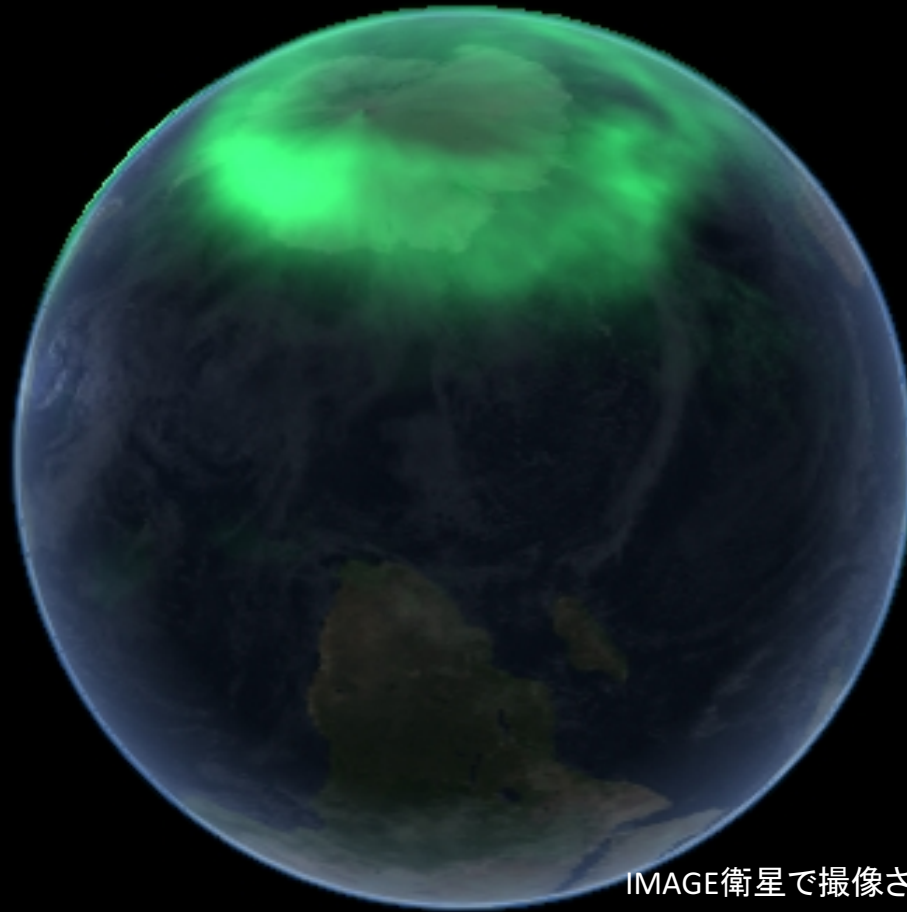


宇宙天気ミニ講座：磁気圏編

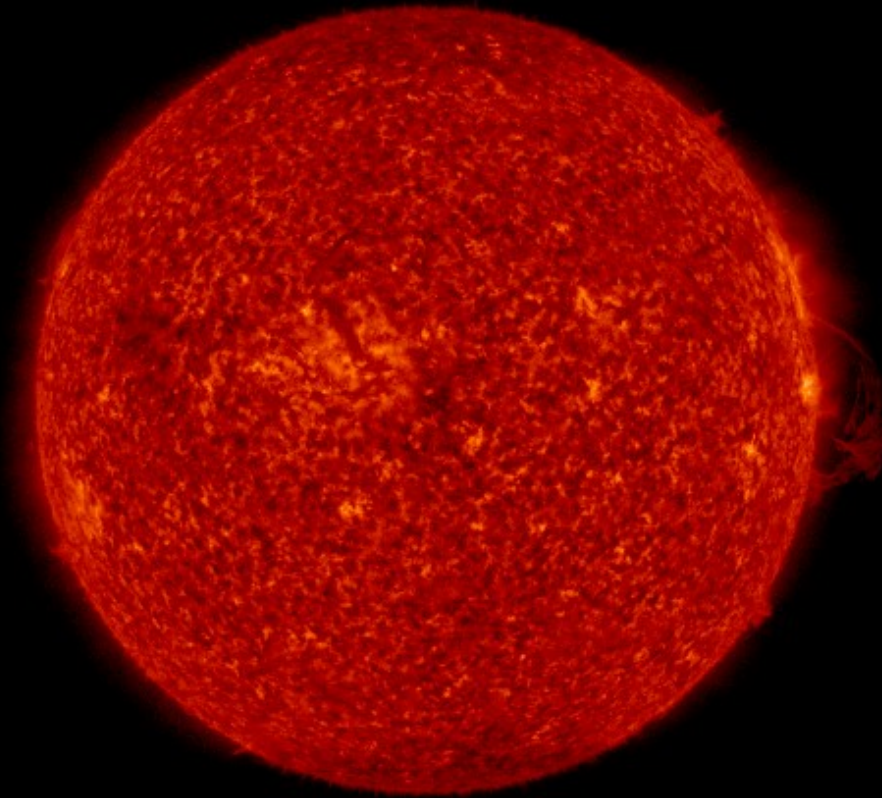


IMAGE衛星で撮像されたオーロラ(<https://www.nasa.gov/>)

情報通信研究機構 電磁波研究所 宇宙環境研究室

中溝 葵

自然の核融合炉 太陽



SDO/AIA 304 2017-07-03 00:58:30 UT

光エネルギーの放出

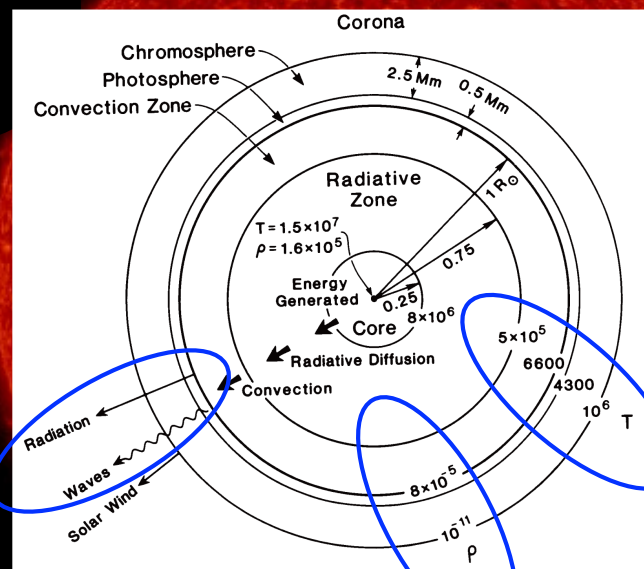
超音速に加速される太陽大気コロナ 太陽風

①強い重力
と磁場

②太陽内部からの
エネルギー供給

太陽大気”コロナ”
(e^- , H^+ , He^+ , ...)

③何桁も変わる
温度・密度構造



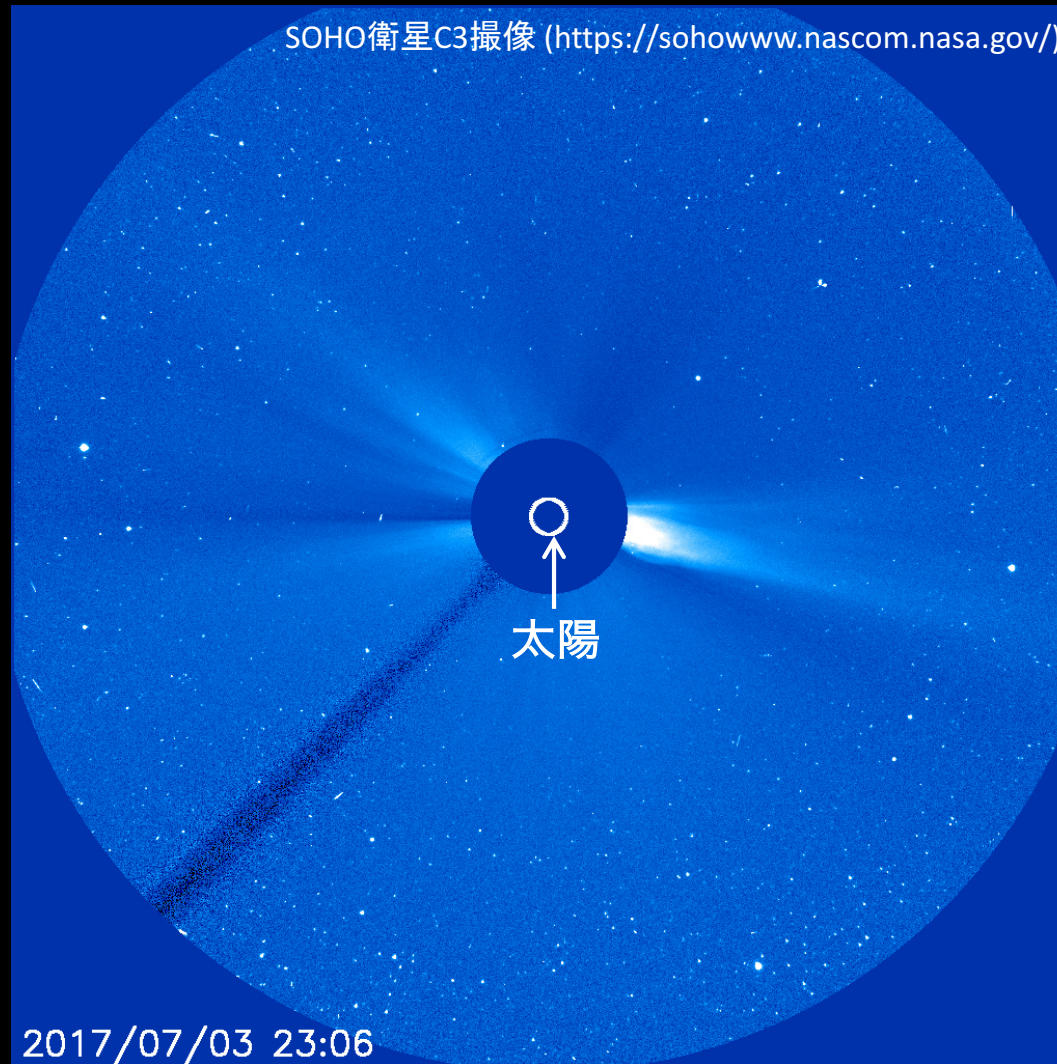
SDO/AIA 304 2017-07-03 00:58:30 UT

①+②+③=超音速加速

電磁流体エネルギーの放出
プラズマと磁場から成る超音速の「太陽風」

超音速に加速される太陽大気コロナ 太陽風

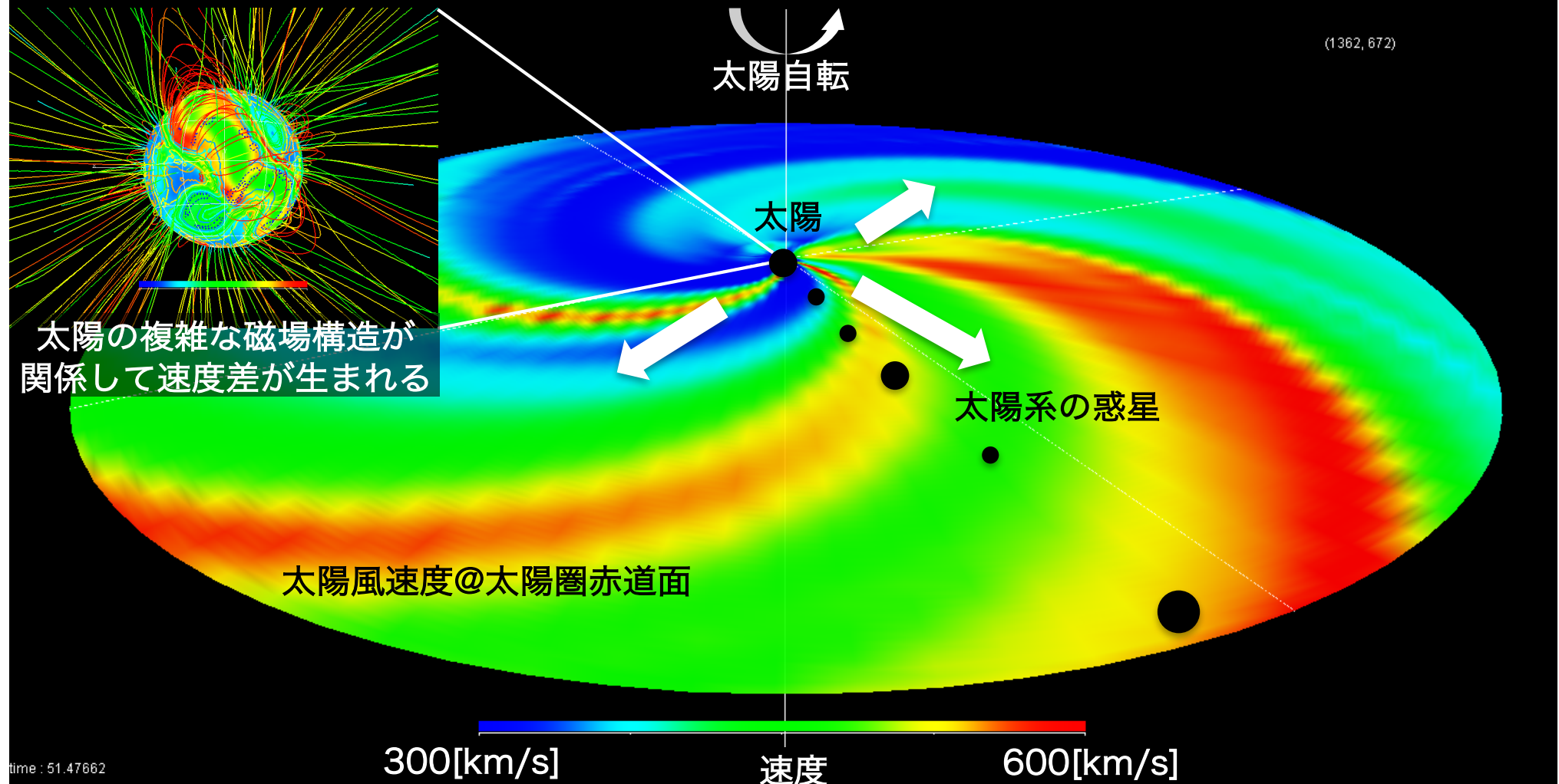
SOHO衛星C3撮像 (<https://sohowww.nascom.nasa.gov/>)



2017/07/03 23:06

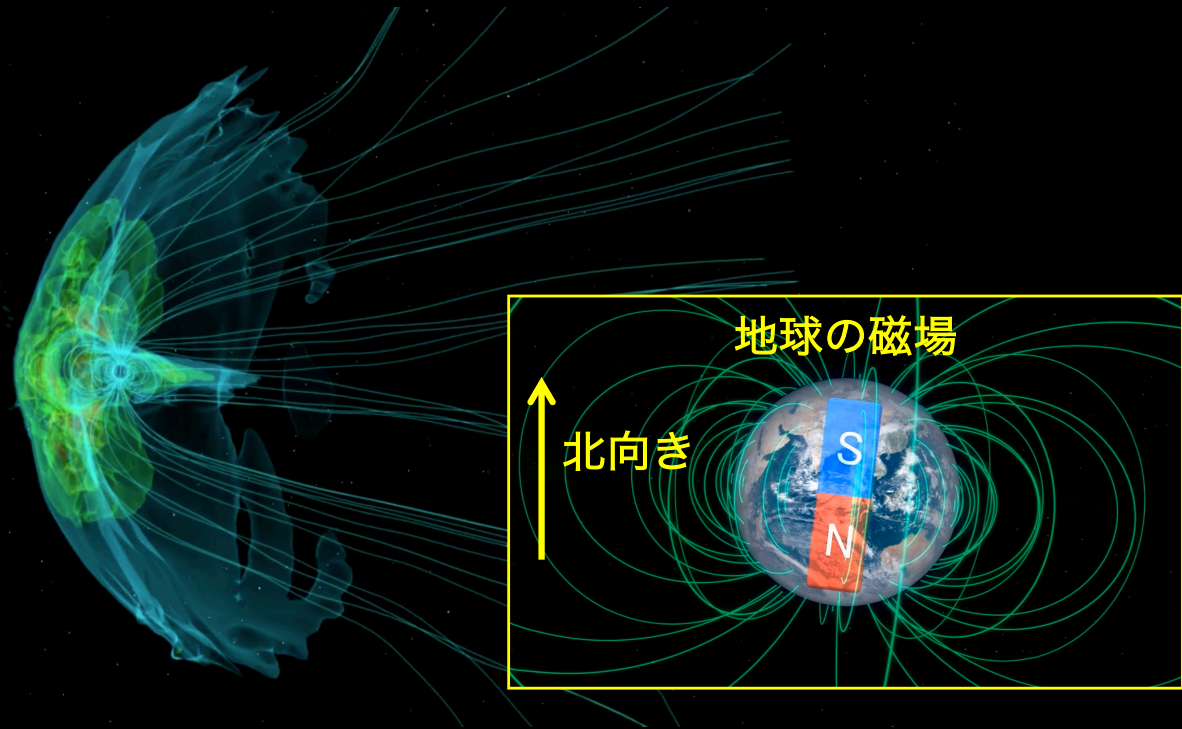
電磁流体エネルギーの放出
プラズマと磁場から成る超音速の「太陽風」

太陽風大規模構造の形成



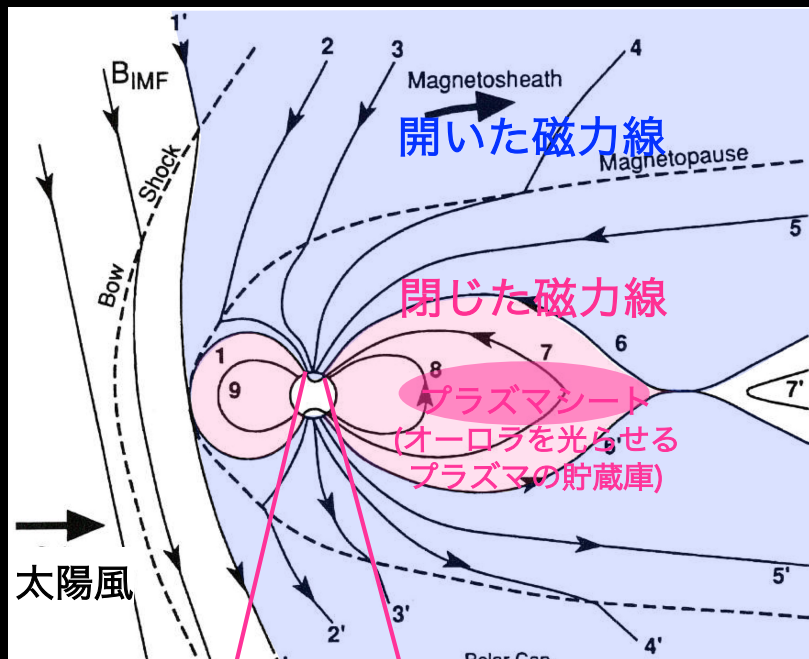
宇宙空間に3次元的に吹出す太陽風が大規模構造を形成
太陽系の惑星は太陽光・太陽風の影響を受け「惑星圏」を形成
(固有磁場・大気の有無により異なったシステム)

磁気圏の形成



- 地球は磁場を持つ惑星。
- 地球の磁力線は、もともとは棒磁石と同じような形（南極はN極, 北極はS極）。
- 太陽風によって、前面は圧縮され反対側は彗星のように引き伸ばされている。
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宇宙線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：宇宙線から生命を守るバリア
- しかし完全に閉じた磁気圏ではない。
太陽風－磁気圏相互作用→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起こる。

磁気圏対流の駆動



太陽風磁場が南向き成分を持つ時…

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. 一方の端は地球、一方の端は太陽風とつながった
「開いた磁力線」が生成
 - 3.4.5. 「開いた磁力線」は太陽風とともに
尾部 (磁気圏後方) に運ばれる
 6. 尾部で南北の「開いた磁力線」が近づいてくる (反平行)
磁力線が繋ぎ替わり「閉じた磁力線」になる
 - 7.8.9. 「閉じた磁力線」は元に戻ろうとする力によって
地球の方に戻ってくる
- …磁力線と一緒に太陽風起源プラズマも磁気圏内を移動

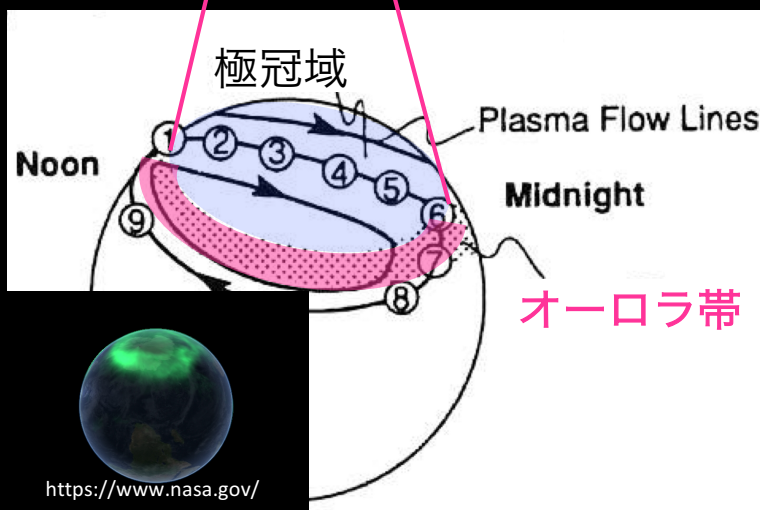
以上の一連の磁場・プラズマの循環が
磁気圏対流

さらに

太陽風起源のプラズマは対流過程でさまざまな作用を受け
磁気圏内でさまざまなプラズマ領域を形成

太陽風磁場南向き成分が大きいほど…

多くの磁力線が開く → 極冠が拡大 → オーロラ帯が低緯度に



<https://www.nasa.gov/>

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

さまざまなプラズマ環境

太陽風

$10[\text{cm}^3]$, $1,000,000[\text{K}]$

放射線帯

MeV以上の(相対論的)電子

7[Re]

30[Re]

Re : 地球半径

内部磁気圏

数十~100[keV]

西向きに流れる赤道環電流

プラズマシート

$1-10[\text{cm}^3]$, $<10[\text{keV}]$

オーロラを光らせるプラズマの起源

$1 \text{ eV}/k=11,604 \text{ K}$

k (ボルツマン定数) = $8.617 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$

磁気圏の変動：オーロラ嵐

太陽風エネルギー流入が適度な場合

エネルギー解放
(オーロラ帯への電流流入
電子降込み)

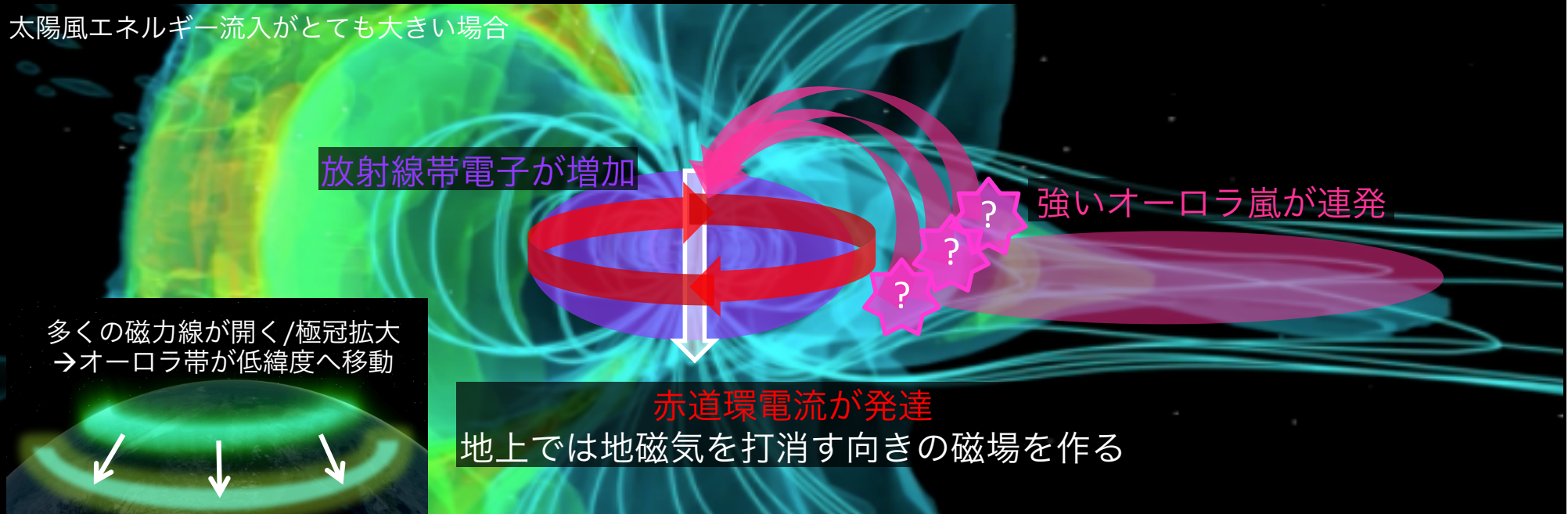
プラズマシート

1-10[cm^{-3}], <10[keV]
オーロラを光らせるプラズマの起源

- 太陽風エネルギー流入が適度な場合 : オーロラ嵐
 - エネルギーはプラズマシートに一旦蓄積、「何らかのメカニズムで」突然解放
 - プラズマシートの電子が磁力線に沿って地球に降注 → オーロラ

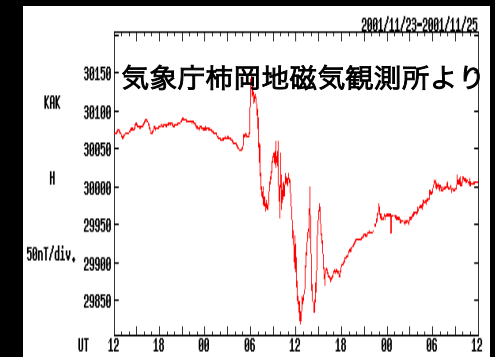
磁気圏の変動：磁気嵐

太陽風エネルギー流入がとても大きい場合



- 太陽風エネルギー流入が適度な場合 : オーロラ嵐
 - エネルギーはプラズマシートに一旦蓄積、「何らかのメカニズムで」突然解放
 - プラズマシートの電子が磁力線に沿って地球に降注ぐ→オーロラ
- 太陽風エネルギー流入(南向き磁場)が特に大きい場合 : 磁気嵐
 - 開いた磁力線が多くなる→オーロラ帯が低緯度へ移動
 - 強いオーロラ嵐が頻発→オーロラ帯に強い電流が流れる
 - 放射線帯電子の増加
 - 赤道環電流が発達

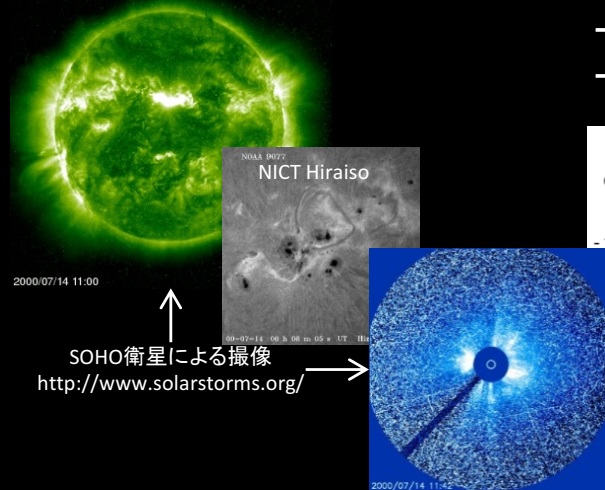
←-----> 地磁気が大きく減る



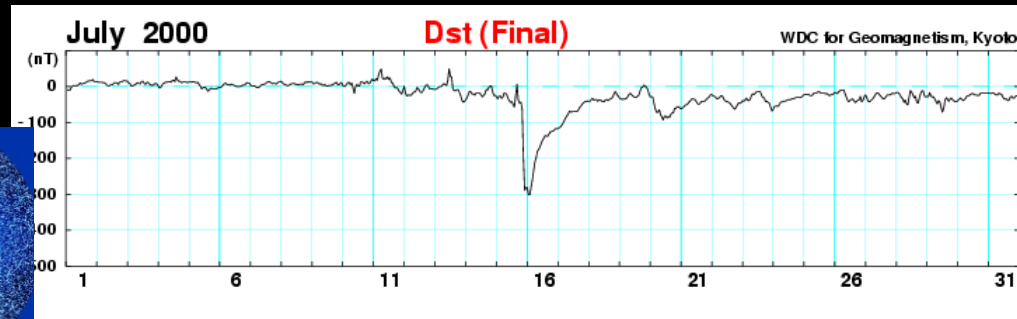
太陽-磁気圏-電離圏は磁場とプラズマの世界。変化=電流の変化。
電離圏へ流込む電流や磁気圏電流の遠隔作用で、地磁気が変化（現象の表れ）
歴史的には、地磁気から宇宙空間を推察してきた。地磁気は現在も最も基本的かつ重要な情報。

磁気嵐の影響例

大気加熱・膨張

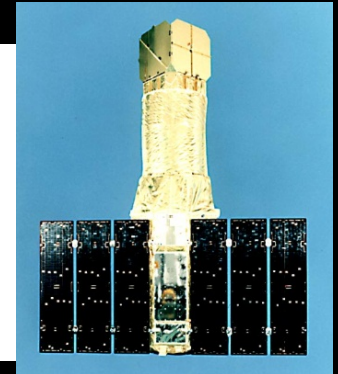


2000年7月太陽面爆発により強い磁気嵐発生
→電離圏に強いオーロラ電流
→大気加熱・膨張→大気摩擦→あすか衛星制御不能



<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp>

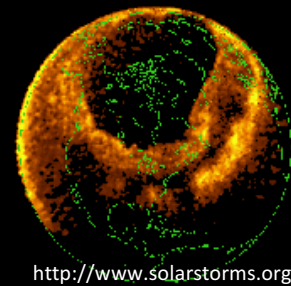
X線天文衛星あすか



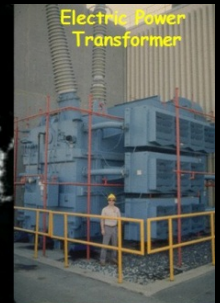
© JAXA/ISAS

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

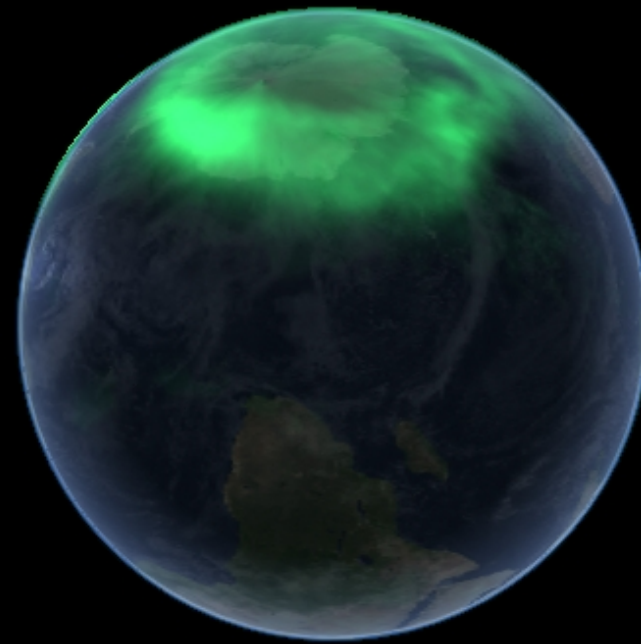
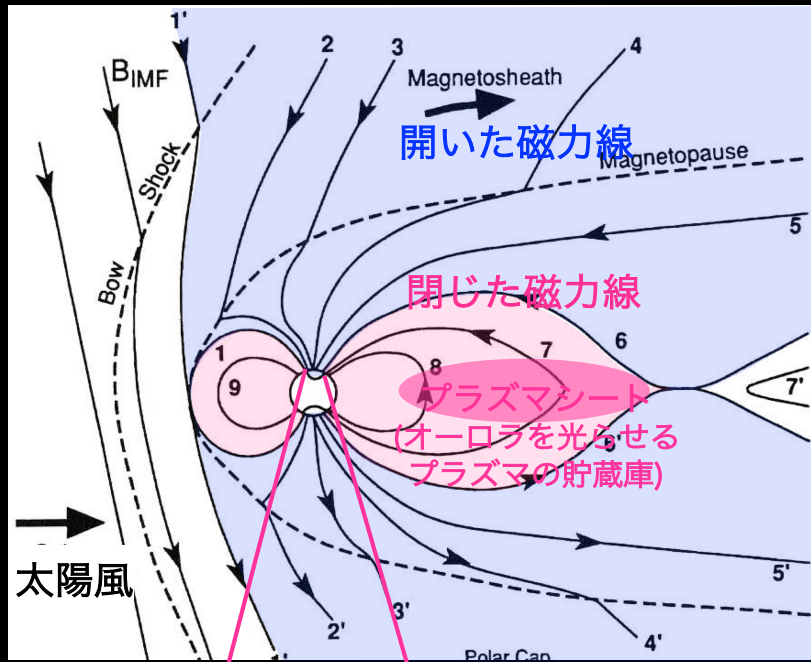


Geomagnetic Storm Effects
March 1989
Hydro Quebec Loses Electric Power for 9 Hours

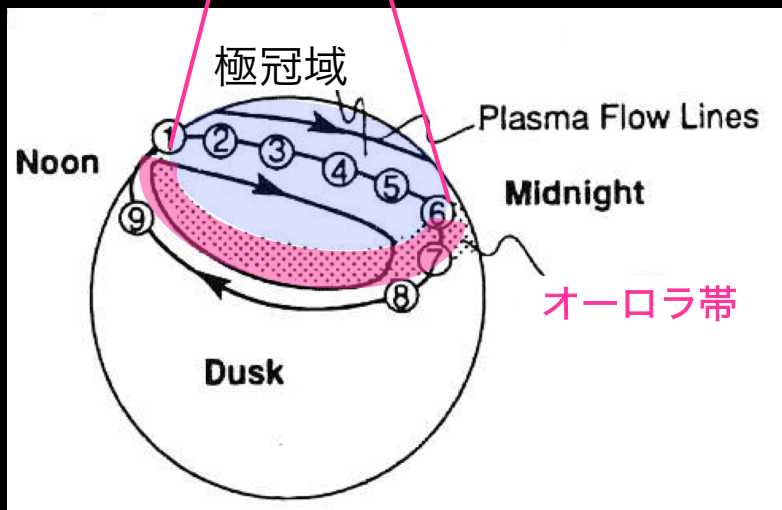


オーロラ基礎知識

オーロラが見える場所



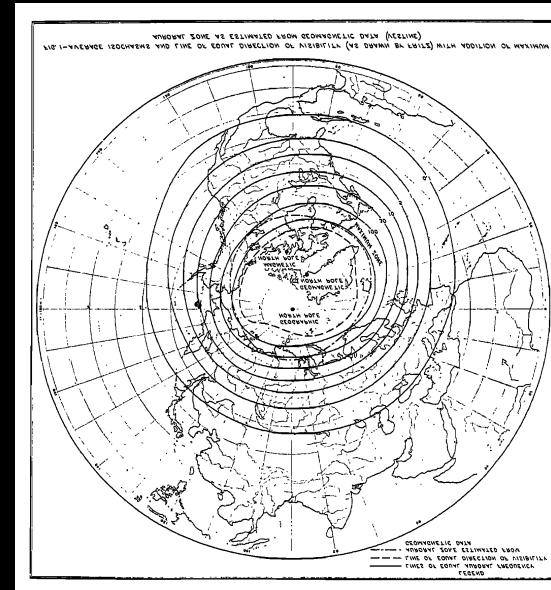
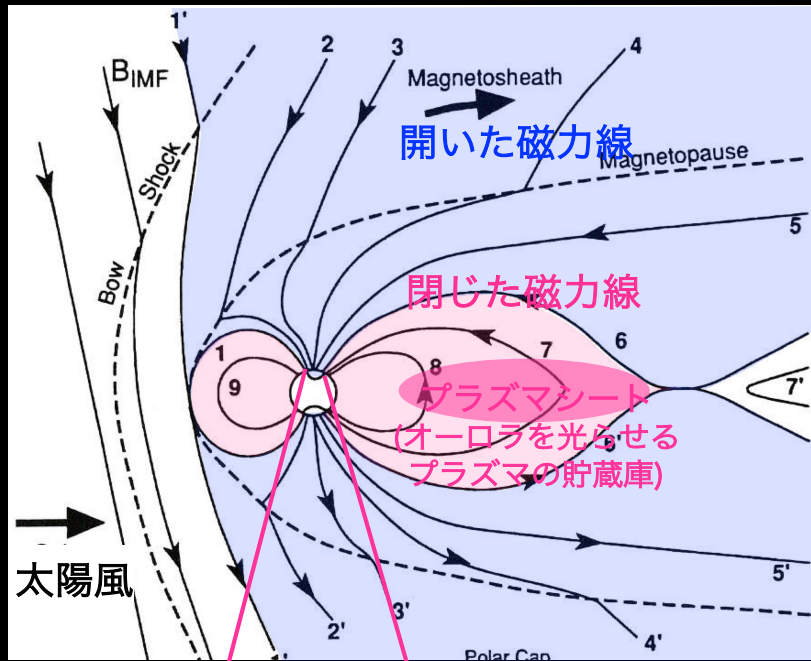
磁気緯度: 60-70度
(北欧、カナダ、南極大陸....)



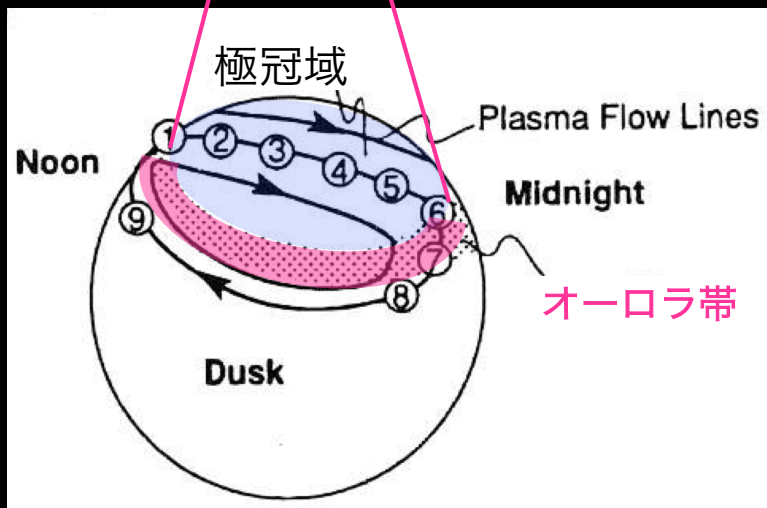
Hughes [1991] (in Kivelson and Russell)より抜粋・編集

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

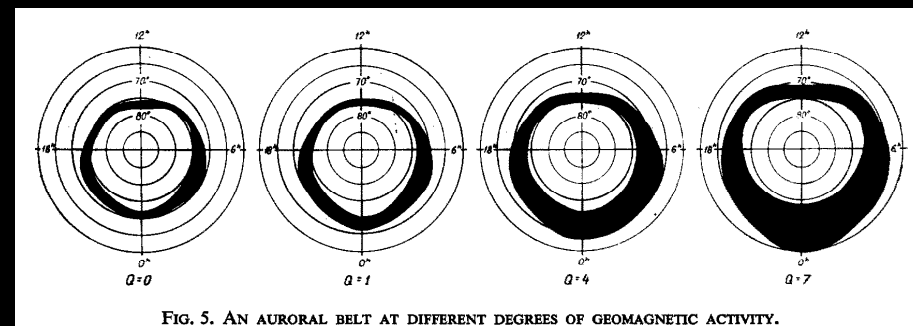
オーロラが見える場所



1700-1872年の観測記録より編纂 "Isochasms"
[Fritz, 1881, Vestine 1944より抜粋]



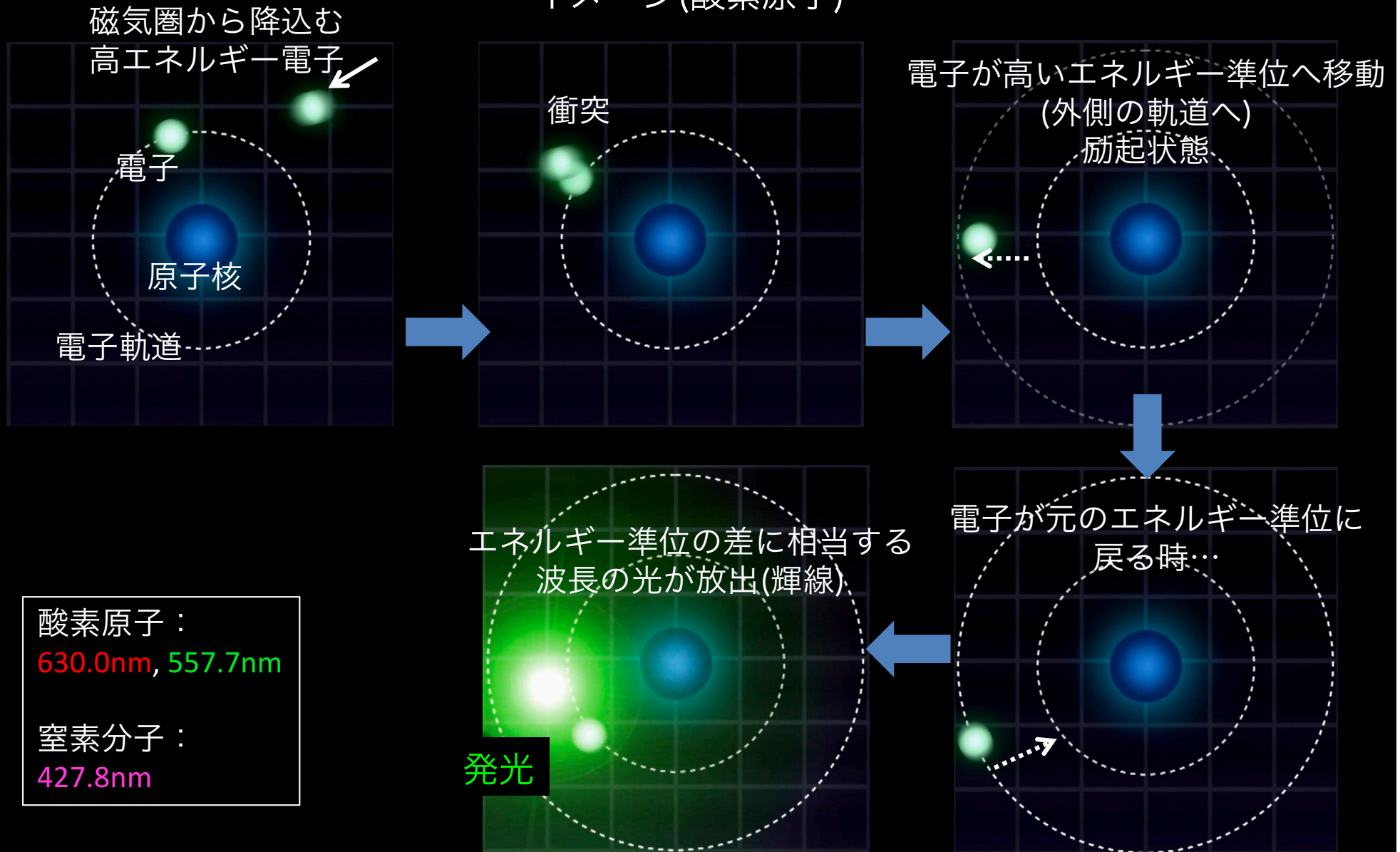
Hughes [1991] (in Kivelson and Russel)より抜粋・編集



太陽に対して固定された環状であること
地磁気活動が活発なほど大きくなることを示した。
[Feldstein and Starkov, 1967]

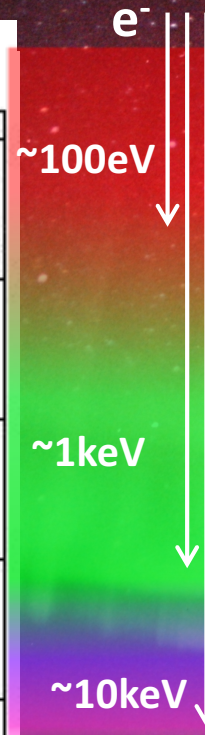
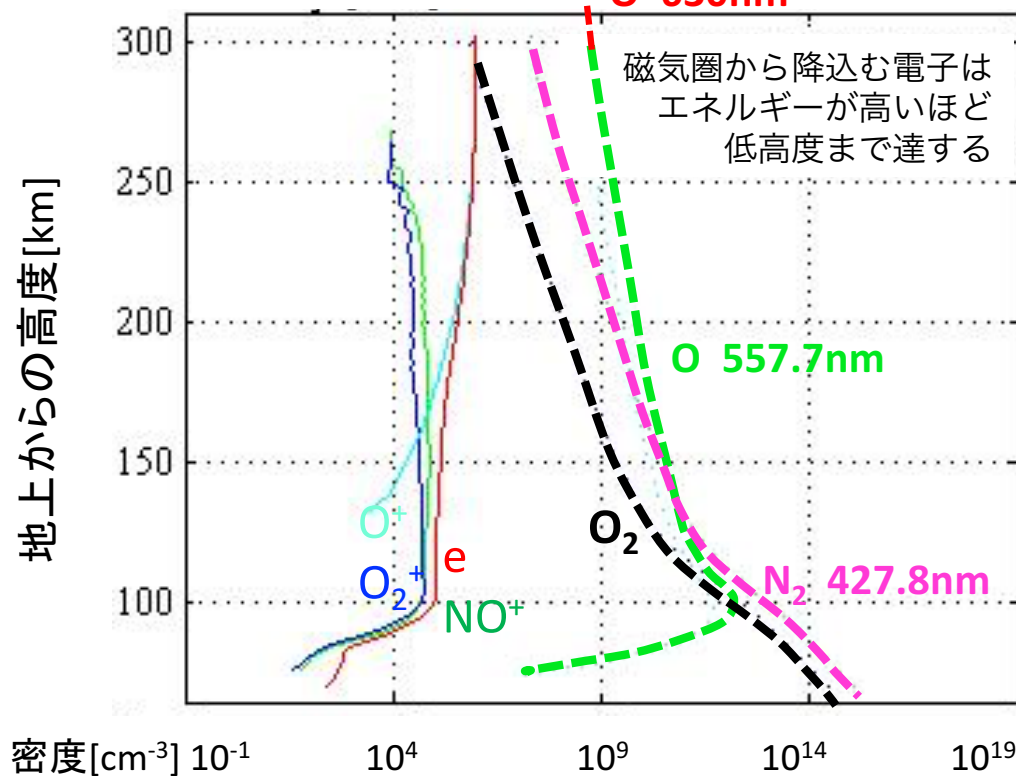
オーロラ発光の仕組み

イメージ(酸素原子)



オーロラの色・高度

00UT(真夜中) 緯度65度

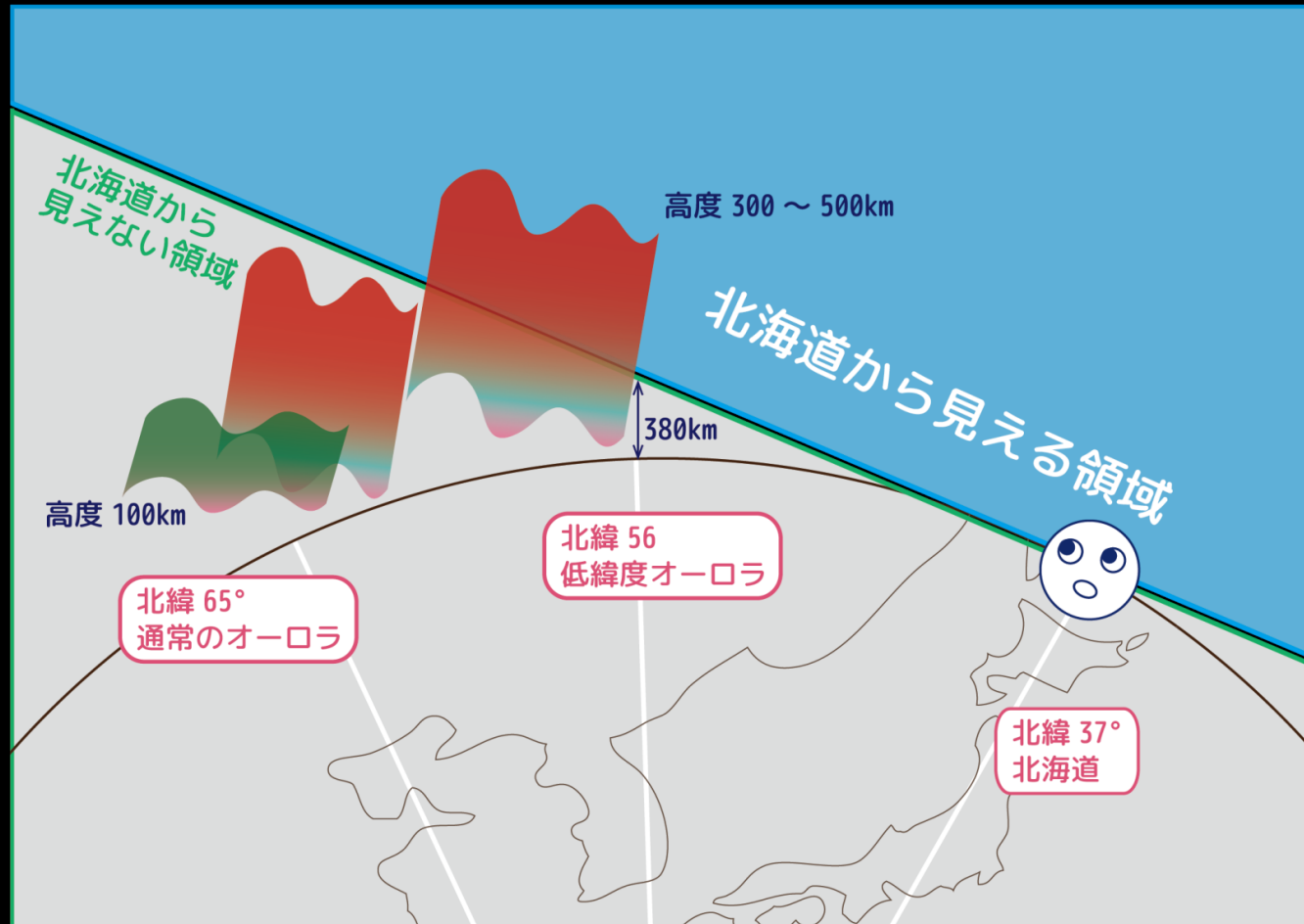


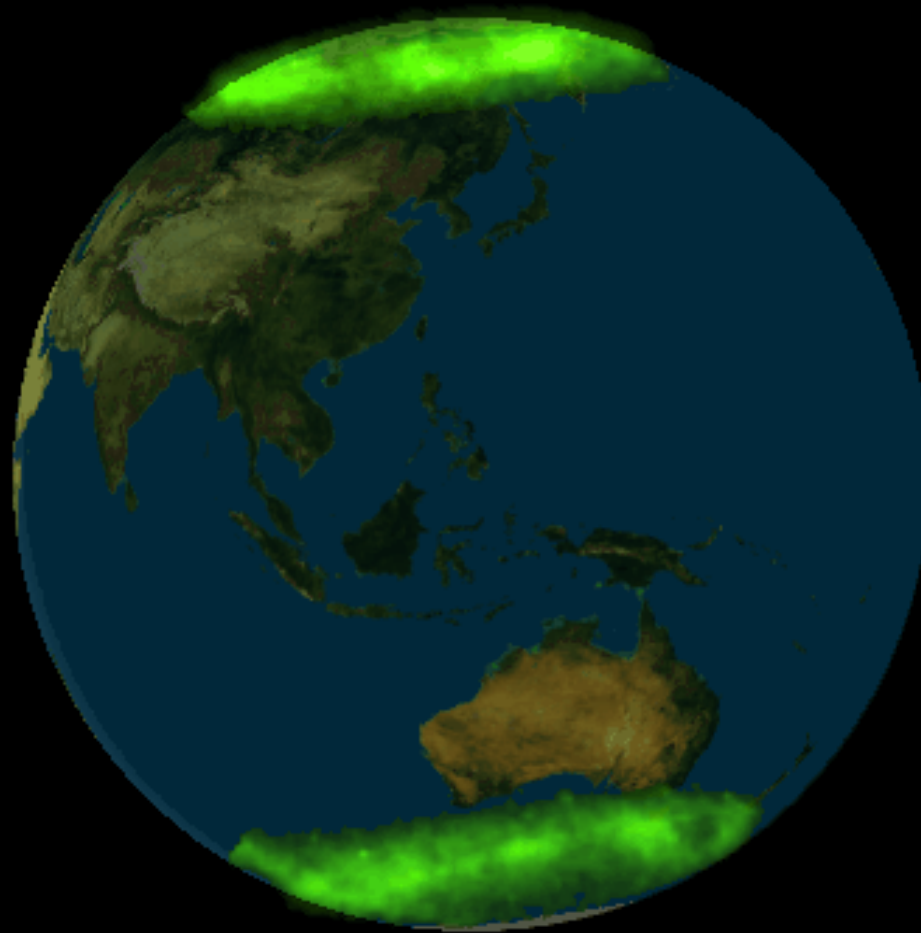
>200km:
大気密度が低い。主に酸素原子。
低エネルギー電子が酸素原子を励起。

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。

日本でオーロラが見えるというのは…





地球に輝く緑色のオーロラ = 酸素の存在

宇宙天気ミニ講座ー磁気圏編ー：まとめ

- 太陽系の惑星は、太陽から常に吹出す超音速のプラズマ・磁場から成る「太陽風」の影響を受けている。
- 地球の場合：太陽風によって固有磁場が変形され「磁気圏」が生成。
- 太陽風中の磁場が南向き成分を持つと：磁力線の繋ぎ替わりによって、太陽風のエネルギー・プラズマが磁気圏に流入。
 - ー 磁気圏対流・オーロラ嵐・磁気嵐
- オーロラ：
 - ー 極ではなく、円環状のオーロラ帯で見られる。
 - ー 色と高度は、大気組成とその高度分布による。
- 本講座では省略した、放射線帯の詳細・各種データの見方等については過去の講座資料をご覧ください。
 - ー <http://sw-forum.nict.go.jp/>→ 過去のフォーラム