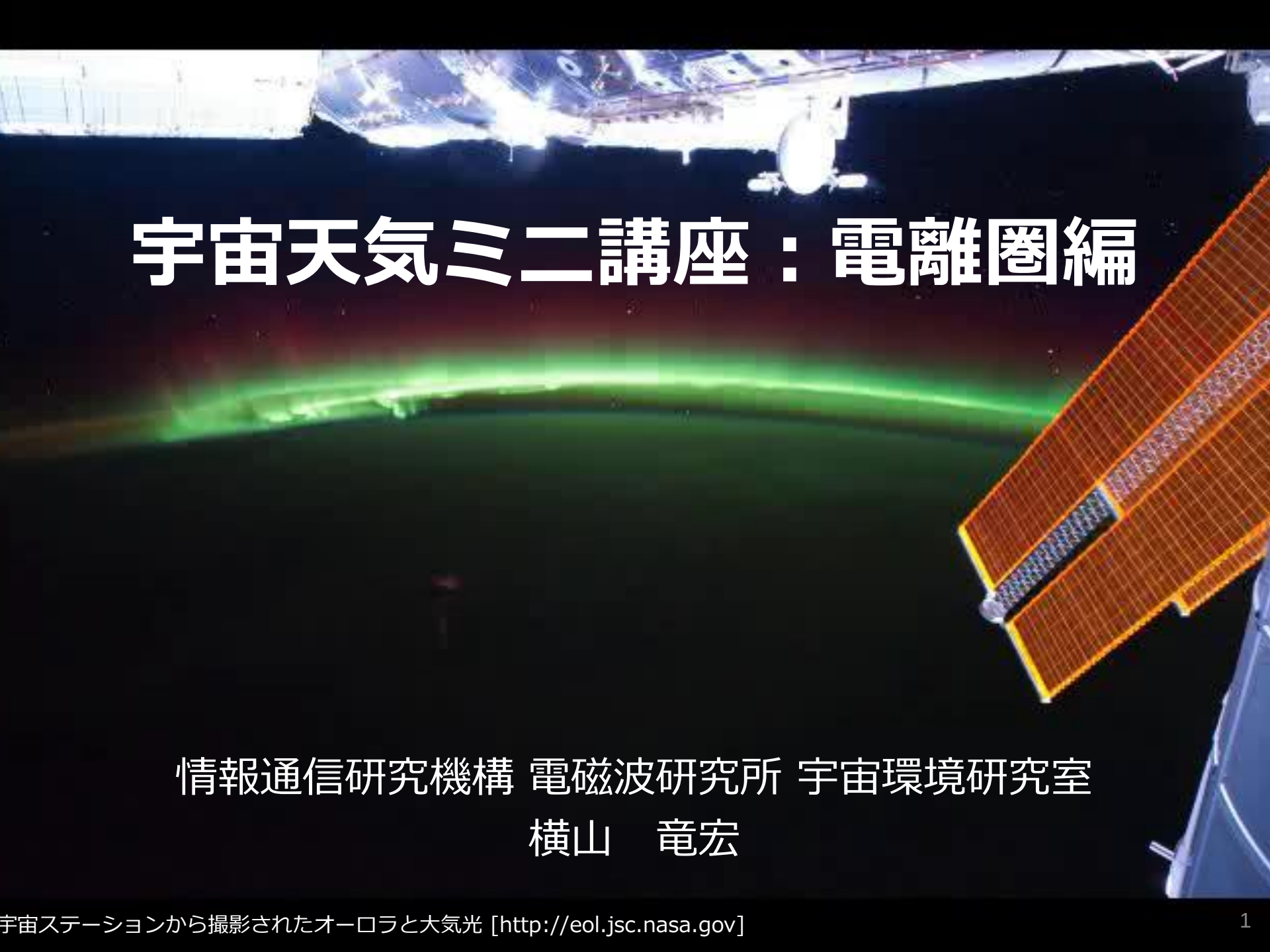
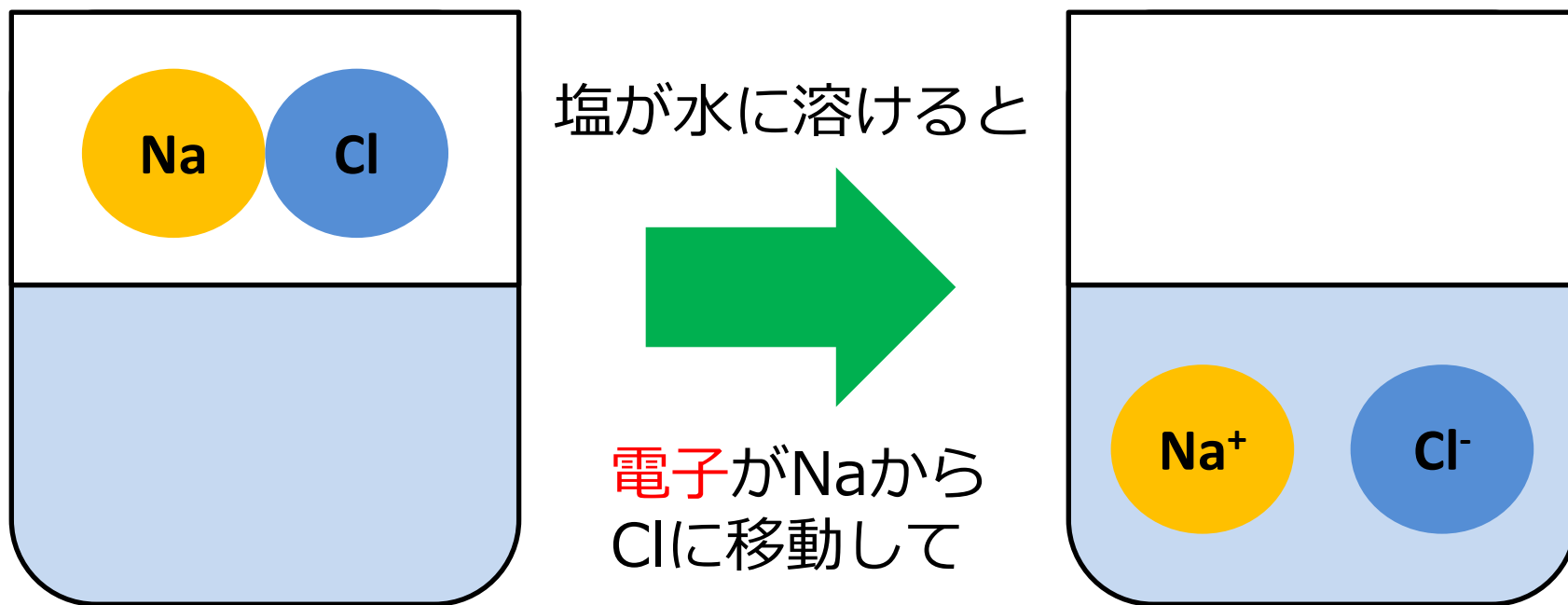


A photograph taken from the International Space Station (ISS) showing a vibrant green aurora (northern lights) glowing over the Earth's horizon. The station's complex structure, including solar panel arrays and various instruments, is visible in the foreground and background against the blackness of space.

宇宙天気三二講座：電離圏編

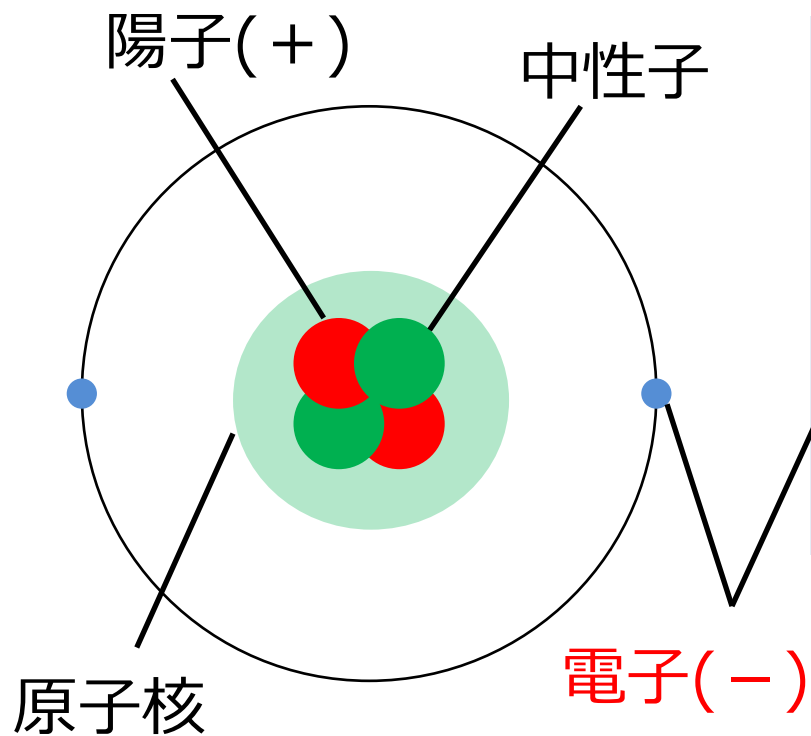
情報通信研究機構 電磁波研究所 宇宙環境研究室
横山 竜宏

「電離」？

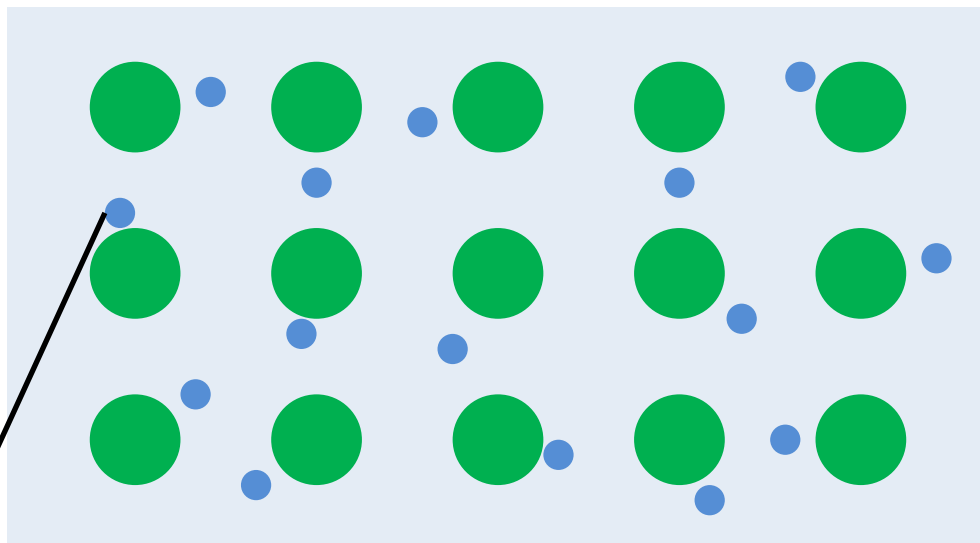


正イオンと負イオンに分離する：電離

「電子」？



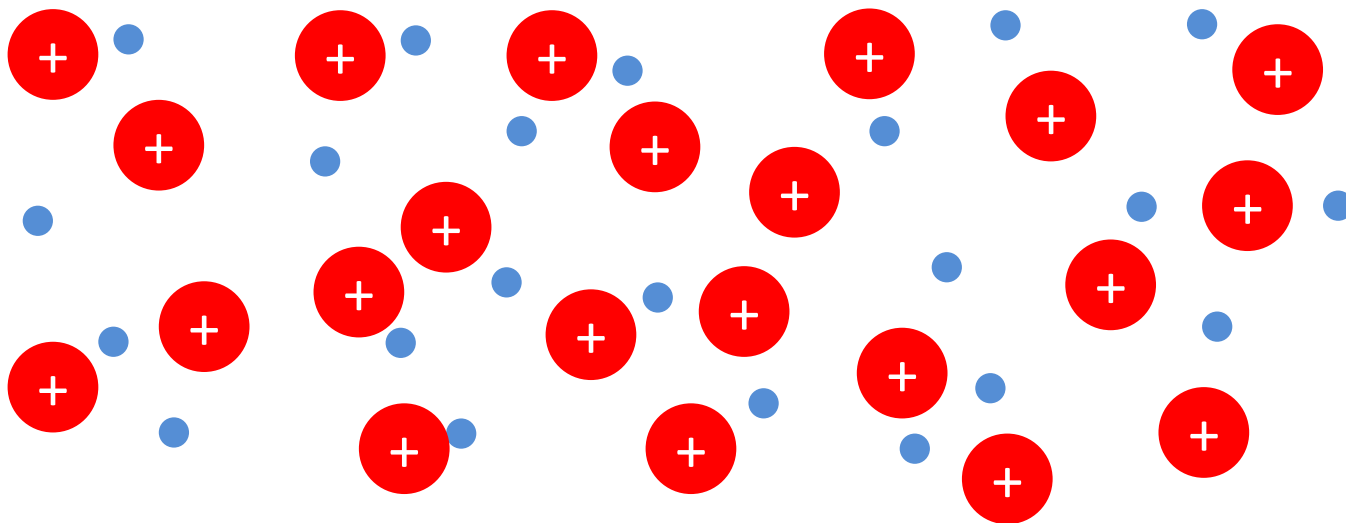
原子の構造



金属中の自由電子

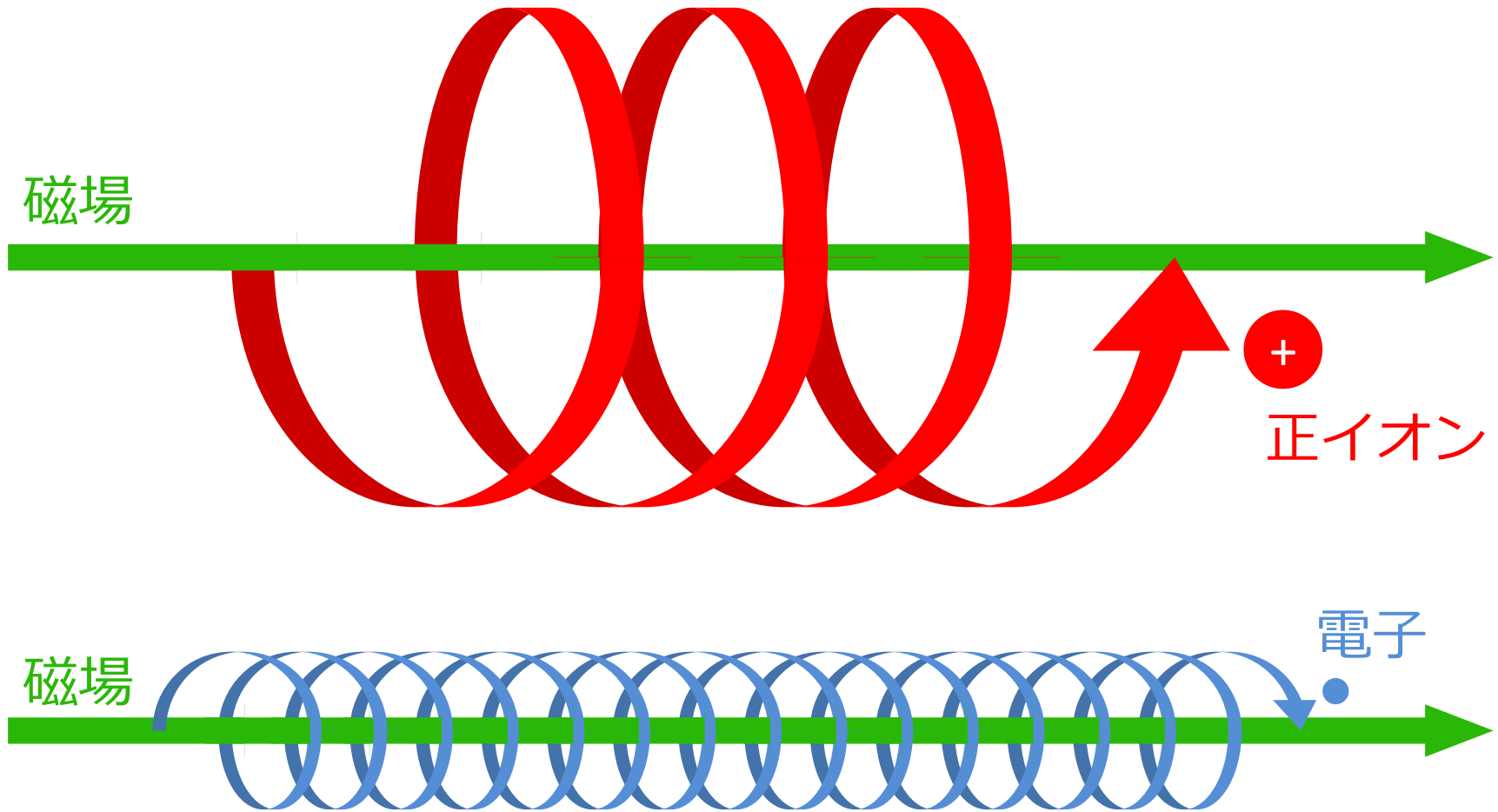
電圧をかけると電子が動いて
電流が流れる

「電離」 圏？



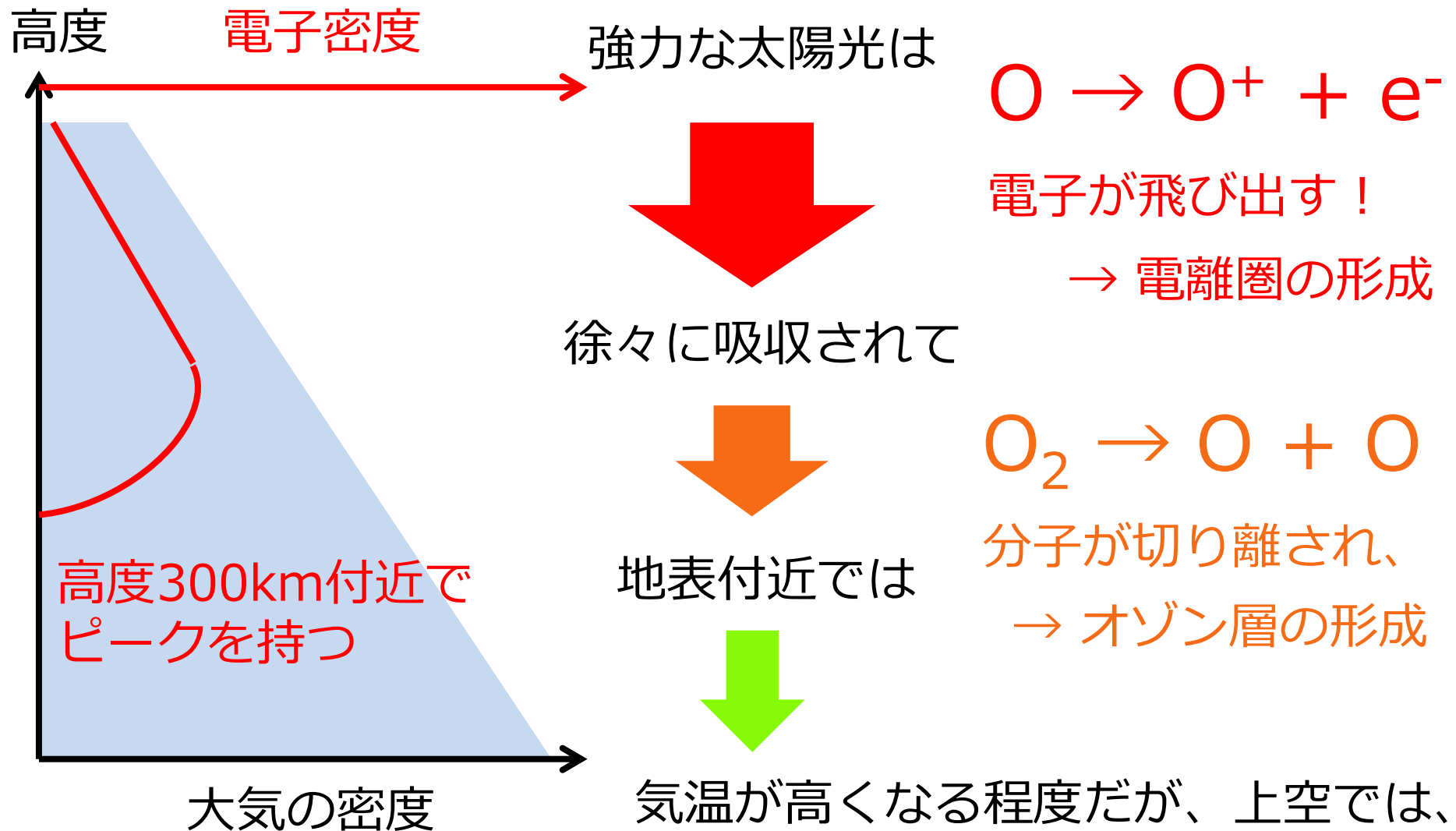
- 気体中の原子から電子が飛び出した状態
- プラスとマイナスは同数、全体では電氣的に中性
- 固体 → 液体 → 気体 → プラズマ(宇宙の99%)

電気を帯びた粒子の運動

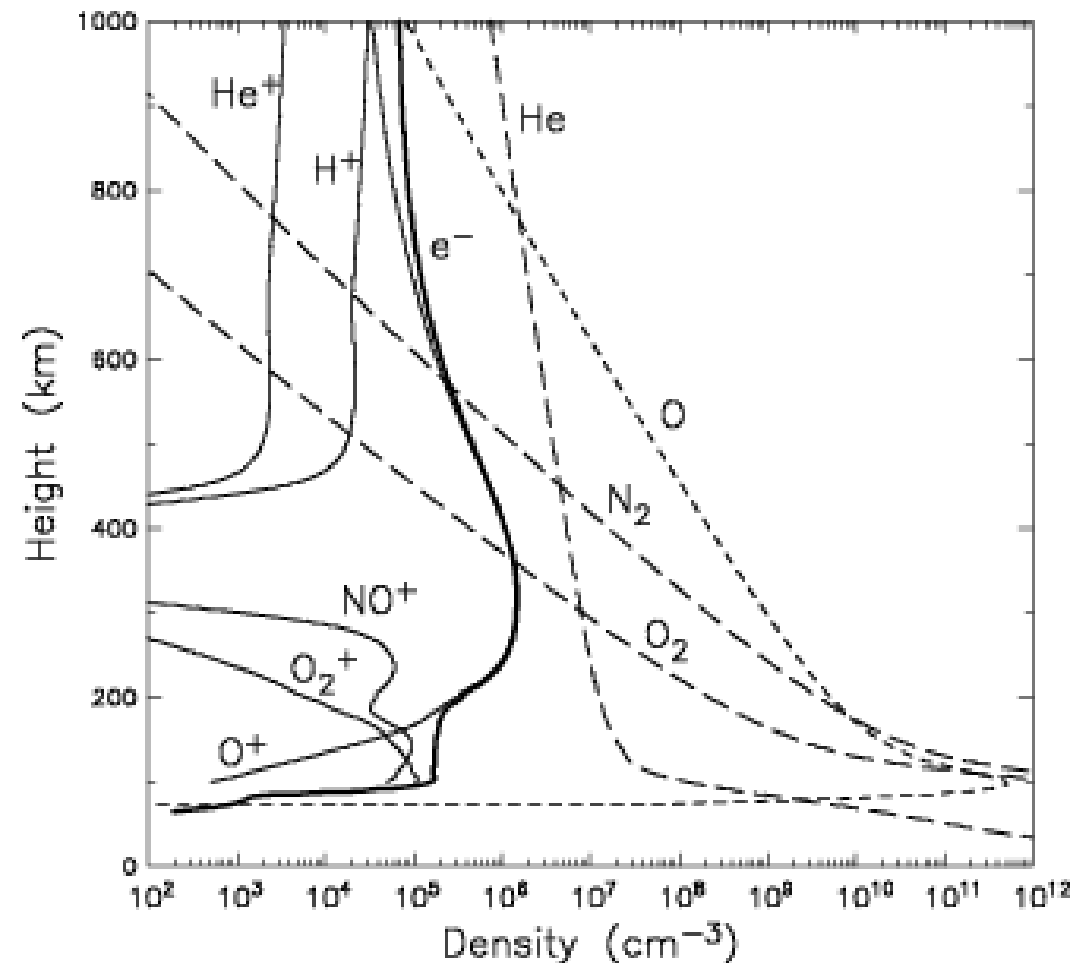


粒子は磁力線に巻きついて運動する $\Rightarrow$ 磁気圏との結合

太陽光による大気の反応



電離圏の構造



- 高度100km以上では、大気がよく混ざらなくなり、上空ほど軽い成分が多くなる。
- 電子密度最大の高度でも、中性大気の0.1%程度。
- 高度150km以下では、分子イオンが多い。分子イオンは夜になると電子とすぐに再結合してしまう。
- Eスポは夜も出るけど？

電離圏(層)の発見

- 19世紀中頃 ガウス(独)他：地上の磁場変動は上空に電流の流れる層が存在するからではないか？
- 1901年 マルコーニ(伊)：大西洋横断無線通信に成功(ノーベル物理学賞) 電波が曲がっている？
- 1902年 ケネリー(米) & ヘビサイド(英)：上空に電波を反射する電離した層が存在すると予言
- 1924年 アップルトン(英)：電波の反射を測定する実験から、ケネリー-ヘビサイド層(E層)が高度100km付近に存在することを実証
- 1925年 さらにその上下にも反射層(D層；F層)が存在することを実証(ノーベル物理学賞)
- 1931年 チャップマン(英)：太陽放射線による電離層形成の基礎理論を確立

招待論文

電離層研究の五十年

前田 憲一*
(昭和61年5月8日)

1. 電離層研究の初期

1.1 出 発

英国の Appleton ら (1925 a) と米国の Breit ら (1925) によって電離層の存在が電波実験で実証されたのが1925年であったが、日本と印度 (Mitra, 1984) では早くも 1930 年にインパルス法による実験が始められた。当時は電離層のことを、その予言者の名をとって Kennelly-Heaviside 層と呼んだ。日本では海軍技術研究所 (Minohara and Ito, 1932) が最初で、2年ほど後に逓信省電気試験所平磯出張所 (現在電波研平磯支所) (Maeda, 1934) でスタートした。当時5年程度の遅れで英米の実験に追随できた日本は、遠く1911年に端を発する電波 (長波) 伝搬と空電の研究の実績を積み重ねていたのであって、その高い科学的潜在能力が英米に次ぐものであったことを物語るものである。

初め電離層の実験は $h'-t$ オペレーションであったが、間もなく技術的に高度な $h'-f$ 実験に替わり、これでルーチン観測を実施することが米国の Washington D. C. で始められた。これは1933年であった。続いて1934年には英国の Slough と日本の東京で始まり、さらに米国の Carnegie 財団の援助による3局、すなわち Peru の Huancayo (1934年)、豪洲の Watheroo (1935年) 及び Norway の Tromsø (1935年) がルーチン観測を開始した。平磯での開始は1936年であった。

北半球では高緯度や中緯度に数か所、赤道地帯に1か所、南半球中緯度に1か所というように、荒いながらも全地球をカバーする観測網が既にこのころにできていたことは、驚歎のほかなしといわざるを得ない。

2.3 正午 f_oF2 の緯度分布

1941～1942年頃筆者らは、北は千島列島から南はインドネシアに至る東アジア地域一帯にわたって良好な無線通信連絡を確保するため、軍用の周波数マップを作製する目的で上記地域の f_oF2 の分布を調査した。平磯

図2-8は前図を地磁気伏角を横軸に描き直したもので、黒点もD点H点もすべて一つの曲線上に乗り、また南北両半球が伏角ゼロを挟んで対象になっているのが見える。なお×で示す値は東部アジア地区の観測値を筆者がplotしたものである。この図からわかるもう一つの重要事項は伏角ゼロの黒点（PeruのHuancayo）が異常に低いことである。筆者が追加した×点も伏角の小さい所はHuancayoと同様である。1934年2月の南洋群島の日食実験で経験したbite out（2.1節参照）もこれと同様の現象である。この現象は筆者らが1942年に経度効果に始めて気付いたときに既に知っていたことである。これは地磁気赤道の正午 f_oF2 の低下の現象で、後年これがAppleton異常（anomaly）と呼ばれるようになったが、筆者には何となく割り切れないものがある。

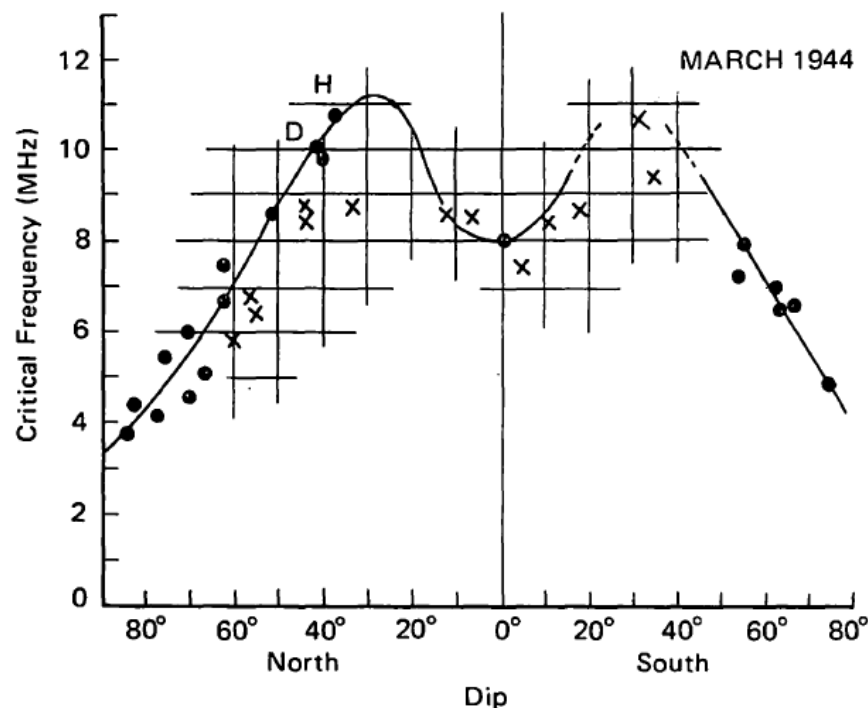
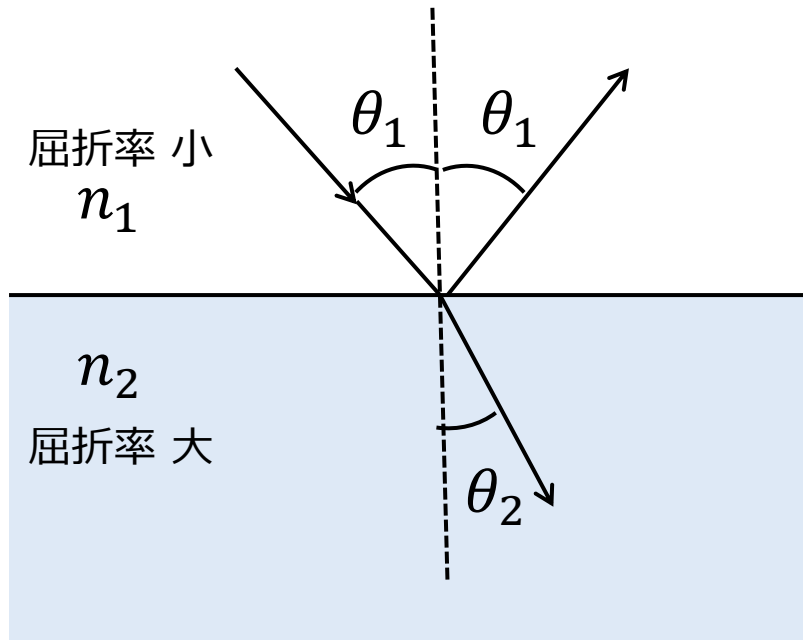


図 2-8 正午の f_oF2 の磁気傾角に対する変化 (Appleton, 1946). ×点は東アジア地区の値で筆者が追加したもの。

電波(光)の反射・屈折



$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$: スネルの法則

- 伝搬媒質の屈折率が変化すると、電波(光)は屈折する
- 屈折率は電波(光)の周波数(波長)によって変化する(分散)
- 電離圏の屈折率を求めよう！

アップルトン-ハートリーの式

$$n^2 = 1 - \frac{2X}{2(1 - iZ) - \frac{(Y \sin \theta)^2}{1 - X - iZ} \pm \sqrt{\frac{(Y \sin \theta)^4}{(1 - X - iZ)^2} + 4(Y \cos \theta)^2}}$$

$$X = \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \qquad Y = \frac{\Omega_e}{\omega} \qquad Z = \frac{\nu}{\omega}$$

ω : 電波の角周波数(周波数の 2π 倍)

$\omega_p = \sqrt{\frac{Nq^2}{\epsilon_0 m}}$: プラズマ角周波数(N : 電子密度)

$\Omega_e = \frac{qB}{m}$: 電子のジャイロ角周波数(磁場の影響)

ν : 電子の衝突周波数(中性大気の影響)

磁場と衝突の効果を無視すると、

$$n = \sqrt{1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}} \quad \omega_p = \sqrt{\frac{Nq^2}{\epsilon_0 m}}$$

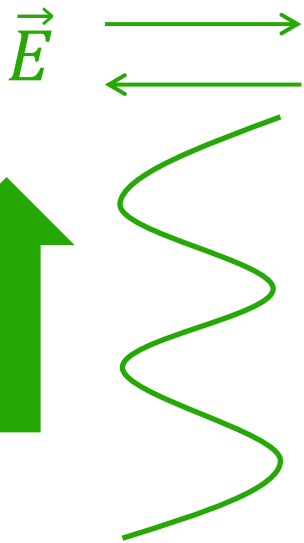
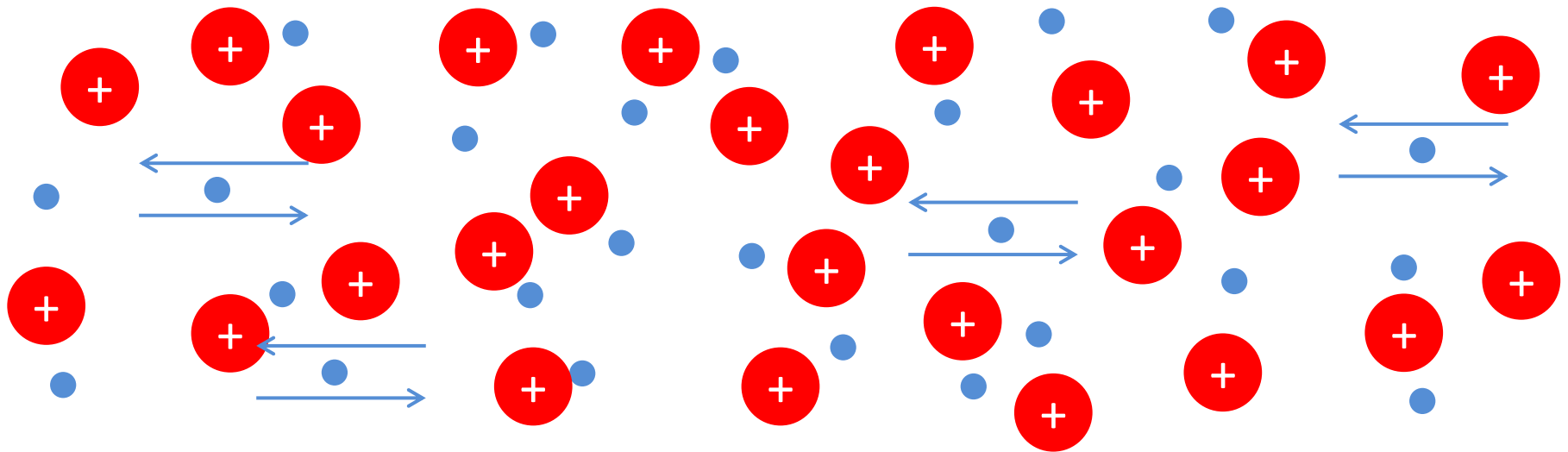
電子密度 (red arrow pointing to N)

電波の周波数 (blue arrow pointing to ω)

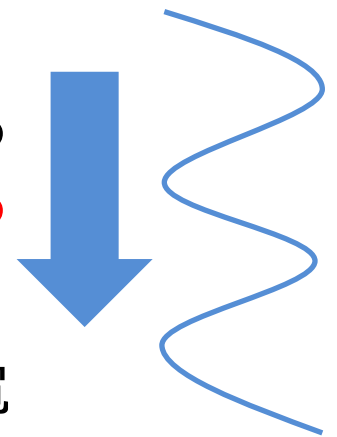
定数 (green arrow pointing to $\epsilon_0 m$)

- プラズマ(角)周波数は、電子密度のみで決まる
- 電子密度が増加すると、屈折率は1より小さくなる
- プラズマ周波数が電波の周波数より大きくなると、屈折率は虚数となる ⇒ その先には伝搬できず反射する

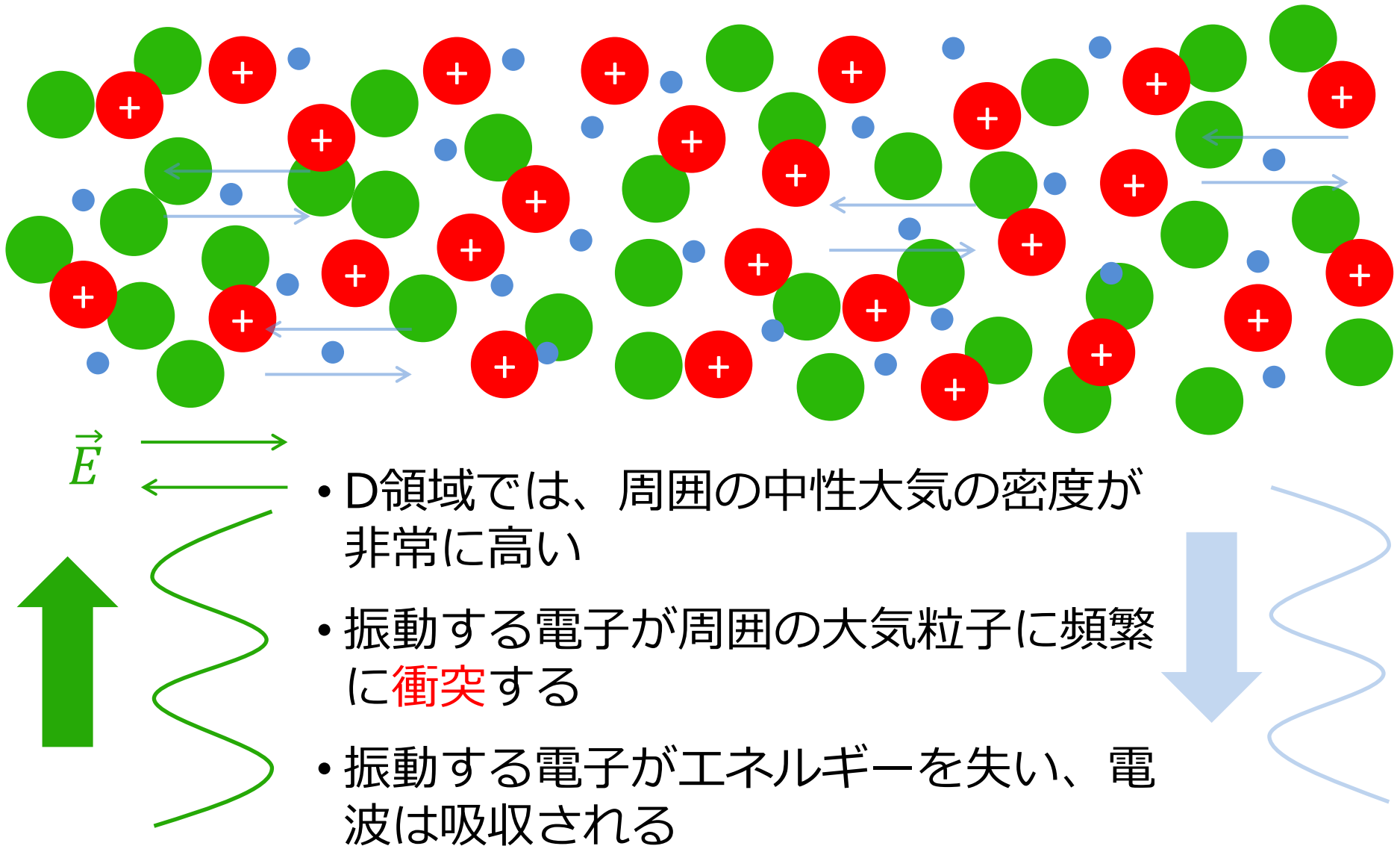
電波が反射する(大まかな)原理



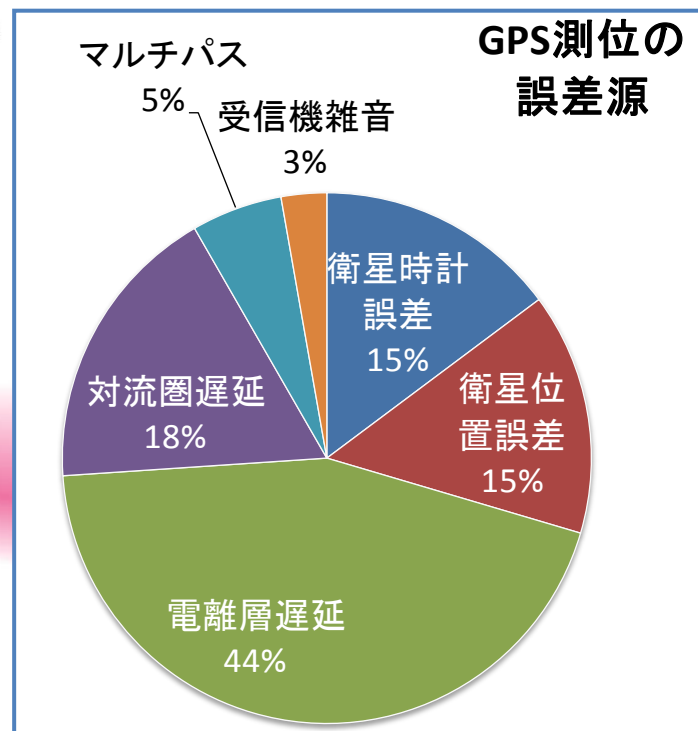
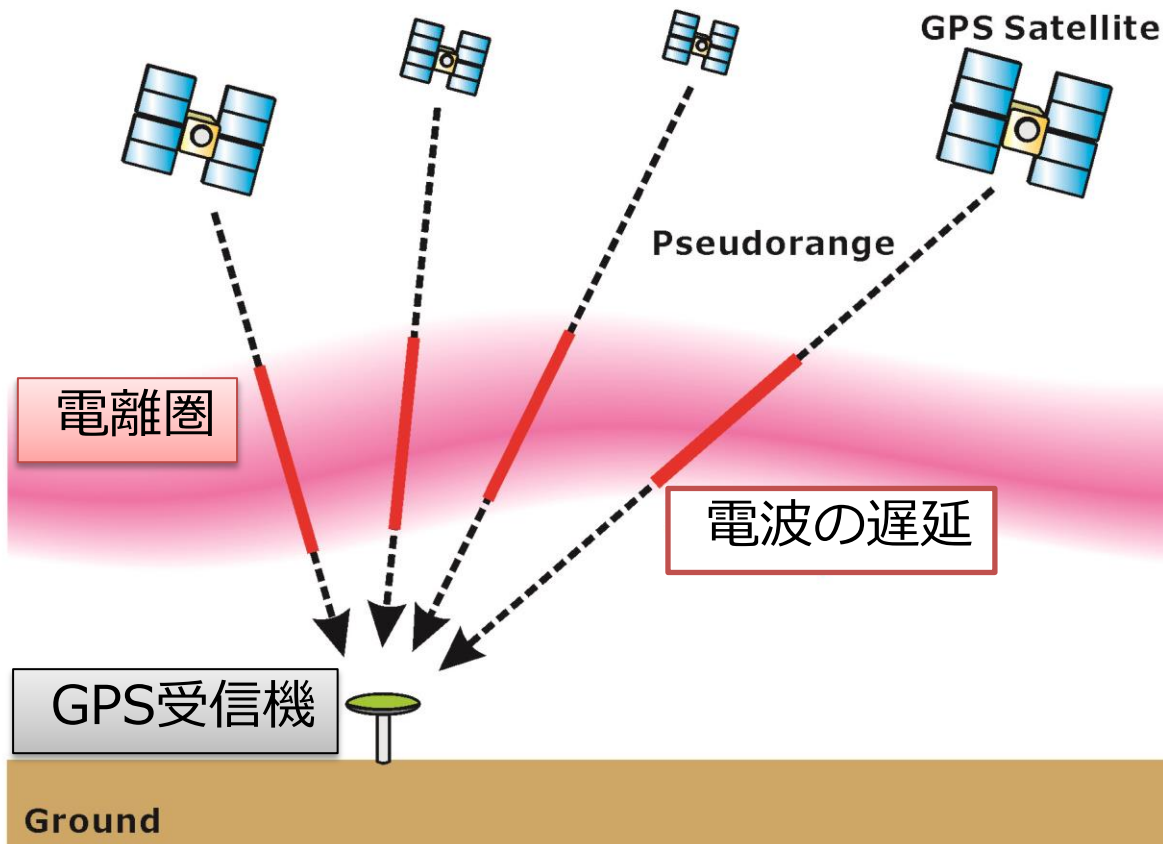
- 電場が振動しながら電波は伝わる
- 電離圏の電子も同じ周波数で振動する
(プラズマ周波数 = 電波に追隨できる最大の周波数)
- 振動する電子が電波の進行を妨げ、電波は反射される



電波が吸収される(大まかな)原理



衛星測位誤差

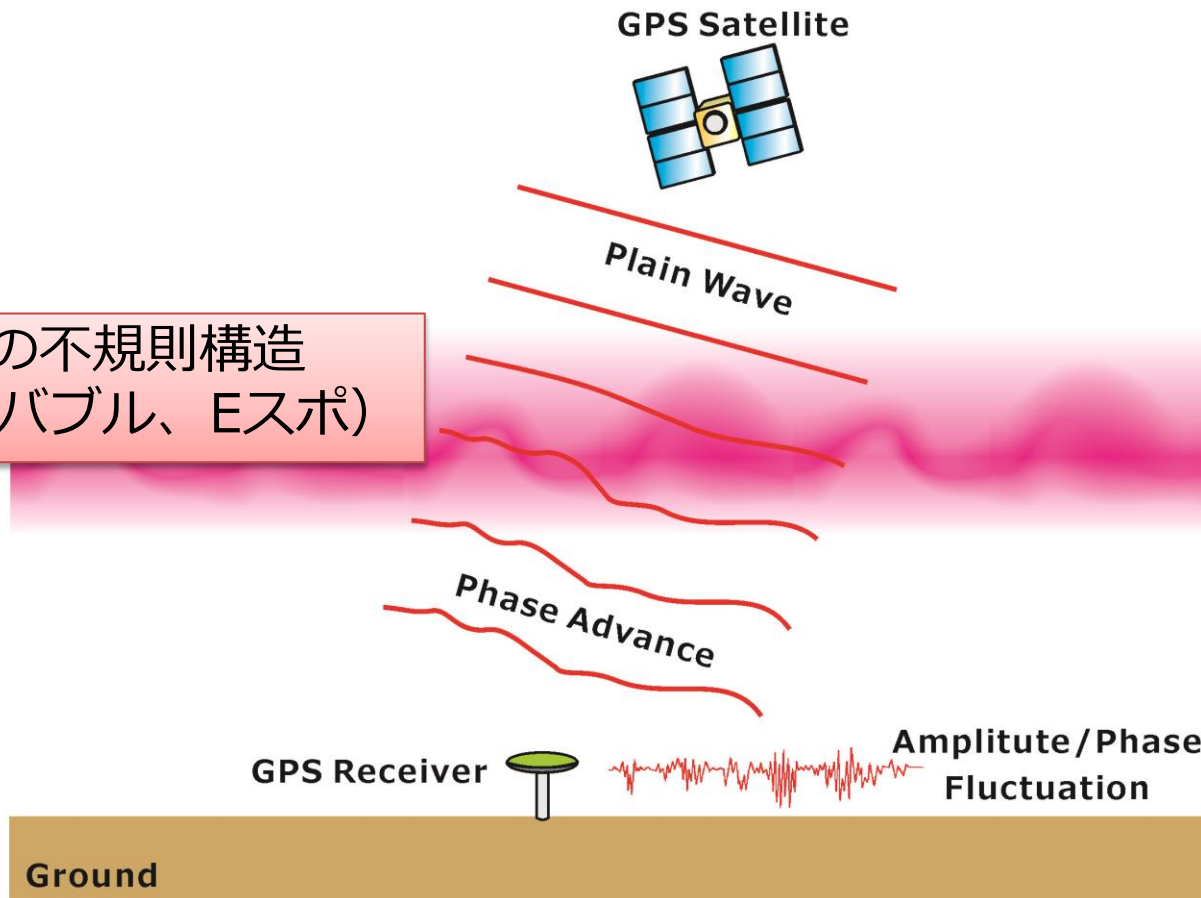


「精説GPS（日本航空学会
GPS研究会）より」

- 屈折率が変わると電波の伝搬速度も変わる
- 電離圏嵐が発生すると、誤差が増大
- 誤差の補正のためには正確な電離圏情報が必要！

電波のゆらぎ(シンチレーション)

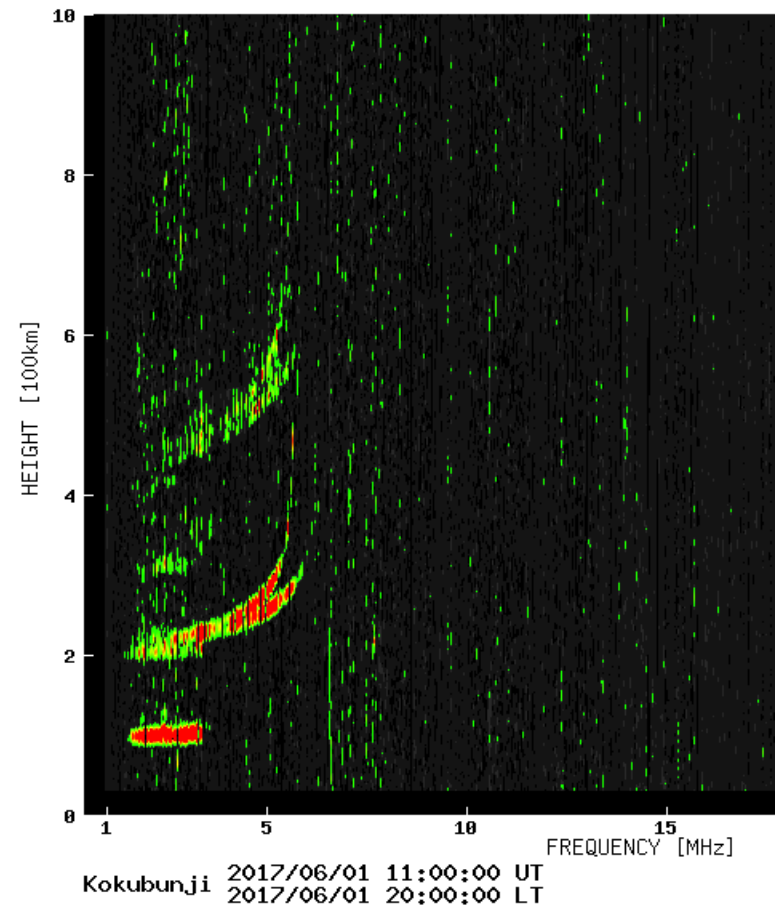
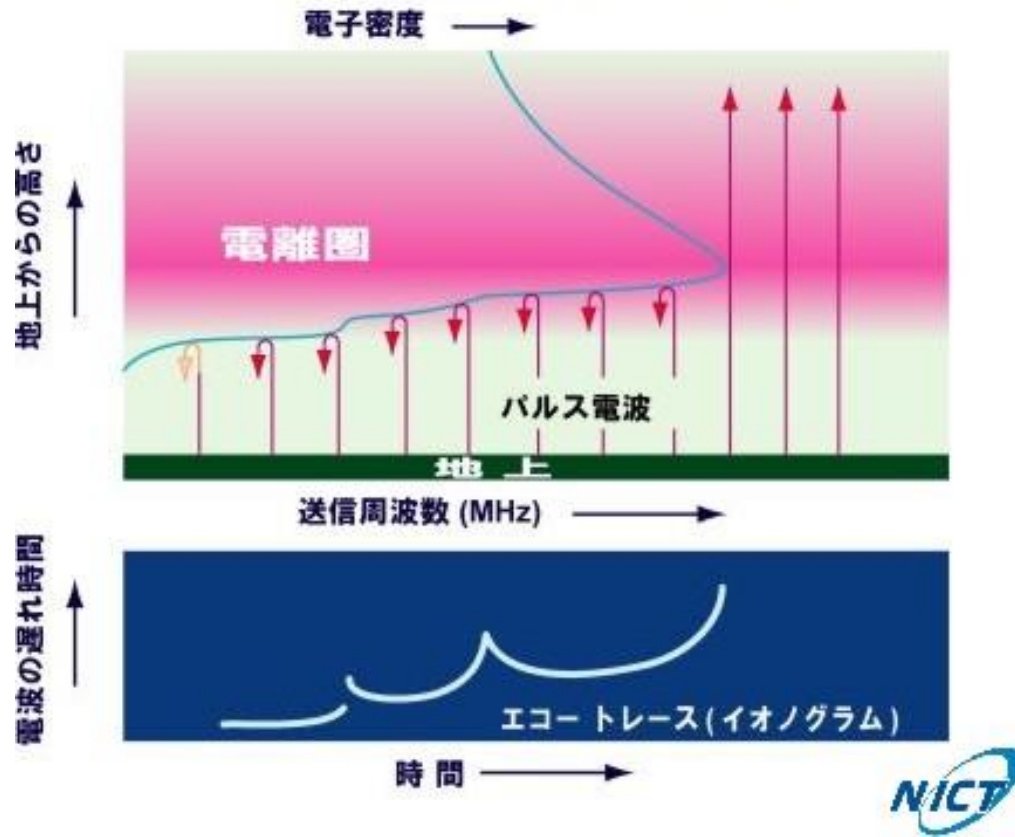
電離圏の不規則構造
(プラズマバブル、Eスポ)



- 数100m程度の不規則な構造があると、地上で干渉パターンを作り、振幅と位相が激しく変動
- 誤差どころか、情報そのものが取れなくなる

電離圏の観測手法：イオノゾンデ

電離圏の観測 (イオノゾンデ)



- 周波数を変えながら電波を送信
- NICTが国内4地点で定常観測

電離圏の観測手法：大型レーダー

ペルー・ヒカマルカ



ノルウェー・アイスキヤット



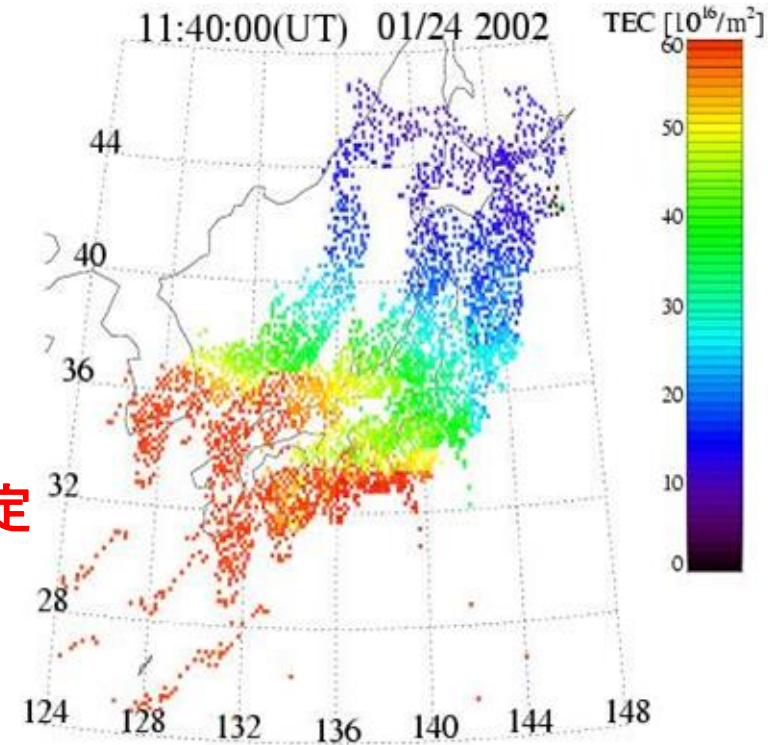
滋賀県信楽町・MULレーダー



プエルトリコ・アレシボ

- VHF-UHF帯の電波を発射し、電離圏からの微弱な散乱信号から電子密度、温度などの情報を取り出す

電離圏の観測手法：GPS/GNSS



- 測位上の誤差 $\Rightarrow$ 電離圏の情報
- 2周波数の遅延時間の差から伝搬経路上の全電子数が求まる
- 全電子数の水平2次元分布が得られる

電離圏の観測手法：ロケット

JAXA 内之浦宇宙空間観測所

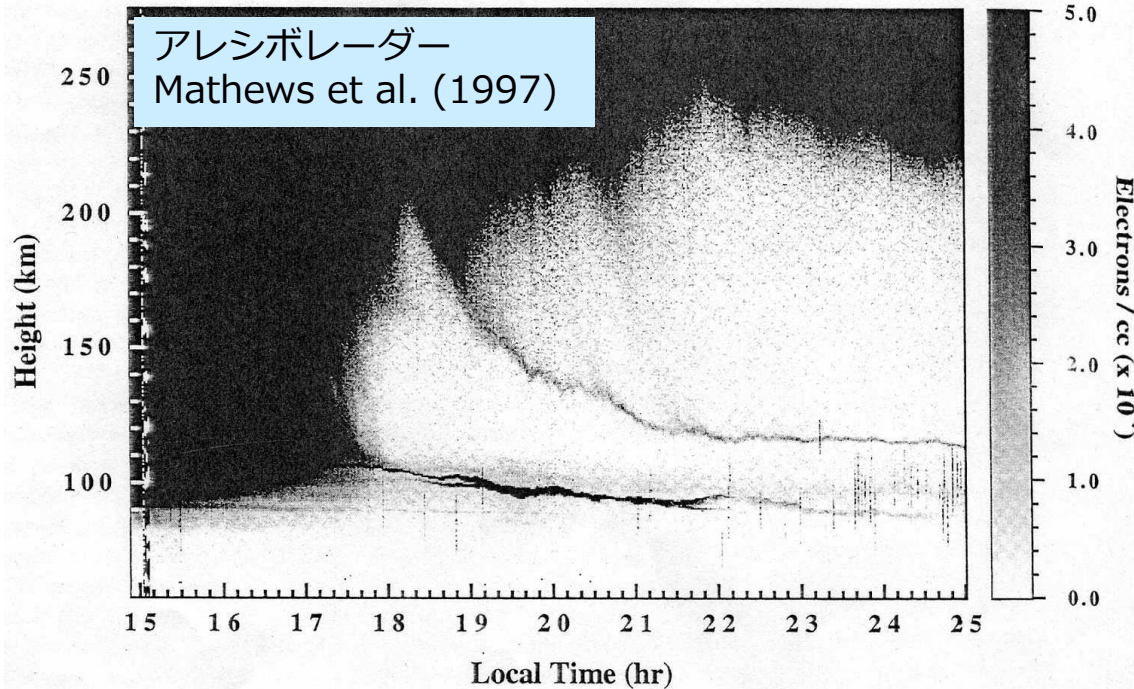
NASA フロップス島



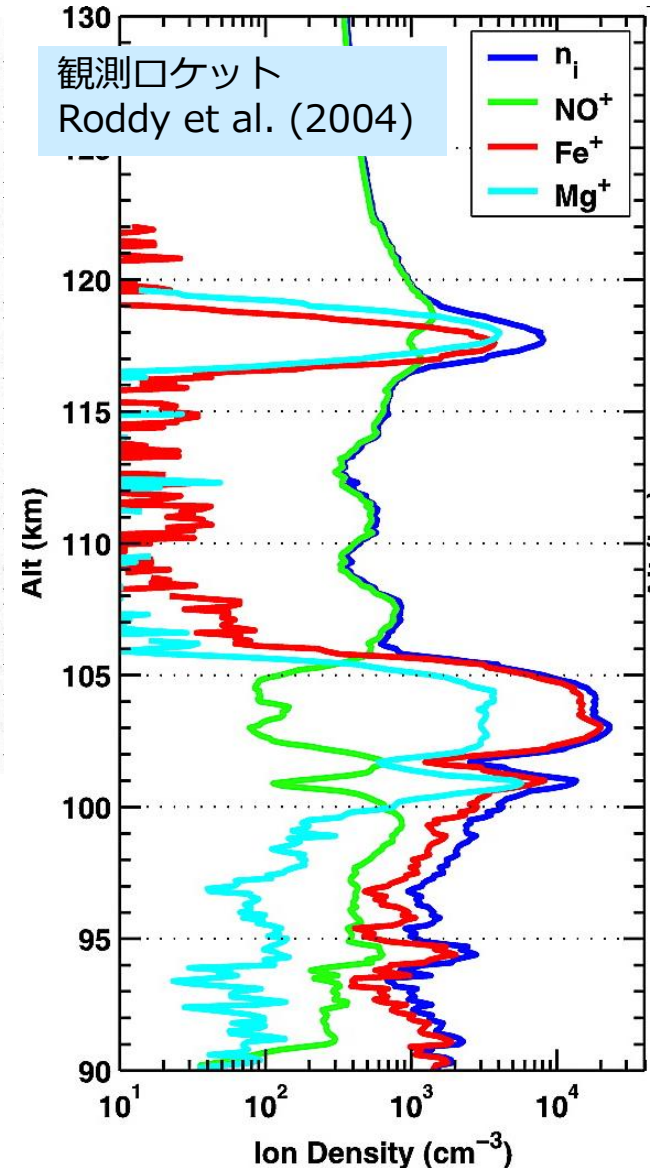
- 測定器を搭載し、電子密度や電磁場をその場で観測

スプラディックE層(Eスポ)の観測

Electron Concentration 09/02/94



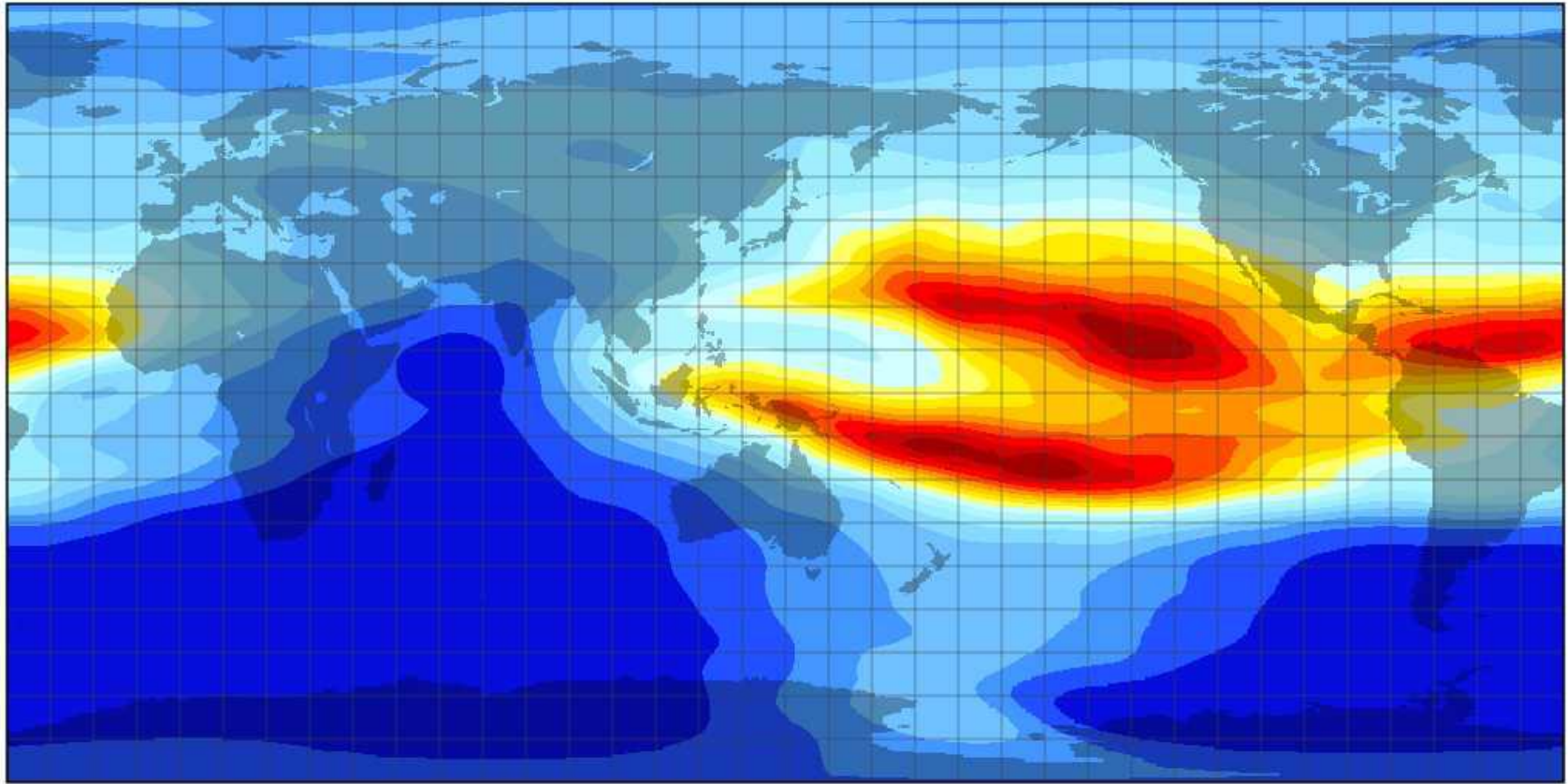
- Eスポの正体は鉄、マグネシウム、ナトリウム等の**金属イオン**
- 金属イオンは寿命が長い
- 流星が金属原子を持ち込み、風が吹き集める



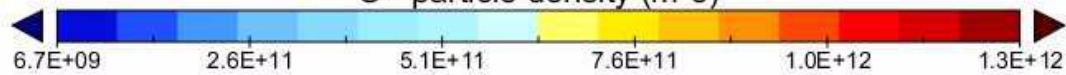
電離圏の数値シミュレーション：大規模構造

O+ particle density

Time: 2015-05-31 02:15:00 +0200

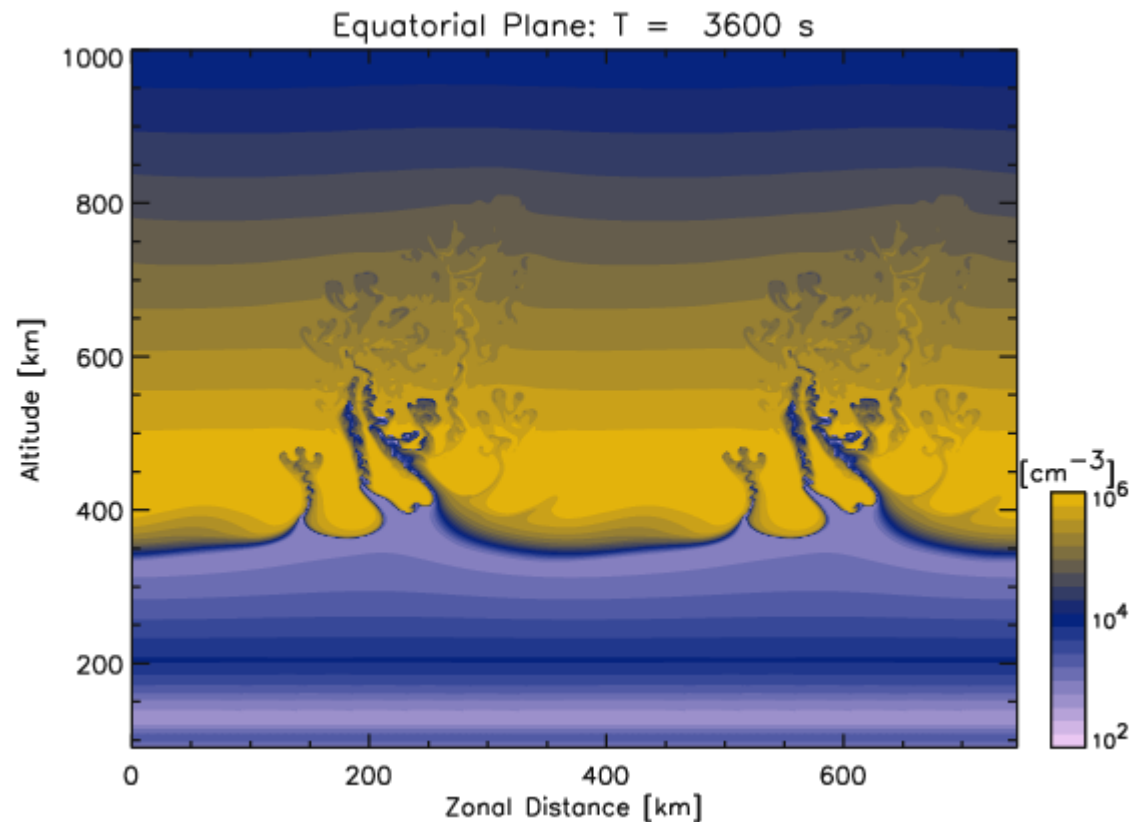


O+ particle density (m⁻³)



Data Min = 6.7E+09, Max = 1.3E+12

電離圏の数値シミュレーション：プラズマバブル



密度が変動する

分極電場が強くなる

薄い部分が上昇する

- 地磁気が水平な磁気赤道で発生する現象。東南アジアでは春と秋に多く発生する。
- 深刻な電波障害の原因となるが予測が難しい。日没後の数十分間で急激に発達する。

三二講座電離圏編：まとめ

- 強力な太陽光によって上空の大気は電離し、プラズマ状態となっている。ただし最大電子密度の高さでも、電離度は0.1%程度、大気から宇宙への遷移領域。
- 研究の歴史は浅い。発見されてから100年足らず。
- プラズマ中は屈折率が変化する、電波は屈折、反射、吸収される。磁場の影響でさらに複雑に。
- 直接観測するのが難しい。気球は届かない、人工衛星は大気摩擦ですぐ速度が落ちてしまう。
- 数値シミュレーション、AI予測の発展に乞うご期待。
- 各現象の詳細については、過去の講座資料もご覧下さい。

<http://sw-forum.nict.go.jp/> → 過去のフォーラム