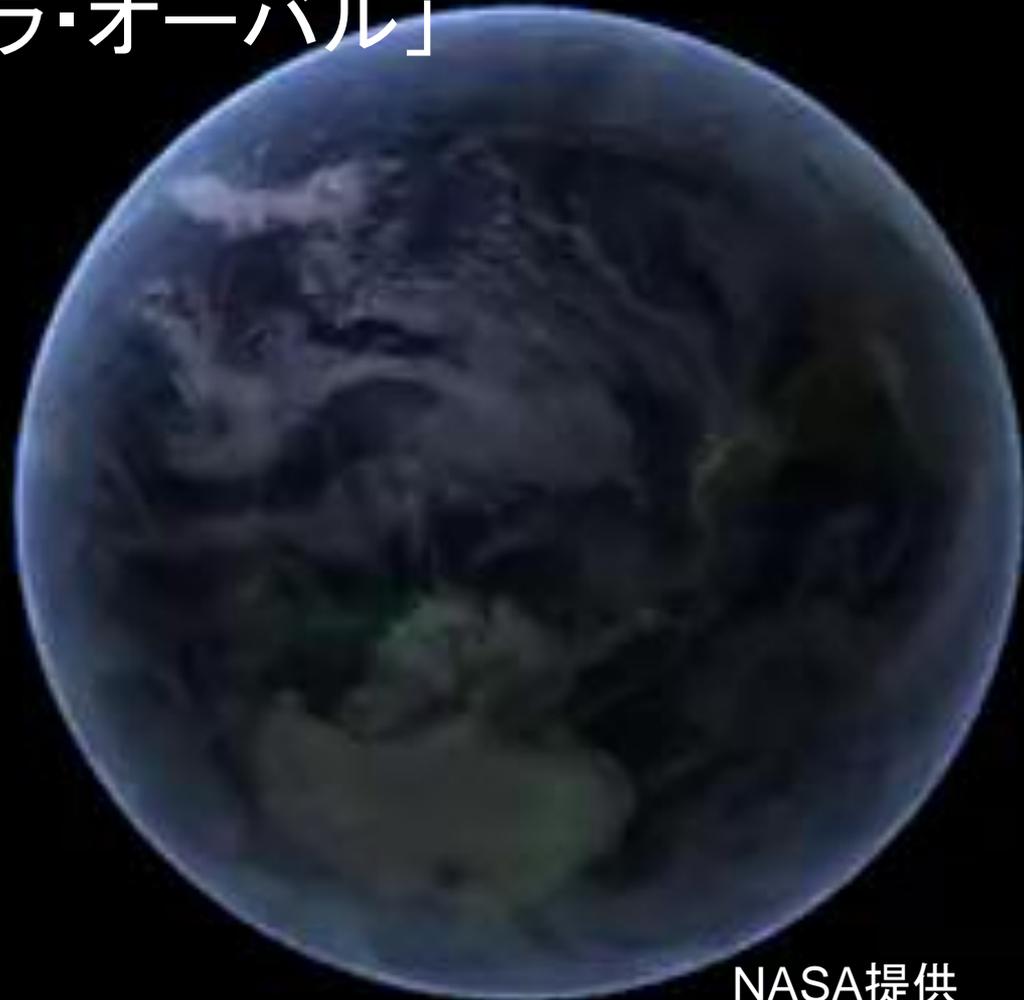
高さ

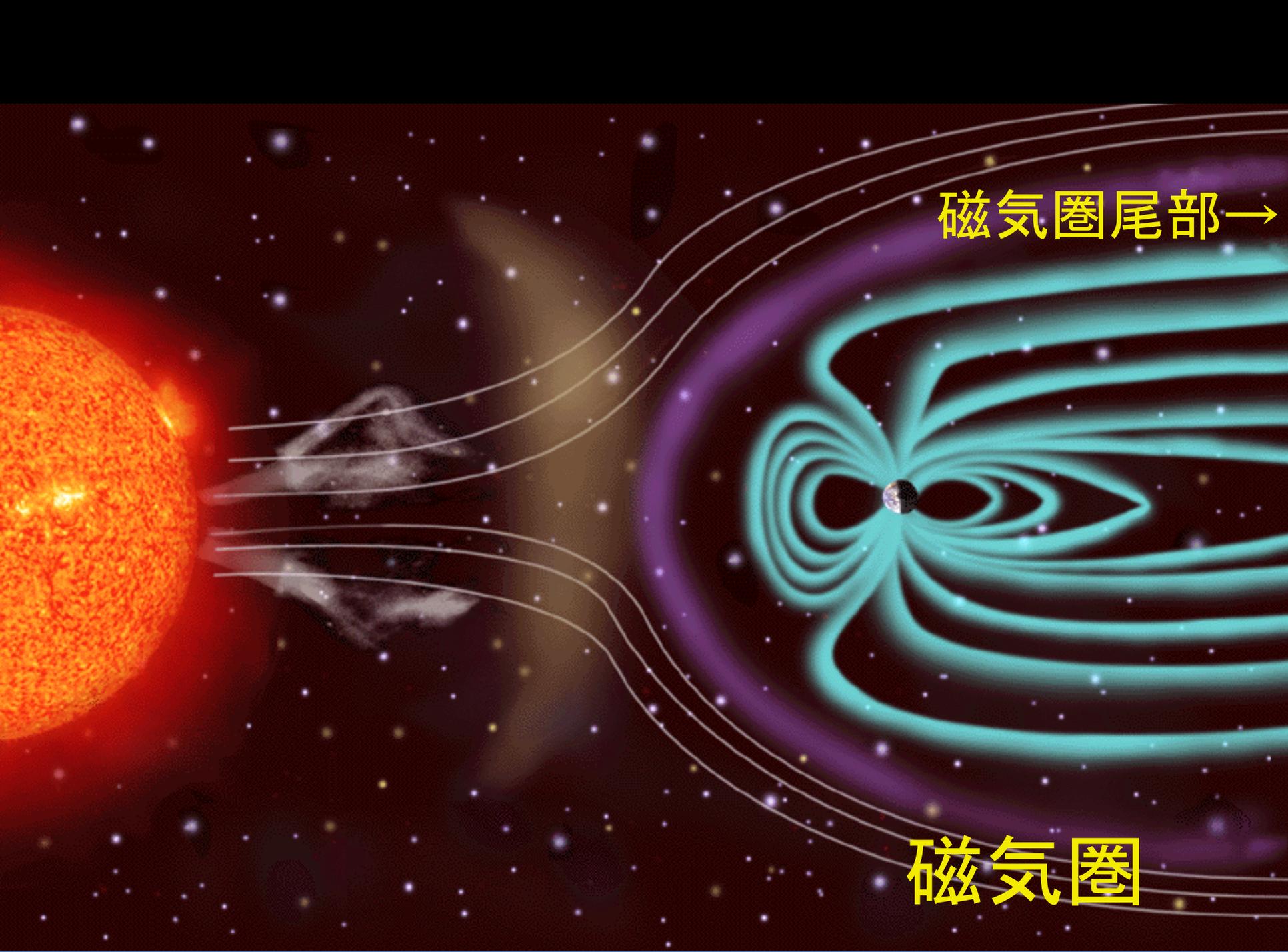
雲のある高度



# 宇宙から見ると

- 極を中心とした環状の分布  
「オーロラ・オーバル」

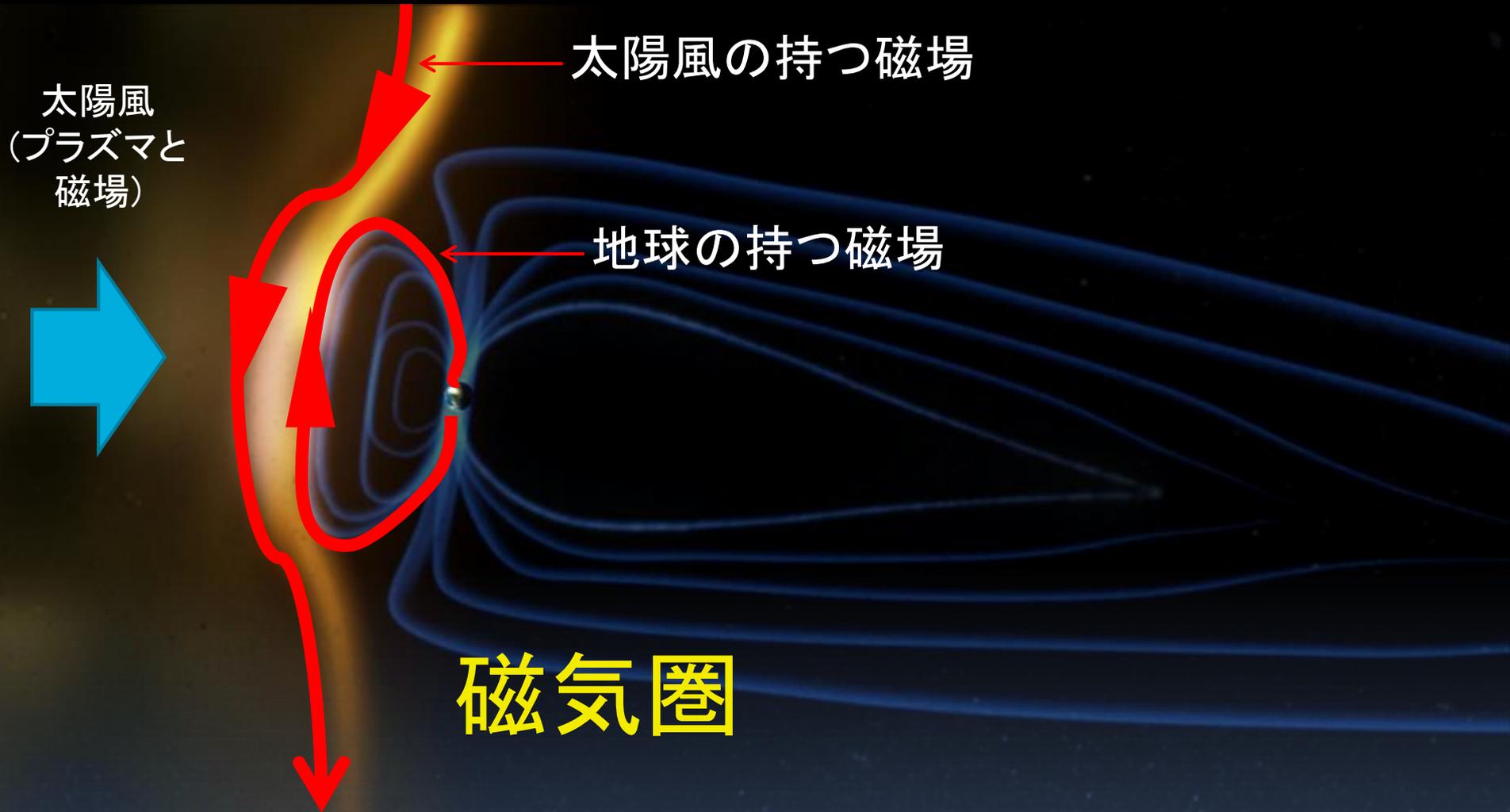




磁気圏尾部→

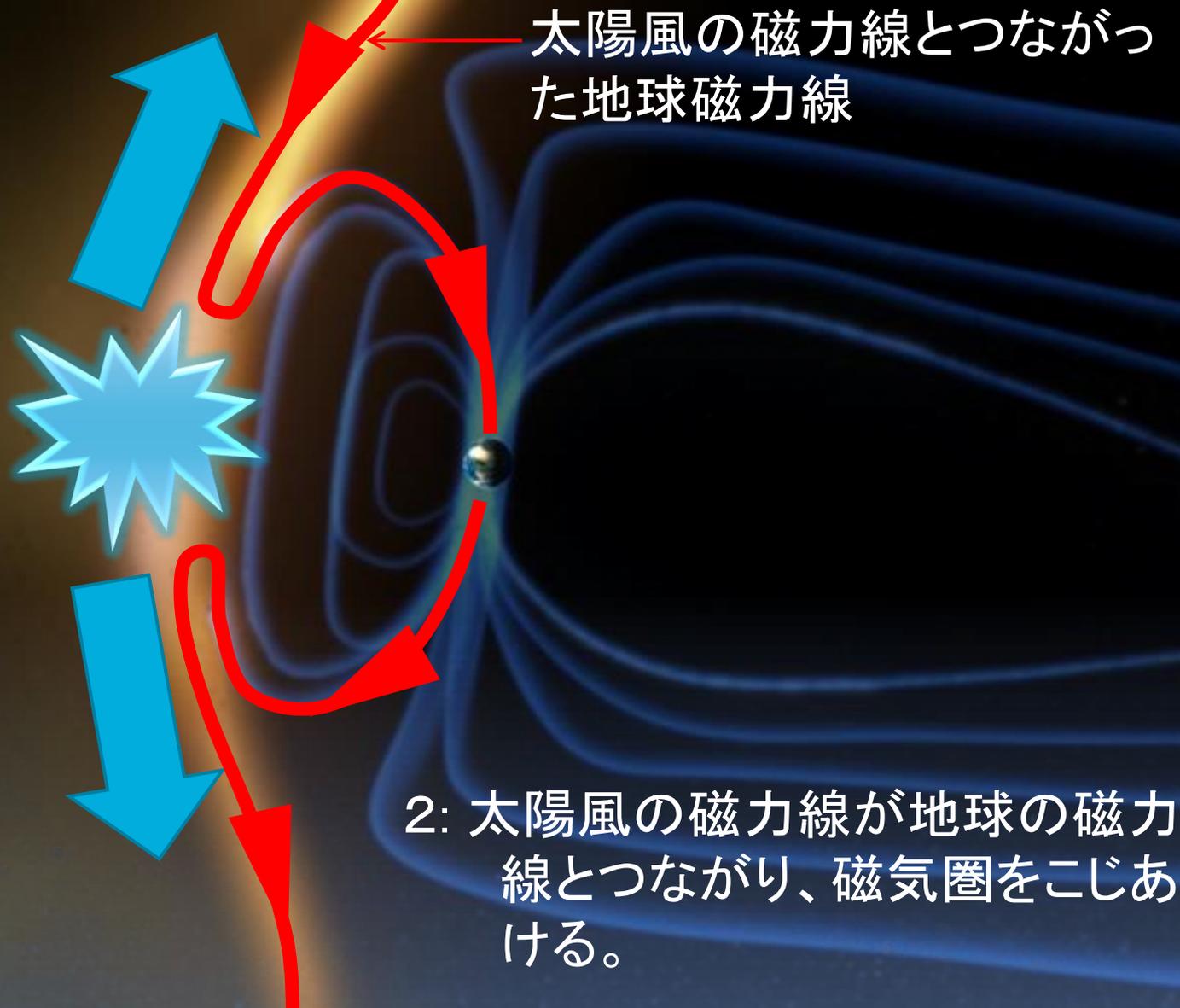
磁気圏

# 太陽風の侵入経路

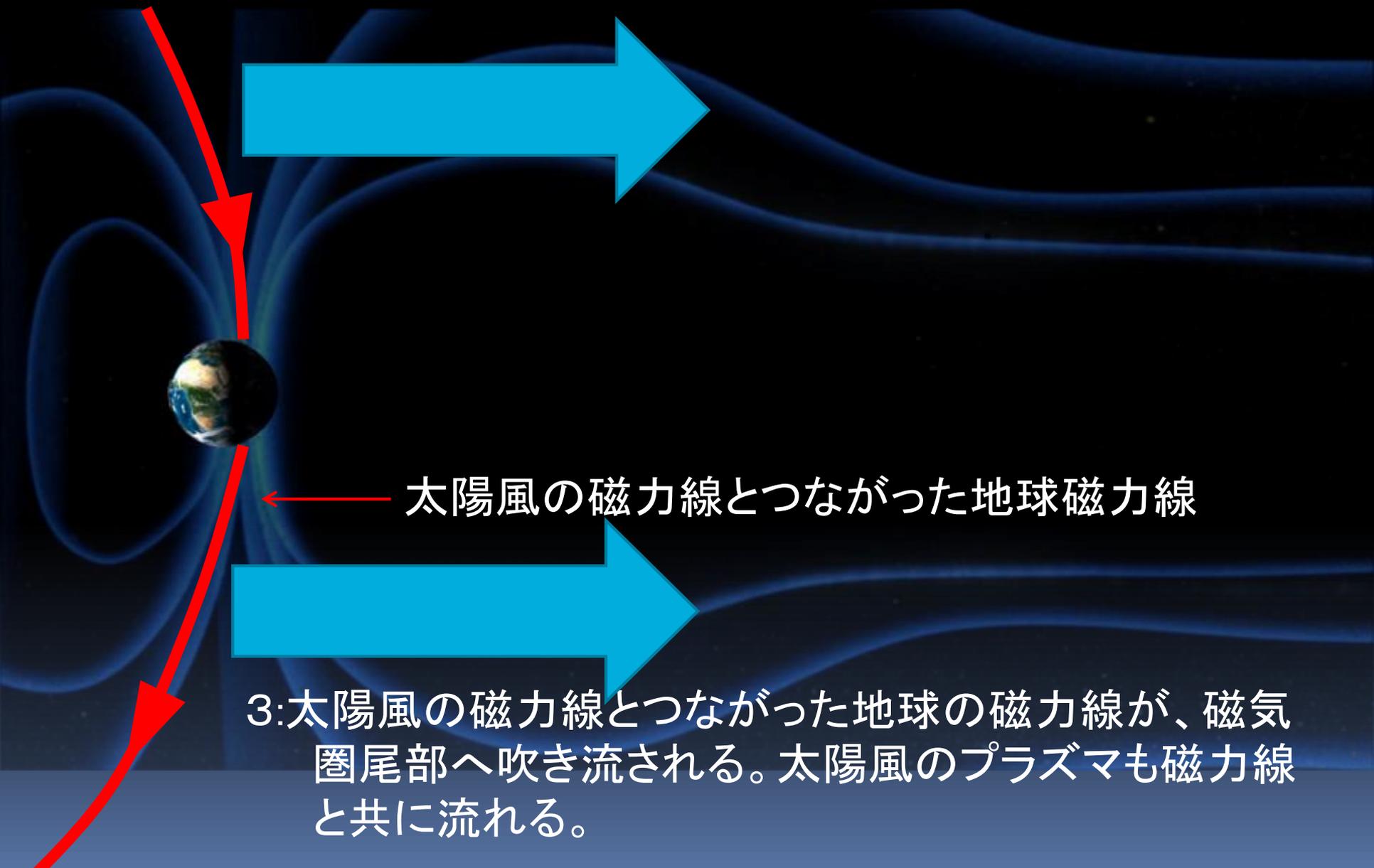


1: プラズマと磁場の流れである太陽風が吹いてきて、地球磁気圏とぶつかる

# 太陽風の侵入経路



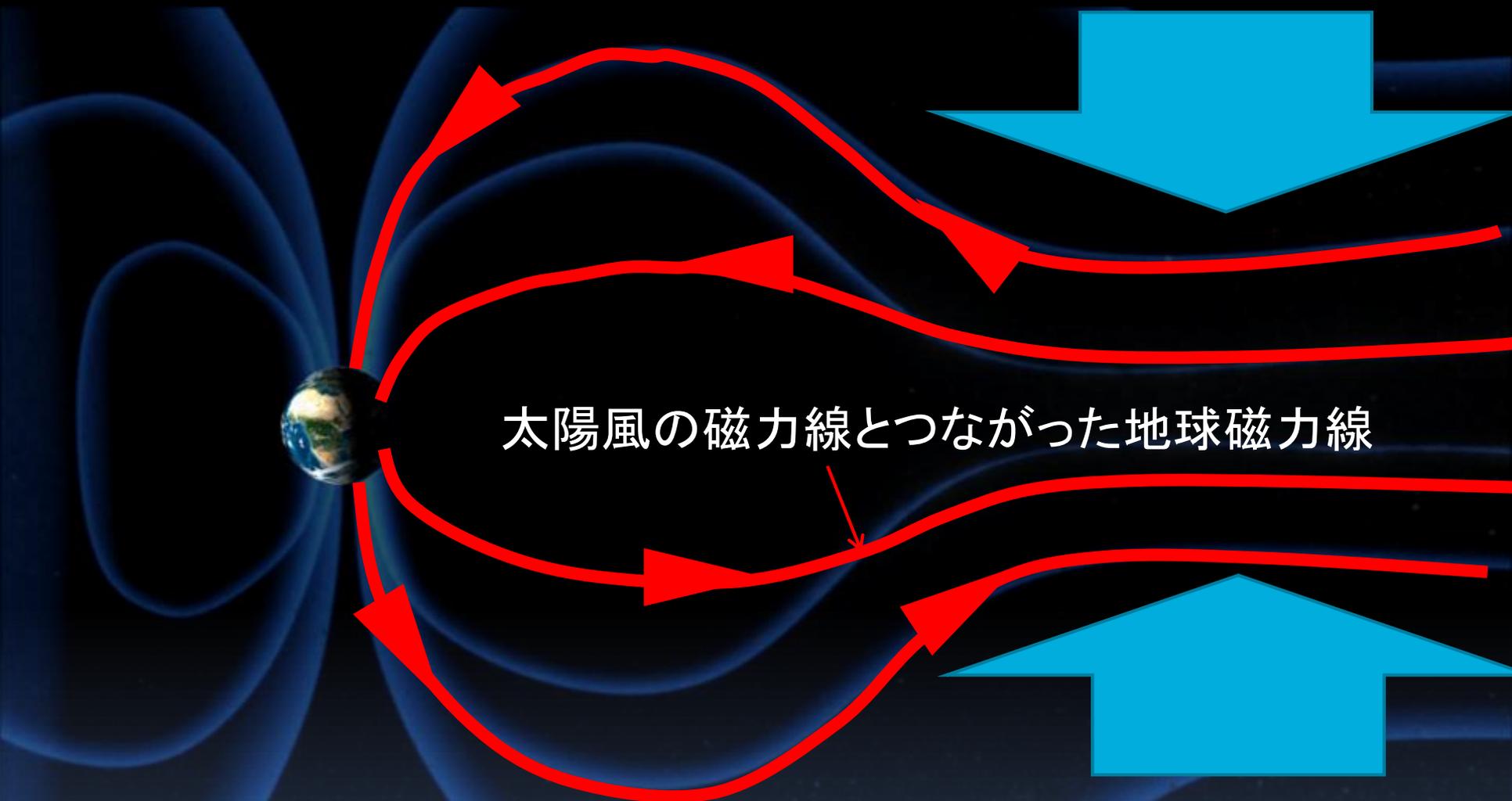
# 太陽風の侵入経路



太陽風の磁力線とつながった地球磁力線

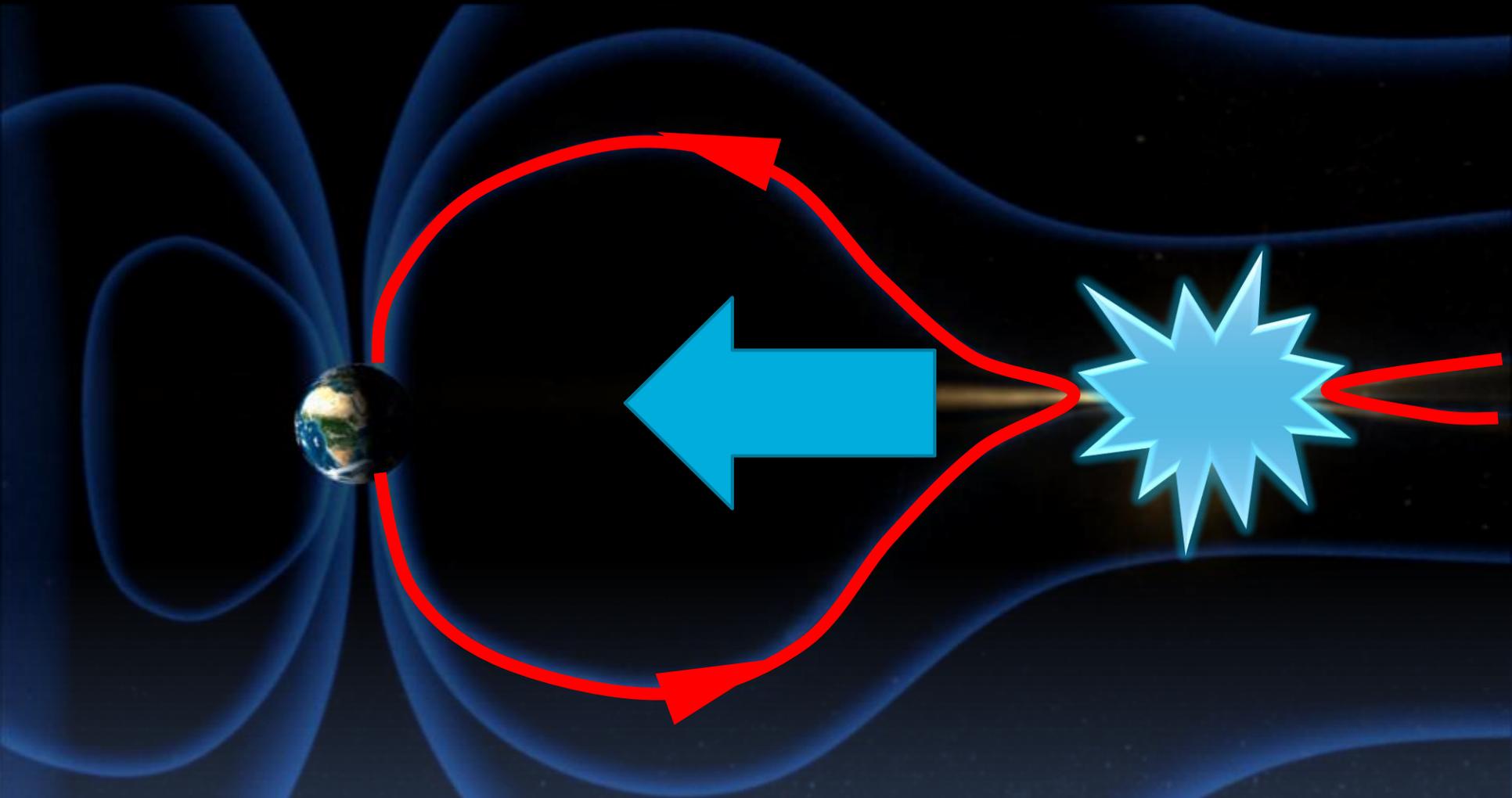
3:太陽風の磁力線とつながった地球の磁力線が、磁気圏尾部へ吹き流される。太陽風のプラズマも磁力線と共に流れる。

# 太陽風の侵入経路



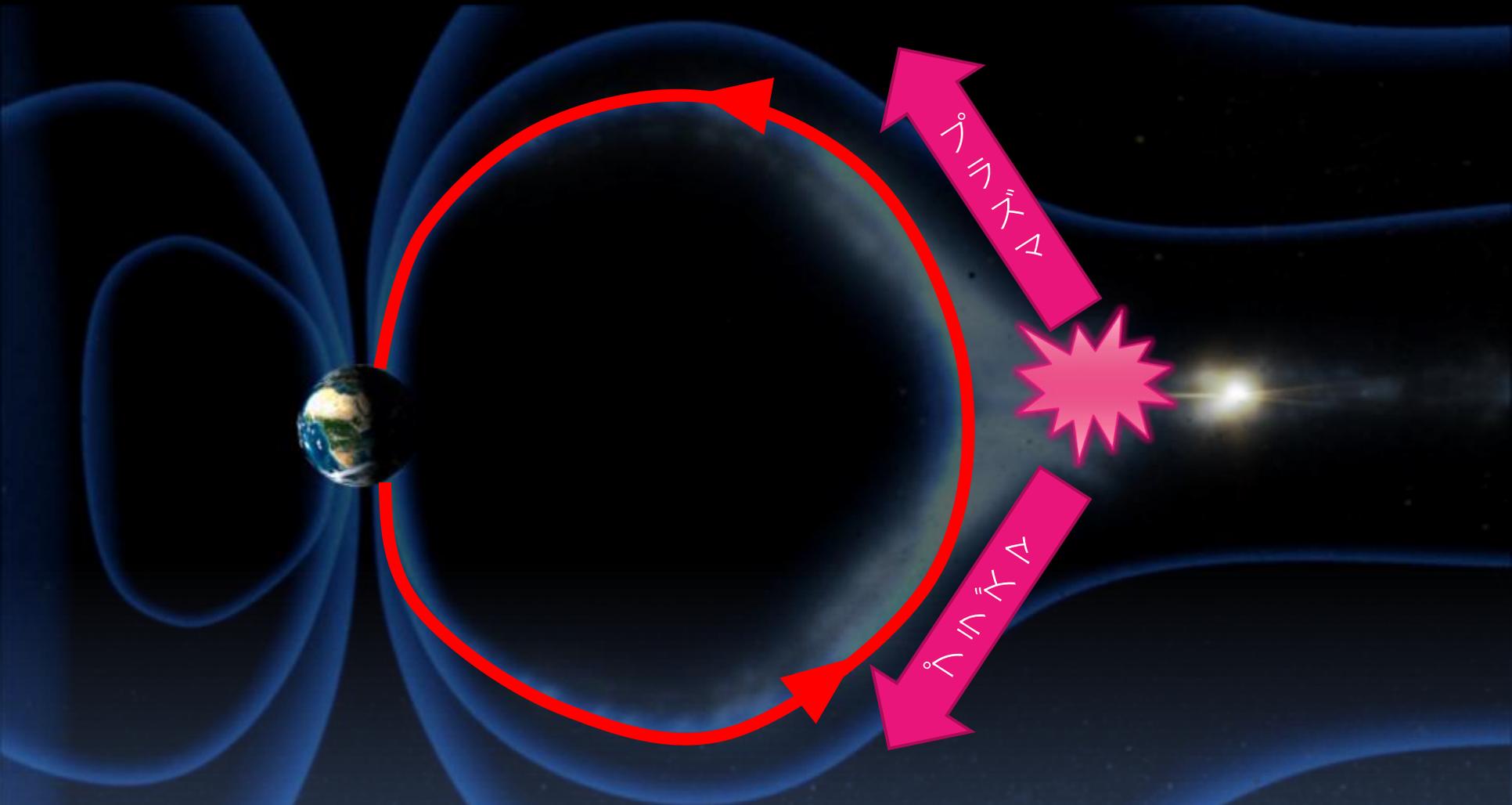
4: 地球磁力線が引き伸ばされながら、上(北)と下(南)から磁気圏尾部へ押し込められる。太陽風のプラズマと磁場がぎゅうぎゅう詰りになる。

# 太陽風の侵入経路



5:磁力線は引き伸ばされて限界に達するとちぎれる。地球側の磁力線は、地球の方へ引き戻される。

# 太陽風の侵入経路



6: 磁気圏尾部にたまっていたプラズマは、磁力線に沿って一気に地球の両極に流れ込む。

# オーロラへ



7: 電離圏でオーロラを光らせる。

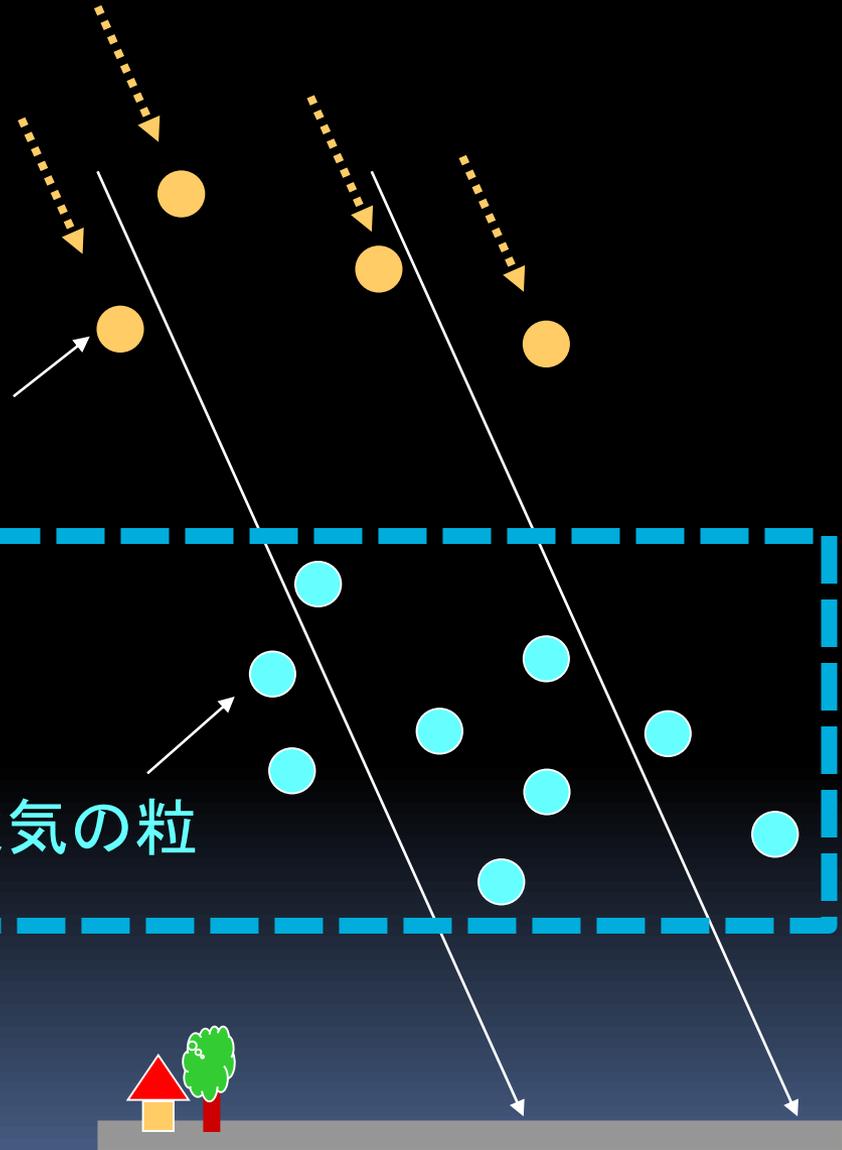
# 発光のしくみ

地球の磁力線に沿って、  
プラズマの粒(電気を帯  
びた粒)が降ってくる

プラスやマイナスの電気を  
帯びたプラズマの粒

電離圏高度  
(100-500 km)

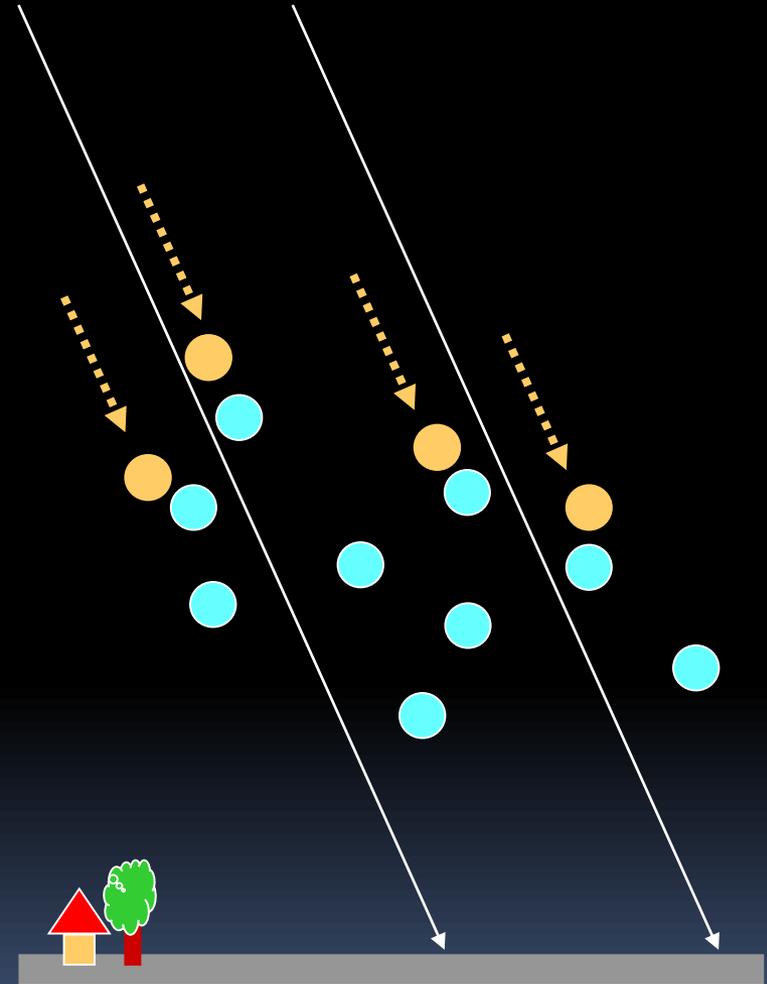
地球の大気の粒



# 発光のしくみ

地球の磁力線に沿って、  
プラズマの粒（電気を帯  
びた粒）が降ってくる

プラズマの粒が地球の大  
気の粒にぶつかる



# 発光のしくみ

地球の磁力線に沿って、  
プラズマの粒(電気を帯  
びた粒)が降ってくる

プラズマの粒が地球の  
大気の大気粒にぶつかる

この大気が光る



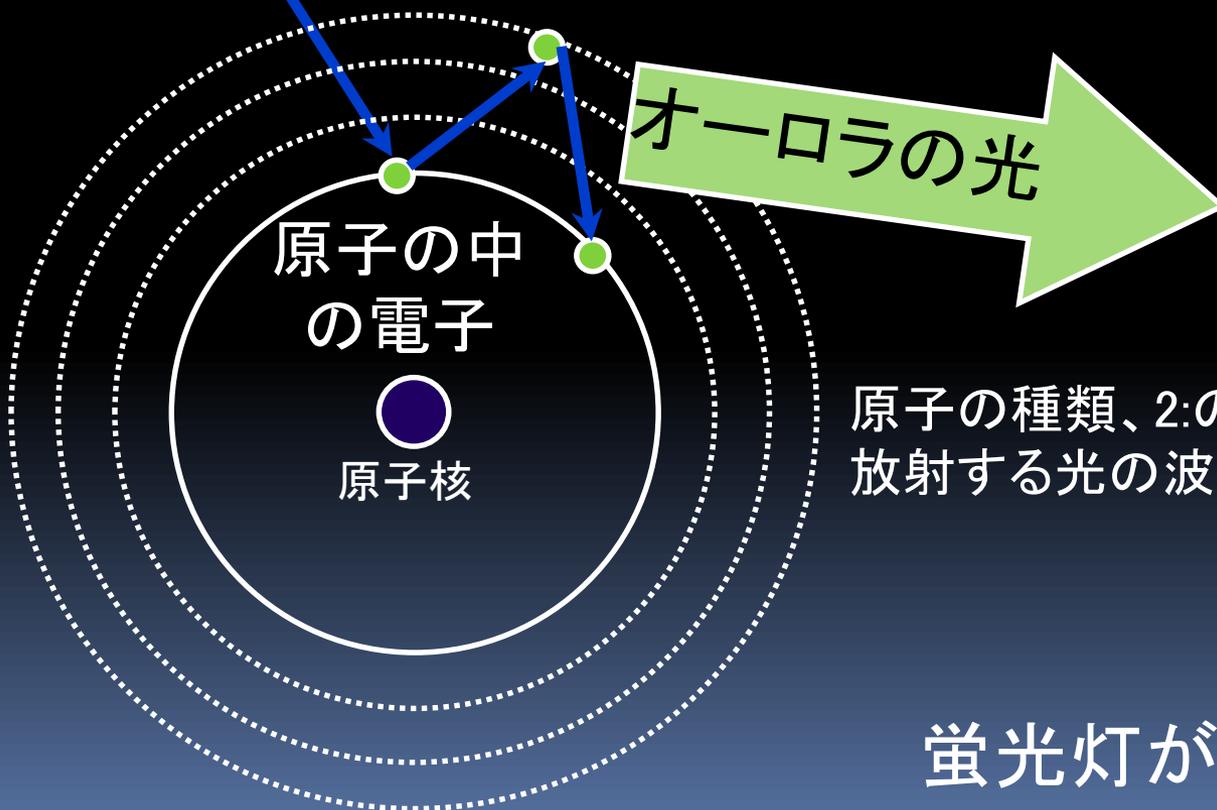
この光がオーロラ



# 拡大してみると…

● 宇宙からの  
電子

- 1: 電子が地球大気(窒素、酸素)の原子を叩く
- 2: 原子核を回っていた電子のエネルギーが上昇
- 3: 再び元の状態に戻る
- 4: 余分なエネルギーを光で放射



原子の種類、2:のエネルギー状態によって放射する光の波長～色は決まっている

蛍光灯が光る原理と全く同じ

Q:色や高さはなぜ違う？ 高度

500 km

A:光っている原子や降込み電子のエネルギーが違うから。

赤色:降込み電子のエネルギーが低い酸素原子が光っている  
(波長630nm)

250 km

緑色:降込み電子のエネルギーが高い酸素原子が光っている  
(波長557nm)

青色~ピンク:  
降込み電子のエネルギーが非常に高い窒素原子が光っている(波長427nm)

100 km



500 km

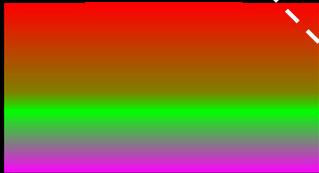
250 km

100 km

ディスクリートオーロラ Wikipedia提供

磁嵐時のオーロラ  
北海道から赤いオーロラが  
見えるかも

オーロラベルト  
緯度 60-70度



日本書紀 推古天皇の時代  
「天に赤気あり、その形は雉(きじ)の尾  
に似たり」  
大和飛鳥でオーロラが見えた

北海道  
緯度 41-45度



# オーロラを光らせる電流

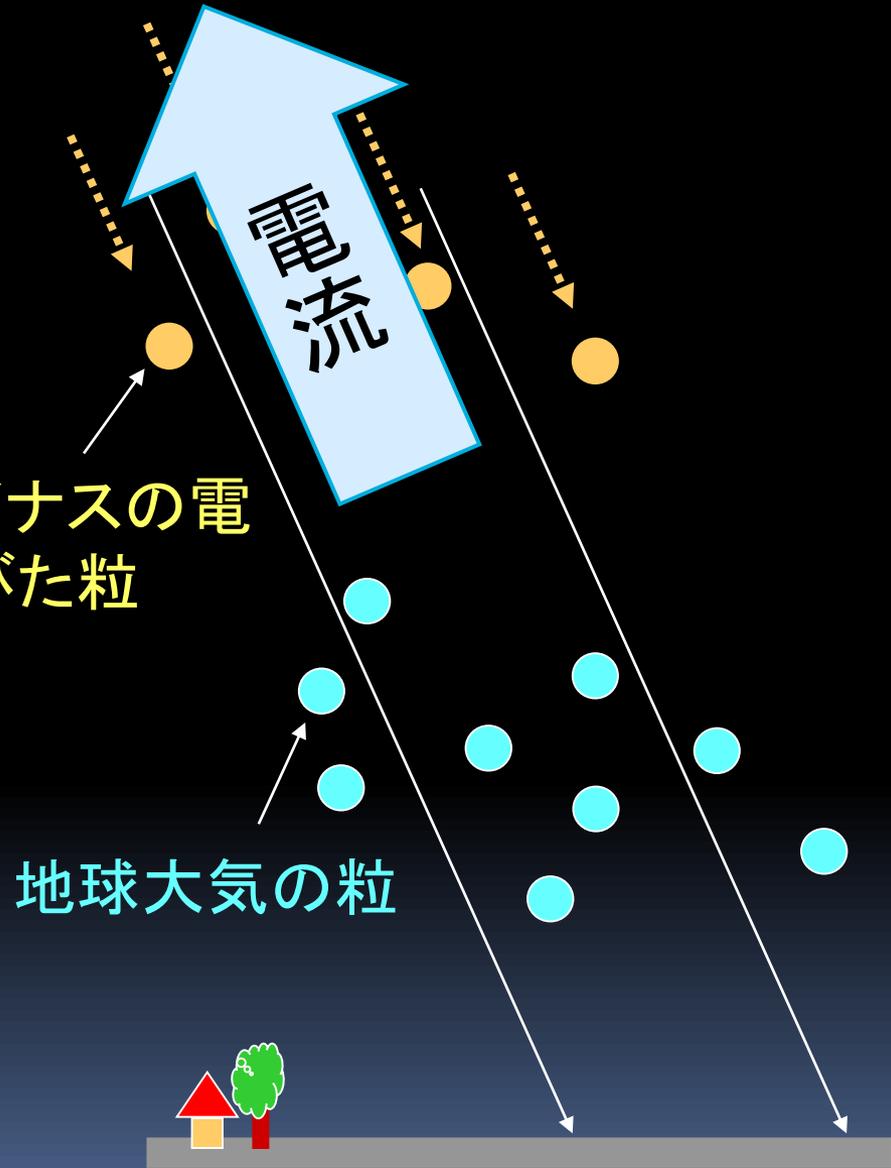
地球の磁力線に沿って、プラズマの粒(電気を帯びた粒)が降ってくる

プラスやマイナスの電気を帯びた粒

電気を帯びた粒の流れ

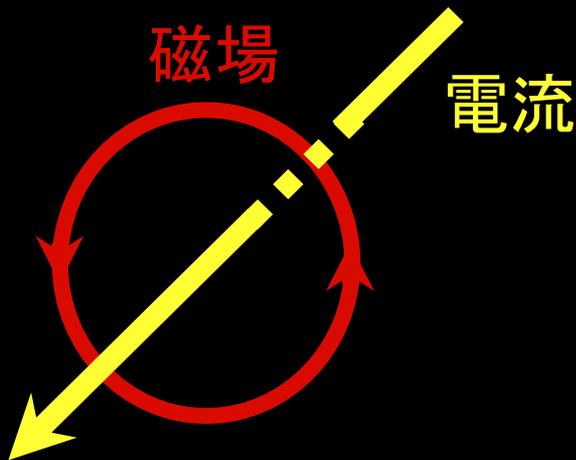


電流

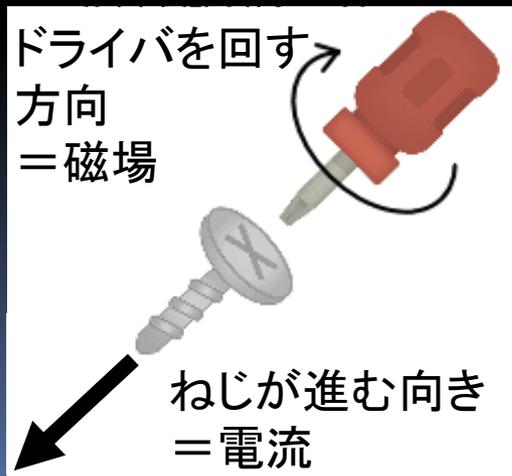


# 電流と磁場の関係：右ねじの法則

「右ねじの法則」  
宇宙の基本法則の1つ



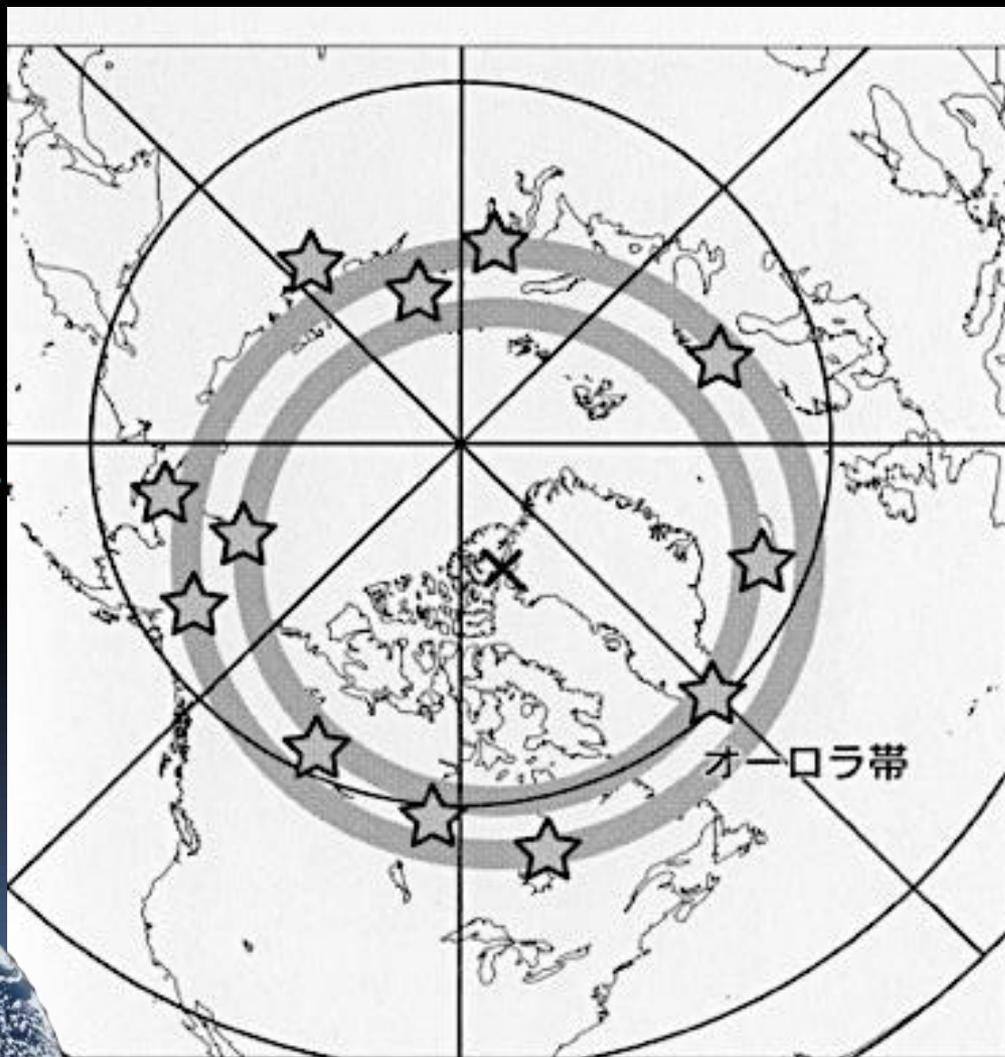
- 電流が流れるとその周りに磁場ができる
- 電流・磁場の向きは「右ねじの法則」に従う
- 電離圏にオーロラ電流が流れると、地上に強い磁場ができる



# 磁場に現れるオーロラ

- オーロラエレクトロジェット(AE)指数
  - オーロラ電流がつくる磁場でオーロラ活動をの激しさを示す

北極の上から見ると……



篠原  
「宇宙天気」

図4.11 北極のオーロラ帯に沿って設置された、12カ所のAE指数観測点(★印)。この観測網で得られた磁場データからオーロラ活動を監視している。



磁場の強さ

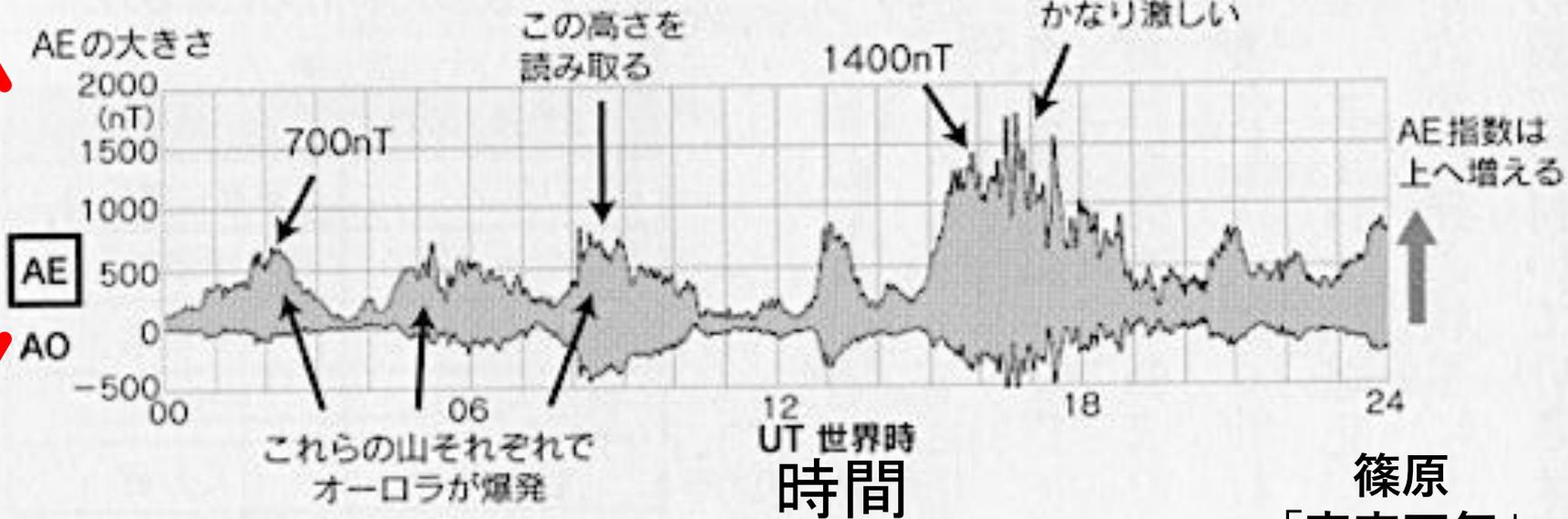
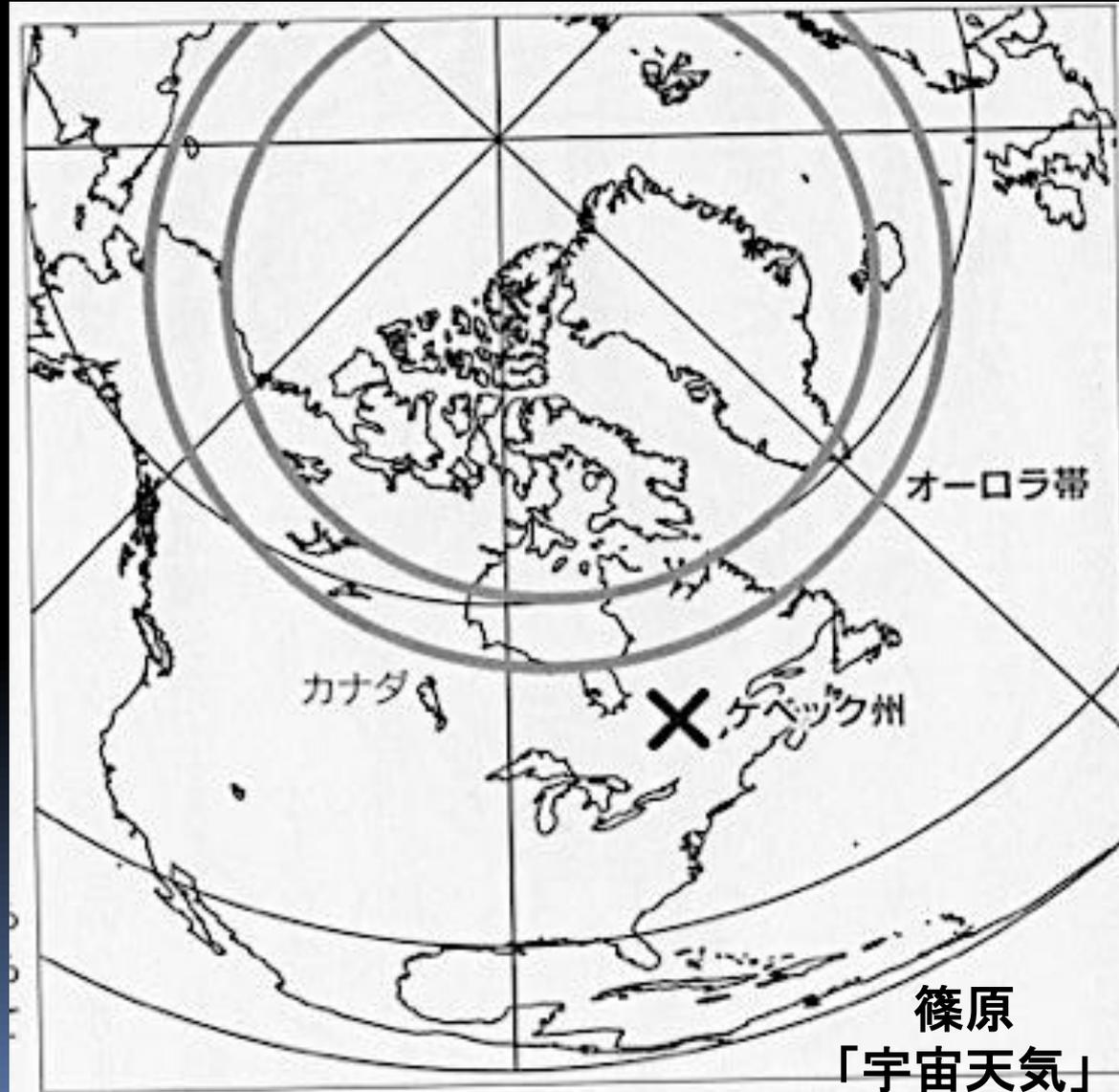


図4.12 2008年4月23日のAE指数。提供：京都大学WDC

くもりでも、カメラがなくても、磁場を測ればオーロラが爆発していることがわかる

# オーロラが起こす「災害」

- 強いオーロラ電流は人間にとって「災害」になりうる
- カナダ・ケベック州で大規模停電（1989年）



# カナダ ケベック州の大停電



変圧器が故障 [画像:PSE&G]

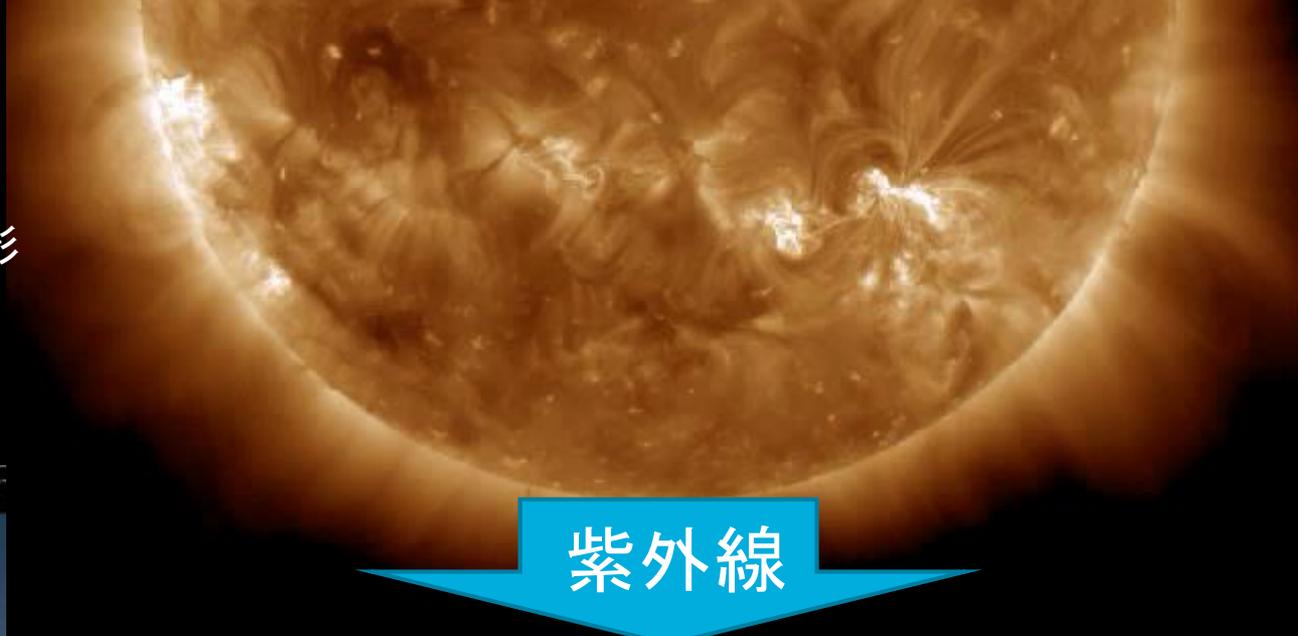
- 1989年3月9日、CME発生
- 3月13日、カナダ ケベック州の送電網が影響を受け、9時間の大停電発生
- 異常な電流の発生で変圧器が焼き切れた

# 電離圏が起こす「災害」

- 普段は電離圏のお陰で遠くまで電波が届く
- 太陽フレアが電離圏を襲うと、電波が吸収されて届かなくなる



SDOの紫外線撮影  
2012年3月6日



紫外線

電離圏のプラズマ密度増加

D領域

通常状態の短波伝播



SDOの紫外線撮影  
2012年3月6日

紫外線

電離圏のプラズマ密度増加

D領域

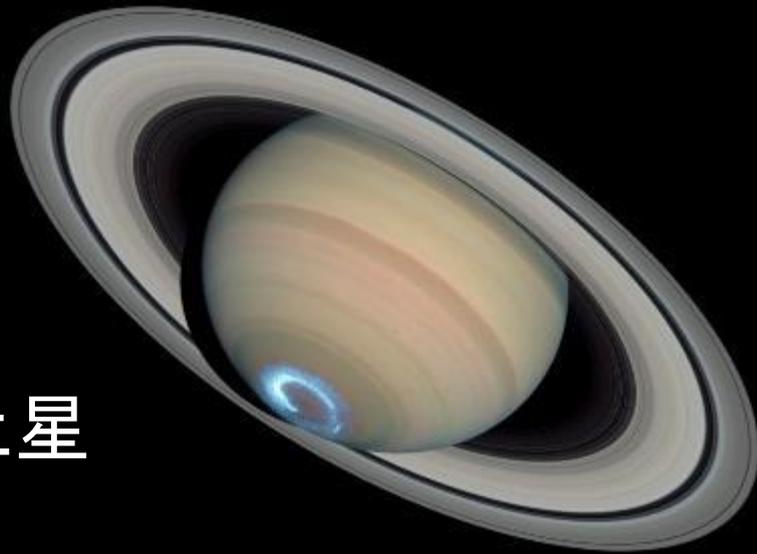
デリンジャー現象

D層が短波帯を吸収

??

# 他の惑星にも

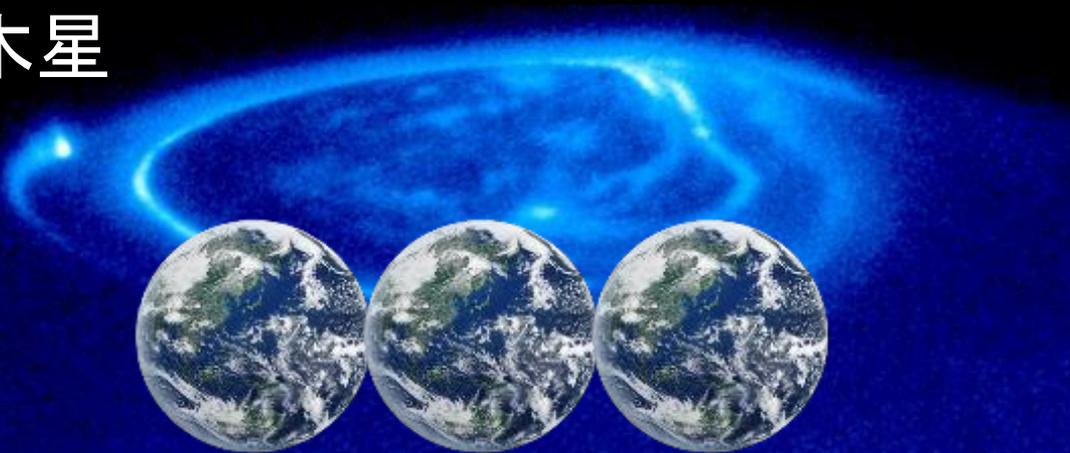
土星



天王星



木星



いずれもハッブル宇宙望遠鏡で撮影