

# **惑星科学フロンティアセミナー 2014**

## **「惑星プラズマの生成と散逸」**

**講師: 渡部 重十 氏  
(北海道大学大学院理学院)  
2014年9月3日 - 9月4日**

**ノート作成: 高橋 康人, 今井 正堯**

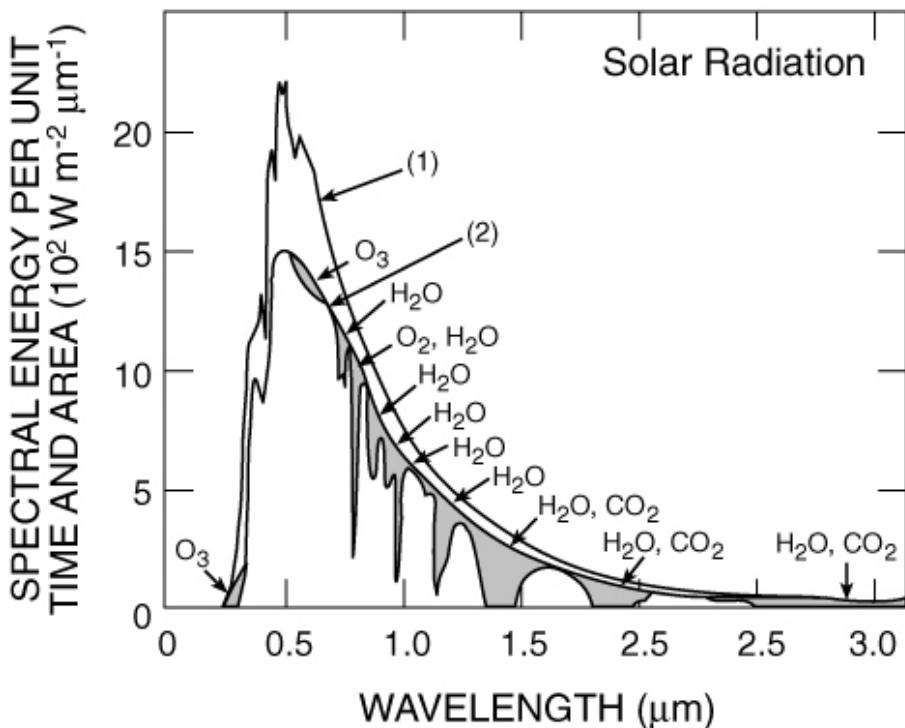
# 1. 惑星電離圏

はじめに、地球の電離層の発見に始まり現代までの電離圏に関する知見を、歴史的な流れに沿って述べていく。

惑星電離圏の研究は、プラズマ層の発見とそこで起こっている光化学反応に関する洞察から電離圏がどうやってできているのかを知ることに始まった。その後、地球電離圏の観測が進むにつれ電離圏が動いている(変動)ことが分かり力学 : Dynamics、そしてエネルギー収支 : Energetics がどうなっているのかということに研究者の関心が払われるようになった。そして最近(20-30 年前から)の発見から電離圏は安定な層ではなかった(不安定 : Instability)ということが明らかになり、現在の研究の多くはこの部分の理解に取り掛かっている。

## 1.1 Photochemistry (光化学反応)

最初に、太陽からの放射と地球大気による吸収を見る。この図はよく見かけるものだが、大気の方の研究に必須の紫外より短い波長に関する情報に乏しい。



© 1961 Macmillan Books

図 1: 太陽放射スペクトルと地球大気の吸収

かつての研究者たちは、波長が短い光がなぜ地上に届かないのか？という問い合わせを持つようになっていた。当時から、実験室での分子の解離や原子電子の電離の研究があり、地球大気が 300nm より短い波長を吸収・散乱しているだろうという予想があった。

この問い合わせに答えた最初の実験は Marconi の 1901 年の実験である。

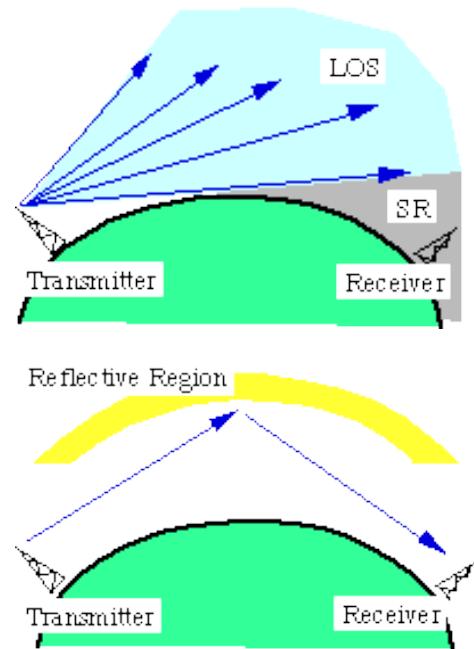
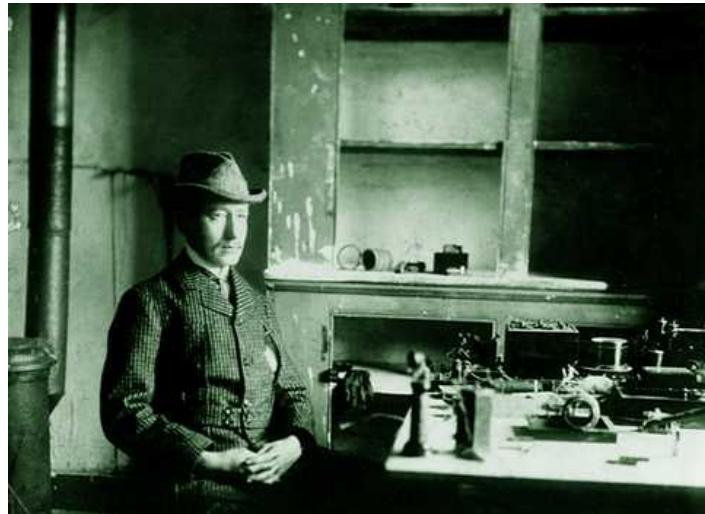


図 2: Marconi による電波実験

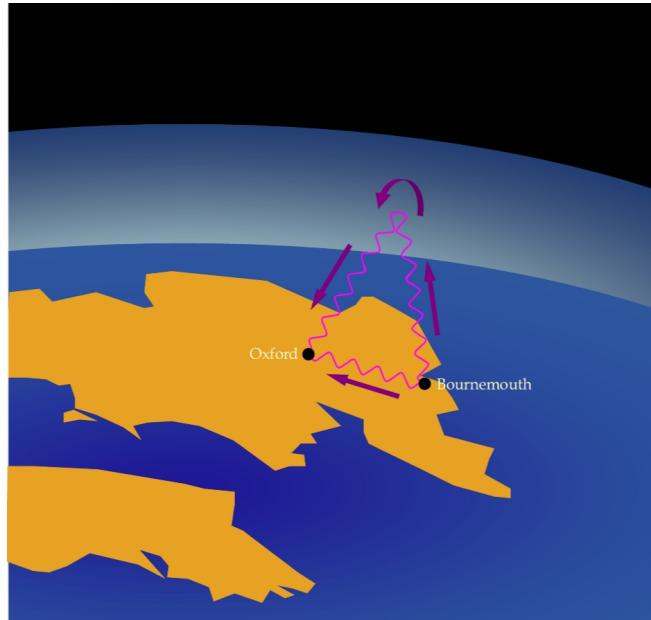


図 3: Appleton による電波実験

Marconi は、イギリスで発生させた電波がニューファンドランド(カナダ東部の島)で受信できることを発見した。このことから、大気の上方に電気を流しやすい層があることが考えられた。  
(Marconi は電波通信手法で 1909 年ノーベル賞を受賞している。)

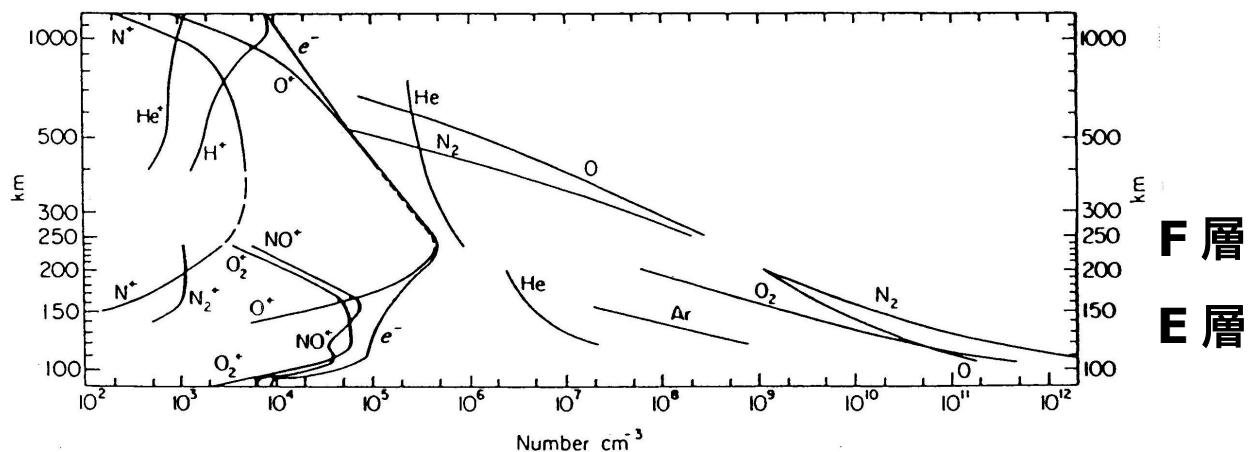
Marconi の実験結果をうけて、電離圏についてのサイエンスを導いた人物が Appleton である。Appleton は、1924 年に電波を真上に打ち上げ、それが往復する時間を計測する観測を行い、電波を

反射する層が高度約100 kmにあることをついた。また彼は、観測に際し周波数を変えながら電波を真上に打ち上げており、イオンや電子が集まっているところ(プラズマ)中で電波がどのように伝播するかを理論検証した結果と比較することを行っている。この業績が評価され、Appleton もまた1947年にノーベル賞を受賞している。

電波の周波数を変えながら観測した結果からは、電波を反射する複数の層が存在することが発見された。これらの層が現在 E 層(高度~100 km), F 層(高度~200 km)として知られる電離層である。なぜ”E”層のような名前が付けられたかは定かではないが、electric の E であるという説と、他にもたくさん同じような層があるだろうという予想の元なんとなく E から始めたとする考えもある。

後にロケットによる観測からイオンの高度による密度分布が測定され、E 層は 分子イオン  $O_2^+$  や  $N_0^+$  が、F 層は原子イオン  $O^+$  が主成分の電離層であることが明らかとなっている。

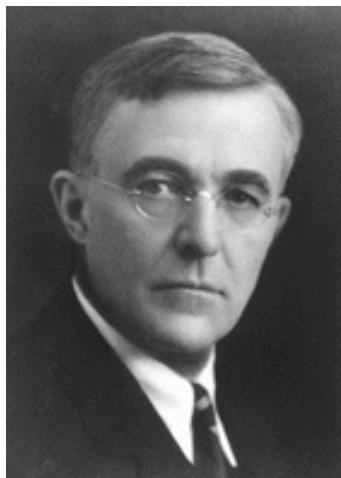
### 電波反射の層



**Fig. 1.2.** International Quiet Solar Year (IQSY) daytime atmospheric composition, based on mass spectrometer measurements above White Sands, New Mexico ( $32^\circ N$ ,  $106^\circ W$ ). The helium distribution is from a nighttime measurement. Distributions above 250 km are from the Elektron II satellite results of Istomin (1966) and Explorer XVII results of Reber and Nicolet (1965). [C. Y. Johnson, U.S. Naval Research Laboratory, Washington, D.C. Reprinted from Johnson (1969) by permission of the MIT Press, Cambridge, Massachusetts. Copyright 1969 by MIT.]

図 4: 地球電離圏でのイオンの密度分布

電離層に存在する気体はプラズマと呼ばれるが、電離層が見つかってからずっと後に Langmuir によって最初に命名された。プラズマとは、原子や分子が電離によりイオンと電子に分かれ、原子核は安定で荷電粒子相互間のクーロン力によって支配される状態の物質のことである。全体として電気的にはほぼ中性で、原子、分子 → イオン+電子 と電離している。



プラズマの例	$n$ ( $m^{-3}$ )	$T_e$ (eV)	$T_i$ (eV)
H II ガス雲	$10^4 \sim 10^{10}$	~1	~1
太陽コロナ	$10^{11} \sim 10^{15}$	~10 <sup>2</sup>	~10 <sup>2</sup>
惑星間空間	$10^7$	~10	~10
地球磁気圏	$10^9$	~1	~1
電離圏	$10^{12}$	~0.1	~0.1
ネオンサイン	$5 \times 10^{18}$	~2.5	~0.15
核融合	$10^{20}$	~10 <sup>4</sup>	~10 <sup>4</sup>

図 5: Langmuir とプラズマの例

プラズマは高高度に大量に存在するが、中性ガスに比べれば質量は微々たるもので、中性ガスの運動がプラズマに影響をあたえることはあってもその逆はないだろうと長い間思われてきた。しかし近年、プラズマの運動が中性大気の運動に強く関わっていることが明らかになりつつあり、学会などでも大きなテーマとなっている。

以下の表は、プラズマの代表的な例とその密度とエネルギーを示したものである。

基本的にプラズマは希薄で、エネルギーのやりとりもさほどない。しかし、電荷をもつため、磁場との相互作用により運動に異方性が生じ、また温度にも異方性がある。プラズマの分布はマクスウェル分布とはならず、波動などが存在し基本的に不安定である。

次に示す表は、原子のイオン化エネルギーとそのエネルギーに対応する波長を示したものである。

Neutral	eV	nm
C	11.26	110.1
CH <sub>4</sub>	12.55	98.79
CO	14.01	88.49
H	13.60	91.16
H <sub>2</sub>	15.43	80.35
H <sub>2</sub> O	12.62	98.24
He	24.59	50.42
Mg	7.646	162.2
N	14.55	85.33
N <sub>2</sub>	15.58	79.58
NH <sub>3</sub>	10.16	121.9
NO	9.264	133.8
Na	5.139	241.3
O	13.62	91.03
O <sub>2</sub>	12.06	102.8
OH	13.18	94.07
S	10.36	119.7
SO	10.0	124.0
SO <sub>2</sub>	12.34	100.5

表 2: イオン化エネルギーと対応した光の波長

このような値を元に、地球大気中の光化学反応によって、太陽からの放射が吸収される高度を波長と対応付けしたものが次の図になる。各波長での光学的深さが 1 となる高度を見ると、階段状に 2 つか 3 つ段差があるようないくつかの特徴がある。それぞれ高い方から、200 km 弱に F 層の O 原子などの光解離が、約 100 km では E 層の O<sub>2</sub> や N<sub>2</sub> の分子の光解離が、30 km 近辺にはオゾン層：酸素の解離が見られる。

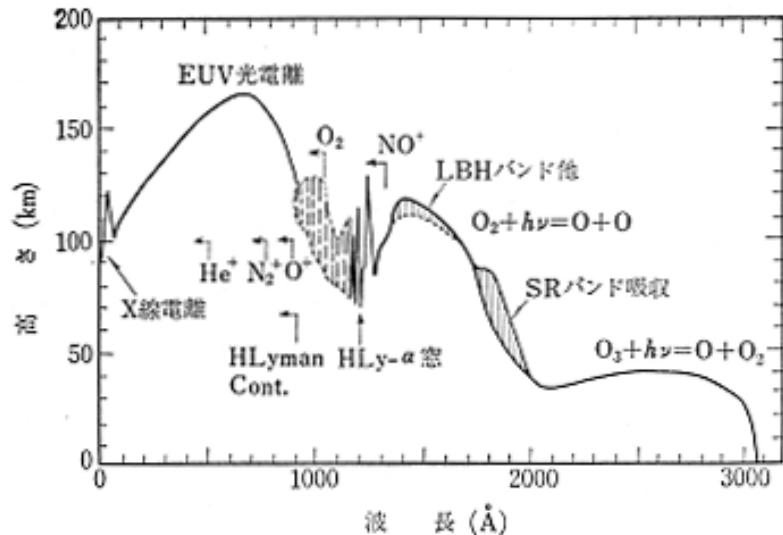
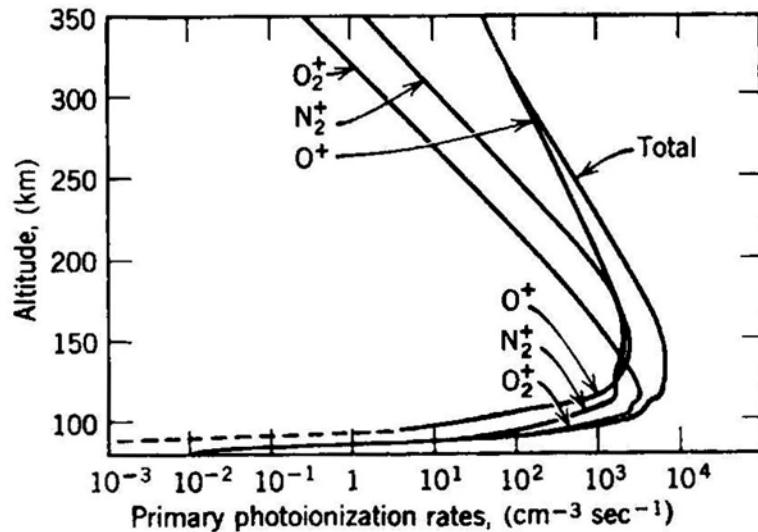


図 6: 太陽光吸収高度と生成イオン



また、光化学反応の結果、各イオンの高度ごとの生成率をモデルによって計算した結果が下の図である。

O<sub>2</sub> は解離して高度 100 km 付近に 100–200 nm の光を吸収し生成し、100 km 以上の高度から O が増えていくことがわかる。

一方で、上層大気を解離させるエネルギーの高い光の強度を見てみる。太陽からの大気を電離させる 100nm より短い波長の光は黒体放射から大きくずれている。無数の輝線がざくざくと存在し(上図)，太陽活動 11 年周期の変動をみると可視光域はほとんど変化しないが、EUV, X 線は 10–100 倍変化する(下図)。

また、日毎にも突然変化することが知られており、これによって高度 100km のイオンが一桁増える。

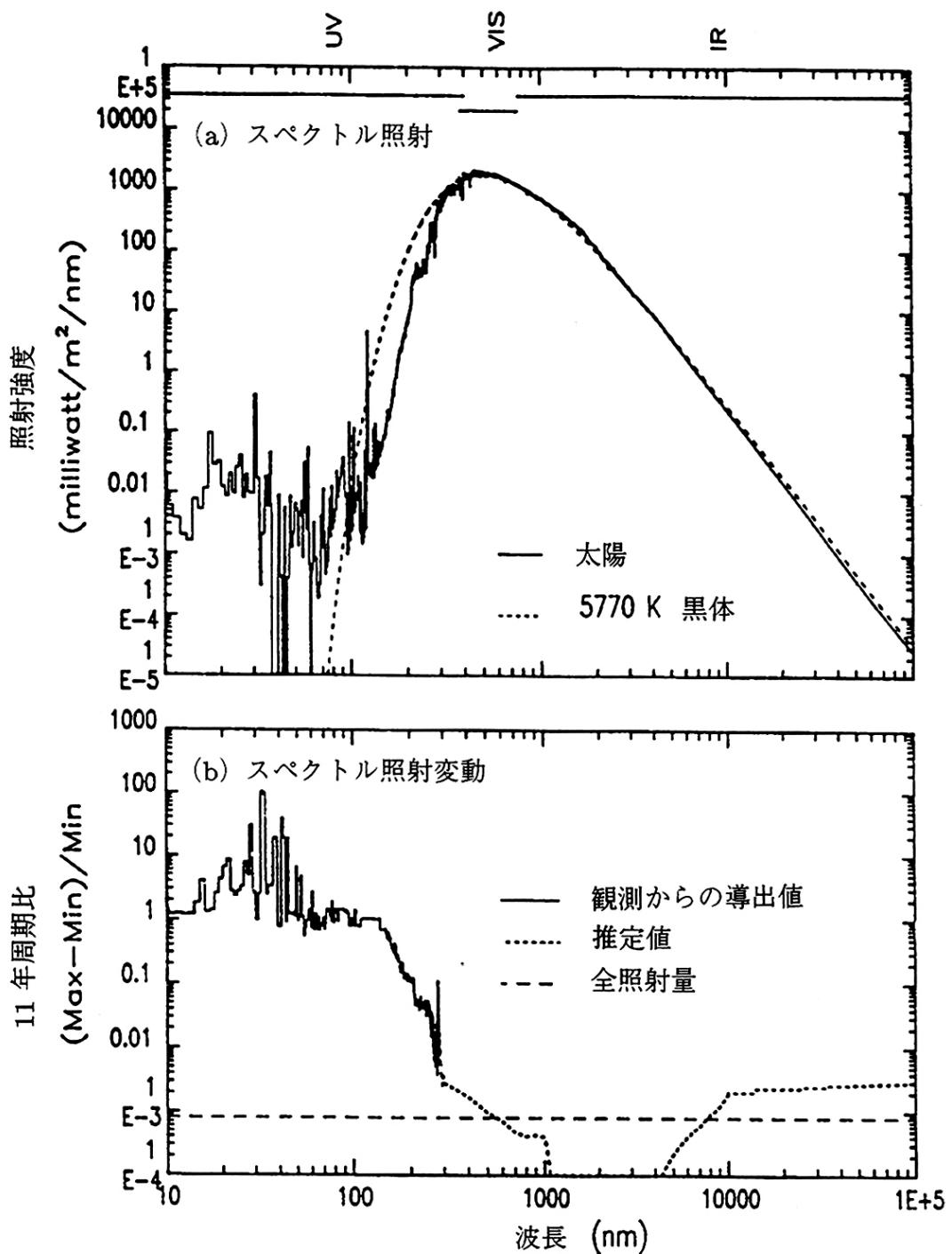


図 8: 短波長域を含む太陽スペクトル(上)と勝者強度の 11 年変動振幅

## DAILY SUNSPOT AREA AVERAGED OVER INDIVIDUAL SOLAR ROTATIONS

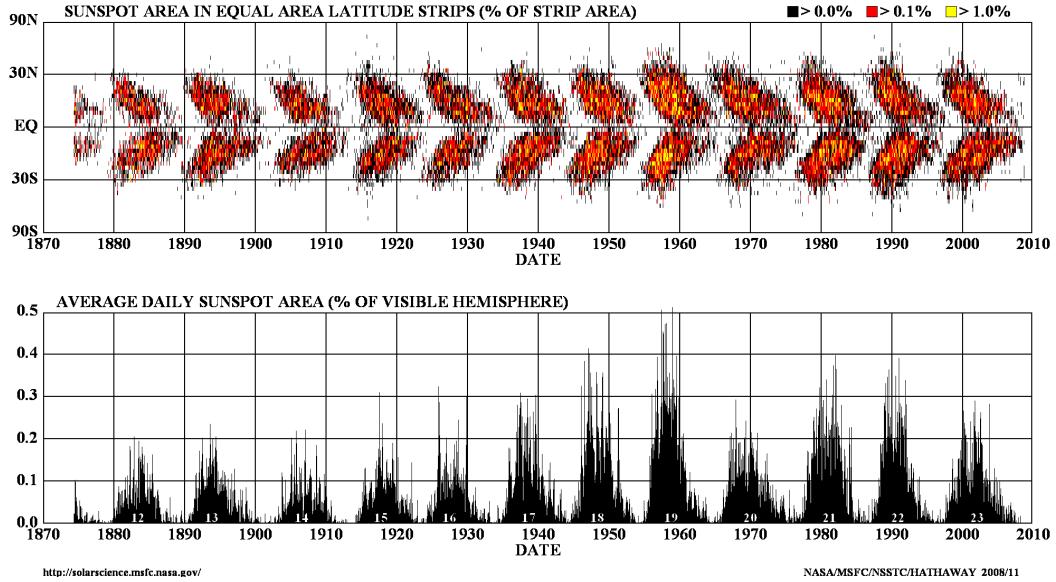


図 9: 太陽黒点の 11 年変動(上: 黒点数の分布変化, 下: 黒点面積)

太陽からの紫外線や X 線量は太陽黒点数と比較され、黒点の存在する場所と EUV の強い場所には相関があるとわかっている。このことから太陽活動のモニターには、黒点数が長い間利用されてきた。

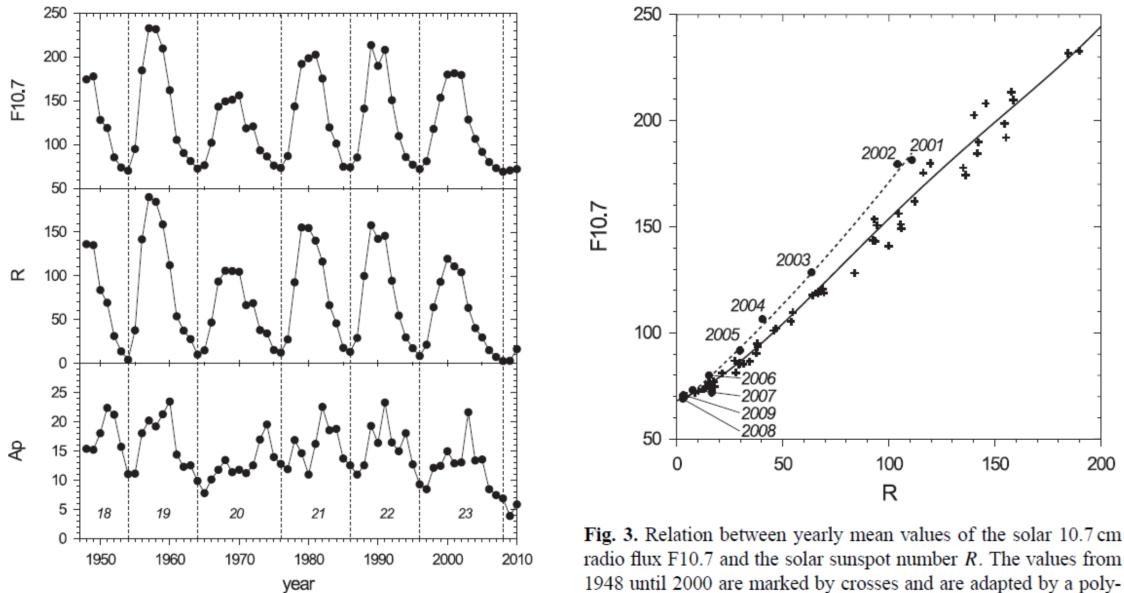


Fig. 2. Long-term variation of solar 10.7 cm radio flux  $F_{10.7}$ , solar sunspot number  $R$ , and geomagnetic  $Ap$  value. The vertical dashed lines mark the boundaries of the different solar cycles.

図 10: 太陽黒点数と  $F_{10.7}$  の対応関係

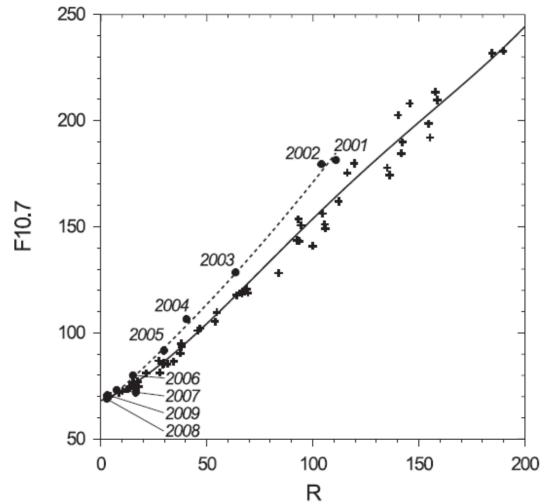


Fig. 3. Relation between yearly mean values of the solar 10.7 cm radio flux  $F_{10.7}$  and the solar sunspot number  $R$ . The values from 1948 until 2000 are marked by crosses and are adapted by a polynomial fit of fourth order (continuous curve); the values from 2001 until 2009 are marked by full dots and are adapted by a polynomial fit of second order (dashed curve).

近年では、10.7 cm の波長を持つ電波の強度が黒点数と非常に良くあうことが知られるようになり、黒点を数えるのが人間に依存するため、 $F_{10.7}$  と呼ばれるこの電波強度が指標になっている。

ただし、なぜF10.7と黒点数に相関があるかは不明。

なおAPとは、地球の緯度50–60ぐらいに置かれた13, 14点ほどの磁力計をもちい、毎日地球磁場を測定結果の日平均からの偏差を示したものである。オーロラが出たりすると電流が流れて磁場が強く変化し、オーロラなどで強い電流が流れたという証拠となる。単位は[nT]（ナノテスラー）

## 放射再結合



## 解離再結合



## 電荷交換反応



電離圏での物理が複雑となる理由の一つに、イオンがとても活性が強い、つまり反応が非常に早いことがあげられる。

これを見ると、 $\text{O}^+$ ,  $\text{O}_2^+$ や $\text{NO}^+$ は他に比べて反応時定数が長いことがわかる。また $\text{N}_2$ は反応しやすくあまり残らない。ここで書かれている温度とは、一般に実験室での測定に際しての実験室のガスの温度（電荷交換反応の場合）だが、これは研究（論文）によってまちまちである。

この説の最後に地球と他の惑星との比較を簡単にまとめる。

### 〈地球〉

N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, H, He が特徴としてあげられる

E層の分子イオン, F層のO<sup>+</sup>, 高度の高い方には, H<sup>+</sup> He<sup>+</sup>が存在する。

より高度が高くなるとプラズマポーズと呼ばれる, 分布密度が急激に低下する場所がある(宇宙空間に散逸している)。

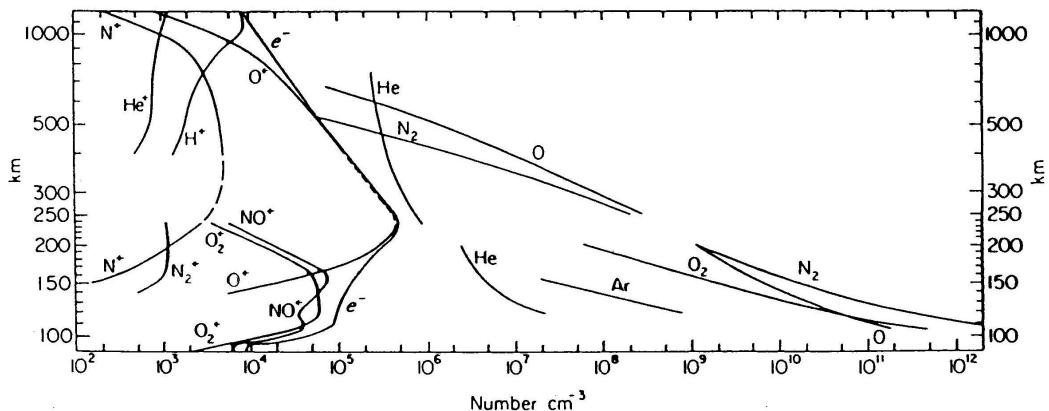


図 4 再掲

### 〈金星〉

金星の電離圏は Pioneer Venus によって初めて測定され, 地球同様電離圏があることがわかった。高度 100km まで測定されており, 地球とそっくりな反面, CO<sub>2</sub><sup>+</sup>, C<sup>+</sup>が存在する。電離圏として非常に発達しており, 密度のピークは 10<sup>5</sup>, 6 /cm<sup>3</sup> 図には示されていないが, もっと低い高度まで行くと CO<sub>2</sub><sup>+</sup>のピークがある。金星のO<sup>+</sup>は CO<sub>2</sub> から作られたもので, 高度が 100km より上がると紫外線で CO<sub>2</sub> が解離する。高度 200km 以上になると主成分は O となり, O<sub>2</sub><sup>+</sup>も反応の時間スケールが遅いため残っている。夜の電離層の主成分は O<sub>2</sub><sup>+</sup>, O<sup>+</sup> でしっかりと存在しているが, 自転遅い金星で何故このようなことが起こるかはこの講義の後半に取り上げられる。

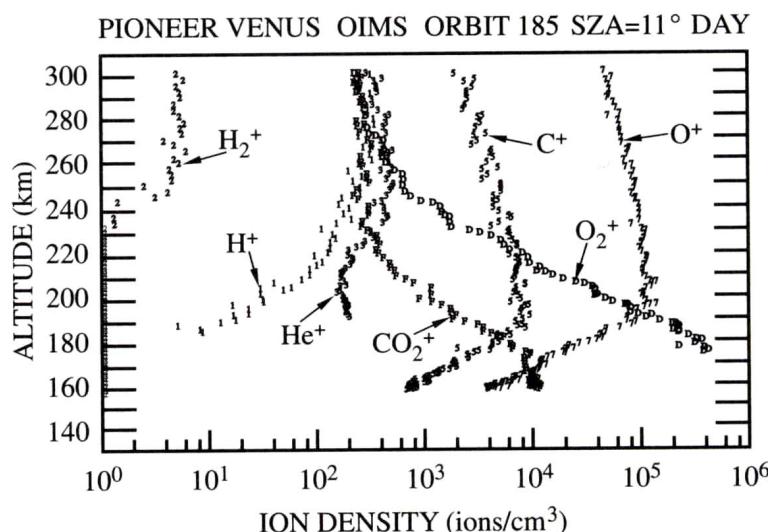
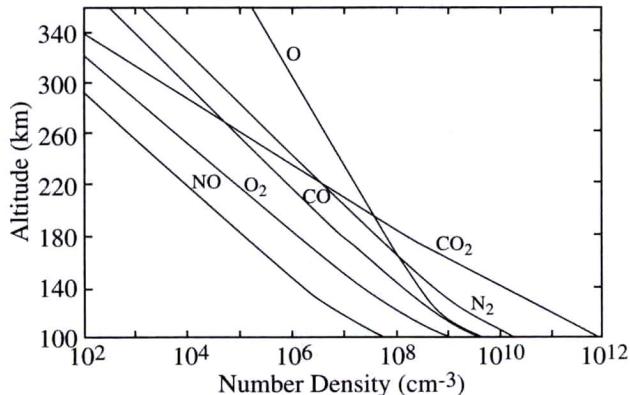


Figure 2.21 Measured ion densities in the Venus dayside ionosphere.<sup>26</sup>

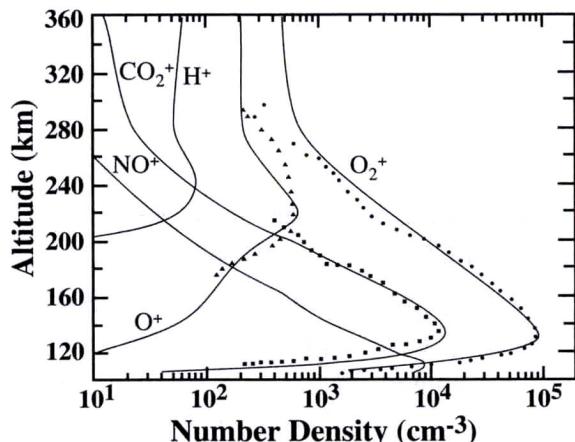
図 12: 金星でのイオン密度分布

### 〈火星〉

火星では、バイキングによる観測があり、O<sub>2</sub>+メインの電離大気が観測された。太陽光が地球や金星と比べると弱いため、あまり発達した電離圏をもってはいない。



**Figure 2.22** Representative neutral gas densities at Mars.<sup>31</sup>



**Figure 2.23** Measured and calculated ion densities for the dayside ionosphere of Mars.<sup>31</sup>

図 13: 火星でのイオン密度分布

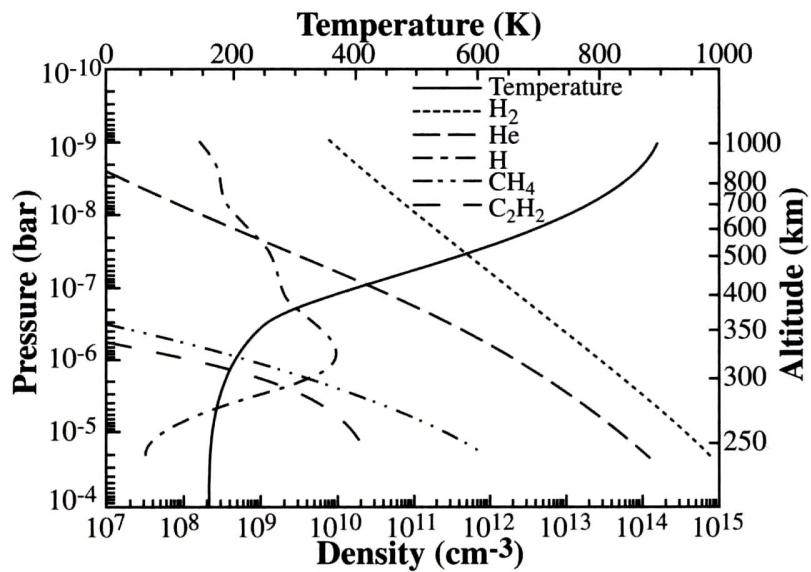
なお、衛星で計測されるイオン密度は1,2桁程度測定エラーがあるはずで、特に質量数の低い水素や酸素と炭素の分離は難しいと想像される。地球型惑星すべてで高度100 kmに分子イオンのピークがあるのは、一瞬不思議にも思われるが光学的厚さでおおよそ一意に決まるものであろうと予想される。

### 〈木星〉

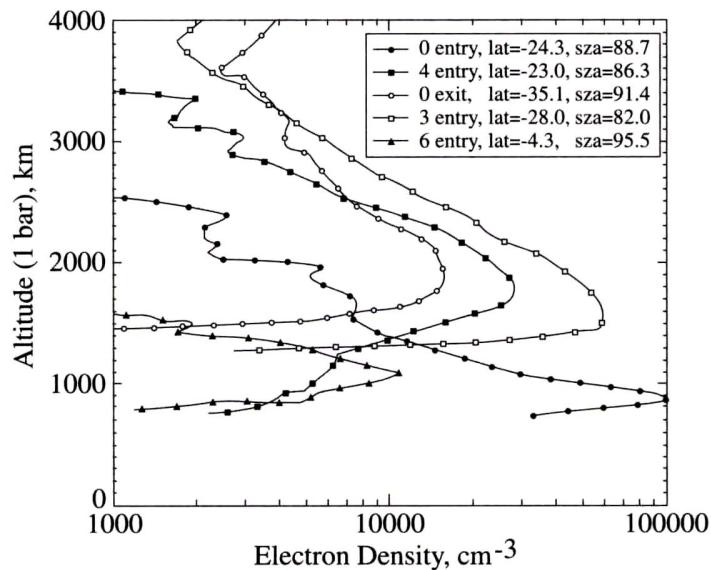
木星にはイオン密度の直接計測がないが、掩蔽観測による結果から以下の図が得られている（1気圧を0kmとしている）。木星は火星以上に太陽放射が小さいはずなのに、電離層が非常に発達していることがわかる。観測は赤道付近で行われたため、これが何故かは未だに解明されていない（オーロラなどは関係ないはず）。

物質としては水素がメインと思われ、H<sub>2</sub>解離 H<sup>+</sup>, H<sub>2</sub><sup>+</sup> また H<sub>3</sub><sup>+</sup>の可能性がある（H<sub>3</sub><sup>+</sup>は反応の時定数わかっていないが比較的長いのでは？）。

メタン起源のCとHの結合物質がイオン化したものも想像される。このような物質は反応のタイムスケールが長く、すでにタイタンでは見つかっている。何れにしても木星には電離層があることは間違いない、またこれは激しく変動している。



**Figure 2.24** A model of Jupiter's atmosphere, showing neutral gas densities and temperatures. (Courtesy of Tariq Majecd.)



**Figure 2.25** Galileo radio occultation measurements of ionospheric electron densities at Jupiter. (Courtesy of A. J. Kliore.)

図 14: 木星でのイオン密度分布

〈その他〉

他の惑星や衛星（土星、イオ、タイタン）などでも電離圏の観測がカッシーニなどの探査機によって観測されている。（講義ノートでは割愛する。）

## 1.2 Dynamics (力学)

この節では電離圏でのイオンや電子の運動について考察し、その結果どのような現象が起こっているのかを見てゆく。基本的な粒子の電磁気的運動に関するることは適当な専門書を参照してもらうとして、まず、簡単に電離圏におけるイオンや電子の運動について述べる。

電離圏における粒子の運動を考える上で重要なものは、磁場の影響である。ある領域に磁場がかかっていると、イオンや電子はラーマー運動をし、磁力線周りにラーマー半径の円運動をする。この時の周波数はサイクロotron周波数と呼ばれ、これは粒子の質量と電荷で決まる。磁力線に平行の方向に外力を受けなければ荷電粒子は円運動するが、そうでない場合は磁力線周りを螺旋運動する。

また、この螺旋運動に電場がかかると、電場と磁場の外積の方向に全体がドリフト( $E \times B$  ドリフト)する。(下図) この電場によるドリフトは、実際は電場ではなくある外力の場合にも外力と磁場の外積の方向にドリフト( $F \times B$  ドリフト)する。

しかし、重要な点はイオンと電子でドリフト方向が異なることで、イオンと電子が逆方向に流れるため電流が発生することにある。

$$O^+ (B=10^{-5}T, E=10^{-3}V/m)$$

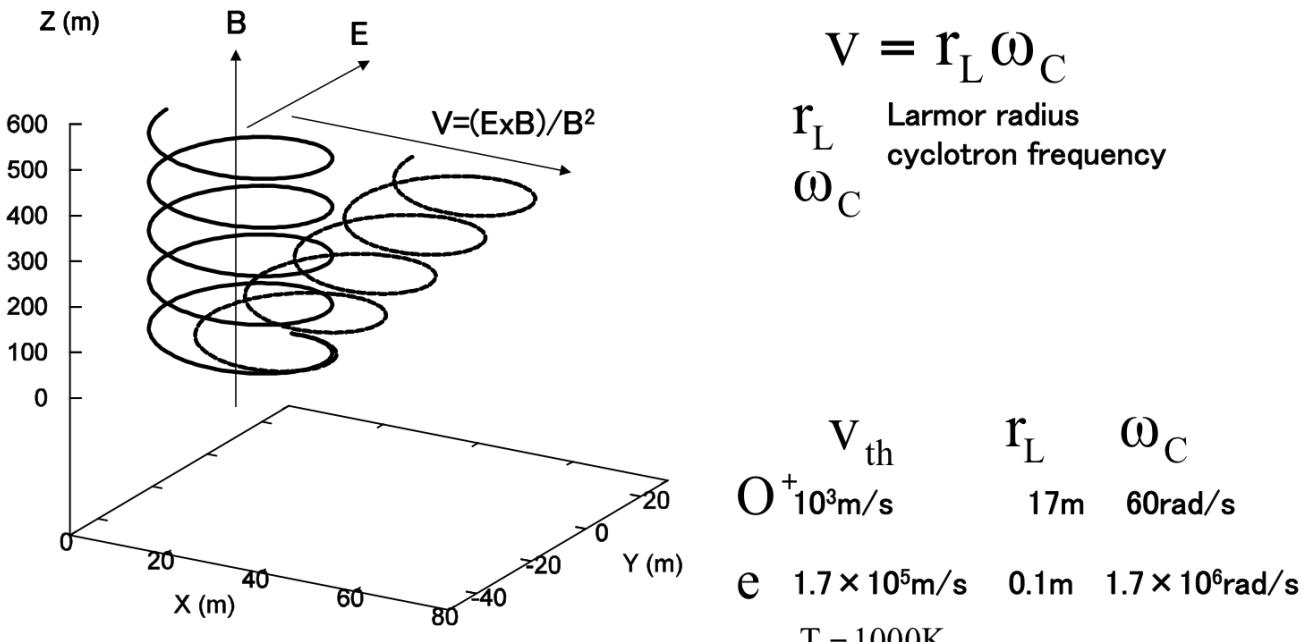


図 15: 電場(外力)によるイオン・電子の螺旋ドリフト

電流が流れると新たな磁場を生成するが、地球や木星、土星、天王星、海王星といった磁場が強く安定している惑星の場合、たとえドリフトによる電流が発生したとしても元の磁場への影響は小さいと考えられるため、現在の研究ではあまり考慮されていない。一方で、電流による電場の発生は、 $E \times B$  ドリフトに変化を生じさせるため、 $E \times B$  ドリフトと  $F \times B$  ドリフトの間で相互に作用すること

が地球について明らかになってきている。地球の場合の外力  $F$  に相当するものは重力であり、重力と磁場の外積が大きくなる磁気赤道でもっともこの効果が大きい。他の惑星でも、例えば自転が早い木星の遠心力による効果などのように、同類の効果が期待されるが地球以外の惑星についてはそういうデータは今のところ存在しない。

実際にどの程度の電流がながれるのかということについては、荷電粒子の運動方程式を粒子間の衝突頻度(スケールハイト)によって場合分けして求めることができる。委細は省略するが、イオンと電子の速度からそこに流れる電流  $J$  は以下の通りであると考えられる。

$$\mathbf{J} = en(\mathbf{V}_i - \mathbf{V}_e)$$

$$\Omega_i \gg \nu_{in}, \quad \Omega_e \gg \nu_{en} \quad \mathbf{J} \approx en \left( -\frac{\nabla p_i}{nm_i \Omega_i} - \frac{\nabla p_e}{nm_e \Omega_e} + \frac{\mathbf{g}}{\Omega_i} \right) \times \frac{\mathbf{B}}{B} \approx 0$$

$$\left[ \frac{\nabla p}{nm\Omega} \approx \frac{nkT}{nm\Omega H} \approx V_{th} \frac{r_L}{H} \right]$$

$$\Omega_i < \nu_{in}, \quad \Omega_e > \nu_{en} \quad \mathbf{J} \approx en \left( \mathbf{u}_n - \frac{\mathbf{E} \times \mathbf{B}}{B^2} \right)$$

$$\Omega_i < \nu_{in}, \quad \Omega_e < \nu_{en} \quad \mathbf{J} \approx 0$$

これによると、高度の低いところは  $J=0$  で電流は流れないと考えられるが、上方になると電流が流れる。この領域の事をダイナモ領域 (Current layer) という。

## 電流層 地球の熱圏下部・中間圏に存在するダイナモ領域

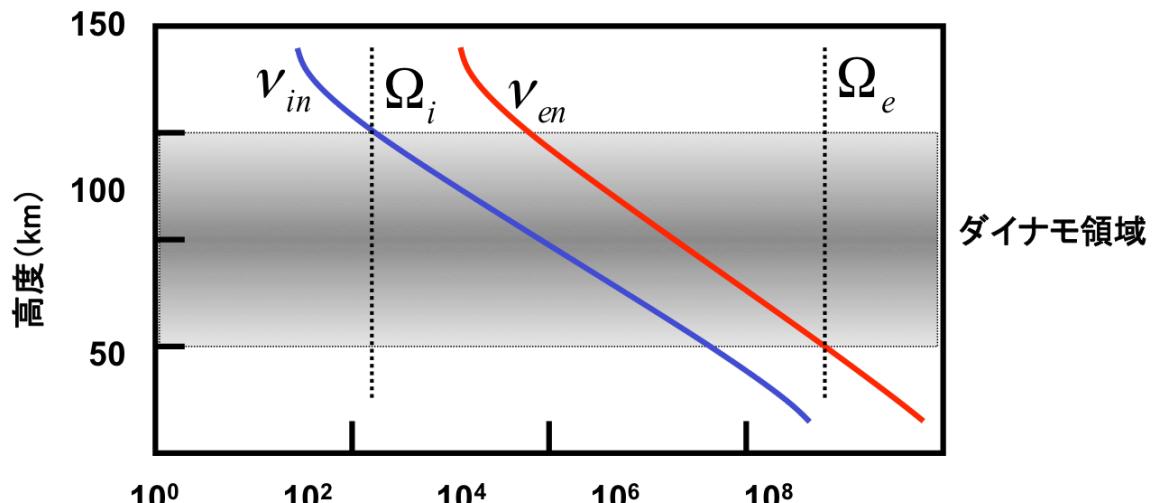


図 16: ダイナモ領域

実際にこの電流を観測しようとする場合、ロケットによる磁場の変化を測定し  $\text{rot } \mathbf{B} = \mathbf{J}$  から電流量を調べることができる。その結果が次の図であり、高度 100 - 110 km に厚さ 10 - 20 km の層があることがわかる。

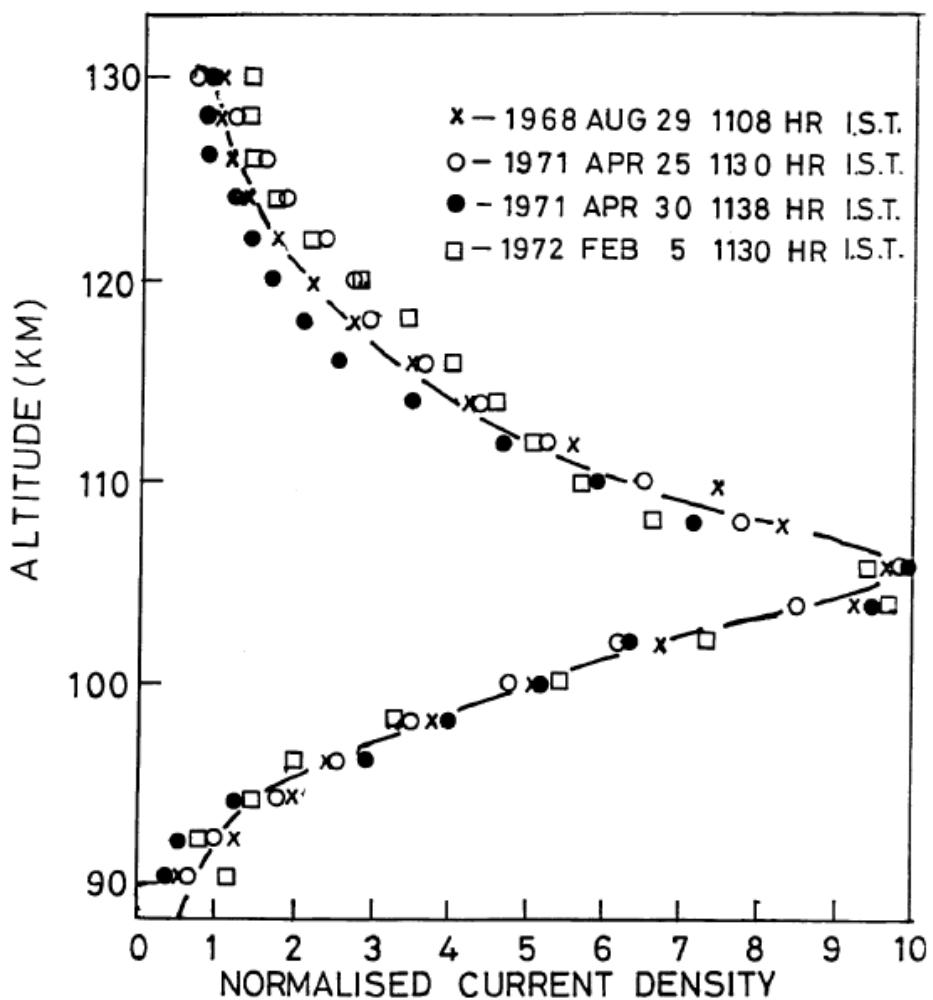


Fig. 6. The vertical distribution of the equatorial electrojet current density measured during four midday flights from Thumba, plotted  
図 17: ロケットによる電流層の観測  
line shows the average distribution (after Sampath and Sastry, 1979a).

電流がわかると大気の導電率を求めることができる。各方向の導電率はペダーセン(磁力線に垂直電場方向), ホール(磁力線に垂直  $E \times B$ ), 平行(磁力線方向)と呼ばれる。

## 導電率

$$\sigma_P = \frac{en}{B} \left( \frac{\nu_{in} \Omega_i}{\nu_{in}^2 + \Omega_i^2} + \frac{\nu_{en} \Omega_e}{\nu_{en}^2 + \Omega_e^2} \right)$$

ペダーセン

$$\sigma_H = \frac{en}{B} \left( \frac{\Omega_i^2}{\nu_{in}^2 + \Omega_i^2} - \frac{\Omega_e^2}{\nu_{en}^2 + \Omega_e^2} \right)$$

ホール

$$\sigma_{//} = \frac{en}{B} \left( \frac{\Omega_i}{\nu_{in}} + \frac{\Omega_e}{\nu_{en}} \right)$$

平行

導電率を計算すると、高度 100–130km 付近に非常に電気を流しやすい部分があり、これはオーロラに伴う電流が流れる領域である。特徴として、ペダーセン ( $\sigma_2$ ) とホール ( $\sigma_1$ ) で導電率ピークに微妙なズレがあり、また平行の導電率で磁気圏と電離圏がつながっている。この結果オーロラ付近では複雑な電流系が形成されている。

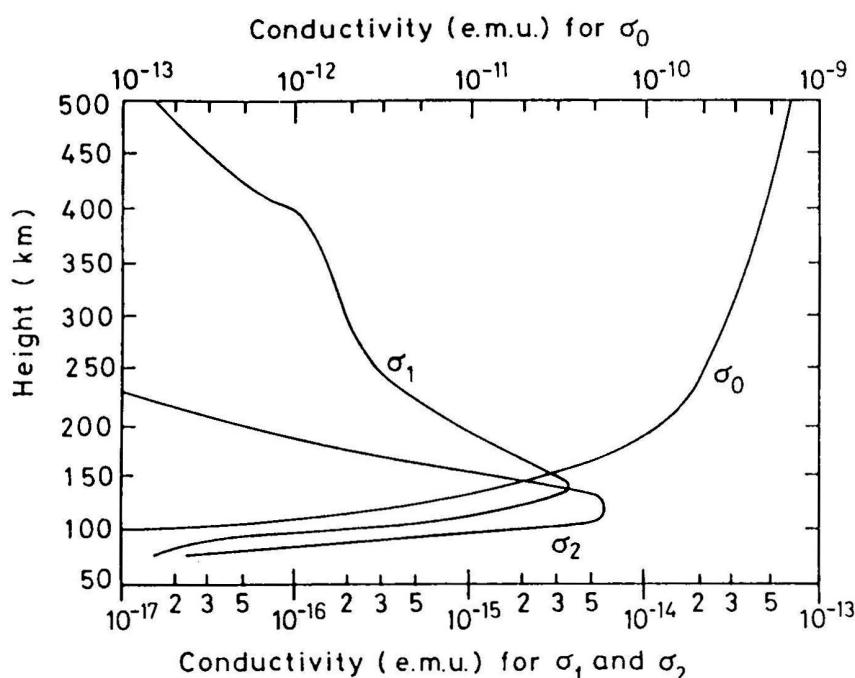


Fig. 6.23 Conductivity profiles calculated for middle latitude at noon. (S.-I. Akasofu and S. Chapman (after K. Maeda and H. Matsumoto), *Solar-Terrestrial Physics*. Oxford University Press, 1972. By permission of Oxford University Press)

図 18: 導電率の高度プロファイル

熱圏では、昼から夜に向けて風が吹いているが、これによってダイナモ電場と呼ばれる電場が生成される。次の模式図には昼から夜に向けて流れる風が $u_n$ で示されている。この風によって赤道では、昼側は明け方から夕方の方向に、夜側ではその逆の電場がかかる。これを電離層電流といい、SQ電流系(平時)、SD電流系(イベント時)という名前がついていて、全体として大きな電流系を形成し太陽風とつながっている。

# ダイナモ電場の生成

## - E-Region Dynamo -

$$\mathbf{J} \approx en \left( \mathbf{u}_n - \frac{\mathbf{E} \times \mathbf{B}}{B^2} \right)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = \nabla \cdot \left( en \left( \mathbf{u}_n - \frac{\mathbf{E} \times \mathbf{B}}{B^2} \right) \right) = 0$$

$$\therefore \mathbf{E} = -\mathbf{u}_n \times \mathbf{B}$$

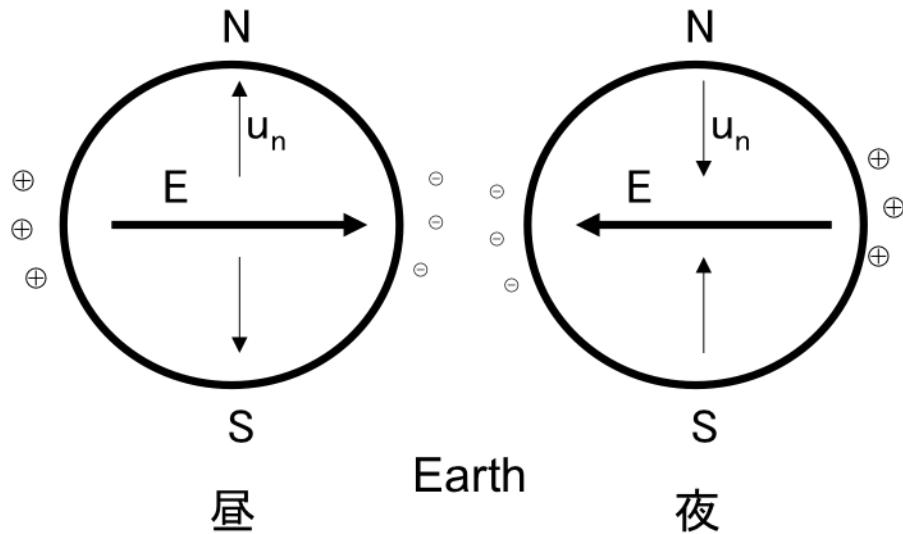


図 19: ダイナモ電場の生成メカニズム

下図は、電離層電流の様子を示した図であるが、この電離層電流によって赤道部に興味深い現象が起こる。下図右上の模式図のように南半球から北半球へ磁気赤道を見たとき、E層ではダイナモ電場が東西方向に、また西から東へ電場北向き磁場がかかっている。その結果  $E \times B$  の方向(高度方向)にイオンや電子が移動するが、電子の方が早く移動するため、最終的に南北方向へ電場がかかる。すると東西方向のもともとあったダイナモ電場Eをさらに大きくする作用をもたらす。

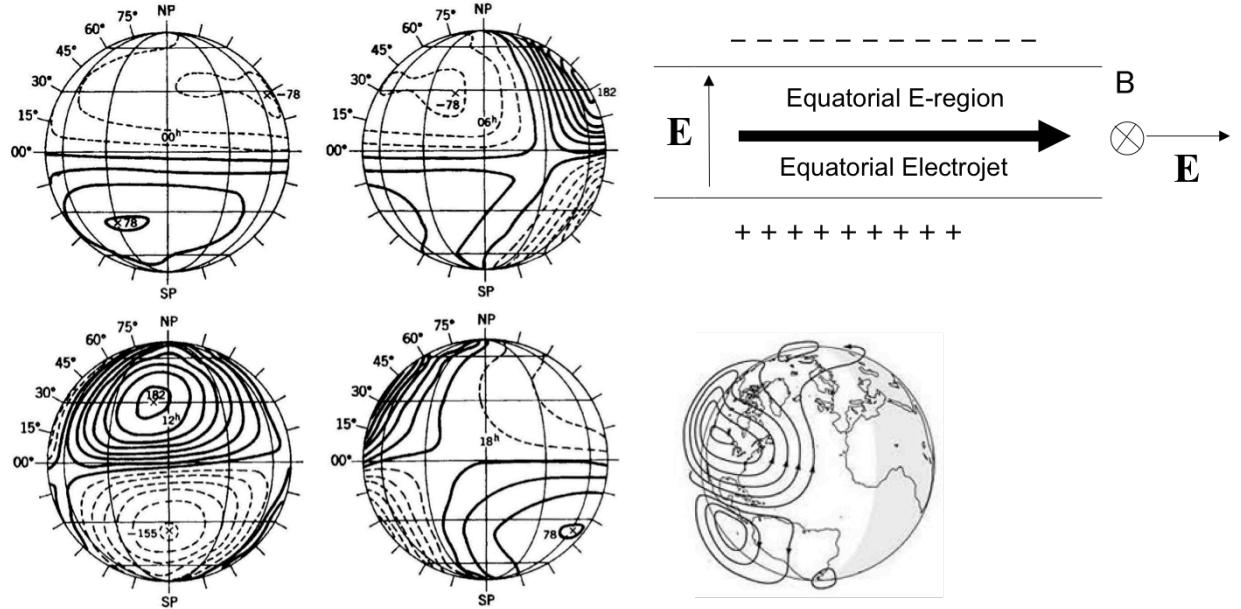


Fig. 7.21. Average mean  $S_q$  (solar quiet) current systems during IGY (International Geophysical Year) viewed from the magnetic equator at the 00, 06, 12, and 18 local time meridians. The numbers near the crosses indicate vortex current intensity in  $10^3$  A. The distance between the current lines corresponds to  $2.5 \times 10^3$  A. (From Matsushita, 1967.)

## 図 20: 赤道異常の観測例

このように、磁気赤道含んで非常に強い電場がE層につよい電場がかかっているはずである。しかし高度100 kmの電場をグローバルに測定することは難しい。

そこで人工衛星を用いて、300–400 kmの高度でイオンのドリフトを測り電場を推定することが行われている。この推定には、高度100 kmでの電場の影響が磁力線を介して高度300–400 kmにもマッピングされるはずだという想定に基づいている。

次のページにある図は Atmospheric Explorer という衛星によるイオンのドリフト速度を観測した結果である。昼のプラスと夜のマイナスの値が示すのは、地球の磁力線に対して昼では上へ、夜では下へ電流が流れていることを示しており、太陽光によって昼間にできたE層が上下方向に変動したものである。

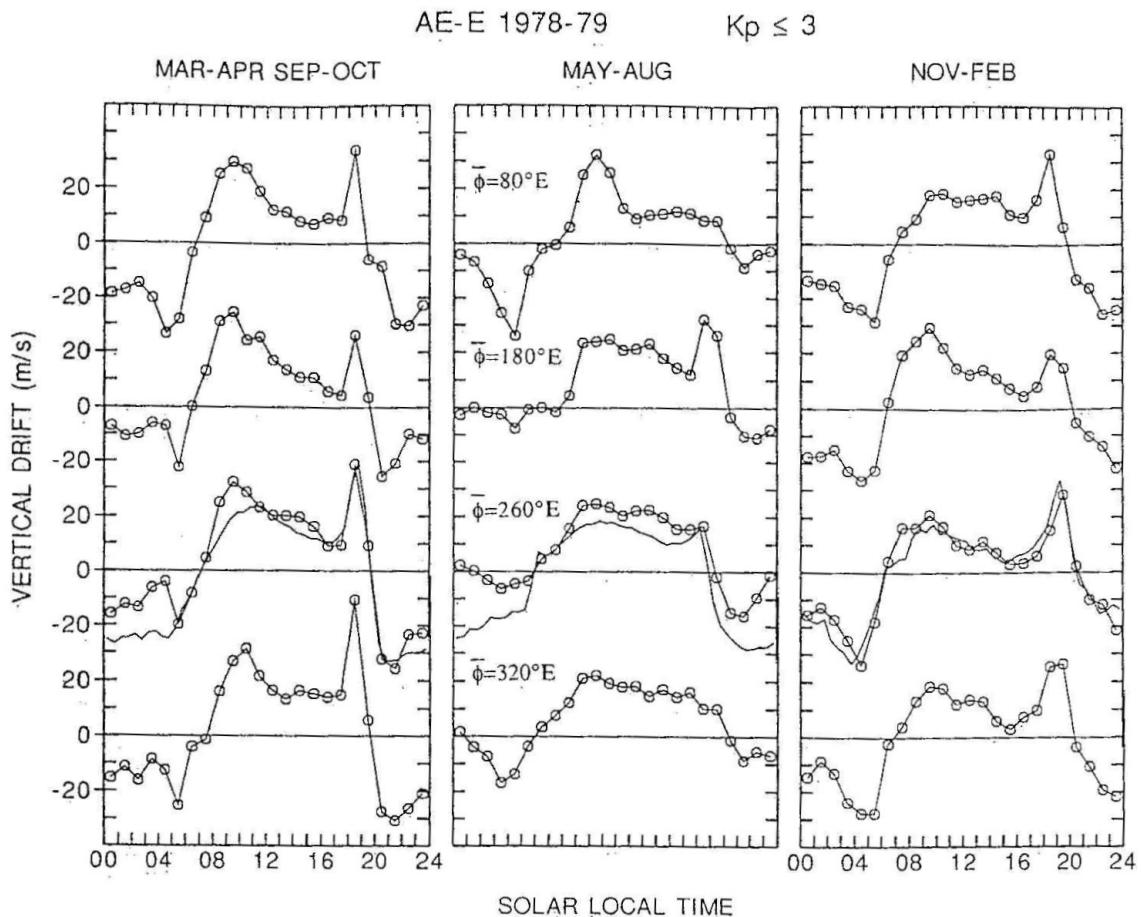


図 21: Atmospheric Explorer による電離層の上下ドリフトの観測

昼間側では赤道に近いほど上に持ち上げられ、そのイオンは磁力線に沿って極側へ落ちてくる。このためイオンが赤道で低密度となり、赤道から離れた緯度帯で高密度となることが起こる。図 24 はこのプラズマ密度の増加を表す模式図である。

その結果おこるプラズマ密度の増加が、赤道異常と呼ばれる現象である。この現象は元々Appleton が船で緯度方向に移動しながら電波の反射実験を行った際に緯度  $10^{\circ} - 30^{\circ}$  付近で電波の反射強度が異常に強くなることを発見し報告したため、Appleton anomaly の名前が付けられていたが、日本の前田憲一先生も同様の研究を独自に行っていたため、現在では世界的に赤道異常 (Equatorial anomaly) の名前が受け入れられるようになっている。

## Equatorial Anomaly (赤道異常: プラズマ密度の増加)

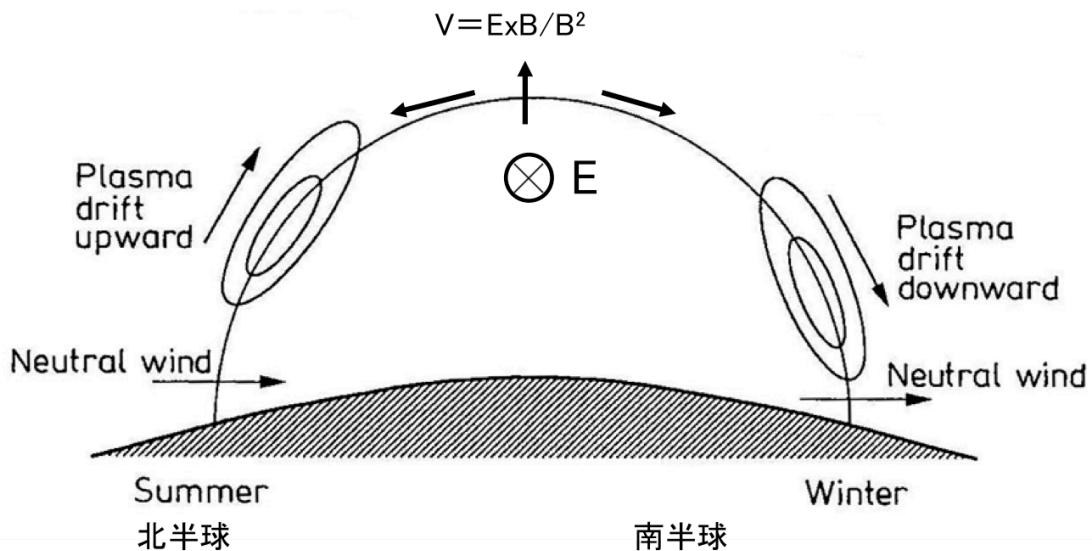


図 22: 赤道異常の概念図

赤道異常の証拠として、アポロが月に行った時に地球の写真を撮ったものがある。630 nm の酸素の発光( $O_+$ と電子)を見た時、夜面の赤道から少しほなれた緯度帯に二つの筋が見える。これが赤道異常によるプラズマの局所的な増加によるものだと考えられている。

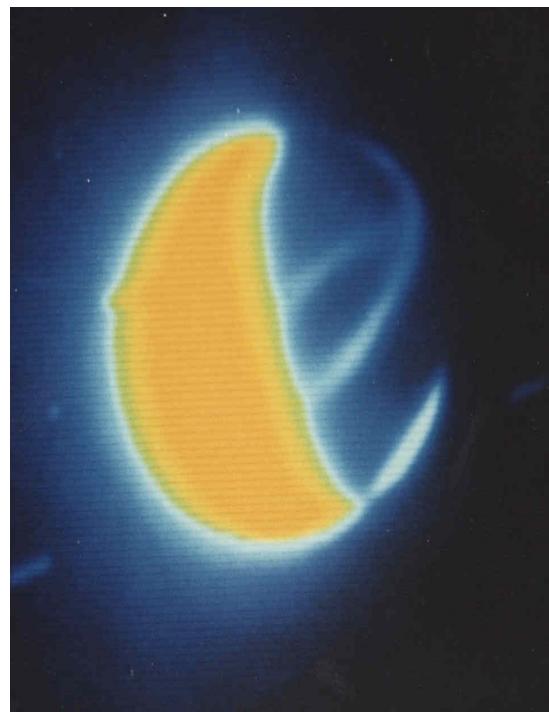


図 23: 酸素の発光からわかる赤道異常

### 1.3 Energetics

高度 500 – 600 km の電子密度と温度をマップした衛星データをみてみる。太陽光によってプラズマができるため、電子密度は昼が高くて夜が低い傾向を持っている。しかしこれと温度を比較すると密度が大きいとき温度が低いという傾向が見られる。また季節の違いに関しても、夏半球側の方が電子密度は高くなる傾向に対して温度は逆相関をもっている。

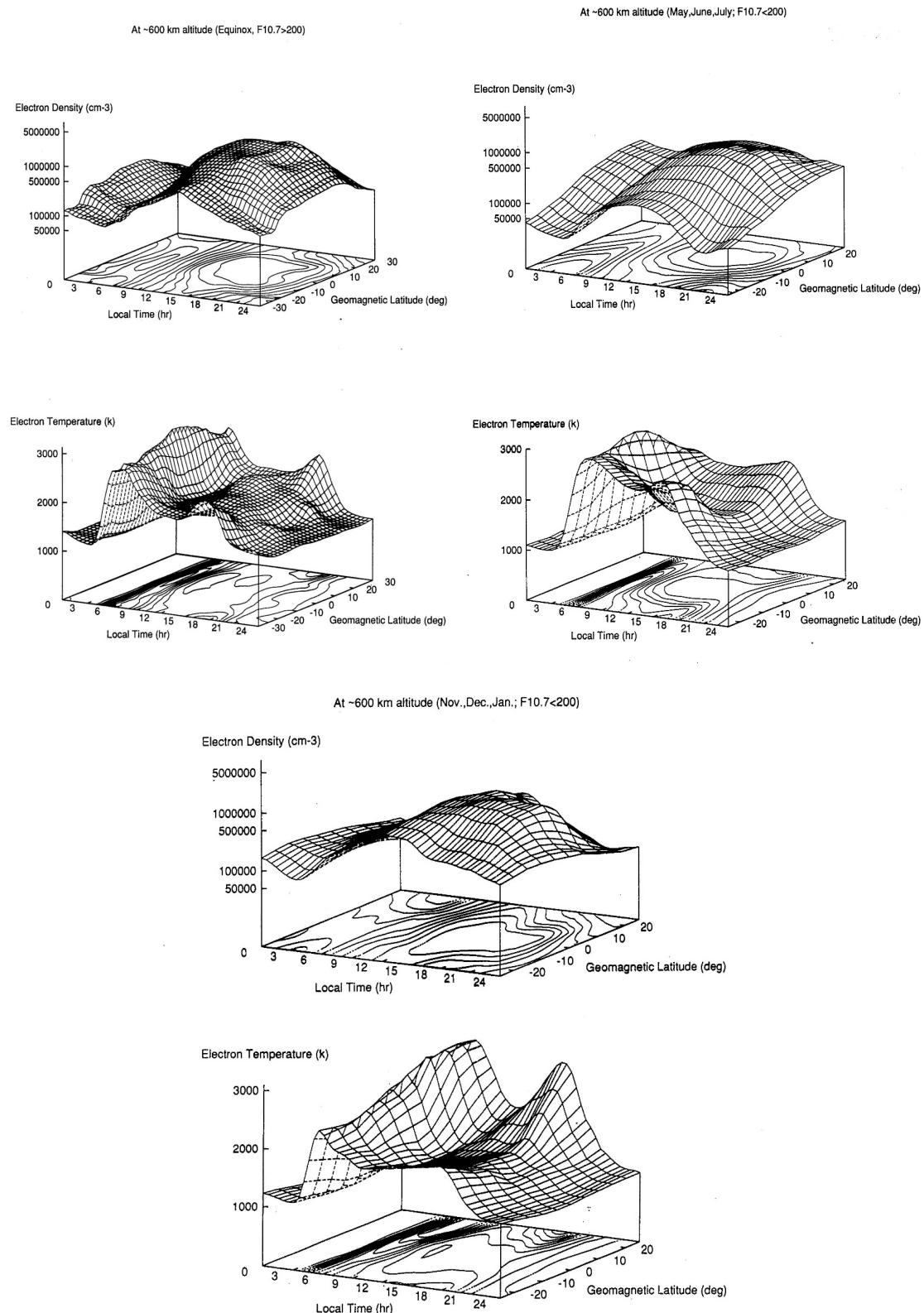


図 24: 高度 500-600 km の電子密度と温度のマップ(各図は季節が異なる)

また、温度に関してはもう一つ特徴がある。下図は電子温度のローカルタイム変化を示しているが、明け方にモーニングオーバーショットと呼ばれる温度が数千度まで上がる特徴がみられる。そもそも電子の温度は、中性大気が太陽光で電離し高度 100–200 km で数 10 eV に光電子が熱化していき、周りのプラズマを温め最終的に数 100 K (エネルギーにして 0.1 eV 以下) になる。このとき周りのプラズマ密度が小さいと温度が上がりやすい。このため、明け方日がそこまで上がってない時にはプラズマ密度小さく効率よく加熱されるため温度が高くなる。昼になるとプラズマ密度が大きくなるため温度が下がってくる。

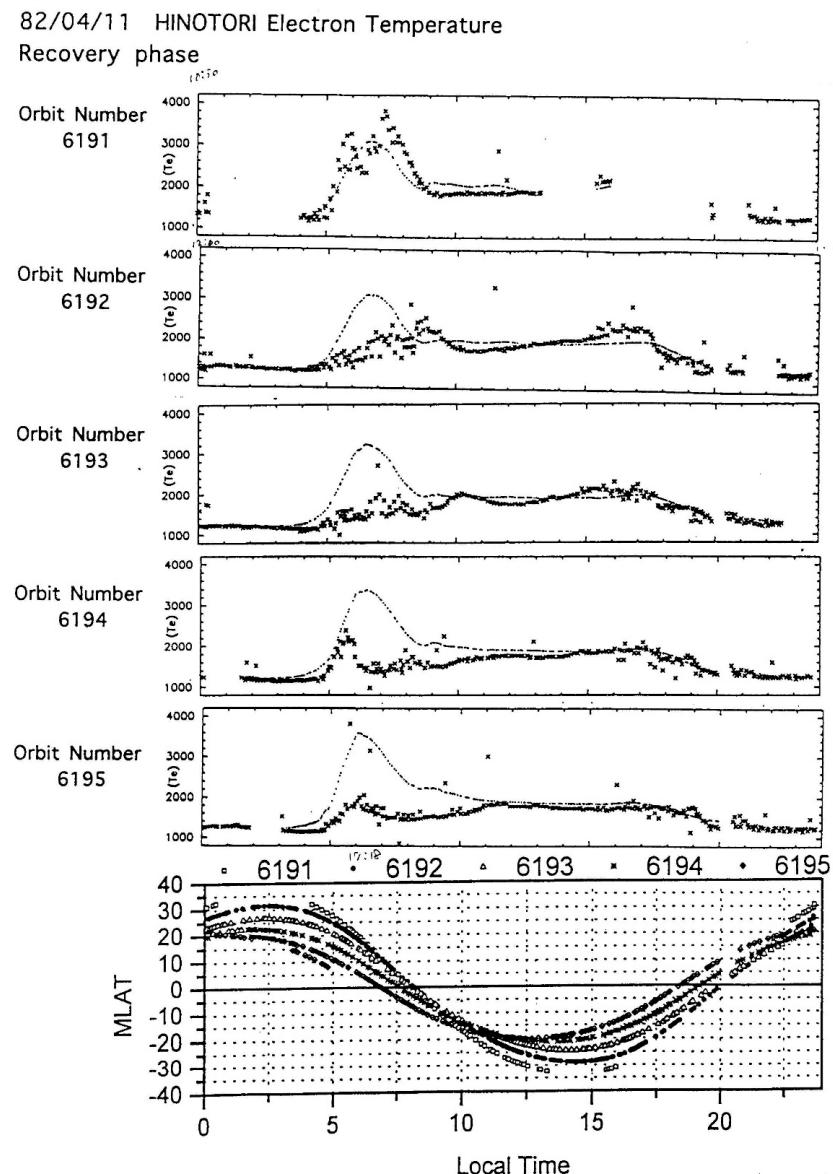
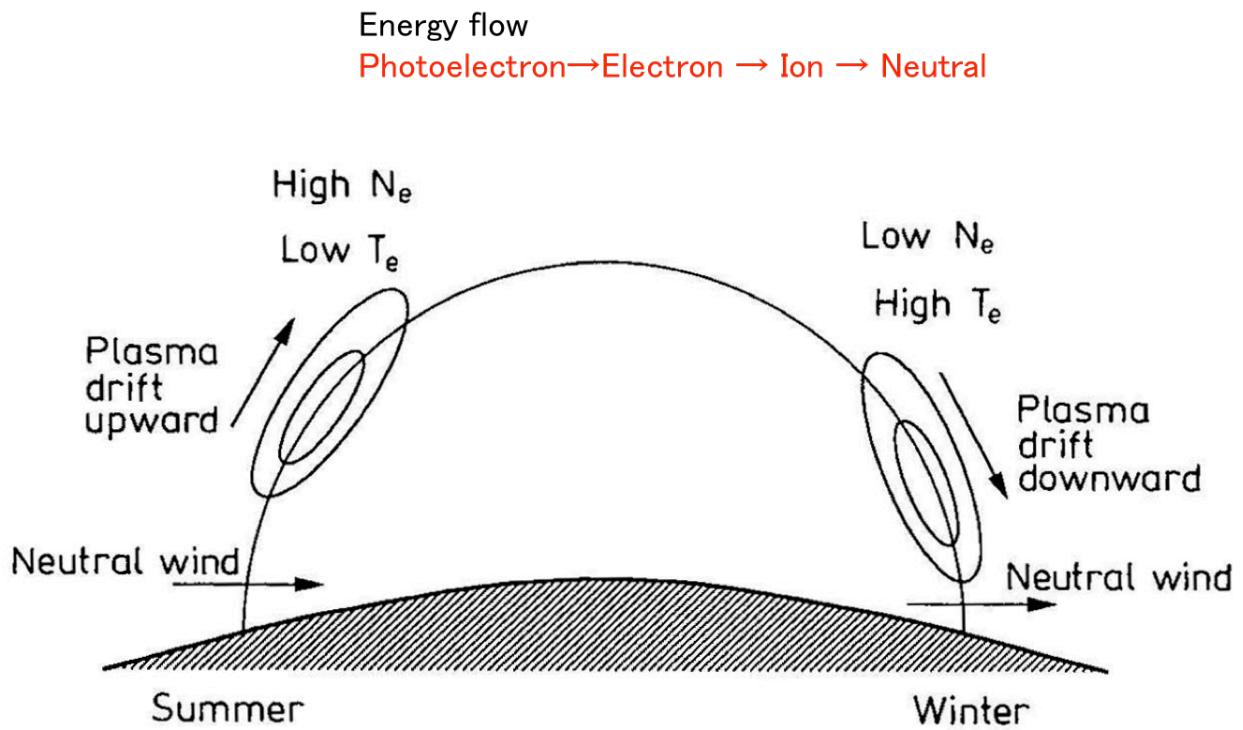


図 25: 電子温度のローカルタイム変化

このような温度のローカルタイム変化の性質は、実際の観測ではその特徴が見えたり見えなかったりする。温度のローカルタイム依存性が見えない時、それは磁気圏の擾乱が起きた結果プラズマのスケールハイトが大きくなり、フォトエレクトロンのエネルギーがより多く分配されてしまったためだと考えられる。

図 24 を再解釈すると、電子のプラズマ加熱は磁力線を介して反対半球まで影響を与えていていることが考えられる。エネルギーの高い粒子プラズマは磁力線に巻きついて夏半球から冬半球へ飛んでいくが、このとき冬半球側は密度が低いためより強く加熱されるというシナリオである。



**Fig. 5.** Schematic illustration of the mechanism responsible for elevating electron temperatures higher in winter than in summer

図 26: 電子密度による温度分布決定の概念図

のことと同じようなことが極域でも起こっている。衛星が赤道から極までパスで電子密度の変化を測定すると、ある緯度で急に密度が減少する領域が存在する。そして、温度に関してはその領域を境に上昇することを示した結果が存在する。このように電離圏の温度は磁力線を介しつつ、密度にもよって決定されている。

しかしながら、最近実際の衛星による観測データでは電子密度と温度の反比例の関係が、密度の高い方で従わないような結果が得られた。図 26 の左は観測データで密度(横軸)の増加に伴って温度が減少していたものが、高密度側で再び持ち上がっている。一方で、図の右側は一方広く利用されているモデルの結果であるが、高密度側部分のデータは意図的に使っていないのでは?とも思われる。(図中の色は緯度の違いを表している)

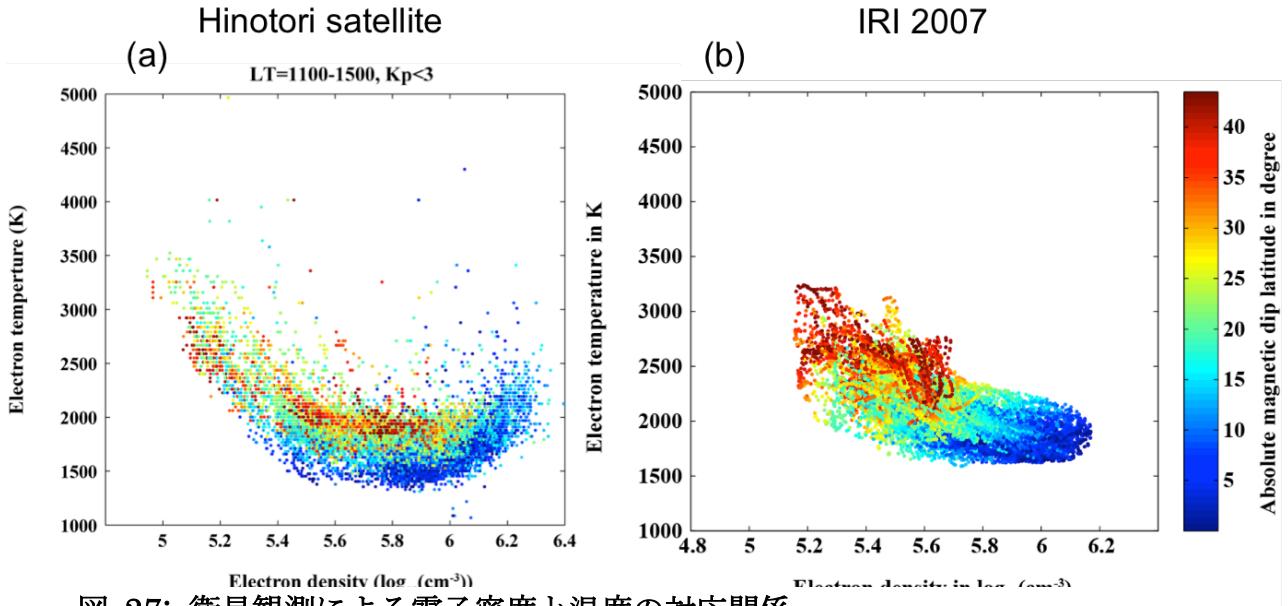


図 27: 衛星観測による電子密度と温度の対応関係

この衛星の結果を支持する結果が地上レーダーのデータからも得られている。(図 27) この観測は電波散乱の具合から電子やイオンの速度分布(酸素 热速度: 1-2 km/s, 風: 数 m=100m/s)を求め、温度を見積もったもので、こちらもやはり高密度側で持ち上がっている様子がわかる。

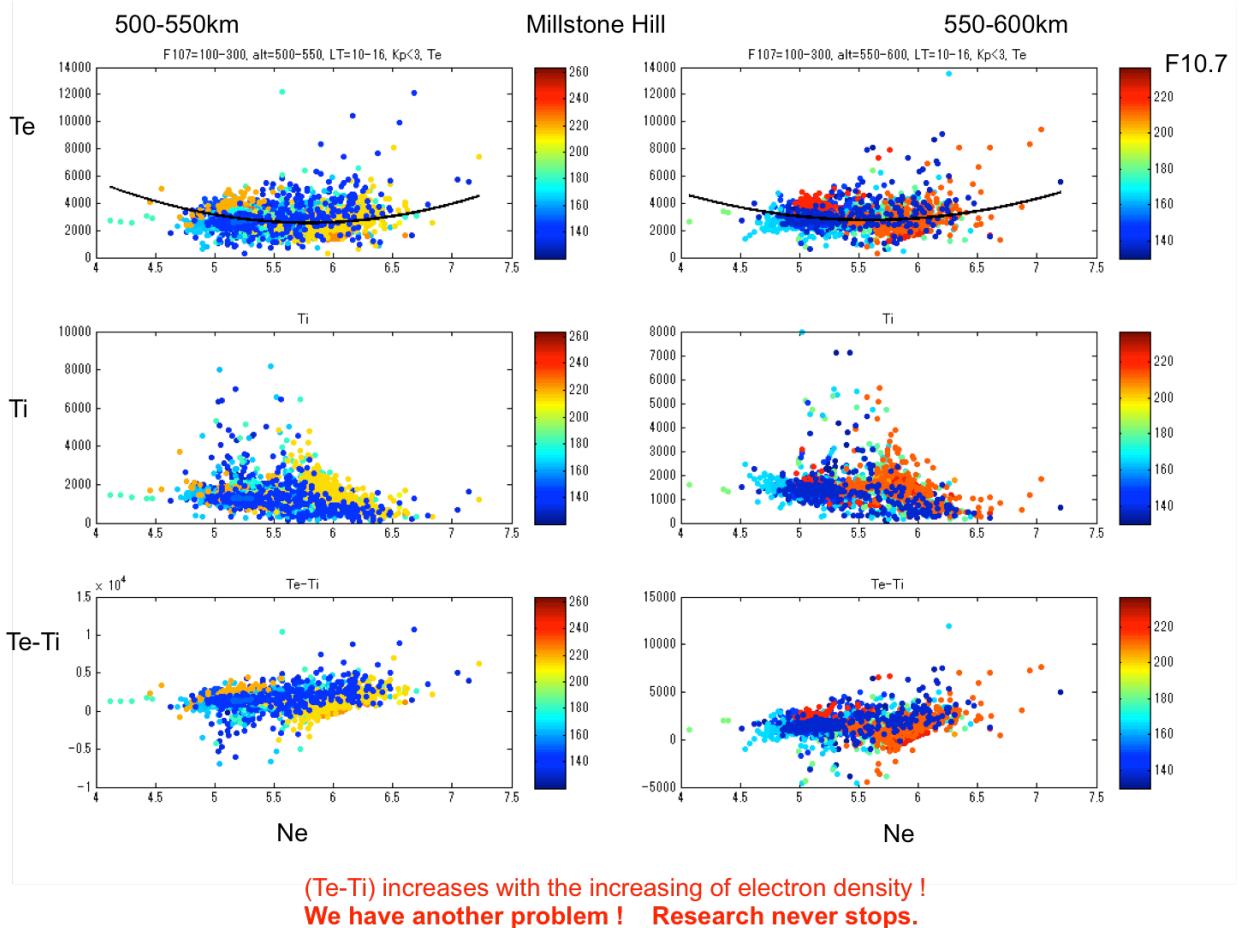
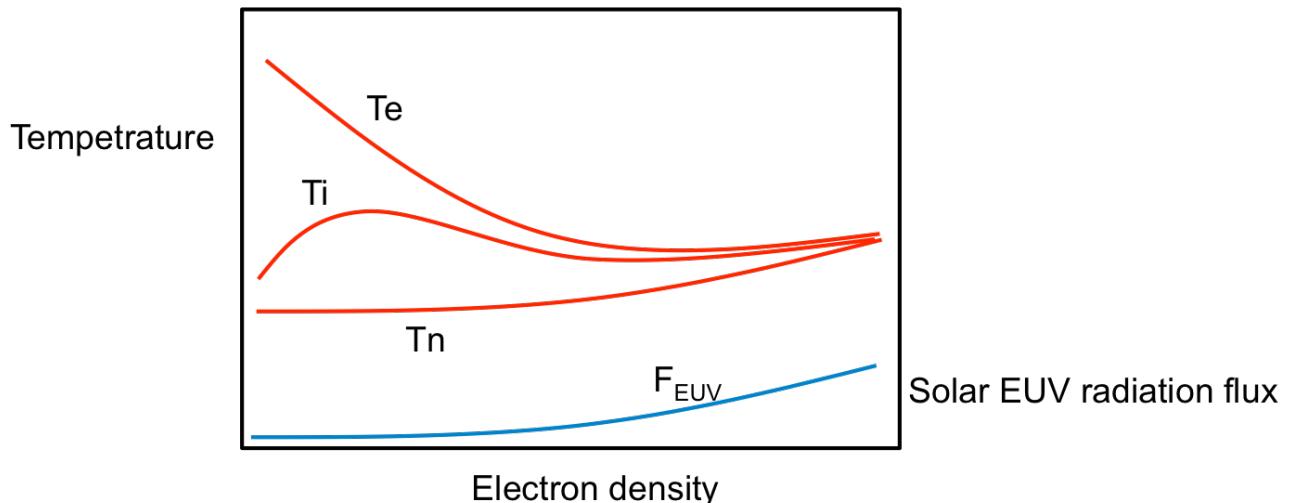


図 27: 地上電波観測による電子密度と温度の対応関係

最終的に電子密度と温度の関係は、図 27 のようになると考へている。

- ・密度が大きいとエネルギーが分配され温度は下がる。
- ・イオンは最初中性ガスとおなじ温度のため、電子の温度よりは低い。
- ・一方、密度上がるということは太陽からのフラックスも増えており、中性大気の温度もあがる。



Electron density	low	→	→	→	→	→	high
Solar radiation flux	low						high
Neutral temperature	low						high
Ion temperature	low		high		low		high
Electron temperature	high		high		low		high
$T_e - T_i$							low

図 28: 電離圏における温度決定の予想

## 1.4 Instability

電離圏不安定が注目されたようになったきっかけのひとつに、人工衛星と地上間で起こる通信の乱れ(GHz 帯や MHz 帯)の原因を調査がある。下図のように唐突に発生するこの電波通信の乱れは、とりわけ赤道付近で多く発生するという特徴をもっていた。

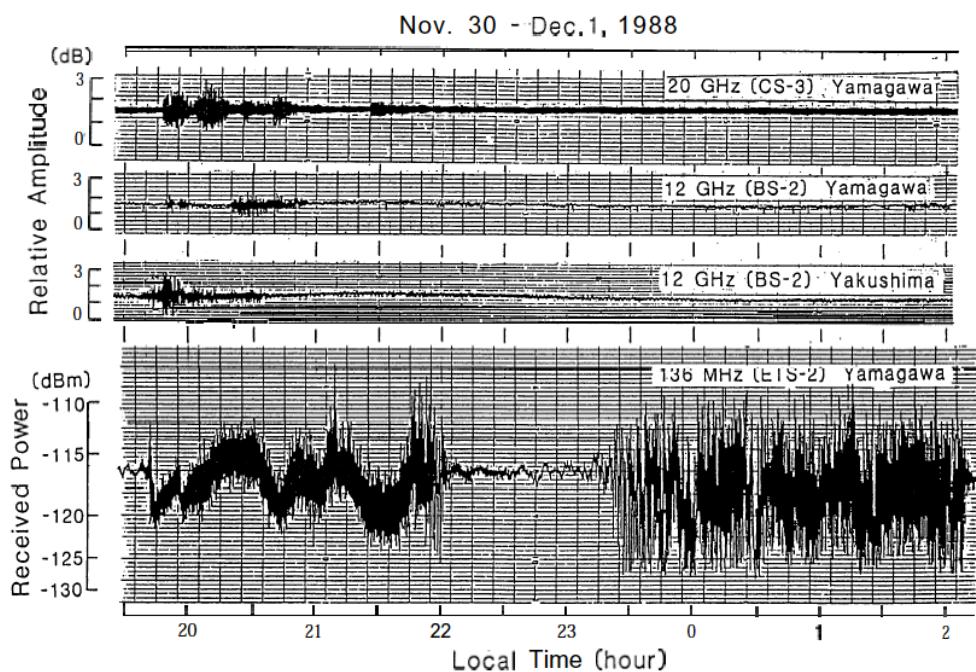


図 29: 様々な波長帯での衛星電波の乱れ

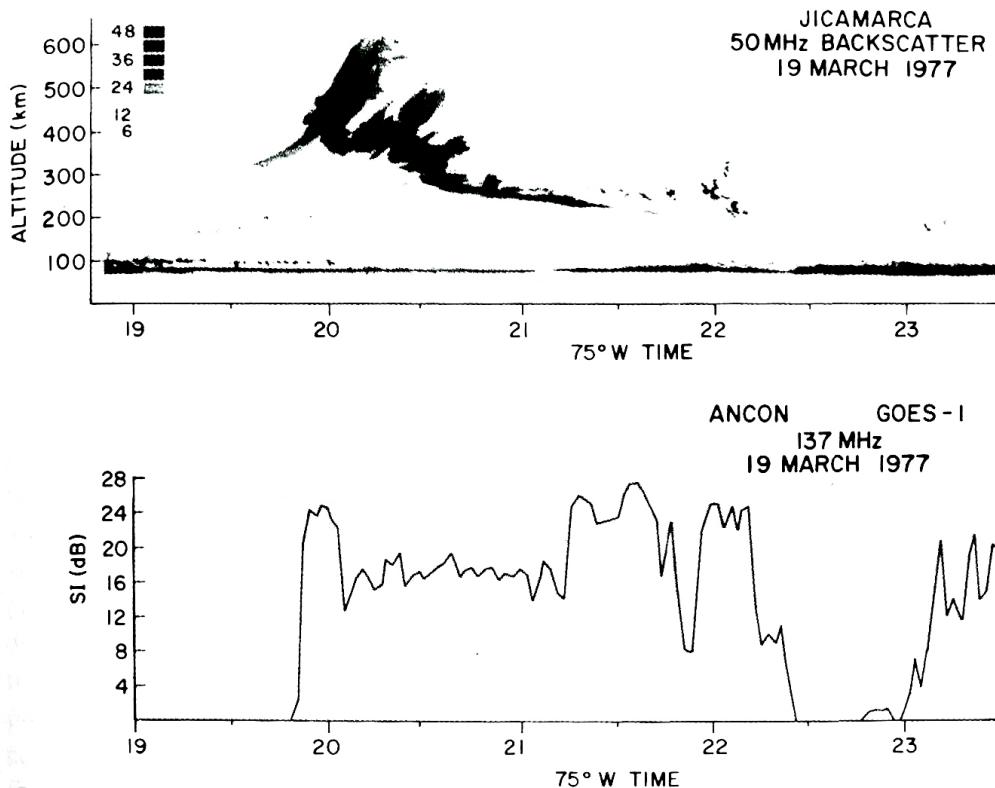
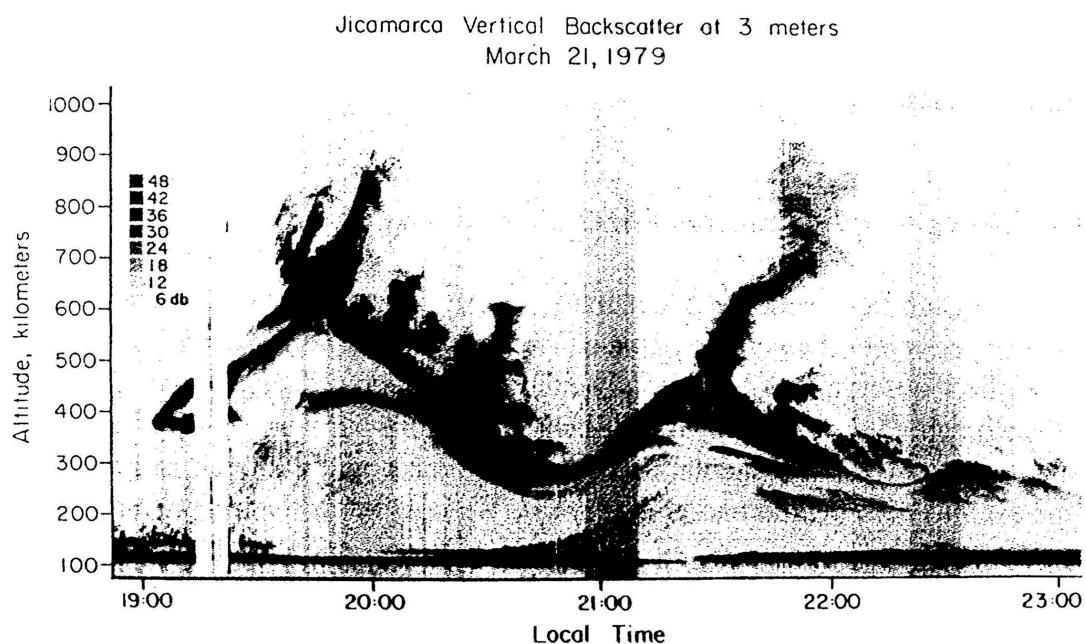


図 30: 電波の散乱高度(上)と衛星電波の乱れの対応

ペルーでの赤道直下の観測からは、日が沈み始めるとプラズマが発生し、その発生したプラズマが上昇していく様子が捉えられたが、これと比較する形で同じ地点で測定された電波状況を見ると、プラズマの上昇と時を同じくして衛星の電波の乱れが発生しているように感じられる結果が得られた。一度このような報告がなされていらい、次々の同種の現象が見つかるようになった。この現象がさらに詳しく観測された結果、図31の黒い部分が示す電波の乱れの原因は、高度約300 kmに存在する電離層が1-2時間程度の時間スケールで大きく波打つときに、上下方向に動く電離層が高度の極大に達するとそこからさらに高高度へ全体の動きとはさらに別で上に伸びていくものが見える



**Fig. 4.1.** Range-time-intensity map displaying the backscatter power at 3-m wavelengths measured at Jicamarca, Peru. The gray scale is decibels above the thermal noise level. [After Kelley *et al.* (1981). Reproduced with permission of the American Geophysical Union.]

図 31: 電離層の波動とそれに伴うプラズマバブル

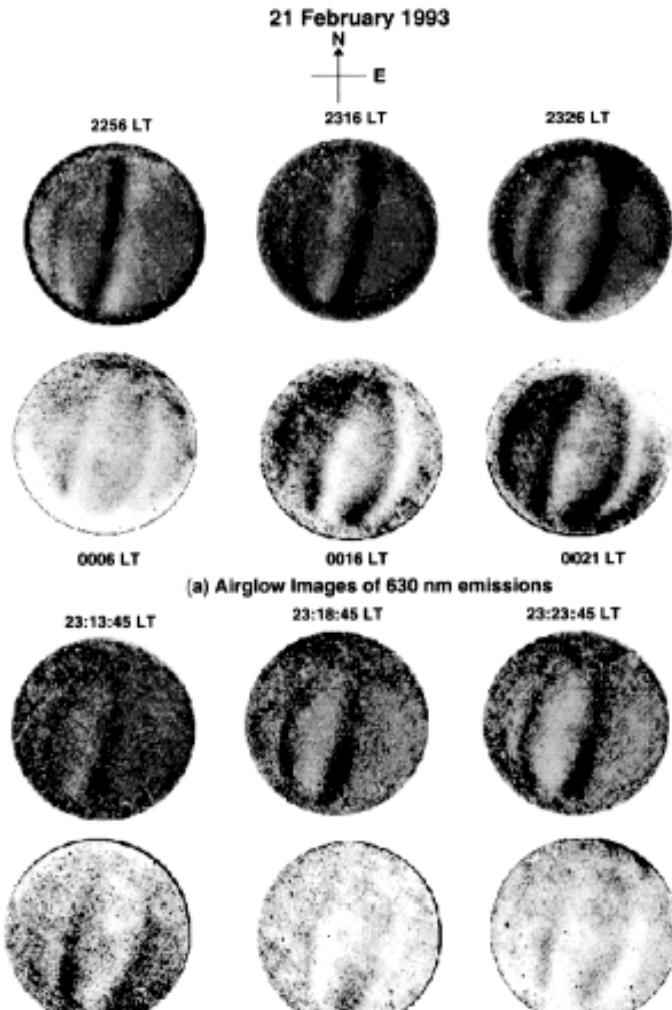


図 32: 電離層の波動とそれに伴うプラズマバブル  
 (b) Airglow images of 777.4 nm emissions

図 32 は地上から 630nm O<sup>+</sup>と 777.4nm O<sup>2+</sup>の発光を捉えた画像で、イオンの密度を反映して明暗の筋模様が赤道で見られた。

またこれとは別に、135.6nm O<sup>+</sup>発光を観測し、赤道を挟んで二本見える赤道異常を捉えたデータにも、赤道異常の中に南北方向筋構造があることがわかる。

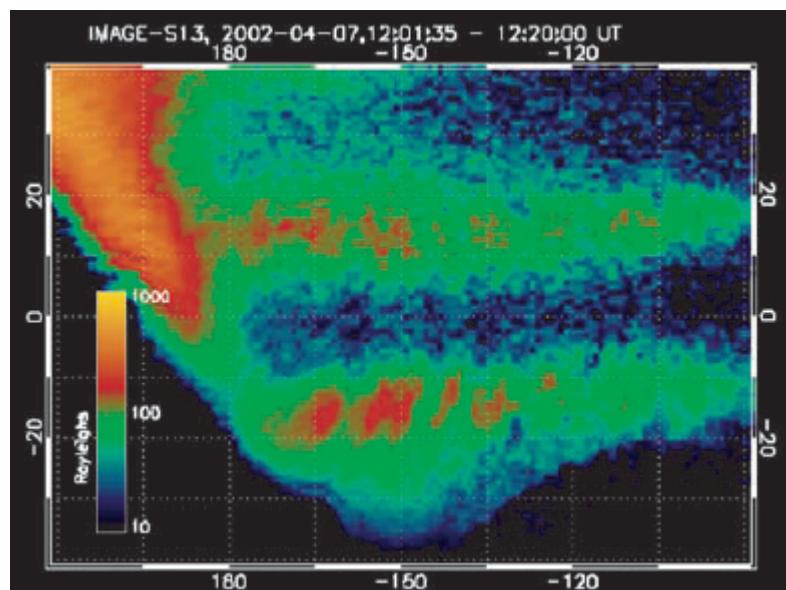


図 33: 電離層の波動とそれに伴うプラズマバブル

さらに地上と衛星の同時観測がされた例もある。図 34 は地上から電波を打ち上げる方向を南北へ振りながら上空の電波散乱を測定したデータ(下)とその中を通過した衛星によって計測された電子密度(上)の対応を示したものである。この結果プラズマが散乱される場所が周りより電子密度が小さい領域であることが分かった。このような特徴から電子密度が小さい、水の中の泡のようであるため、プラズマバブルという名前が付けられた。

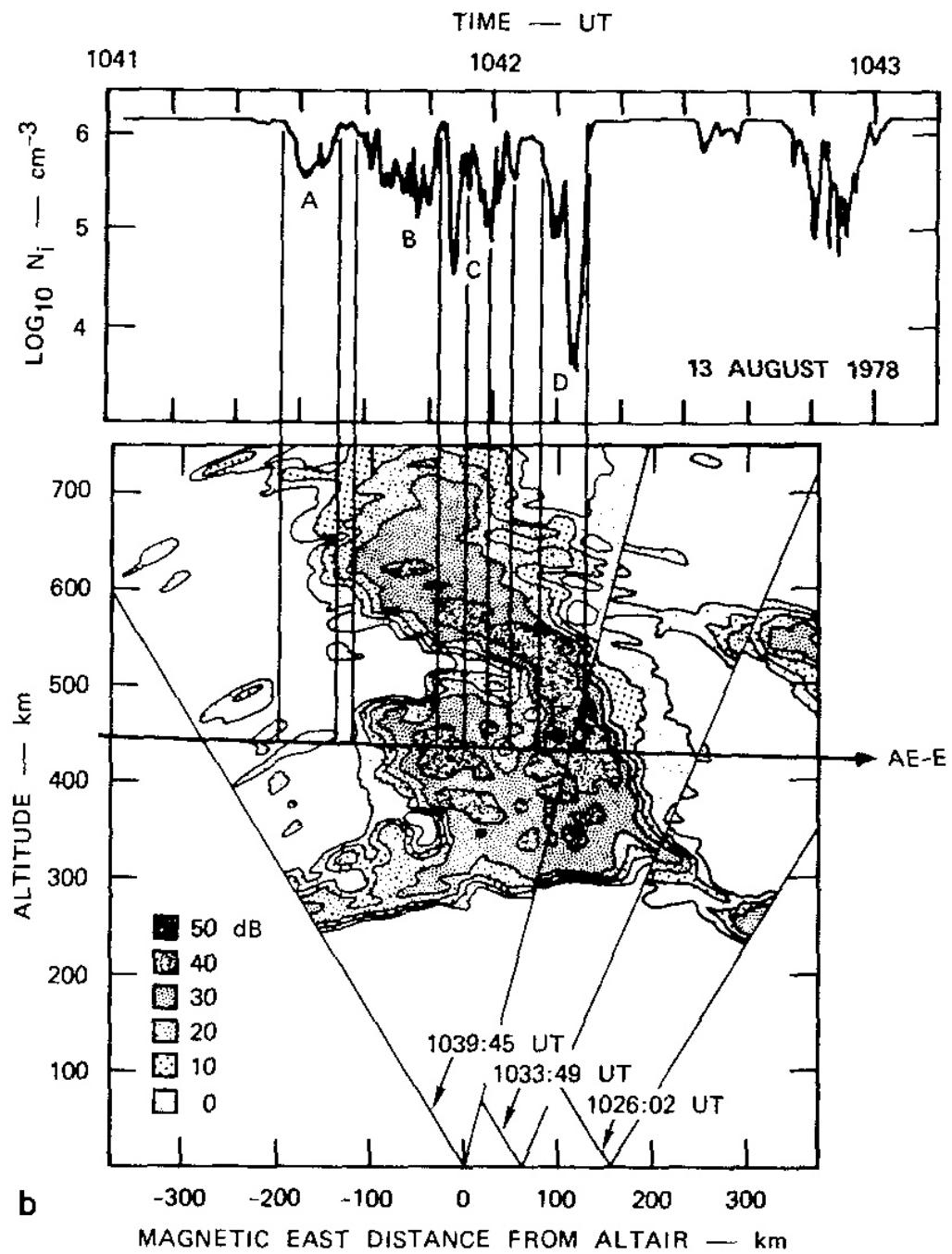


図 34: 地上と衛星観測による電波散乱と電子密度の対応関係

図34同様に、電子密度と電波散乱の対応関係が調べられている。下図はGPS受信機の電波位相の乱れとTEC(total electron content) 電子密度の関係性を調べたものである。衛星から地上への電波パスに沿って電子があると位相が変わるため電波の乱れの指標となっている。先ほど同様に電波の乱れた場所と停電し密度領域が対応している。

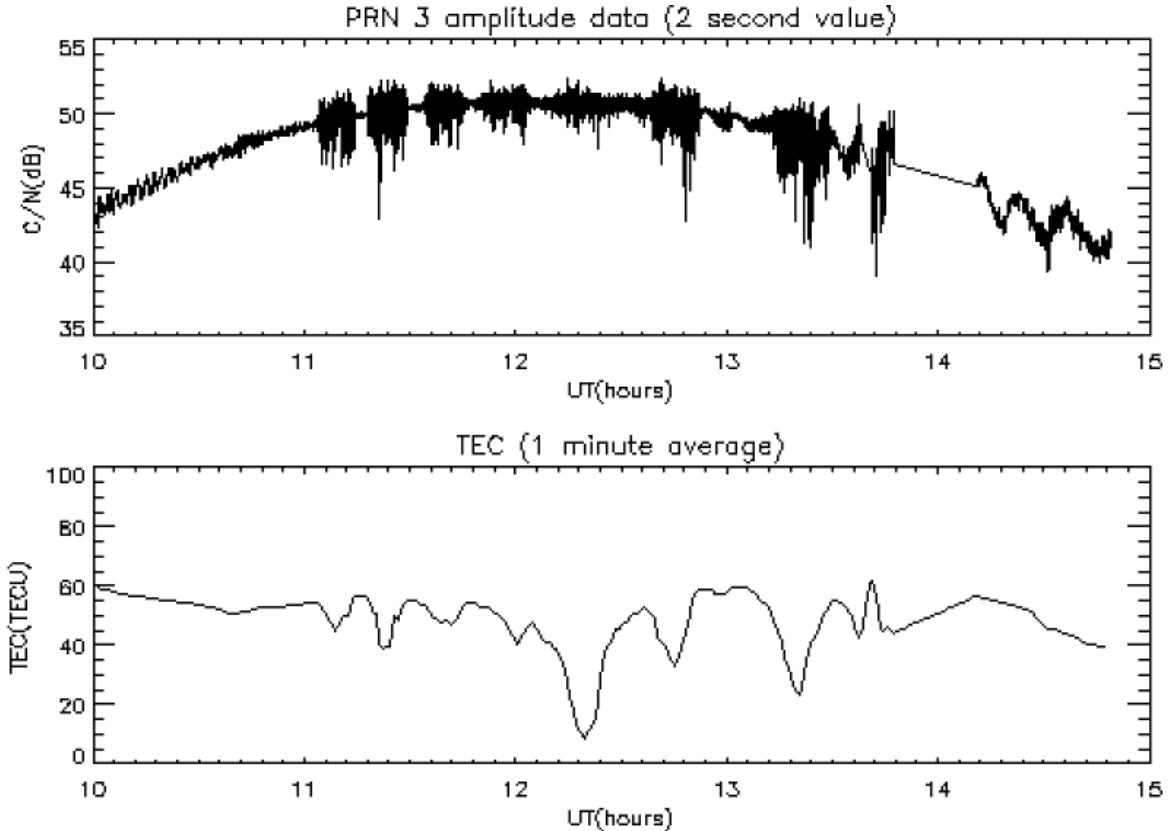


図 35: GPS 位相の乱れと電子密度の対応関係

電波の乱れと電子密度の関係性が明らかになってきたことで、このプラズマバブルの形成メカニズムの理論研究が進んだ。図 36 はプラズマバブルを説明する模式図である。図は南半球から北半球を見た様子を描いており、プラズマ密とプラズマ少ない境界を想定し、具体的な発生源は不明だが重力波などによって境界が変動を受けることを考えている。この境界部に変動を与えると重力と磁場方向で決まるドリフトが発生し、イオンと電子が分かれれる。これによって発生した電場によって上方向にプラズマがドリフト効果を受ける。それゆえ一度想定された擾乱が与えられると、高度が高い方は密度が低く上昇を妨げるものが少ないと、プラズマは上昇を続ける。

$$J = \frac{nMq \times B}{B^2}$$

$$E_0 \text{ and } J = \sigma_p E_0$$

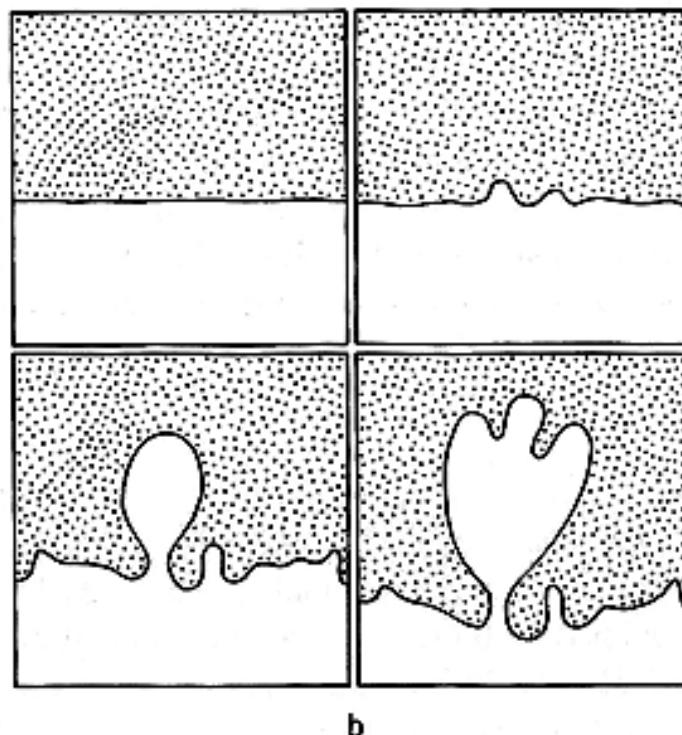
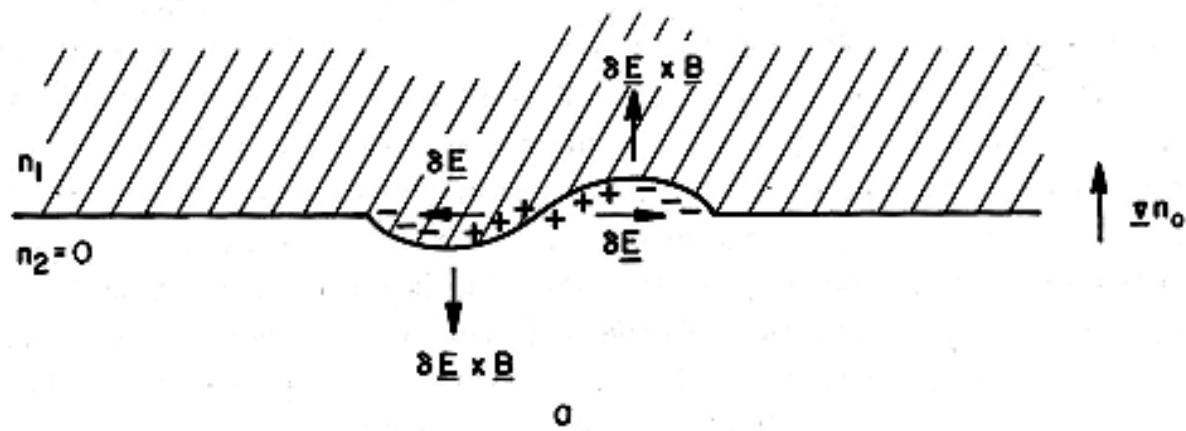


図 36: プラズマバブル形成の模式図

詳細は割愛するが、このプラズマバブルの成長率は簡単な波を想定して計算することができる。  
(レイリーテーラーインスタビリティ)

プラズマバブルの成長率は  $dn/dz$  が大きくなる or  $\nu$  (衝突周波数) が小さくなると大きくなる。

最近のレイリーテーラー不安定が成長計算では重力だけでなく風などの効果を入れることで、傾いた形状のプラズマバブルやヘッドが分かれていく様子も再現されている。

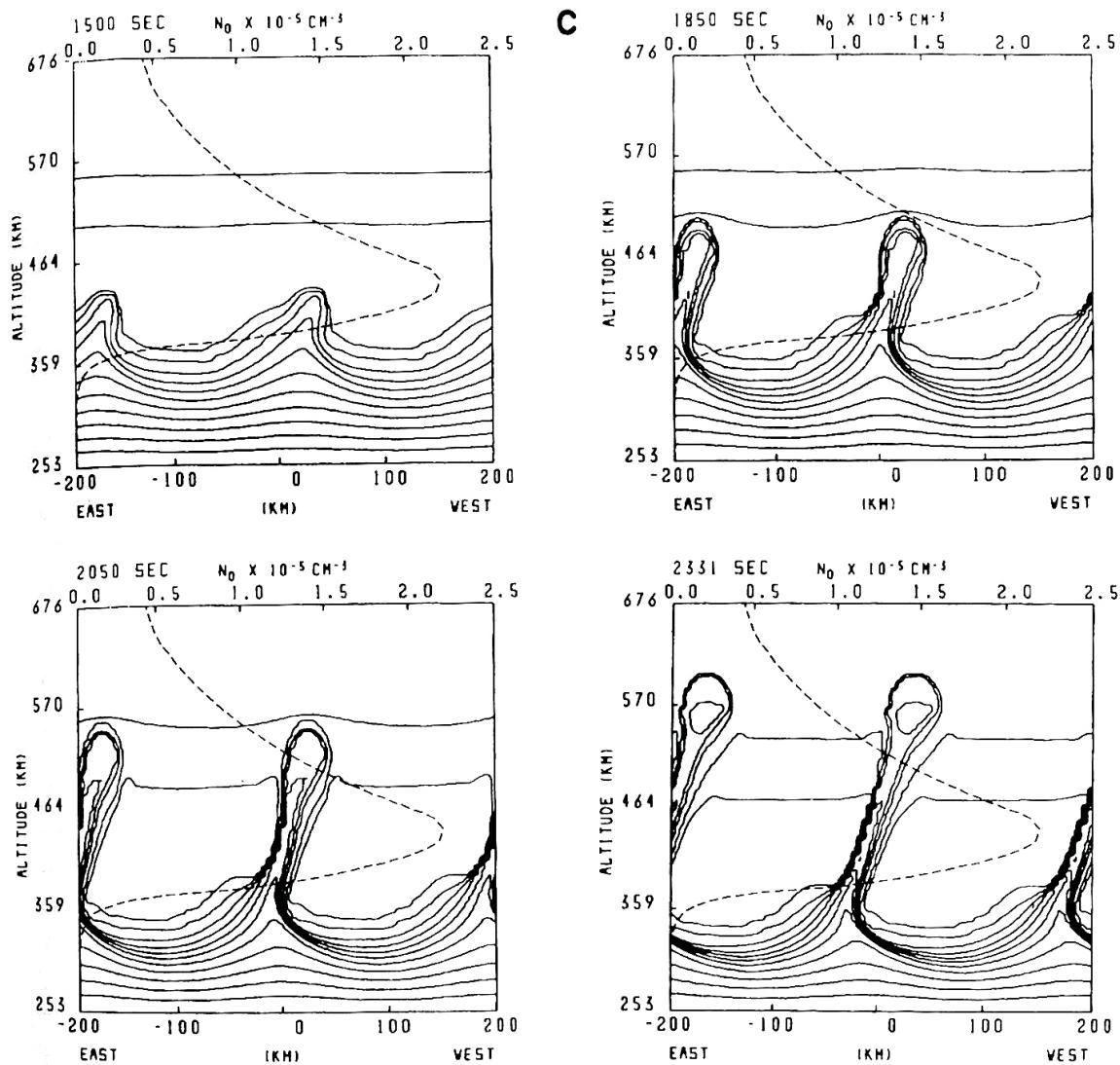


図 37: プラズマバブル形成の理論計算

プラズマバブルの空間構造は光学観測からよりはつきりと観測されてきている。図 37 は地上の二地点(佐田と Darwin)からの 630 nm の光学観測の写真で、レイリーテーラー不安定により電子密度小さいところが黒く写っている。南北両半球でまるで鏡合わせのように見えるこの黒い領域は、磁力線方向に面をもった扇のような構造をしている。二枚の写真は空間的に同じ場所を見ているわけではなく、赤道で生じた低電子密度領域が磁力線に沿って投影され、南北両半球で同じような形に見えているものである。

イメージとしては、図 38 のような磁気赤道を基準とした扇型の格好をしている。

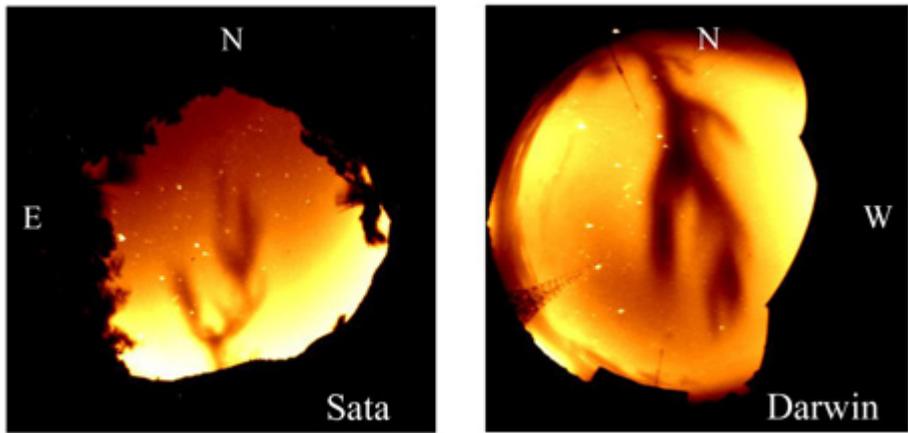


図 37: 磁力線を解したプラズマバブルの空間的広がりを示す光学観測

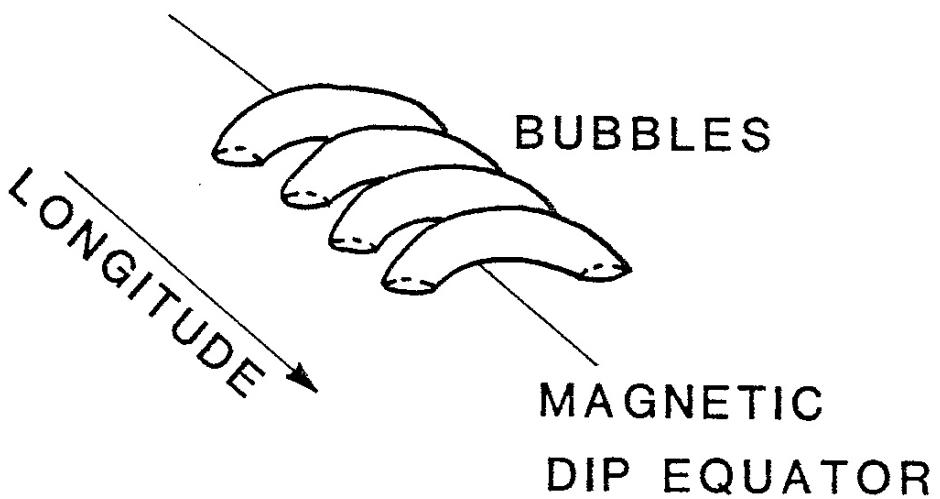


図 38: プラズマバブルの構造の模式図

衛星が磁気赤道を横切ったとき、このような扇型をした領域の電子密度を計ることができる。

図 39 は、磁気赤道を横切るように周回する衛星が、1 時間半おきに同じ領域を観測し得られた電子密度の変化を示した結果である。最初のパスでは電子密度に大きな変化がなかったが、次のパスではローカルタイム 21:30 後から急激な電子密度の増加がある。(これは東向きの電場が強くなったからと考えられる)。この時、全体的に電子密度が大きくなっている中に、一部切れ目のように低密

度の場所が存在している。さらにその次のパスでは、電子密度全体の増加は無くなっているが、依然低密度領域を示す切れ目が多数みられる。このような割れ目のような低密度を示す部分がレイリーテーラー不安定によるものであると考えられる。

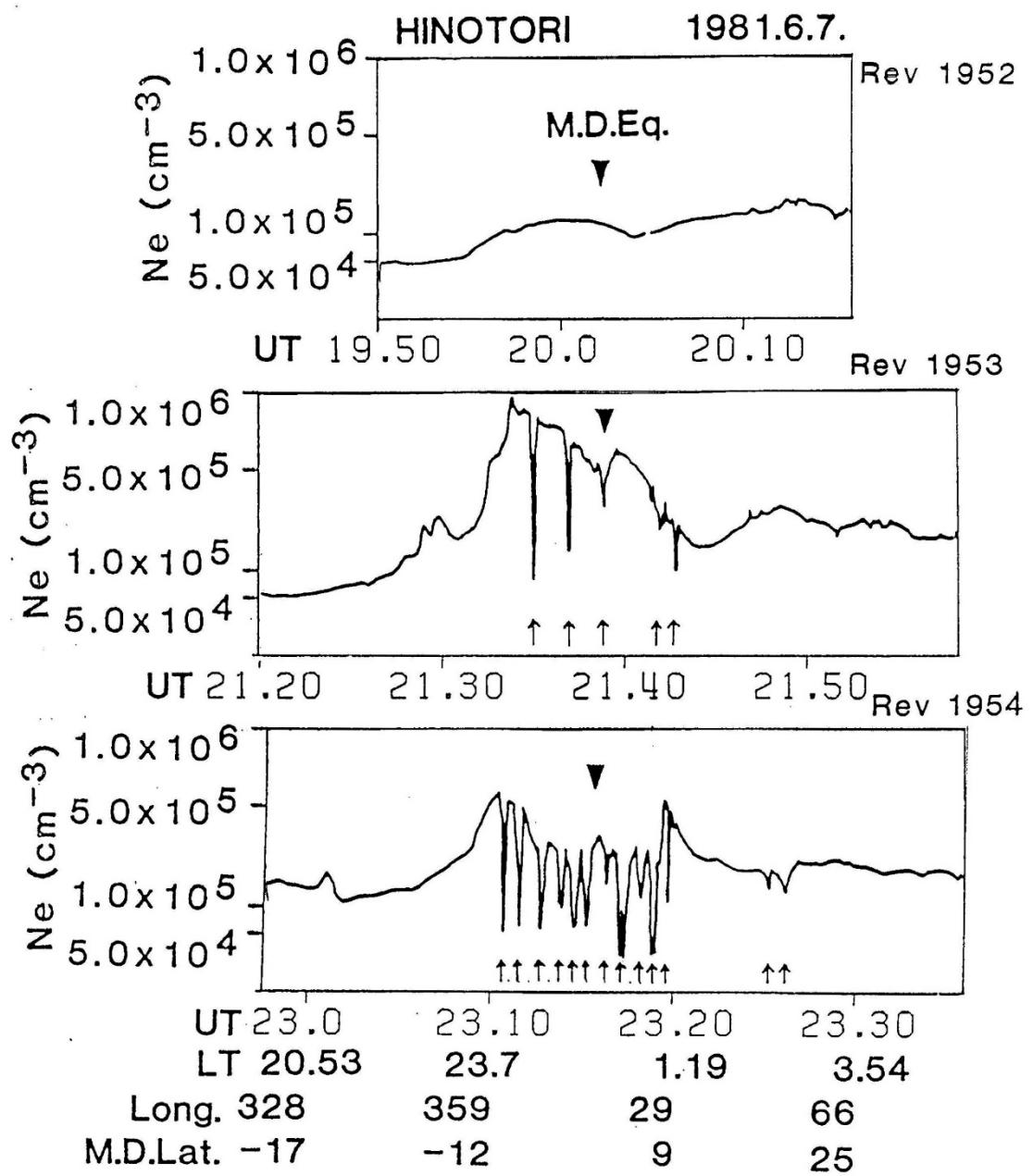


図 39: プラズマバブルの時間発展

先の図が示すような全体的な電子密度の増加がレイリー＝テーラー不安定を発生させることは明らかになってきているが、そもそも最初に起こる全体的な電子密度増加がなぜ発生するのかについてはあまりよくわかっていない。次の図はこのような電子密度の増加がローカルタイムに依存していることを示唆した結果である。電子密度増加は昼間には存在せず、日没と日の出時刻に発生頻度が多い傾向がある。ただし、毎日のように定間隔で発生する現象なのかについては良く分かっていない。また、発生場所に関しては、磁気赤道域でよく発生する様子が明らかになっている。経度依存性がありようにも思われ、また大陸のある場所で頻繁に発生しているように見える。これについては、雲の発生や雷との関係があるのではないかと想像できる。雷との関係性がある場合、地上から電離層高度まで繋がった現象ということになる。

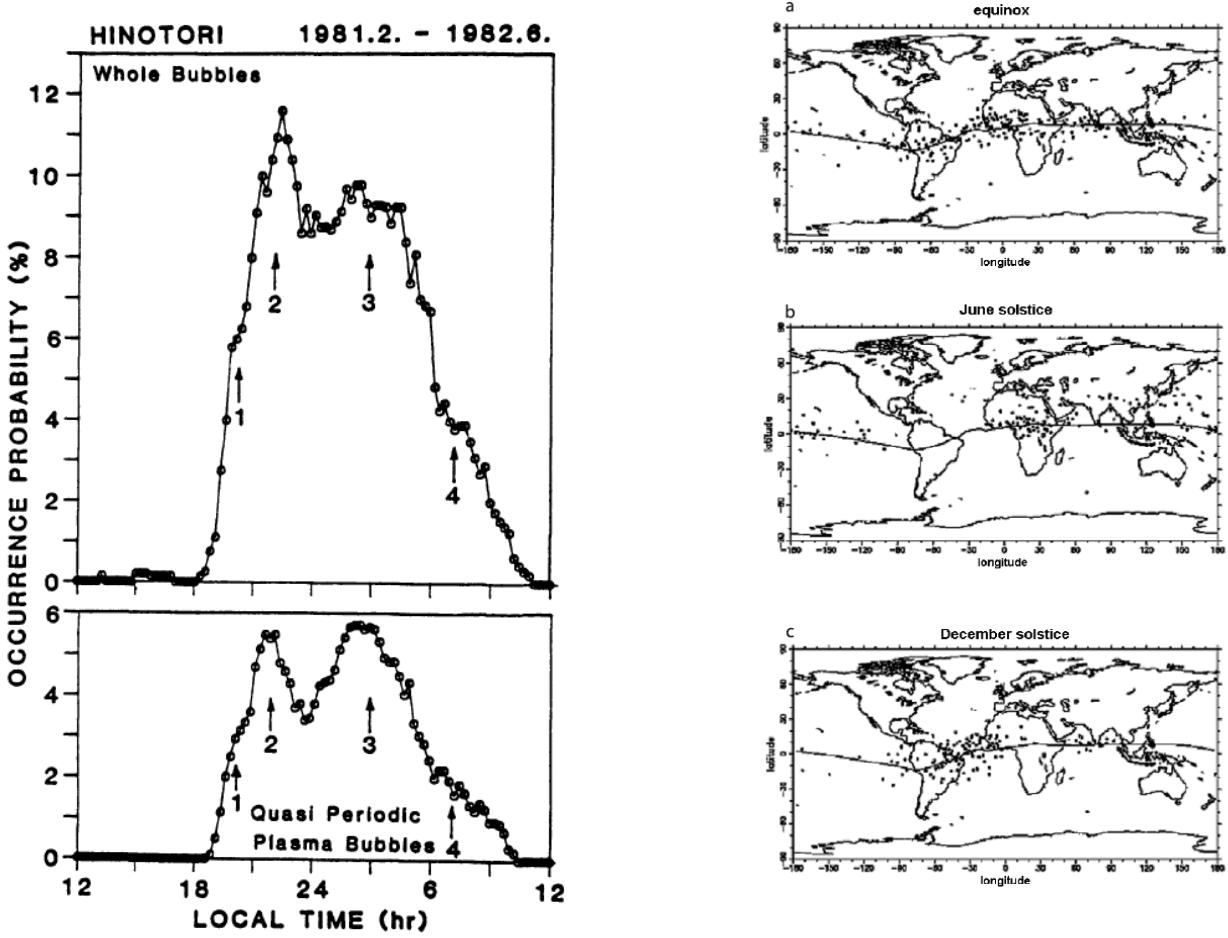


図 40: プラズマバブルのローカルタイム依存性(左)と発生場所(右)

## 1.5 まとめ(宇宙天気)

地球の電離圏の状態は非常に複雑な振る舞いを示す。電離圏の状態は最後にみたプラズマバブルのように、衛星からの電波を乱すなど我々の生活にも影響を当たるものである。そのため近年では宇宙天気という名前で、この電離圏などで起こる現象の人類への影響を調べ対策・予報する分野が発展してきている。電離圏での現象は複雑ではあるが、ローカルタイムに依存してはっきり現れたりするものも多く地上の天気予報よりも精度の高い予報が可能かもしれない。

## 2. 熱圏および電離圏における イオンと中性ガスのカップリング

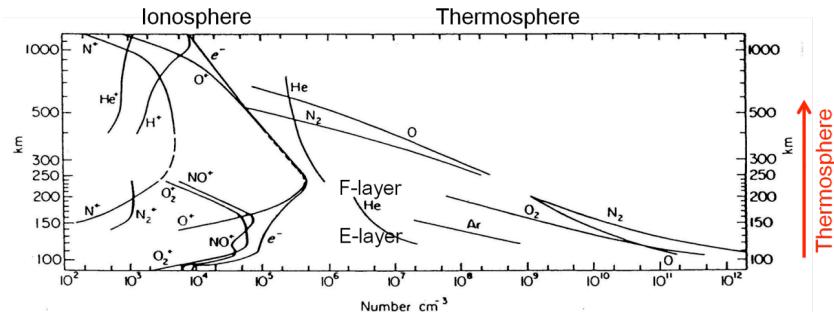


Fig. 1.2. International Quiet Solar Year (IQS) daytime atmospheric composition, based on mass spectrometer measurements above White Sands, New Mexico (32°N, 106°W). The helium distribution is from a nighttime measurement. Distributions above 250 km are from the Elektron II satellite results of Istromin (1966) and Explorer XVII results of Reber and Nicolet (1965). [C. Y. Johnson, U.S. Naval Research Laboratory, Washington, D.C. Reprinted from Johnson (1969) by permission of the MIT Press, Cambridge, Massachusetts. Copyright 1969 by MIT.]

図 41：各高度における中性ガス及びイオンの数密度

熱圏において中性ガスとイオンは密度に大きな差がある。そのため、中性ガスはイオンの影響をほとんど受けないと従来考えられてきた。

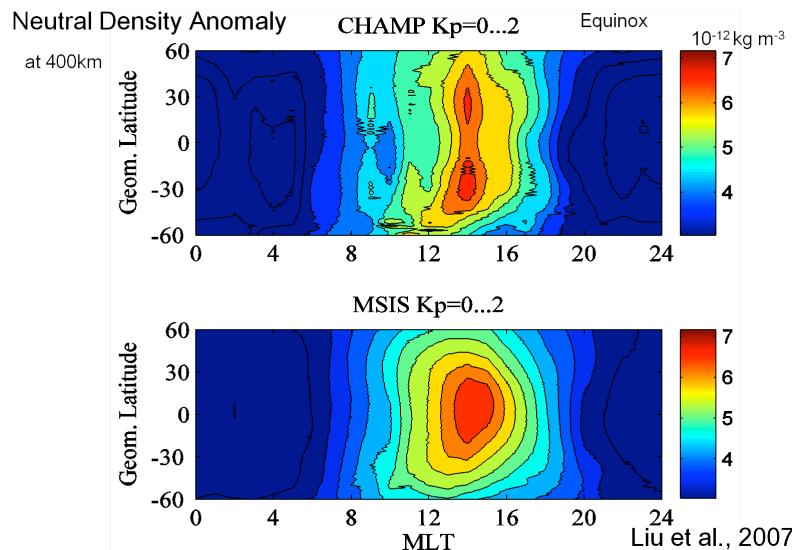


図 42：各磁気緯度における高度 400km での中性ガス密度の時間変化

上図：CHAMP による観測

下図：MSIS 大気モデルによる推定

しかし、CHAMP 衛星による中性ガス密度の観測結果(加速度計による)を見てみると、中性ガスだけでは起こり得ない密度の「谷」を持つことがわかった。中性ガスは磁気緯度とは無関係になるはずなのに、磁気赤道に対して対称な構造となっている。

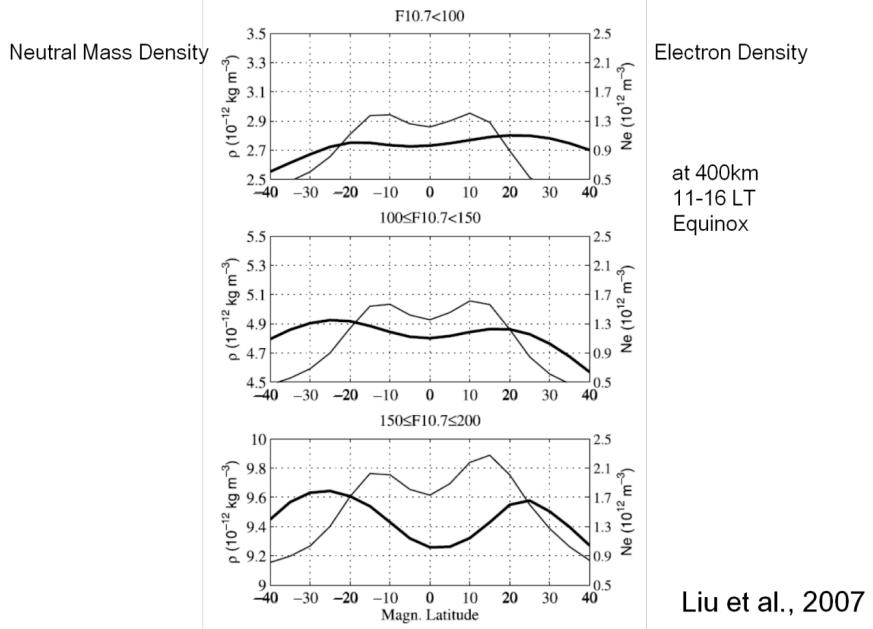


図 43：太陽活動度に応じた中性ガス(太線, O)とイオンの密度(細線, O+)の緯度分布

この「谷」は太陽活動度が強くなると顕著になることがわかる。これは電子の赤道異常と同様の傾向である。

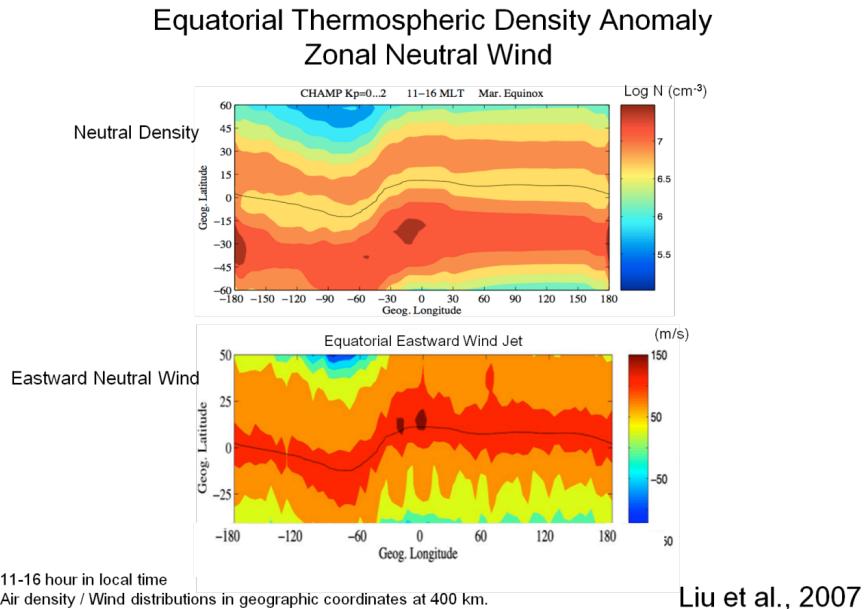


図 44 (上) : 中性ガス密度の全球分布(地理緯度・地理経度)  
 (下) : 東向きの中性風の全球分布(地理緯度・地理経度)

黒い線は磁気赤道をあらわす

衛星の横ブレから東西風を求めるとき、磁気赤道をはさんで谷が見える。東向きの中性風も明らかに磁気赤道に沿って存在しているのがわかる。すなわち、中性風が磁気の影響を受けていることを示している。

先述のとおりイオンと中性ガスの間には大きな密度差があり、希薄なイオンでは中性ガスの運動に影響を与えることはできないと考えられていた。そのためこのような傾向が見えたのは大きな驚きであり、発表当初は大きな批判を受けた。

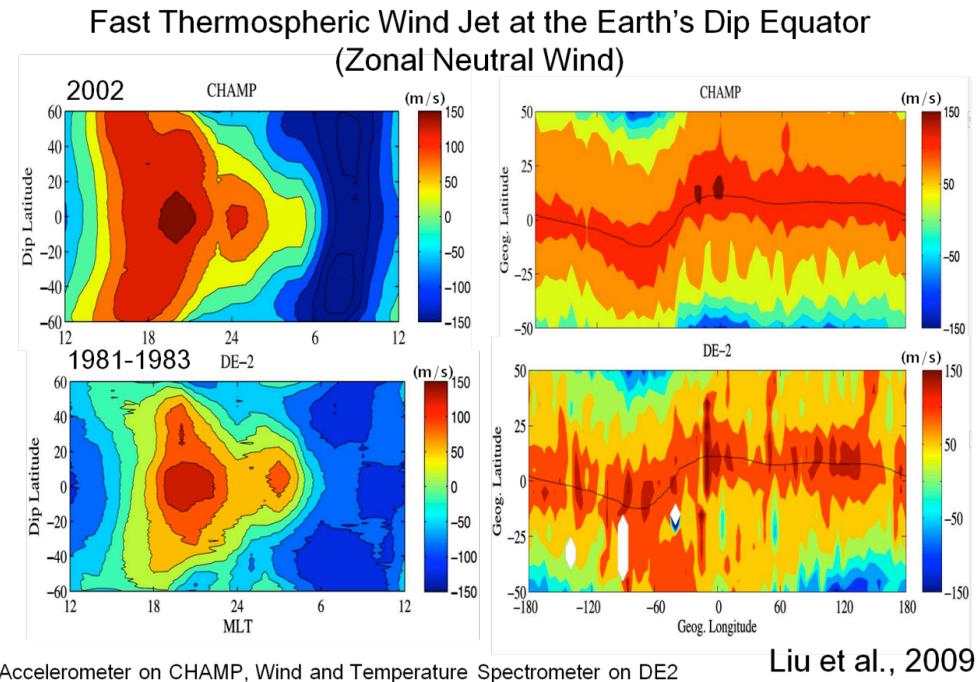
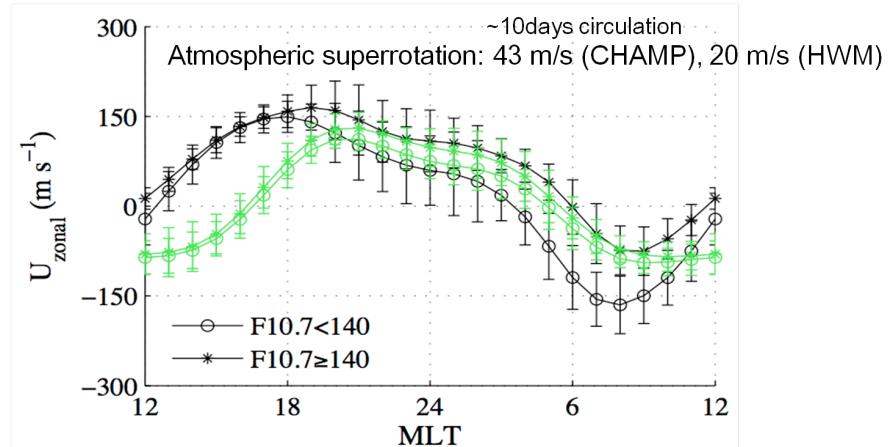


図 45 (上) : CHAMP 衛星による東西風の時間変化および全球分布  
(下) : DE-2 衛星による東西風の時間変化および全球分布

加速度計から推定された中性風が正しいことを示すため、風速計を積んだ DE-2 衛星のデータを解析したところ、同じような結果が得られた。この結果はほとんどチェックなしで雑誌に即掲載が決まり、これによって本現象の存在が広く認められるようになった。

本研究によって中性ガスとイオンの結合の可能性が確立され、電離圏熱圏結合という新分野として認知されるようになった。

## Superrotation in Thermosphere



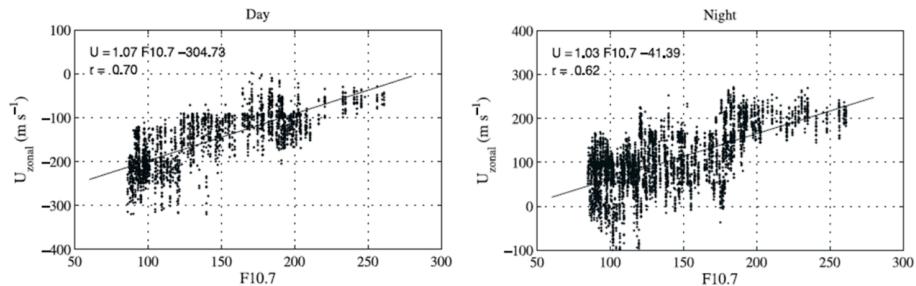
Average zonal wind between 10 S ~ 10 N. Green line: HWM (mainly based on DE2 measurement); Black lines: CHAMP. Good agreement at high solar flux levels on the night side, but a 3-4 hours phase shift between two sets.

Liu et al., 2006

図 46：熱圏における東西風の日変化。

中性風の日平均をみると、昼は東風、夜は西風となることがわかる。これをトータルで見ると全体としては東風であり、熱圏のスーパーローテーションとよばれる。

Atmospheric Super-rotation at 400 km altitude



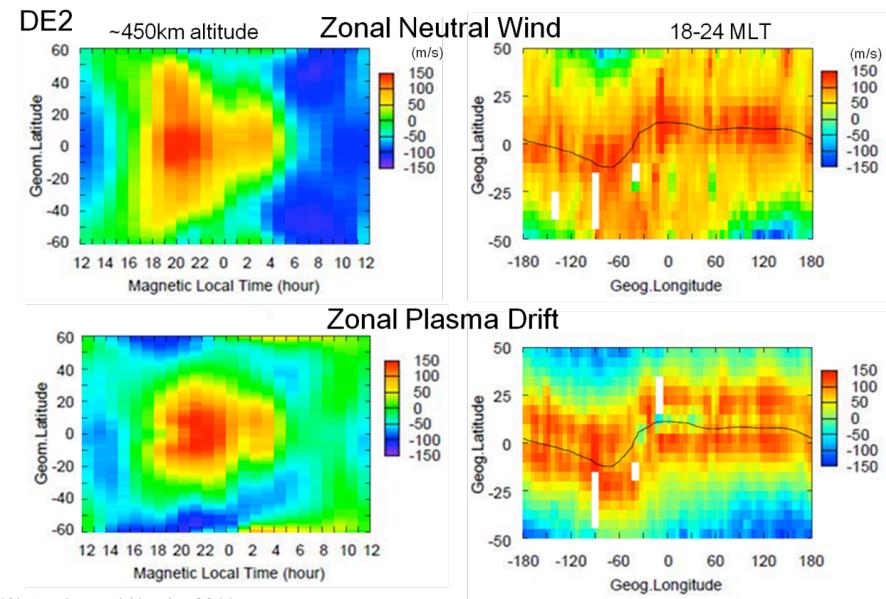
	Summer	Equinox	Winter	Average
F10.7 < 140	11	22	34	22
F10.7 > 140	40	72	76	63

fastest in winter at high solar flux level

Liu et al., 2006

図 47：各太陽活動度におけるスーパーローテーションの風速

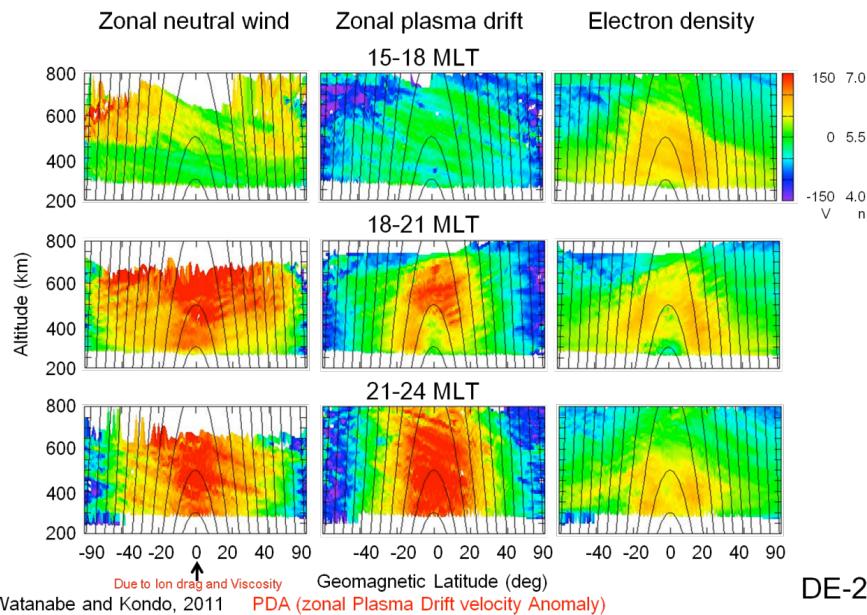
太陽活動度が大きくなるとスーパーローテーションも早くなることから、熱圏の中性風が太陽活動の影響を受けていることがわかる。



Watanabe and Kondo, 2011

図 48 (上)：東西中性風の分布  
(下)：東西方向のプラズマドリフトの分布

さらに、イオンと中性ガスは速度もほぼ一緒(100m/s 程度)である。両者の衝突時定数は数桁ほども違うにもかかわらず、同じように動くことがわかっている。



図：東西中性風・東西プラズマドリフト・電子密度の高度分布

高度方向の違いをみると、高度に関わらず磁力線上に風のピークがあり同じくらいの速度で動いていることがわかる。この高度ではイオンとほとんど作用しないはずなのに、なぜ磁力線の作用を受けるのか、そのメカニズムはどうなっているのだろうか？

過去にはイオンドラッグの影響(Rishbeth, 1979)や電子の赤道異常の影響(Maruyama et al, 2003)などが挙げられてきた。

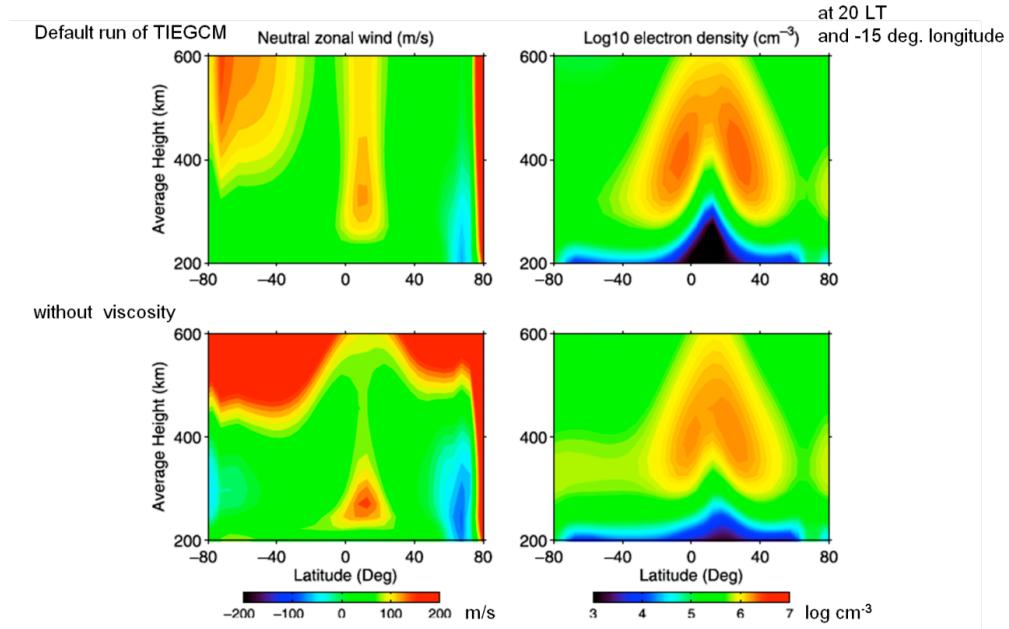


Figure 3. (left) The eastward zonal wind and (right) electron density altitude-latitude profiles at 20 LT and  $-15^{\circ}\text{E}$  longitude. (top) Default conditions (Case 1) and (bottom) the no-viscosity condition (Case 3). The magnetic dip equator is at about  $10^{\circ}\text{N}$  geographic latitude.  
Kondo et al., 2011

図 49：粘性の有無による東西風形成様態の違い。上図(粘性あり)では高高度まで東西風が発生しているが、下図(粘性なし)では低高度に局所的な東西風が形成されるのみである。

モデルを用いて、少なくとも粘性のあるなしで現象が説明できることは分かっているが、この粘性の正体についてはよくわからない。このモデルでは高度に関して指数関数的に与えている。粘性係数は高度があがると増えるようにしているが、それに特に根拠は無い。

けっきょく詳しいメカニズムはわかっていないが、少なくとも現象としては複数の観測から見えているのでおそらく間違いないだろう。

# Nonmigrating Tides

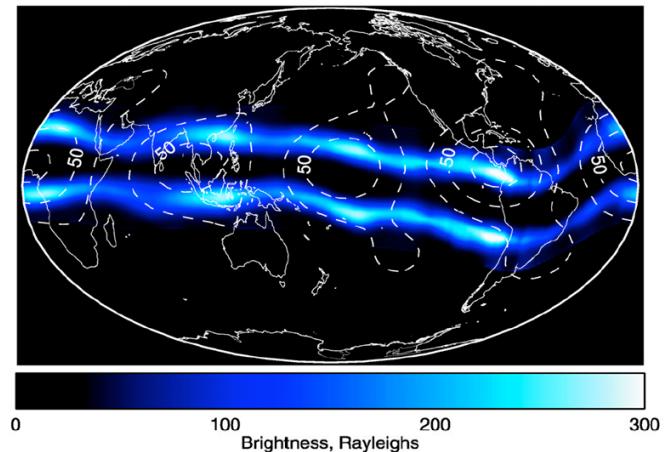


図 50：夜間の電子密度異常

夜間の電子密度異常をみると、経度方向に 4 か所ほどの山が見える。その成因は不明だが、この高度での現象のみで説明することは困難であり、地上からの何らかの作用が考えられる。

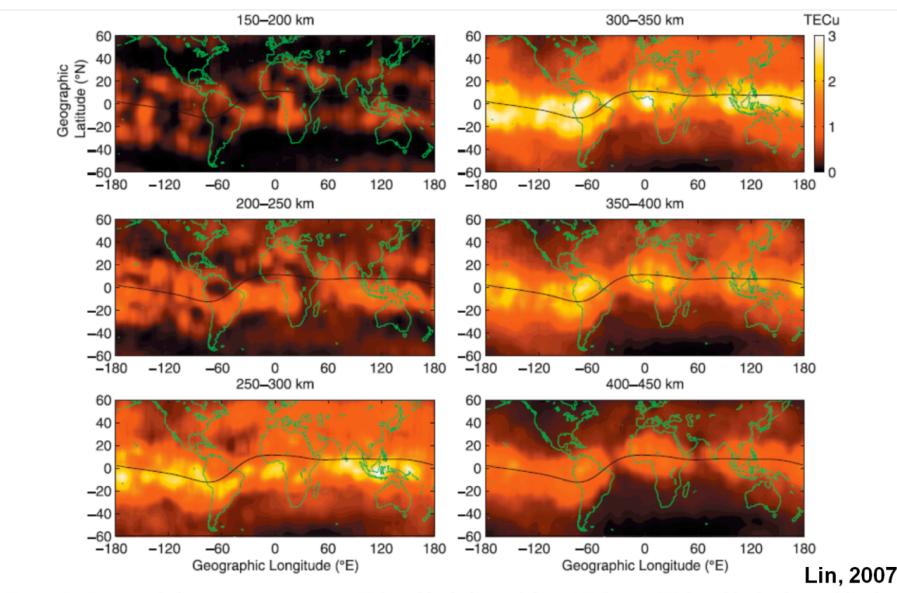


Figure 3. Integrated electron content at every 50 km altitude interval from 150 km to 450 km altitude observed by the FORMOSAT-3/COSMIC during 2000–2200 local time period during around September Equinox, 2006.

図 51：高度別の夜間電子密度異常

他の衛星による観測でも同様の山が見えており、高度 200-500km で顕著となることがわかる。

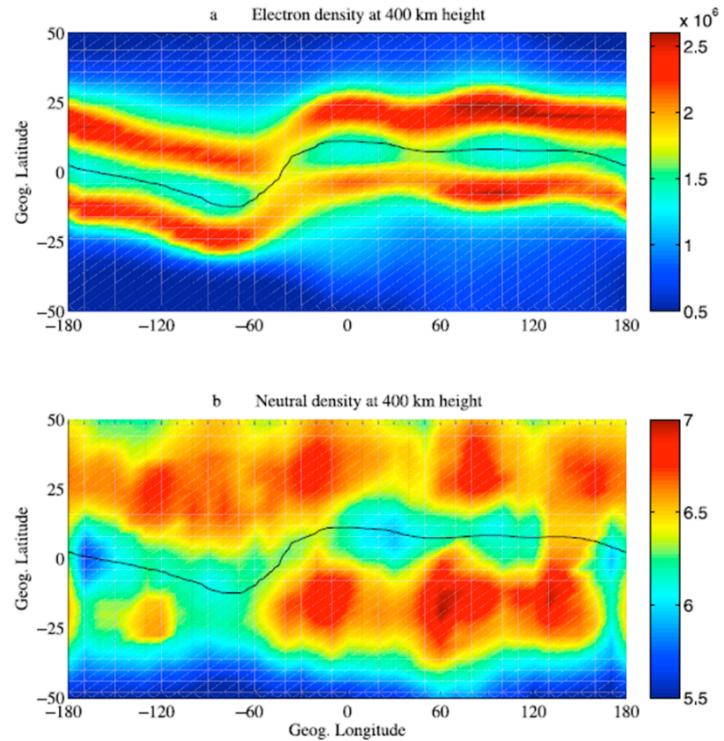


Figure 1. Distribution of the (a) electron density in unit of  $\text{cm}^{-3}$  and (b) neutral density in unit of  $10^{-12} \text{ kg}$  during 14–18 LT in the geographic coordinates near equinoxes in 2002.

Liu et al., 2009

図 52 (上)：電子密度分布  
(下)：中性ガスの分布

同様の山は、電子密度分布だけでなく中性ガス密度分布においても同じように見えていく。

SCIAMACHY Water Vapour: Monthly Mean October 2003

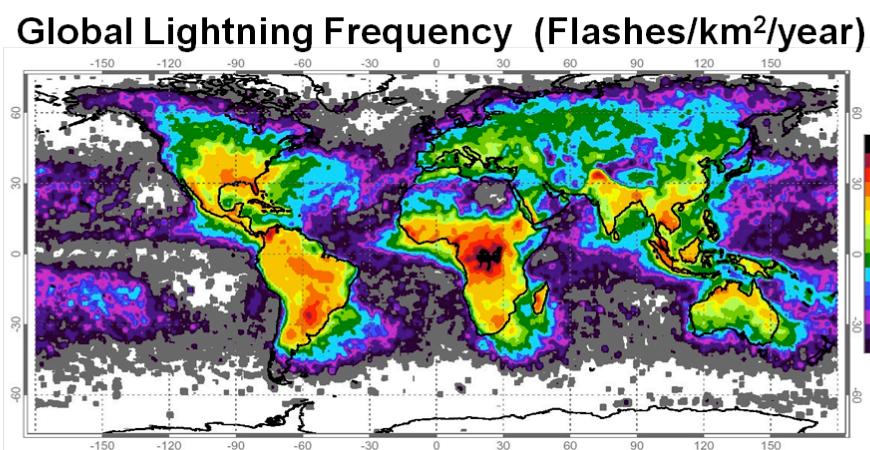
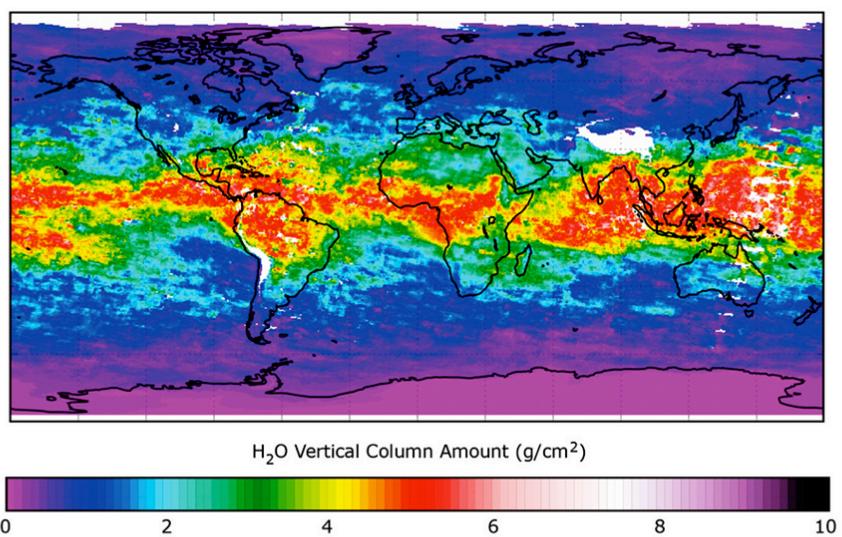


図 53 (上) : 水蒸気密度分布  
(下) : 雷放電頻度分布

このような分布の山は、たとえば地上の雲の存在などが関係している可能性はあるだろうが、メカニズムはそれほど単純ではないだろう。

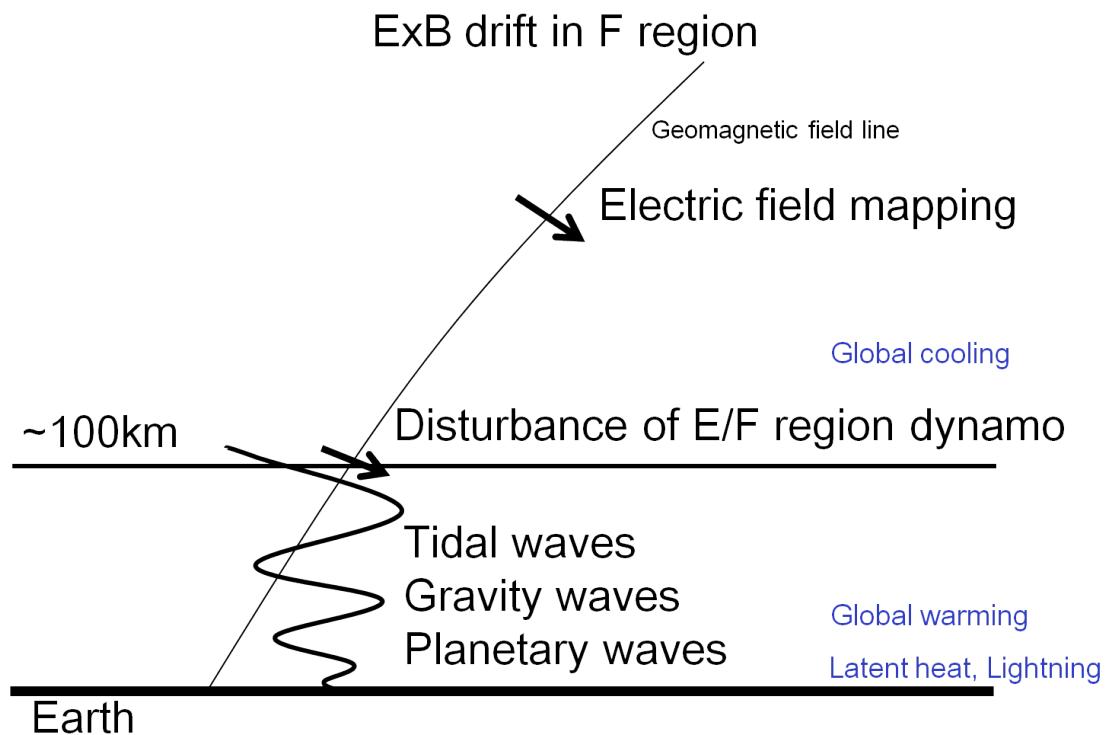


図 54：熱圏電離圏結合のメカニズムの模式図

地上から伝搬してきた波がカレント層で碎波し、それによってカレント層の電場が影響を受け、その結果磁場が発生し、それが中性ガスに影響するというメカニズムが想像される。

## Medium-Scale Traveling Ionospheric Disturbance (MSTID)

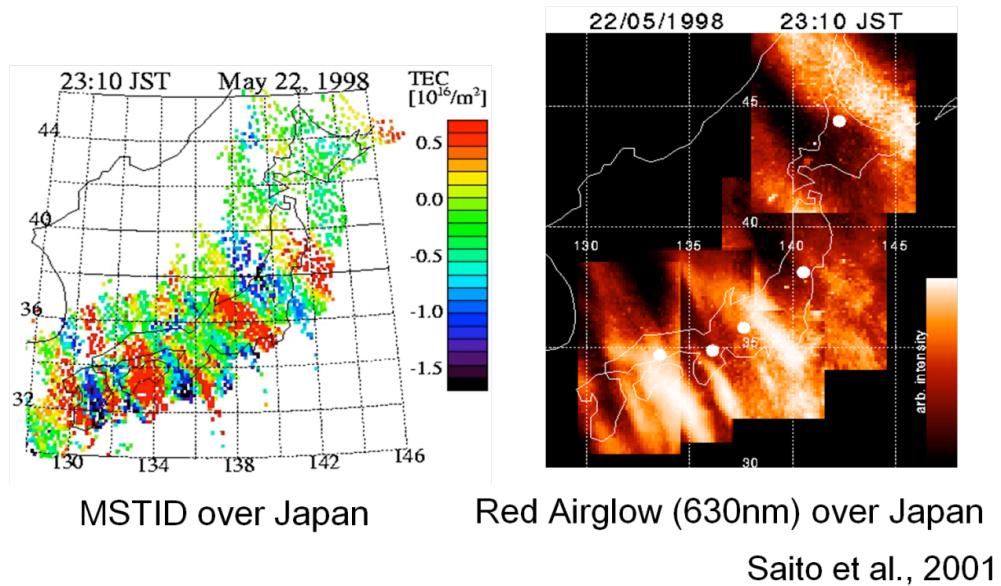


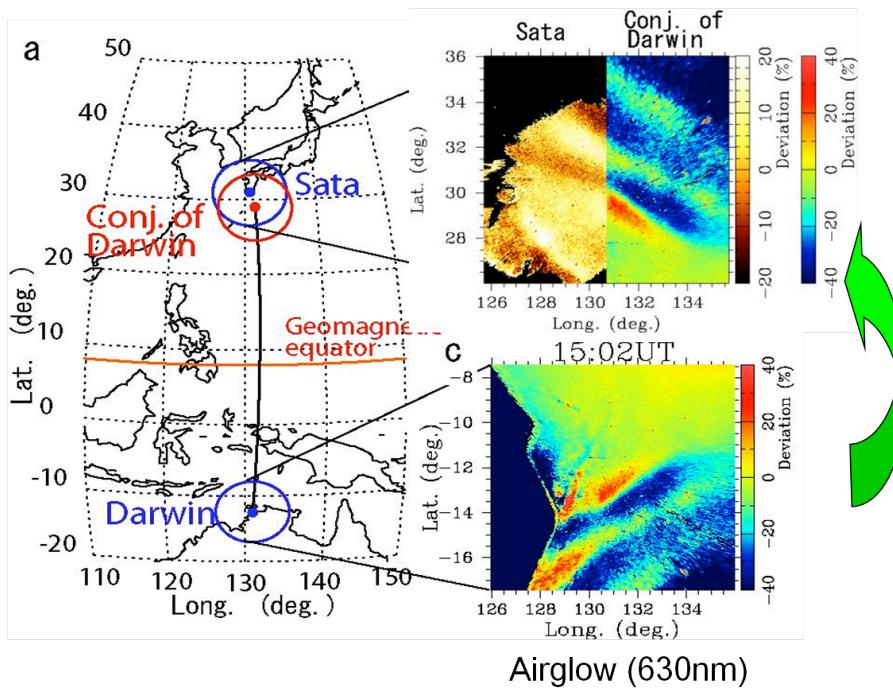
図 55 (左) : GPS を用いた電子密度分布観測

(右) : O<sup>+</sup> の大気光観測

Saito et al., 2001

電子密度異常は他にも見つかっている。GPS を用いた電子密度マッピングを見ると、縞状の構造が見てとれる。これは GPS だけでなく O<sup>+</sup>の光でも同じように見え、両者はおおむね対応している。この波は毎日のように見えており、波の変動も日変化している様子が分かっている。同様の現象は世界中で起きており、高度 200-300 キロほどで見えている。

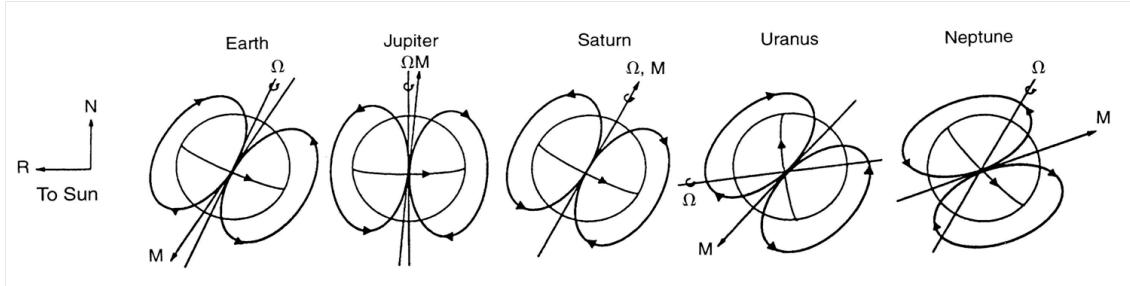
## MSTID August 9, 2002



Otsuka et al., 2005

図 56：磁気赤道をはさんだ南北の電子密度分布比較

さらに、赤道をはさんで日本の反対側のダーウィンでも、同じような縞状構造が見える。電子密度の異常を磁力線に対して折り返してみると同位相でありほぼぴったり重なる。なぜこんな遠くで相互作用が見られるのかは不明である。中性ガスが電子密度異常の原因と考えているが、それだけでは説明がつかないだろう



- SolarWind
- Magnetosphere
- Exosphere-Plasmasphere
- **Thermosphere-Ionosphere-ElectricField**
- LowerAtmosphere

以上をまとめると、これまで熱圏中性ガスにイオンが従属していると考えられてきたが、実際には相互作用しており、上から下まで一つのつながった系としてみなす必要があるということが分かつてきた。

**Q** プラズマにおいてレイリーテーラー不安定と呼んでいいのか？

**A** 教科書的には重いものが上にあって軽いものが下にある状態を言うだろうが、それがどんな力であるかは問わないと思う。様々な分野で使われる言葉なので一種哲学的な問い合わせかもしれない。

**Q** 赤道で電子密度異常の波長が違う等の差はあるのか？

**A** たしかに多少ある。赤道付近の方が顕著に見えるような傾向はあるが、なぜそうなのかはわからない。そもそもデータが少ない。

### 3. プラズマポーズとプラズマテール

#### Plasmasphere

The Earth's plasmasphere is a torus of cold ( $\sim 1\text{eV}$ ) and dense ( $\sim 10^3\text{cm}^{-3}$ ) plasma in the region of the inner magnetosphere.  $\text{H}^+$  is the principal ion with  $\sim 20\%$   $\text{He}^+$ .

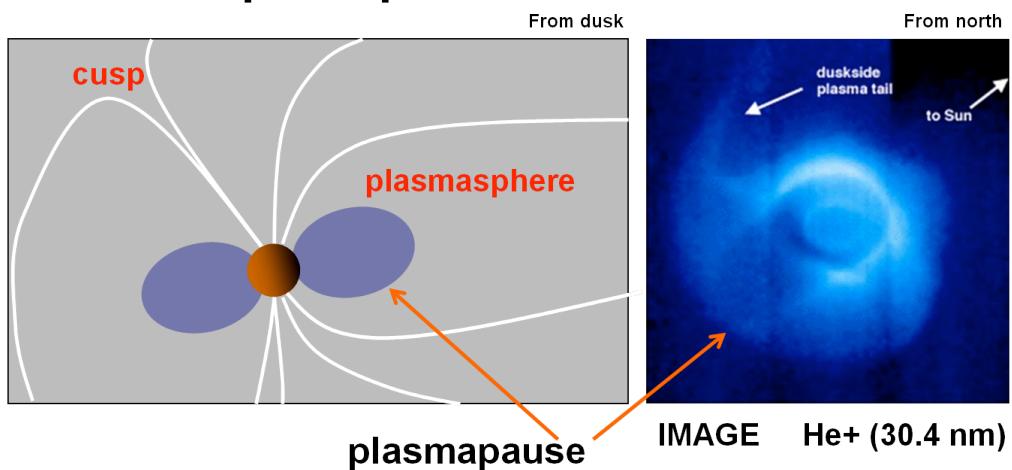


図 57 (左) : プラズマ圏の模式図  
(右) :  $\text{He}^+$ 発光によるプラズマ圏の撮像

電離圏はある高度でふつりと途切れる。電離圏上方をプラズマ圏とよぶ。プラズマ圏と電離圏の境界の定義は特にない。この途切れる上端をプラズマポーズとよぶ。プラズマポーズでは急激に(3-4 枠近く)イオン密度が減少する。

IMAGE による  $\text{He}^+$ 共鳴線を見ると左にプラズマテールが見てとれる。

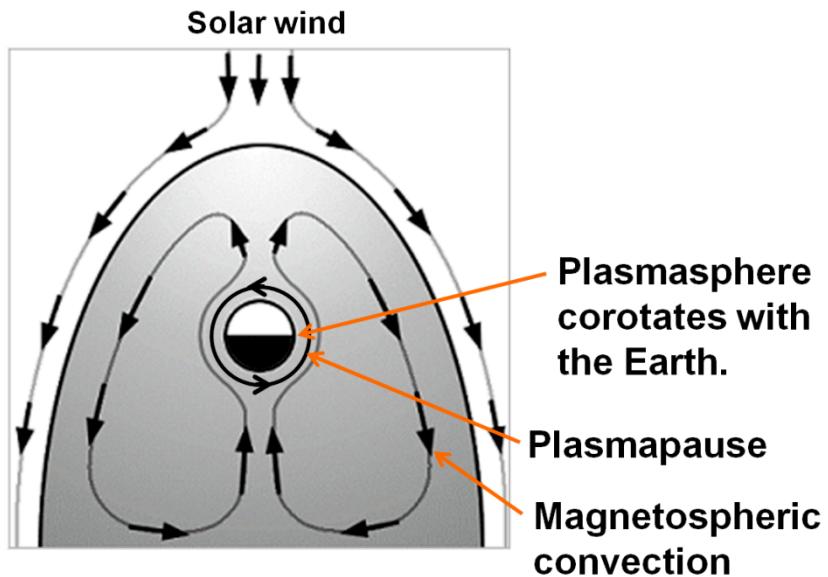
Q 図のどこまでが地球か?

A 明るい部分は地球近傍であり、磁気圏の下の方にあたる。プラズマポーズはもっとぼんやりとした境界の方である。左下側に地球の影があるが、完全に真っ暗にならないのは多重散乱による。

Q 明け方が明るいように見えるのはなぜか

A あまり地方時依存性は無いと思っているが、そもそもちゃんとデータが解析されていない。この画像もスナップショットではなく一種の積分データであることに注意すべき

## Magnetospheric Convection

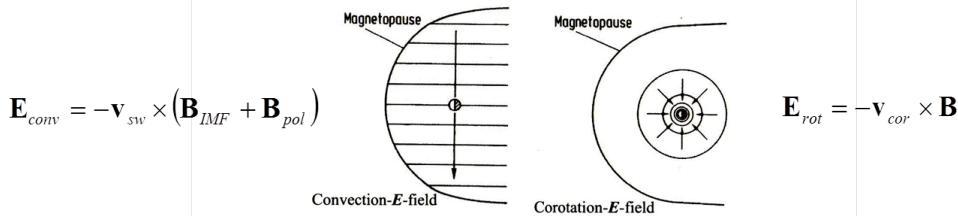


**Plasmaspheric erosion (plasma tail) is the result of enhanced magnetospheric convection.**

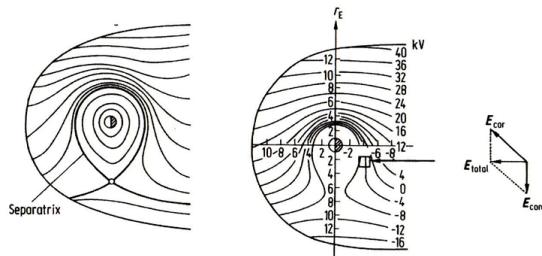
図 58：プラズマ圏内の対流の模式図

プラズマ圏には 2 種類の対流がある。一つは太陽風で駆動される磁気圏対流、もう一つは地球の自転による co rotation である。夕方側境界付近に両者の流れが打ち消し合う特異点が存在し、そこがプラズマテールとなってイオンが流れ出る。

## Magnetospheric Convection



**Fig. 6.1.** Configuration of the convection electric field (left) induced by the solar wind plasma interaction with the magnetosphere and the corotational electric field (right) for contours in the equatorial plane (after H. O. Rucker [196]).



**Fig. 6.2.** Superposition of the convection and corotational electric fields. Theoretical illustration of the areas which are separated by a separatrix (left) and typical values for the potential difference in the terrestrial magnetosphere (after H. O. Rucker [196]).

図 59 (上) : 太陽風による対流で発生する電場と地球自転に伴う電場  
 (下) : 対流および地球自転に伴う電場の重ね合わせ

太陽風は数時間程度のタイムスケールで変動することがあり、それによってプラズマポーズも同程度の時間スケールで複雑な挙動を示す。

(図なし)

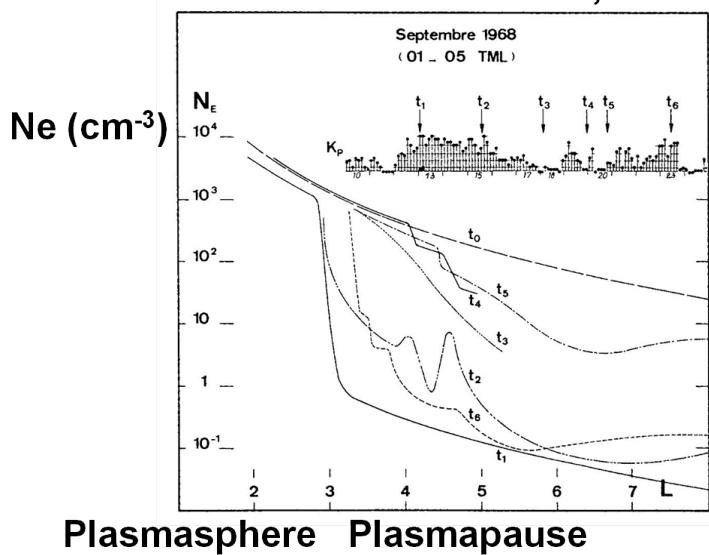
図 60 : プラズマポーズの形状の時間変化

10 時間程度の間でプラズマポーズの形状が大きく変化している。太陽風の速度が上がると電場が大きくなり、一気にプラズマが昼側に運ばれて外部に逃げていく。それが落ち着くと再び元のプラズマポーズの形状に戻っていく。

太陽風が弱まった場合は、地球に巻きつくようにプラズマテールの位置が変化する。その後再びもとの形状に戻るが、それは電離圏からのプラズマ供給レートに依存する。

# Plasmapause

Corcuff et al., 1972



Carpenter and Park, 1973

$$L_{pp} = 5.7 - 0.47K_p$$

The location of the plasmapause depends on the magnetospheric disturbance.

Wave-like irregularity in the plasmapause results from transient, localized processes associated with substorms.

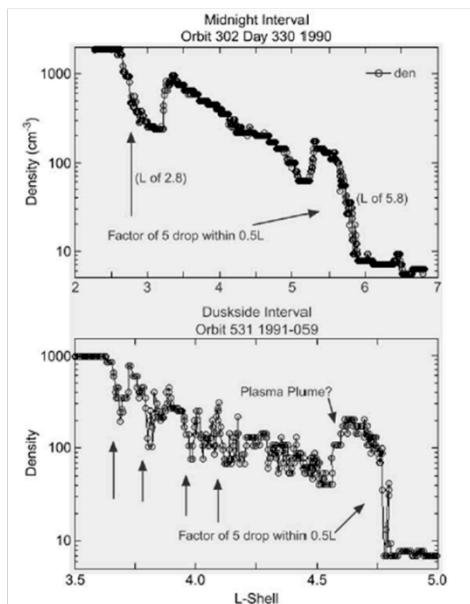
Plasma is supplied continuously from ionosphere.  
(Refilling)

図 61：地球半径に対する各種プラズマの数密度

イオンの種類ごとにプラズマポーズの位置が違う。また太陽活動度に応じて位置が変化する。式の  $K_p$  は極域磁場の変動成分パラメータを表す。プラズマは電離圏から供給されるが、はぎとられる際の距離はまちまちである。

# Plasmapause

## Plasmapause Crossings by CRRES



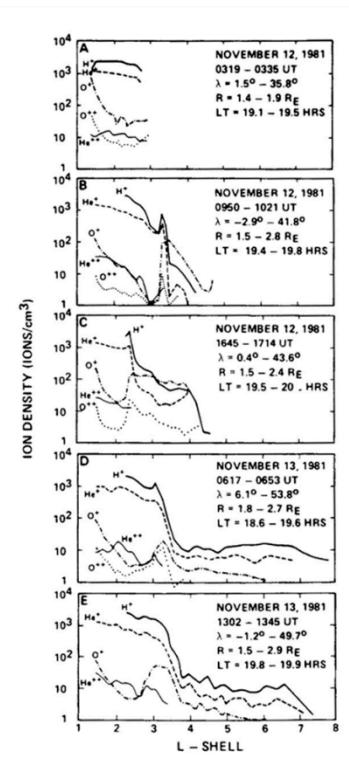
Moldwin et al.

図 62：衛星データによるプラズマ密度観測

上図：過去のプラズマポーズの位置が記録されているように見える(左の二つの谷)

下図：レイリーテーラー不安定のような構造が見てとれる

## Ion Composition



$O^+$  ion density reaches values comparable to the  $H^+$  density in the region  $L=3-4$ .  
(Horwitz et al., 1984)

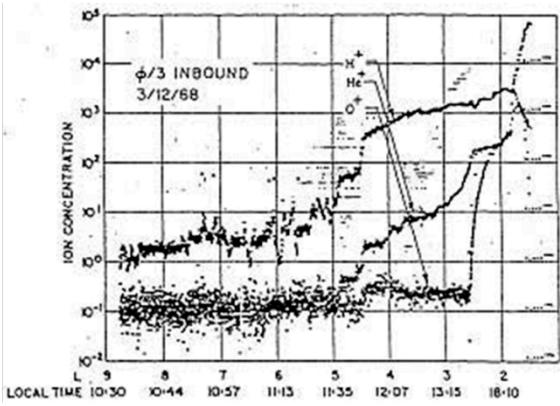


図 63：各プラズマの存在密度分布

プラズマはぎとりのタイムスケールは大変短い。しかし電離圏からのプラズマの供給レートは、イオンの重さによって異なる。軽いイオンから先にプラズマ圏内を満たしていくことになる。

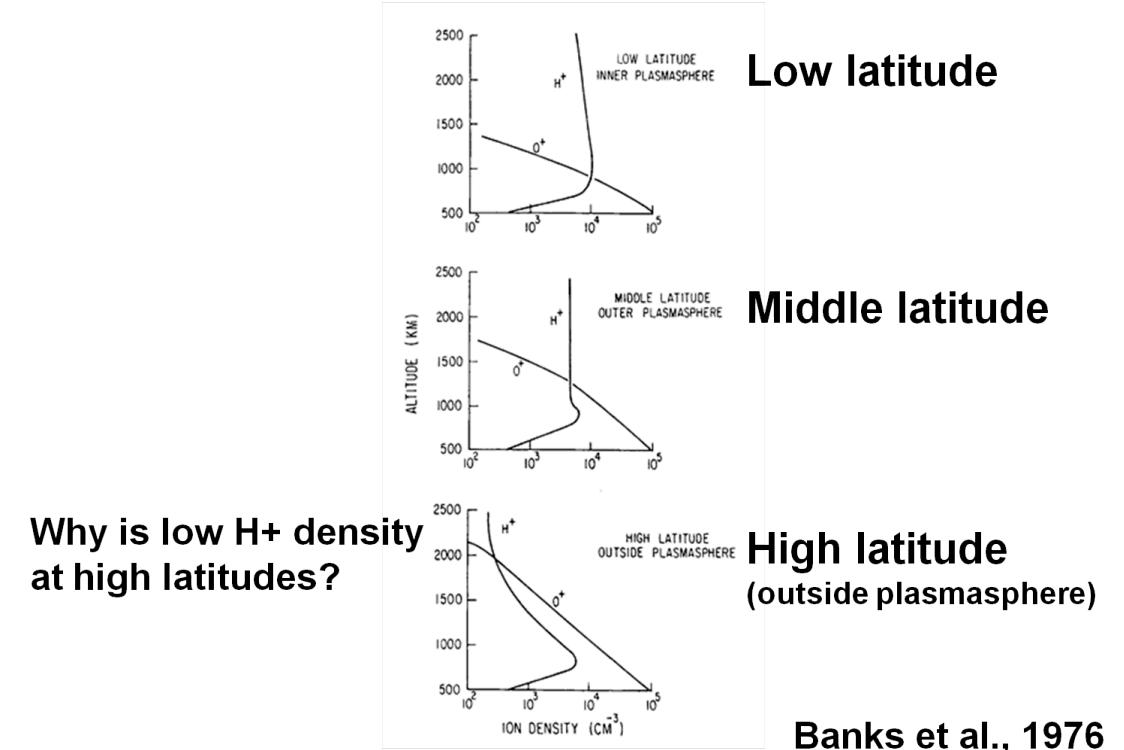
上図では軽いイオンほど遠距離まで充填されておりプラズマポーズの位置が遠くなっているように見える。

Q プラズマポーズは磁力線が消えているのでは?

A 消えているわけではない。電場ドリフトによって流出するので磁力線が残っていても関係ない。これは重量に寄らないので、イオンの種類に関係なく逃げることができる。

ひさきではイオンごとの光を観測して、イオンによるプラズマポーズの違いをイメージとしてとらえることを目標としている 見積もりが正しければちゃんと撮れるはずだがまだデータが上がってきてない

## Topside Ionosphere



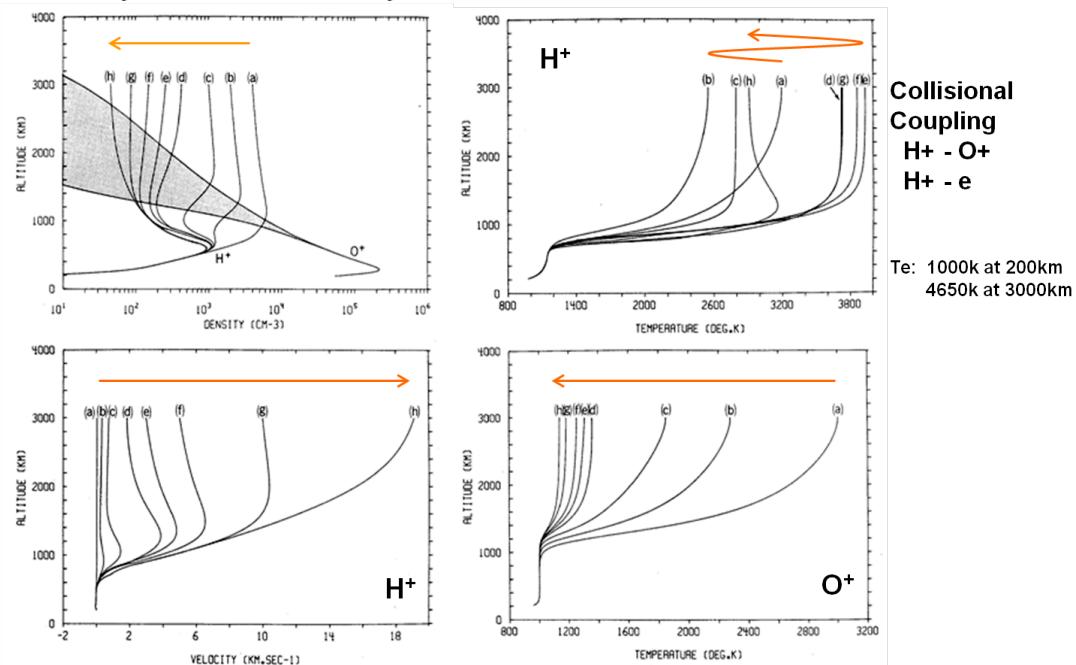
Banks et al., 1976

図 64 :  $H^+$ および  $O^+$ イオン密度の高度分布の緯度による違い

電離圏からプラズマ圏へのイオン供給メカニズムについて考察する。緯度ごとにイオン密度の交差分布を比べてみると、高緯度においてのみ上空で  $H^+$ が少ないことがわかる。すなわち、この領域からプラズマ圏にイオンが飛んでいくのではないかと Banks は考えた。

# Modeling of Topside Ionosphere

Boundary Condition: H+ density at 3000km altitude.



Raitt et al., 1975

図 65 : Banks によるイオン速度のモデル計算

Banks は  $\text{H}^+$  の密度を上部境界条件として与えたモデル計算をおこない、たしかに観測されたような密度構造で有れば上空で速度が上がりプラズマ圏へ向けて流出する可能性があることを確認した。そして、高度 1,000km 付近で超音速流として宇宙空間に流れ出るこのイオンの流れを Polar wind と名付けた。

## Polar Wind

Axford [1968] pointed out that the lighter ions must escape from the earth by the flux of escaping photo-electrons with energies greater than 2.4 eV, and suggested the ion escape speed of ~10 km/sec.

This phenomenon is called ‘**Polar Wind**’.

The polar wind is important as a source of magnetospheric plasma [Shelley et al., 1982; Moore et al., 1986; Chappell et al., 1987].

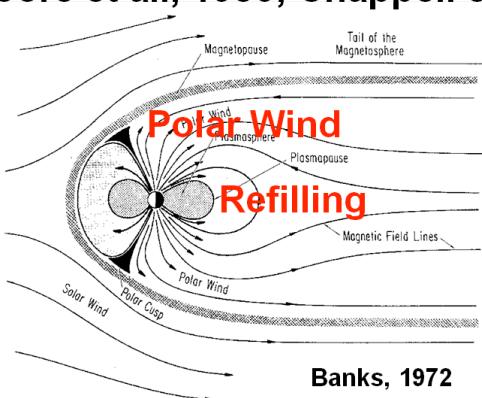
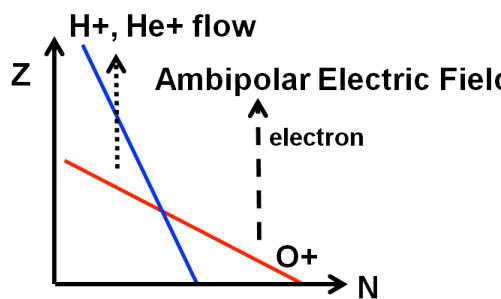


図 66 : Banks の考えた Polar wind 発生のメカニズムの概念図

Polar wind はどのようにして起こるのだろうか? Banks は以下のようなメカニズムを考えた。

1. O+イオンとともに電子ができる、これが地球の磁力線に沿って逃げていく
2. この電子の流れによって電場が発生する
3. この電場によって軽い H+, He+が逃げていくようになる

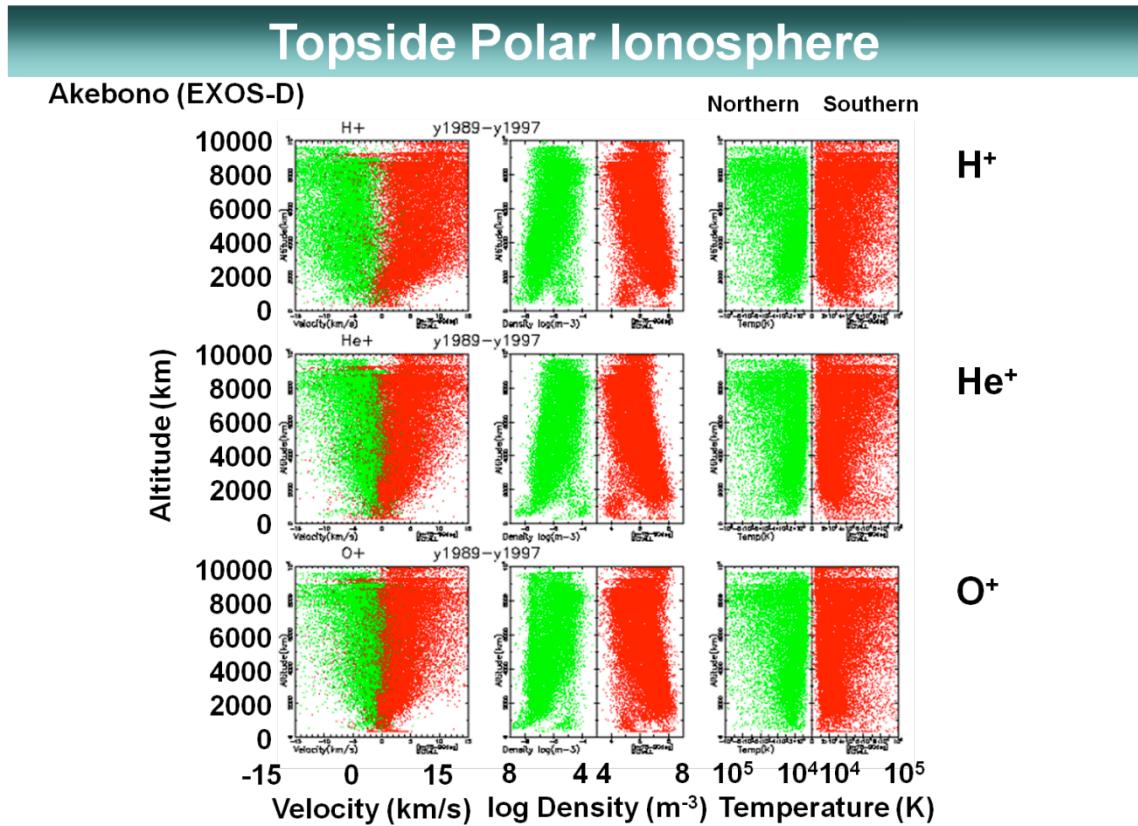


図 67: あけぼのが測定した各イオンの速度や密度の高度分布. 赤が南半球, 緑が北半球での測定

Banks の説をたしかめるべく, あけぼのは実際にイオン速度の測定をおこなった.  
 南半球のイオン: 磁力線方向に正の速度を持ち, 高度 2,000 キロを超えたくらいから速度が上がる.  
 北半球のイオン: 磁力線方向に負の速度を持つ. すなわち電離圏から磁気圏方向に流れる.  
 この観測から, H<sup>+</sup>や He<sup>+</sup>だけでなく O<sup>+</sup>も同様に流れ出していることが分かった. Banks の説は O<sup>+</sup>が流出しないことを前提にしていたため, メカニズムが異なることが示唆される.

**Q** 高高度で南半球イオンが逆向きに動いているように見える.

**A** あまり気にしなくてよい. あけぼのは極軌道衛星であり, この図はいくつかの周回軌道の観測を足し合わせた結果である. 件のプロットはおそらくもっとも外側の軌道のときのデータであり, そのような領域で数 eV 程度の電位を測るのはなかなか難しいという事情もある.

QA 加速領域はイオンごとに異なる?  
そんな風にも見えるが詳細はわからない。

Q 衛星の軌道と高度の関係はどうなっているのか?  
A 時期による。極夜や白夜の影響もあるだろう。観測は9年間ほど撮った結果なのでおよそ平滑化されていると思ってよい。

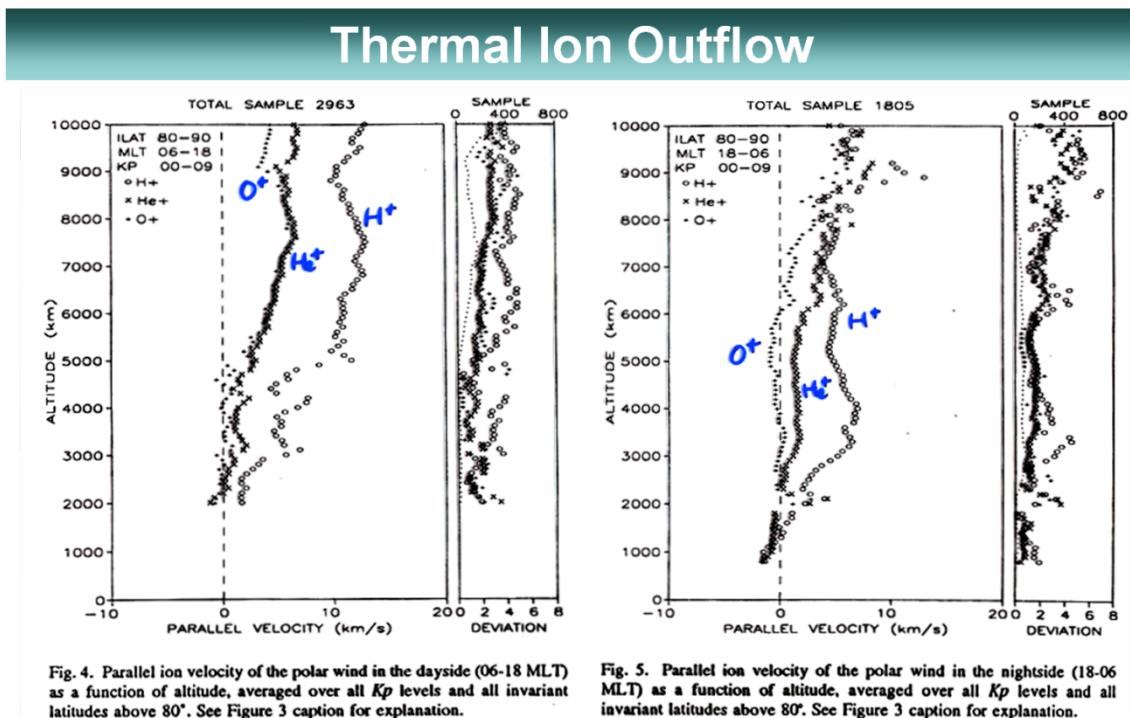


Fig. 4. Parallel ion velocity of the polar wind in the dayside (06-18 MLT) as a function of altitude, averaged over all  $K_p$  levels and all invariant latitudes above 80°. See Figure 3 caption for explanation.

Fig. 5. Parallel ion velocity of the polar wind in the nightside (18-06 MLT) as a function of altitude, averaged over all  $K_p$  levels and all invariant latitudes above 80°. See Figure 3 caption for explanation.

Akebono/SMS

**Near magnetic pole,  
all ionospheric ions are flowing to Magnetosphere.**

図 68：各イオンの速度を平均した高度分布（3年程度のデータ）

高度があがると徐々に速度が上がる傾向が各イオンに共通してみられる。しかしながら先述の通り  $O^+$  も流れ出てしまっており、Banks の説の前提が崩れてしまう。  
そのため Polar wind の駆動には諸説あるが、ここでは最もひろく受け入れられている説を紹介する。

Q 数千キロの高度での平均自由行程は?  
A 数千キロのオーダーである。

## Transversely Accelerated Ion

Akebono (EXOS-D)

Thermal H+

O+

Energetic Ele.

Ion

Electric Field

Magnetic Field

ELF wave E

B

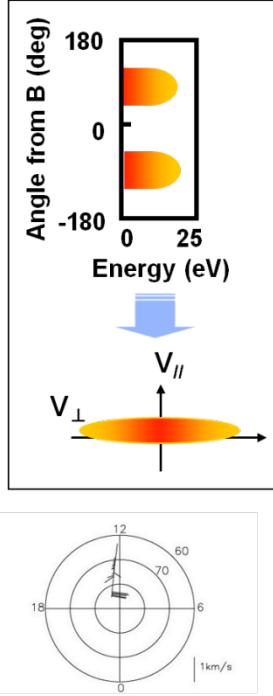
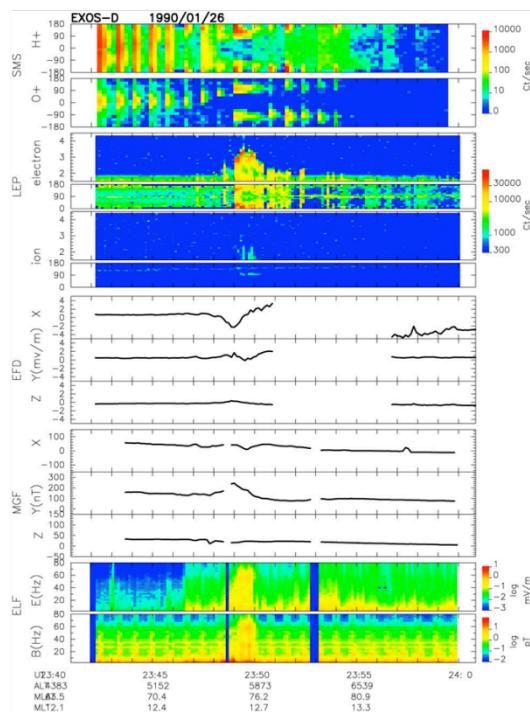


図 69：衛星周回軌道経路に沿ったイオンや電場の分布

H+, O+がともに、ある時点で突然マクスウェル分布からずれる。すなわち、磁力線に対して垂直な方向に「円盤」を形成し、速度分布がUの字状になる。これは速度分布としては不自然なので、マクスウェル分布へ復元しようとする力により波動が発生する

## Outflow and Plasma wave

Akebono (EXOS-D)

Kasahara et al., 2000

### Broadband Noise

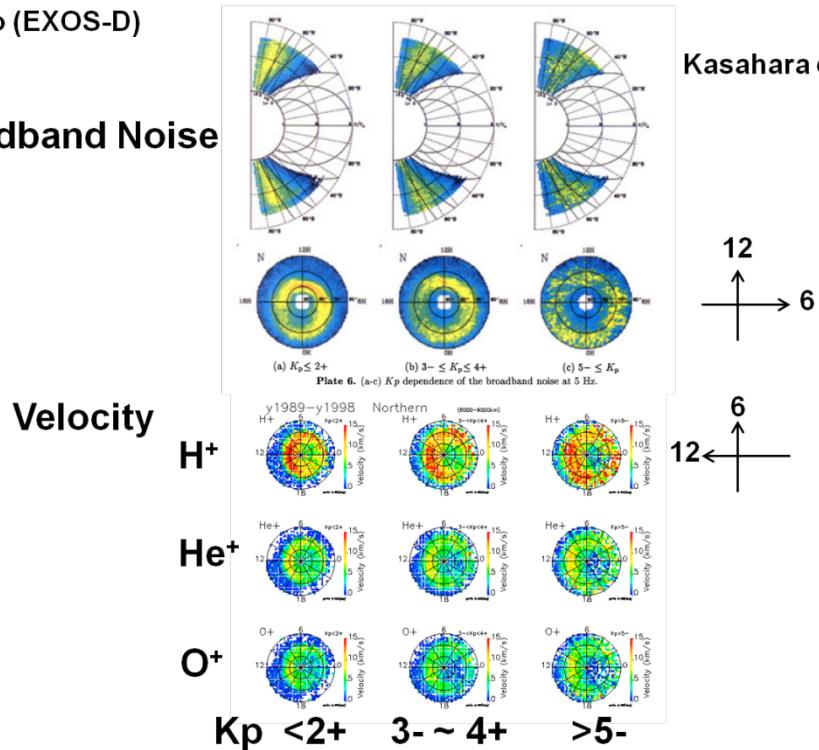


図 70：北極側から見たときのプラズマ波動および各イオンの速度分布の太陽活動度による変化

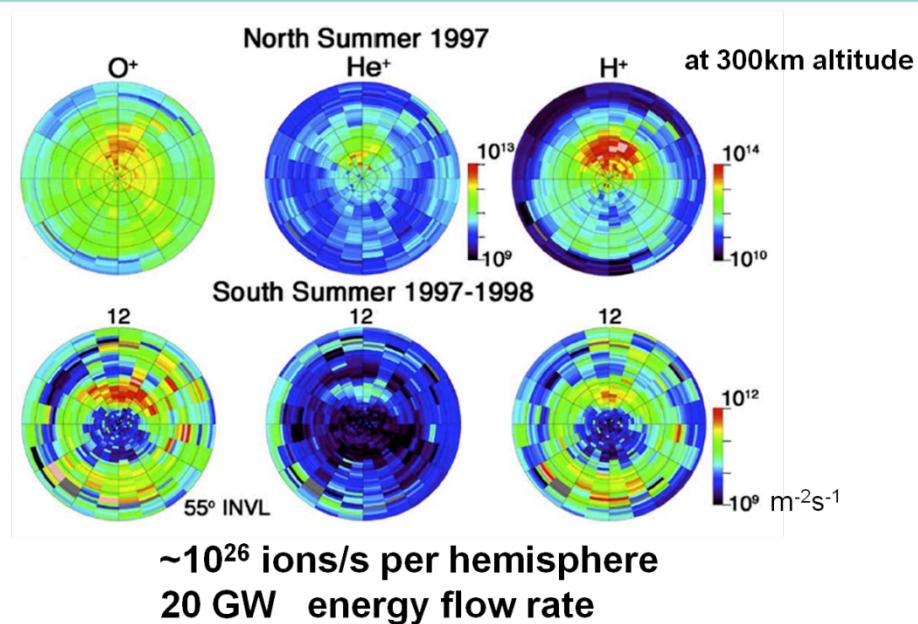
プラズマ波動は極を中心にドーナツ状に強い領域を持つ。それに対して、流出速度は同じくドーナツ状の領域を持つものの、極上空からも流出しているように見える。太陽風の変動が大きくなると速度分布も大きくズレる。

電磁場を測定してみると、同じようなドーナツ構造が見えぴったり重なることが分かっている。

**Q** ドーナツ状の流出はイオンの種類に寄らない?

**A** 寄らない。どのイオンも同じような分布となる。

## Amount of Outflow



**POLAR / Toroidal Imaging Mass-Angle Spectrograph**

**Lennartsson et al., 2004**

図 71：他の衛星で観測した季節毎のイオン速度分布

やはり環状構造が見えており、時期に関係なく毎日流出が起きている。どうやってこれだけの流出を起こすのか？そのエネルギーを得るメカニズムが難しい。

**Q** ヘリウムだけ少ないように見える。

**A** フラックスではそう見えるだけであろう。

**Q** ここでの流出からプラズマポーズまでどうつながるのか？

**A** 極域から磁力線に沿ってらせんを描きつつ流出していく。赤道に近いところは磁力線が短いのですぐにプラズマで満たされ、平衡状態となる。ある程度離れると磁力線が長くなり充填に時間がかかる。なおかつ太陽風によってはぎとられるため、完全に充てんされるにはさらに時間がかかる。

**Q** 磁力線が閉じていれば地球に戻ってくるのではないか？

**A** 基本的に逃げない。しかし電場がかかるために  $E \times B$  ドリフトで動いてしまう。

**Q** 流出する向きに磁力線があるのなら、オーロラはどうやって地球側に入り込んでくるのか？

**A** Polar windは外向きに働くが、せいぜい数十eV。オーロラを作るイオンはキロeV レベルのエネルギーを持つので、Polar wind に逆らって動くことができる。

**Q** 北半球と南半球の夏で主要な Polar wind の成分が違うように見える。

**A** あまり信じない方がいい。極軌道衛星なので同時に観測はできない。その辺無視してとりあえず描いてみただけであろう。太陽風の条件等いくらでも異なる点がある。結局のところ、他の条件を揃えて比較というのはデータが足りず贅沢な話である。

**Q** 南北で流出量に違いがあるように見えるがそれも怪しいのか？

**A** わからない。上記のような理由があるのでどうしても偏見を持って見ざるを得ない。理論家はデータを事実として理論を組み立てようとするが、観測もそこまで絶対ではないといいい例だろう。

**Q** じゃあ何を信じればいいのか？

**A** 共通の特徴等のソリッドな事実を中心に取り出す。理論的につじつまの合わない部分はデータがおかしいものとみなす場合もある。

**Q** 二桁くらい違っているがそれもデータの扱いの問題になるのか

**A** 速度はせいぜい 10 m/s 程度の誤差であろう。密度に関しては一桁くらいずれていても許容範囲と思っている。

## Transversely Acceleration

### ●Acceleration by Cyclotron Resonance

#### Ion Motion

$$m \frac{d\mathbf{v}_{//}}{dt} = -\mu \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial s} - \frac{GMm}{r^3} \hat{\mathbf{s}}$$

Lorentz force

#### Magnetic Moment (conserved)

$$\mu = \frac{mv_{\perp 0}^2}{2B_0}$$

#### Ion Energy

$$\frac{d}{ds} \left( \frac{1}{2} m v_{//}^2 + \mu \mathbf{B} + GMm \left( \frac{1}{r_0} - \frac{1}{r} \right) \right) = 0$$

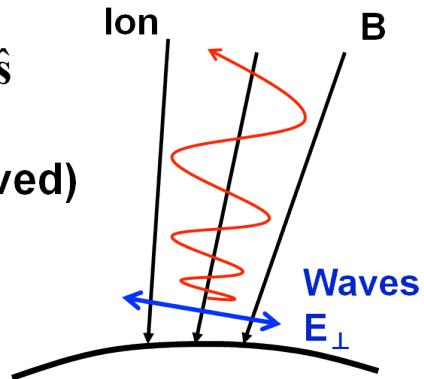


図 72：イオン流出のメカニズム

どうやって速度分布に U の字構造を作り、外に飛び出させるか？これには、まず地表でイオンの速度分布が円盤状になり、それが極に動いて U の字状になるという 2 段階を考えられる。

プラズマの波動は 100Hz 程度であり、イオンのサイクロトロン周波数は数十 Hz である。よってプラズマ波動の周波数はサイクロトロン周波数をカバーしている。プラズマの波動はあまり伝搬せずローカルな波となる。これが電場と磁場を生む。その磁力線に垂直な方向に波が動き、イオンは磁力線に垂直な方向にサイクロトロン運動を始める。

さらに、サイクロトロン周期と波の振動周期の位相が合うと共鳴が起きる。そうなると、サイクロトロン運動しながら徐々に加速していく。このとき、最初の速度が遅いイオンと早いイオンで速度ができるため、U 字状の速度分布の円盤ができる。

惑星磁場は上空に行くほど磁力線の幅が開いている。そのような磁場の中で加速されると、磁力線に垂直な方向にサイクロトロン運動しようとするため、徐々に上方向に逃げていく。その運動の早さは Ion motion の式であらわされ、一度加速されればどんどん上にあがっていく。

(図なし)

さらに、電離圏とプラズマ圏の関係はもう一つ別の見え方が存在する。極域の電離層に磁気圏の電場の動きが反映されることがわかっている。

(図なし)

それを観測した結果を示す。地上レーダーと CHAMP を用いて極域でイオンの速度を測ると、綺麗な渦を描いていることが分かる。これは上記の理由で電離層に磁気圏の電場の動きが反映されている結果と考えられる。そのため、太陽風が変わればパターンは変わる。さらに、CHAMP が観測した中性風の流れもこのパターンと同様に動いていることから、これを含めた大循環モデリングが必要とされている。

Q プラズマポーズ内のローカルなドリフトの結果が地球極域に反映されるのはなぜか？

A 現象としてはローカルだが、太陽風によって駆動されているのでプラズマポーズ内全体に電場が発生している。地球極域においては  $E \times B$  ドリフトは昼面から夜面への向きになる。

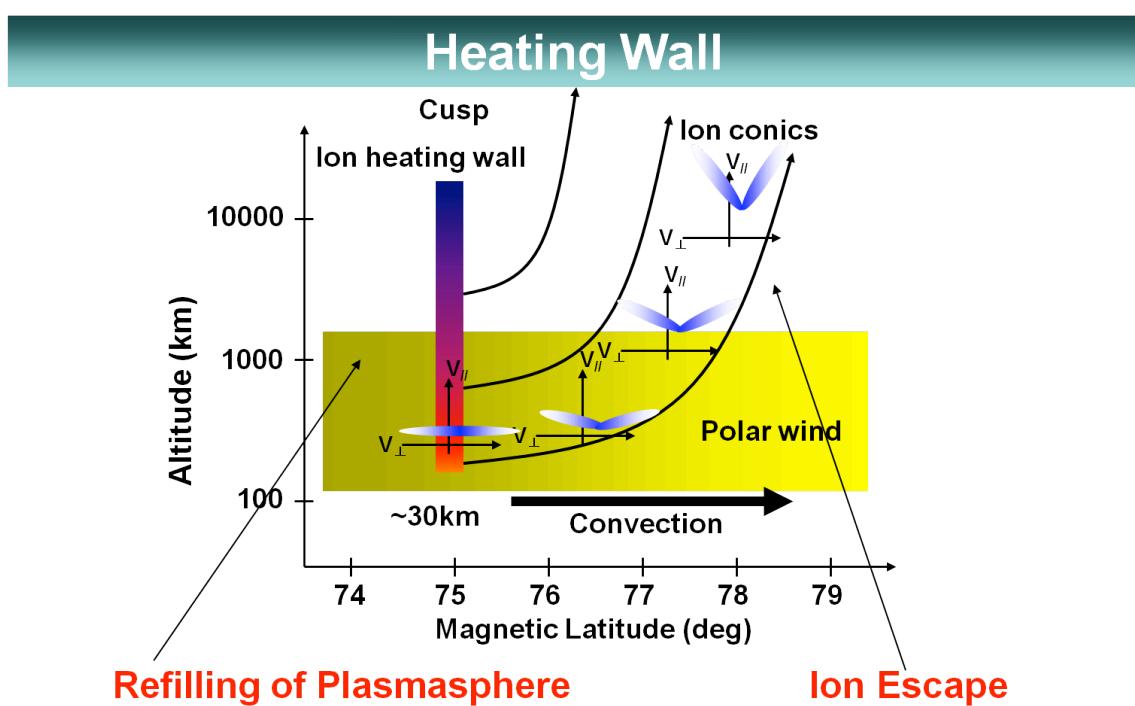


図 73：速度分布の U 字構造形成と極域への移動

極域からの Polar wind はどの高度範囲で加速されるのか？

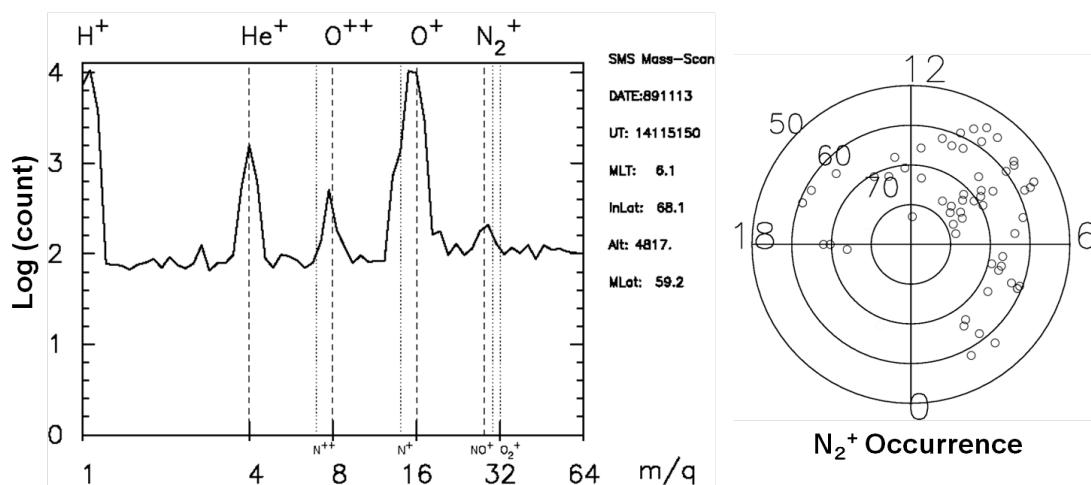
かなり上方まで加熱範囲が広がっているように見える。これを Ion heating wall とよんでいる。流出が強い領域では、イオンの  $E \times B$  ドリフトで昼から夜へ輸送されつつ、高度方向で加熱されるという 2 つの動きの重ね合わせが起きている。

加熱された円盤は極方向へ移送されつつサイクロトロン運動する。この過程でのイオンの分布変化を Ion conics とよぶ。

極域で環状に存在するプラズマ波動は、昼側が特に強く加熱されており、波動が励起されやすい。それが上記のメカニズムで極域に押し流され、結果的に極域全体から流出しているように見えるのではないかと考えられている。

## Molecular Ion Heating

Akebono (EXOS-D)



**In the polar ionosphere, all ions are heated and flow to the magnetosphere.**

図 74：各種イオンの観測カウント数

H<sup>+</sup>や He<sup>+</sup>, O<sup>+</sup> 以外にもイオンがあり、より重い分子イオンも逃げているという観測結果がある。E 層付近(高度 100km あたり) から一部逃げているようだ。特に太陽が活発なときに分子イオンがよく観測される。

## N<sub>2</sub><sup>+</sup> Ion Heating in Cusp

### Optical observation of N<sub>2</sub><sup>+</sup> by MSX satellite (Romic et al. 1999)

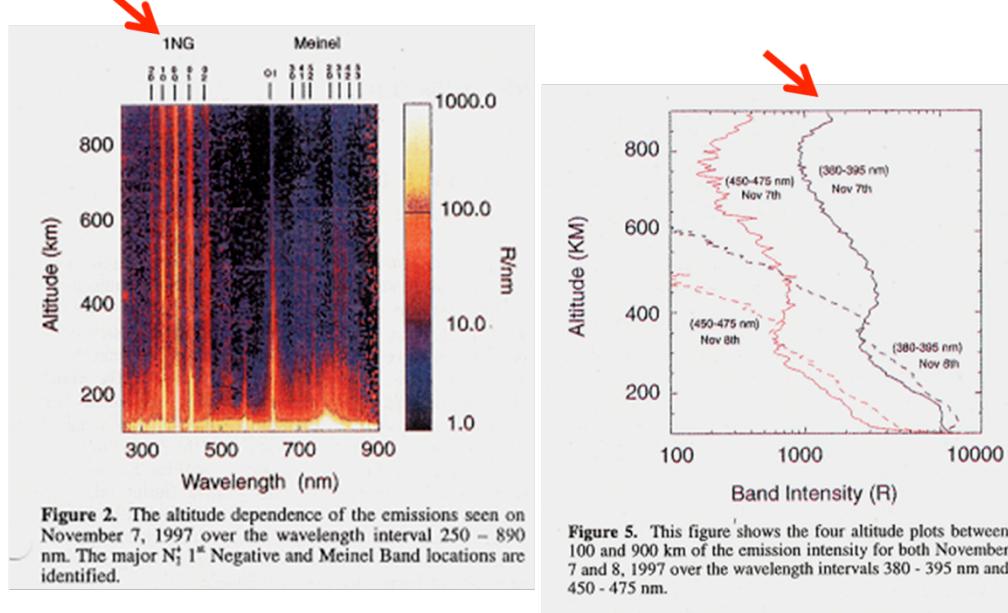
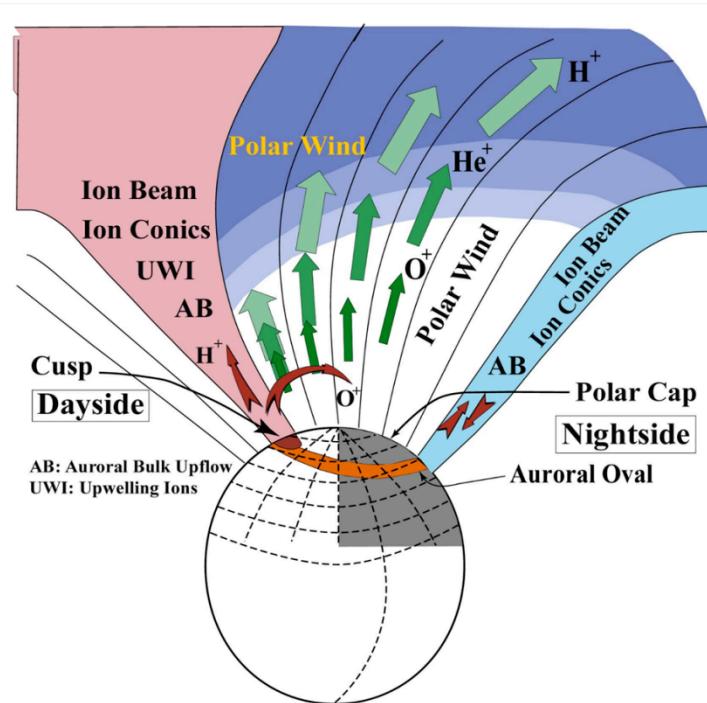


図 75 : N<sub>2</sub>+が持つ太陽光散乱特徴の撮像

N<sub>2</sub><sup>+</sup> 太陽光散乱のラインを見ると、かなりの高高度まで光が見える。他のイオンが逃げているのと同じくらいの位置と思われ、このような重いイオンをも流出させるだけの駆動力が働いているということが分かる。

## Ion Outflow from Topside Ionosphere



Banks は H+ や He+ による Polar wind を予言したが、じつは O+ なども逃げることがわかった。極域には環状の流出領域があり、特に昼間側から多く流出している。流出したイオンは磁力線の方向に加速されつつ U の字状の速度分布を作りながら外向きに飛んでいく。それと同時に  $E \times B$  電場によるドリフトで夜側に移動する。また、より重い分子イオンも流出する。

(図なし)

地球の磁力線を太陽風の下で描くと、地球の磁力線が開いた領域が存在する。これを Cusp とよぶ。ここにエネルギーの流入が起き、そこで波動が起きイオンを加熱し飛びださるのであろう。

Q Ion heating wall の役割は?

A 波動が起きているのは環状の領域だが、イオンの流出は極域全体で起きている。この流出のうち、極域直上での流出を説明するために必要である。そのためには、十分な高度範囲で加熱が起きていないなければならない

Q ERG では何を観測するのか

A オーロラ帯上の放射線帯を調べるのが目的。今まで H+ がメインだと思われていた放射線帯に、実は O+ も多く含まれることがわかつたのでその寄与をちゃんと調べる。

(図なし)

極域から出でていくイオンはどれだけのフラックスか?

いくつかの先行研究にて  $10e8 \sim 10e9$  el/cm<sup>2</sup>/s 程度と考えられているが、このオーダーの見積もりも Banks による先行研究にかなり依存しており、どこまで正確かは怪しい。

このレートだったとすると、プラズマ圏はぎとりから回復するのに数日程度かかる。

(図なし)

先述のとおり、O+などのイオンが地球から離れたところでも観測されている。太陽から来ることは考えにくいため、地球の電離圏由来であろうと考えられている。地球から流出した O+イオンの経路としては 3 種類考えられる。

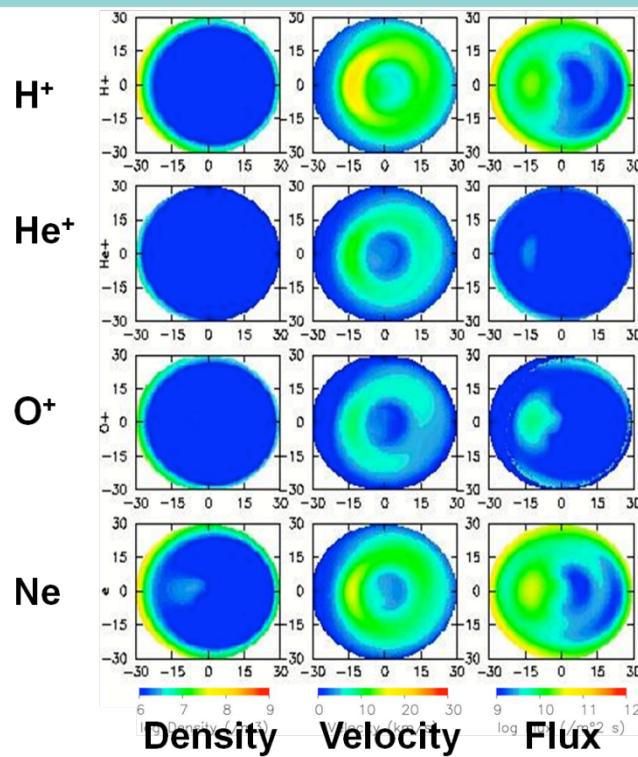
1. 先ほどまでに説明したような Heating wall によって加速されそのまま磁気圏対流に乗って運ばれる説
2. オーロラの磁力線に乗って流出し、昼側に回ったところで地球磁場と太陽風磁場のリコネクションによって磁気圏対流に乗り、運ばれる説。
3. 低緯度側から出したイオンが一旦昼面でリコネクションにより向きが逆転し、地球に戻ってくるものの再び射出するという説。

どの説かはわかっていないが、それらのメカニズムによって地球から離れた場所まで O+ イオンが運ばれるようだ。放射線帯で見つかっている O+イオンも、これらのメカニズムによるだろう。

(図なし)

実際のフラックスを見積るのは難しい。そこで、膨大なあけぼのデータからそれを試みた。各種のパラメータを含む関数を作りデータとのフィッティングを行った。

## Ion Outflow Model



**2003/1/25**  
**Kp:** 3  
**F<sub>10.7</sub>:** 125  
**Altitude: 6000km**

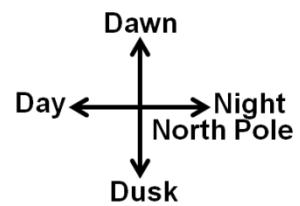


図 76：あけぼののデータを用いてフィッティングを行ったモデル計算の結果

モデル計算から、流出する速度分布を求め、その結果を積分することで流出量を求めた。

## Ion Flux from Ion Outflow Model

### Escape Flux at 6000 km altitude in the northern hemisphere

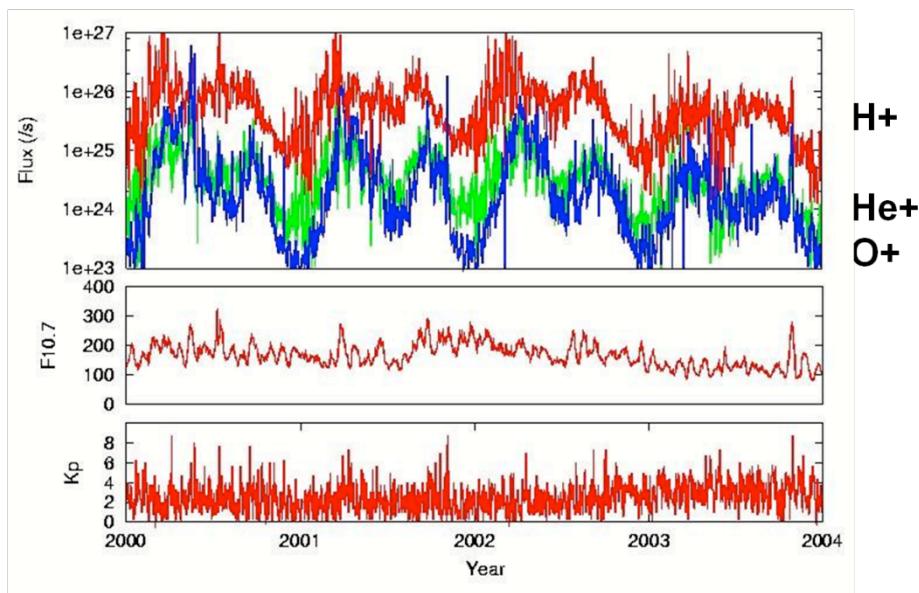
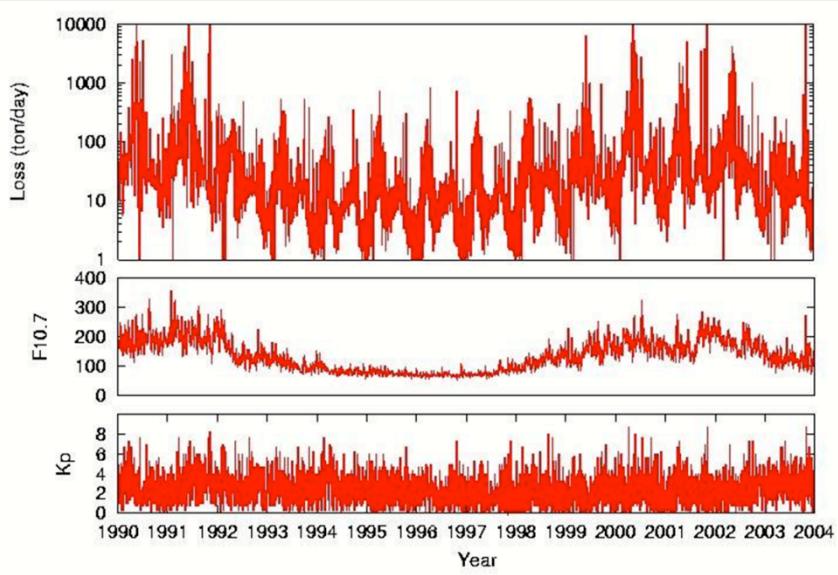


図 77 : 各イオンの流出量. 赤が H+, 緑が He+, 青が O+.

大きな傾向として季節性の変化が見えている. より細かいスケールでは, 短いタイムスケールの太陽活動に応じた変動が見える.

## Mass Loss from Topside Polar Ionosphere



### Total Oxygen Mass in Thermosphere

$$M_t = 4\pi r^2 m_O n_O H = 3 \times 10^7 \text{ ton}$$

図 78：先の流出量を重量に直したもの

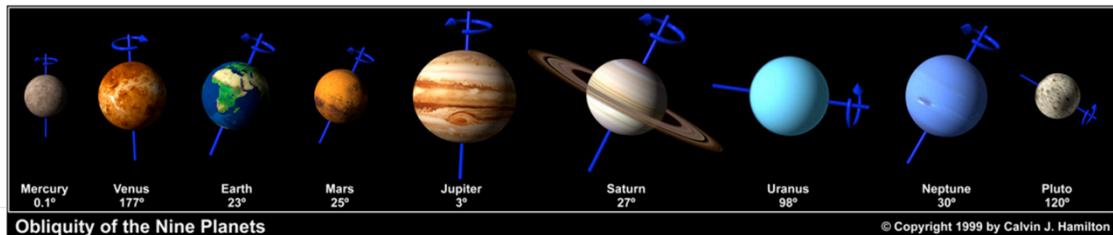
一日あたり数十から 100 トンほどが逃げている。熱圏の総質量がおよそ  $3 \times 10^7$  トンほどなので、このレートだと数百日程度で熱圏が無くなってしまう。

Q これだと地球全体もなくなっちゃうのではないか？

A 十億年くらいで地球大気も全部なくなってしまうようなレートのようだ。太陽活動が強かった過去にはもっと速かったかもしれない。地球の大気進化に大きく影響している可能性はあるだろう。

# Planet

Distance									
0.39	0.723	1	1.524	5.203	9.539	19.18	30.06	39.53	
<i>Period around the Sun</i>									
87.9d	224.6d	365.2d	686.9d	11.8y	29.4y	84.0y	164.8y	247.7y	
<i>Period of Rotation</i>									
58.7d	243d	24h	24.6h	9.84h	10.2h	17.9h	19.1h	6.39d	



Obliquity of the Nine Planets

© Copyright 1999 by Calvin J. Hamilton

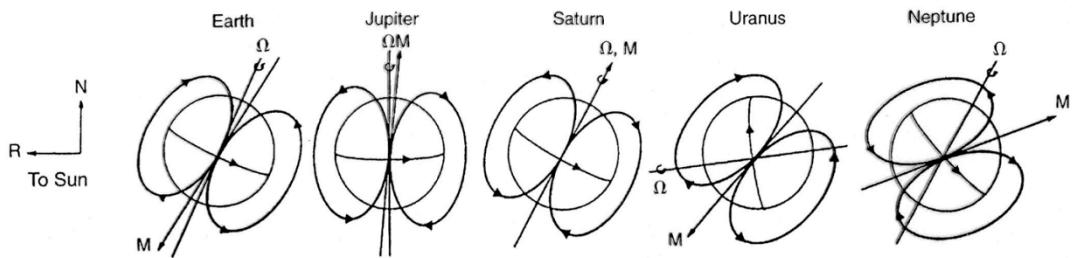
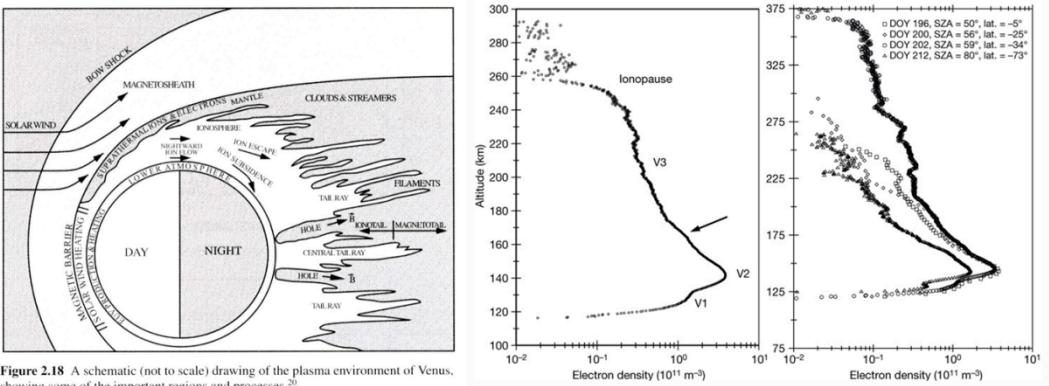


図 79 : 磁場を持った惑星

これらの惑星は電離圏・プラズマ圏を持ち、磁気圏対流も存在する。よって地球同様にプラズマポーズが存在するはずである。しかし現在はっきりと見つかっているのは木星のみ。地球と同じではないだろうが、同様の知見を活かせるはずであろう。

## Venus Ionopause



$$\left( \rho \mathbf{V} \mathbf{V} + p + \frac{B^2}{2\mu} \right)_{SolarWind} = \left( \rho \mathbf{V} \mathbf{V} + p + \frac{B^2}{2\mu} \right)_{Magnetosphere}$$

$$(\rho \mathbf{V} \mathbf{V})_{SolarWind} = (p)_{Ionosphere}$$

$$\rho V^2 = p_0 e^{-\frac{r-r_0}{H}}$$

図 80：金星電離圏の概念図とイオン密度の観測値

金星と火星に注目してみる。金星は濃い大気を持つが磁場が無い。その結果、高度300kmほどで密度が落ちる。地球のプラズマポーズに似ているが形成メカニズムはまったく異なる。磁場が無いため、太陽風によって吹き飛ばされている。

太陽風も電離層も希薄なので、相互作用はしないもの考えられていたが、実際には、太陽風動圧とプラズマの圧力がバランスした高度に境界が形成される。これを Ionopause とよぶ

## Venus Ionopause

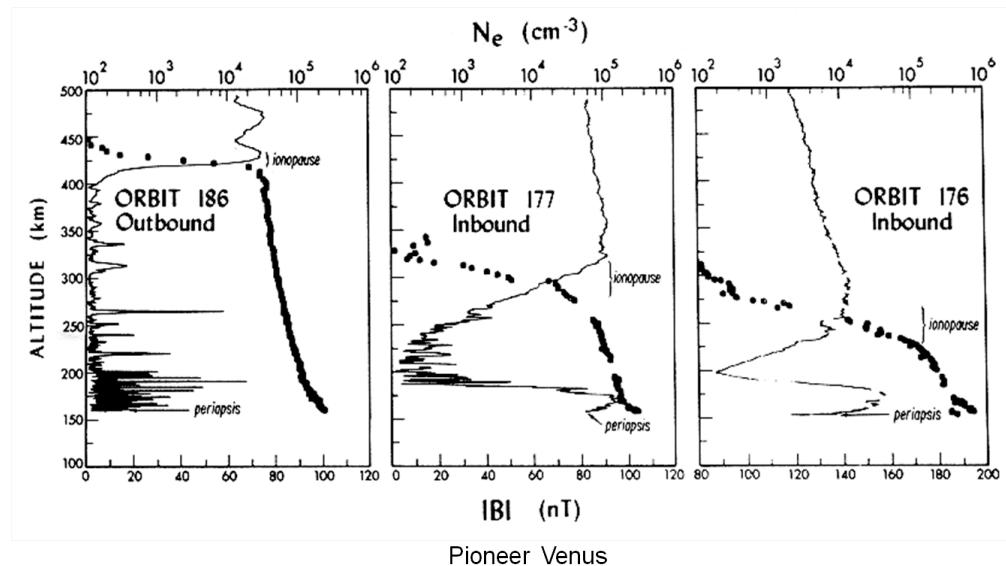


図 81：パイオニアで観測した複数の周回軌道での金星付近の磁場のデータ

磁場と電子密度の観測データを見ると、Ionopause の位置で有無がはっきりとわかっていることがわかる。磁場の圧力とプラズマの圧力がバランスする高度である。

本来、太陽風による磁場はせいぜい 10nT なのに、なぜ 80 nT 近くもあるのか？ これは Ionopause に強い電流が流れるためである。この電流は、太陽風のプラズマ圧と電離圏のガス圧の間に挟まれる領域に流れる。

また低高度領域にある振動はノイズではなく、磁力線のねじれが存在するためであるという主張がある。ほかにも低高度に磁場のピークが存在している軌道があるが、その成因はよくわかつていない。

## Venus Plasma Hole

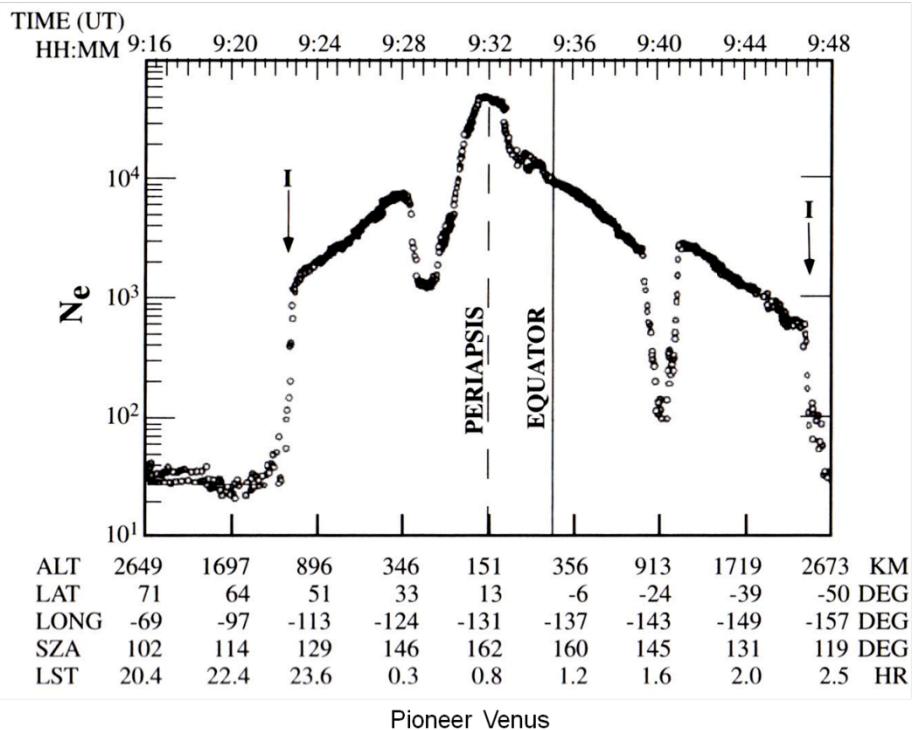


図 82：パイオニアのパスに沿った電子密度分布。

左右のエッジは Ionopause によるものだが、それ以外にも二つの谷が存在している。これをプラズマホールとよんでおり、赤道に対して常に対称に存在している。この領域には磁場が存在しており、磁場とプラズマ圧によってバランスが保たれることになる。これは太陽風が金星周りの磁力線を押し曲げることによって存在していると考えられている。この領域ではプラズマはかなり高温になっており、おおむね太陽風と同等である。

この領域のプラズマは O+ や O2+ が主な成分である。ひさきでもこれらの成分を対象として観測しようとしている。

**Q** かつて金星コアに磁力線がひっかかるという説があったが？

**A** 今ではほとんど見ない。確かに一部の磁力線は内部まで入り込んでいると考えられるので、そういう現象は起こりうるかもしれない。

## Ion Drift Velocity

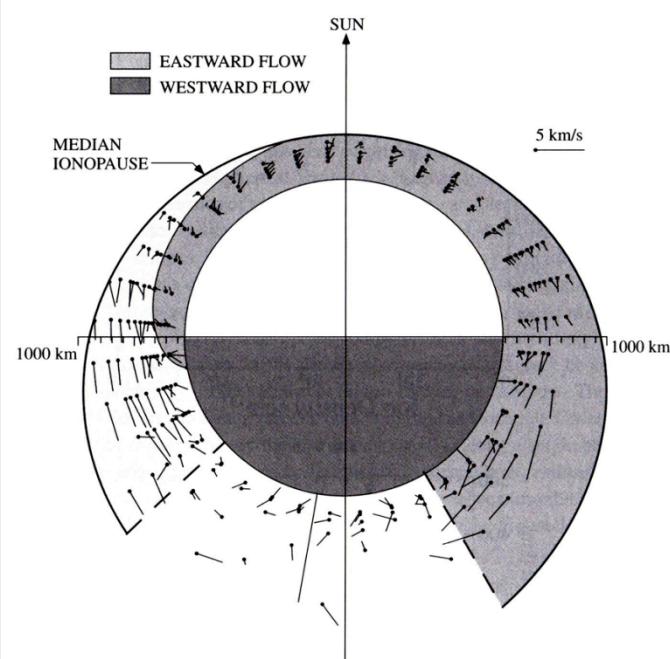


Figure 13.4 Measured ion drift velocities at Venus. Note that the altitude scale is exaggerated by a factor of 4 relative to the planetary radius.<sup>9</sup>

Pioneer Venus

図 83：パイオニアが観測したイオン速度のプロット。各点から延びる線は流れの方向を示す。色つきは時計回りの方向の成分。

昼から夜に向かってプラズマが流れ込んでいる様子が分かる。これらのプラズマはほとんどが超音速となる。全体として東向きの成分(色つき部分)が卓越している。これがスーパー・ローテーションと関係しているという説もある。太陽の磁力線の向きが太陽活動によって変わるので、それを反映している可能性が大きいだろう。

また、夜側に回り込むと一種の乱流状態になる。

Q 左上の領域はどう解釈すればよいのか？

A わからない。現時点では単にデータをプロットしただけ。

## Ion-Neutral Velocity in Earth's Polar Region

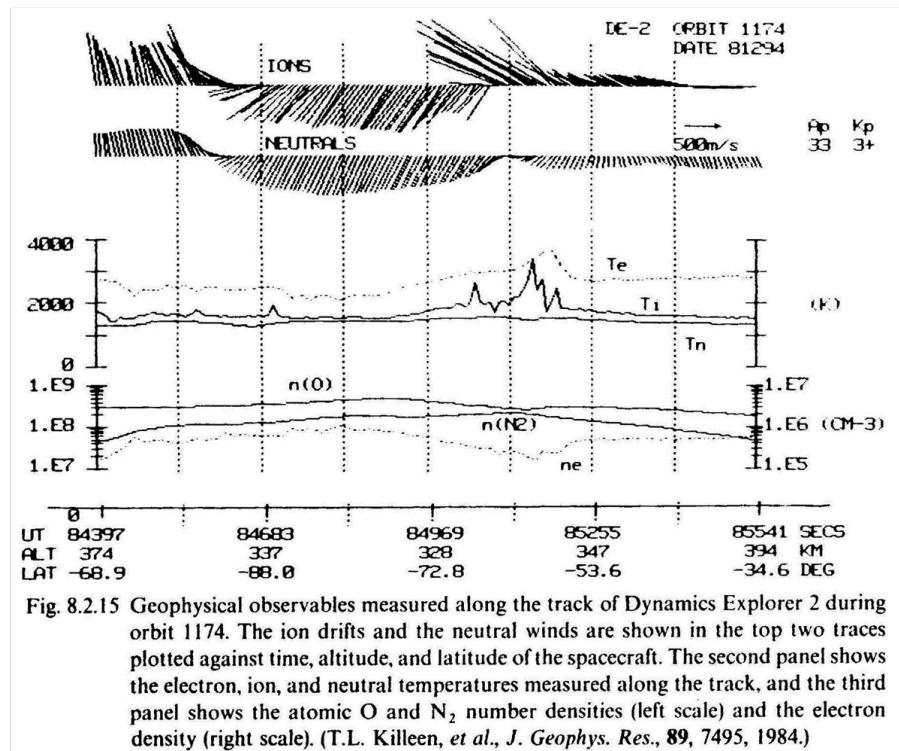


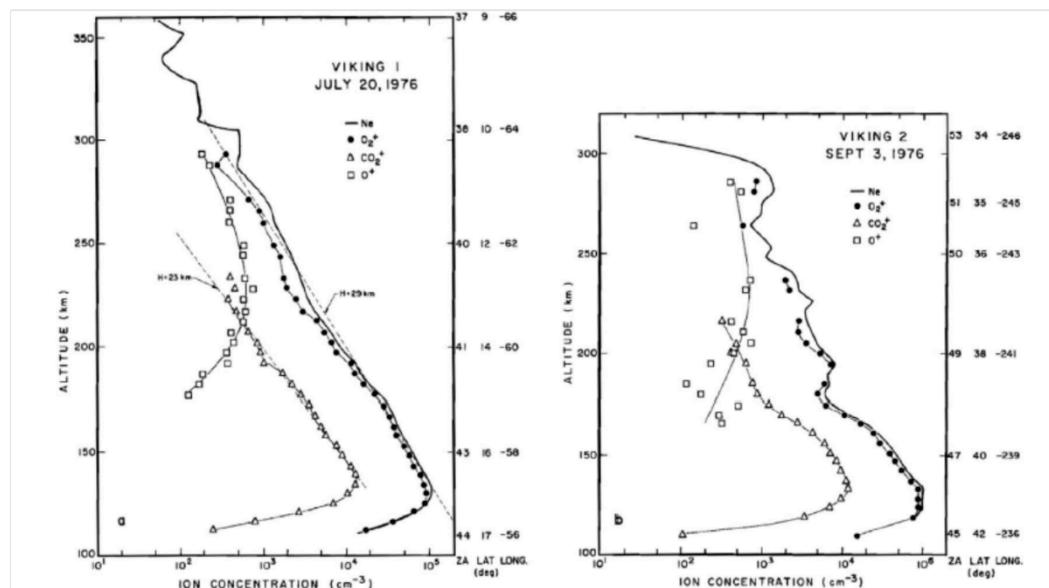
図 84：衛星の経路に沿った磁気圏の中の対流のイオンや中性ガスの流れ

地球の場合と同様に、イオンに引きずられるように中性ガスが動いている。ただし現時点ではまだ中性風の精密な測定はなされていない。

Q これはスナップショットだと思っていいのか？

A そうだと思う。これが定的な流れであるかはわからない。

## Mars Ionosphere



**Figure 31.** Concentrations of  $\text{O}_2^+$ ,  $\text{CO}_2^+$ , and  $\text{O}^+$  measured by RPA on the Viking 1 and 2 Landers. The solar zenith angle (degrees), latitude ( $^{\circ}\text{N}$ ), and longitude ( $^{\circ}\text{E}$ ) are given at the right of each as a function of altitude [from Hanson *et al.*, 1977].

図 85：火星のイオン高度分布

火星においては明白な Ionopause は見られない。データの無い上部に境界が存在していると主張する人もいる。

# Mars Ionosphere

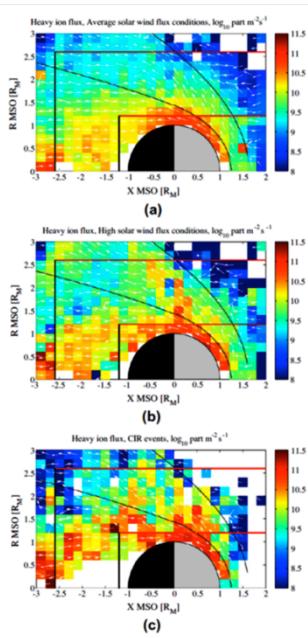


Fig. 6. Flux of ions in the near-Mars space shown projected on the  $X_{MSO}, R_{MSO} (\sqrt{V_{SW} + V_{MSO}})$  plane; the colour scale indicates  $\log_{10}$  flux density ( $m^{-2} s^{-1}$ ), arrow indicates direction of the flux. The top panels shows the planetary escape flux for (a) average solar wind conditions, the middle for enhanced solar wind flux and the bottom panel shows the flux during CIR events. Net escape flux is calculated through the cylindrical surface shown with a red line, and through the circular tail area shown with a black line. (For interpretation of the references to colour in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

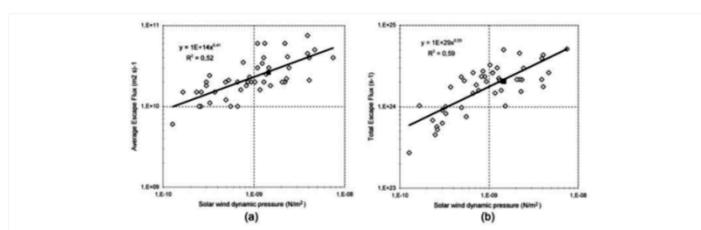


Figure 2. Average (a) escape flux and (b) escape rate of planetary ions versus solar wind dynamic pressure. Average escape flux (diamonds) is here the average outward flux of planetary ions along a spacecraft orbit in the tail outflow region. Total escape rate is obtained from the average ion flux and multiplied by the cross-section area (see text). Solid box marks average values for all orbits.

Mars Express  
Lundin et al., 2008

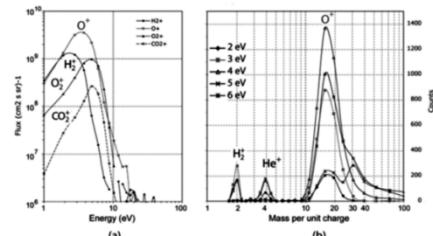


Figure 3. (a) Energy spectra for outflowing low-energy  $H_2^+$ ,  $O^+$ ,  $O_2^+$ , and  $CO_2^+$ . (b) Mass per unit charge spectra for Low-energy ions (energy levels 2–6), demonstrating the mass resolution of the IMA instrument in post acceleration mode 4 (data taken Nov 7, 2008,  $H = 450$ – $350$  km).

Mars Express  
Nilsson et al., 2011

Mars Express  
Lundin et al., 2009

図 86：マーズエクスプレスによるイオン観測

マーズエクスプレスによる火星のイオン観測では、エネルギー的には多くなくとも多様なイオンが流出している様子がわかっている。また、太陽風の圧力が上がるとイオンの速度 or フラックスも増える。太陽風圧力とプラズマ圧がバランスする Ionopause が金星同様に存在し、重いイオンが夜側に流されている。

(図なし)

流出するイオンの総量の見積もりは、地球よりも小さいにもかかわらず、地球と比較して概ね同程度となる。ちなみに金星の場合はこれよりも多少多いが、それでもオーダーはあまり変わらない。地球の場合プラズマ圏にイオンが蓄積されるが、金星や火星ではイオンが常に逃げているような状態である。

(図なし)

$H^+$  と  $O^+$  のイオンの速度は概ね一緒である。つまりエネルギーも同程度と考えられるので、流出に必要な速度はどのイオンも変わらないように見える。

(図なし)

図：探査機のパスに沿った火星の磁場強度観測

火星の残留磁場は、太陽風と相互作用する程度に強い。この磁力線に沿ってイオンが運ばれるため、そこを探査機が通過すると強いイオン流が検出される。

## Atmospheric Escape in Non-magnetic Planet

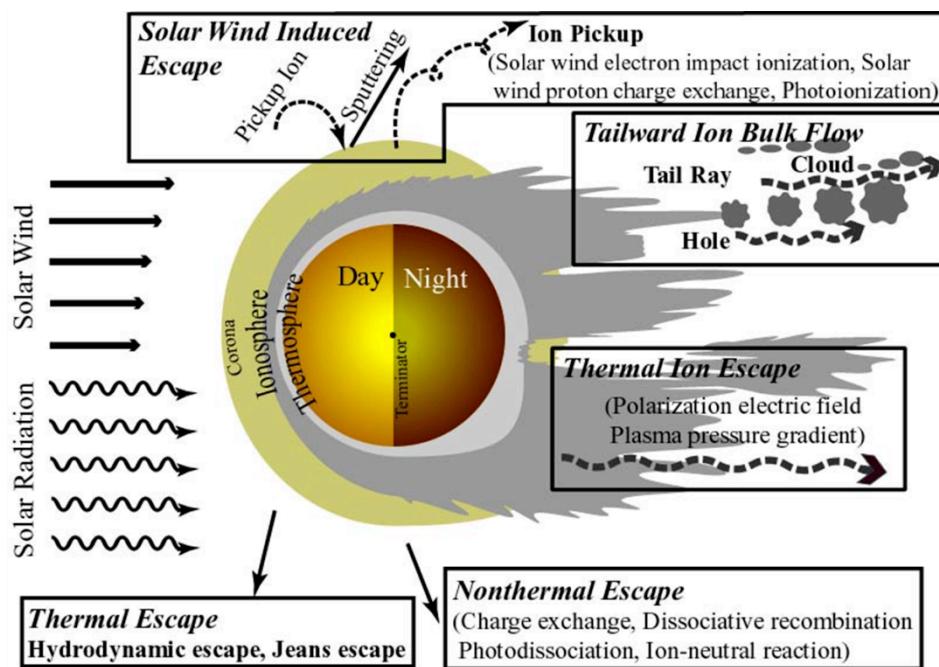
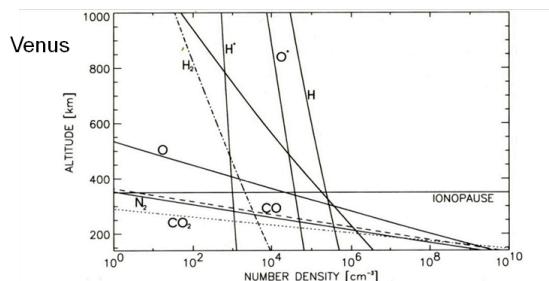


図 87：これまでに述べた金星や火星の電離圏の特徴のまとめ

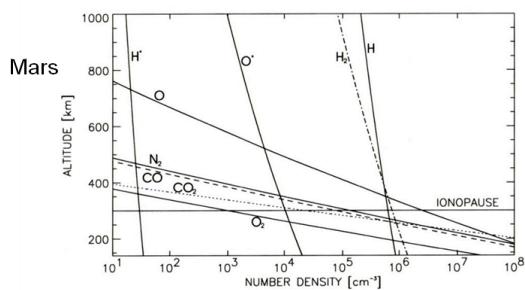
## Nonthermal Atmosphere



**Fig. 4.1.** Cold and hot (\*) density distribution corresponding to medium solar activity of atmospheric constituents in the Venusian atmosphere. The hot  $O^+$  and  $H^+$  particles follow ballistic trajectories up to high altitudes above the cool background gas (courtesy of U. V. Amerstorfer).

Branching Ratio

$O_2^+ + e \rightarrow O(^3P) + O(^3P) + 6.96\text{eV}$	0.22
$\rightarrow O(^3P) + O(^1D) + 5.00\text{eV}$	0.42
$\rightarrow O(^1D) + O(^1D) + 3.02\text{eV}$	0.31
$\rightarrow O(^1D) + O(^1S) + 0.8\text{eV}$	0.005



**Fig. 4.2.** Cold and hot (\*) density distribution corresponding to medium solar activity of atmospheric constituents in the Martian atmosphere. The hot  $O^+$  and  $H^+$  particles follow ballistic trajectories up to high altitudes above the cool background gas (courtesy of U. V. Amerstorfer).

図 88：金星や火星の非熱的な物質の高度分布

ここに示したようなイオンは脱出速度に対して十分な速度を持つ。高高度の各種成分は太陽風に直接さらされることになる。これらの成分がイオン化すると即座に太陽風によって運ばれることになる。

(図なし)

図：タイタンの電離圏におけるイオンの高度分布

# Titan

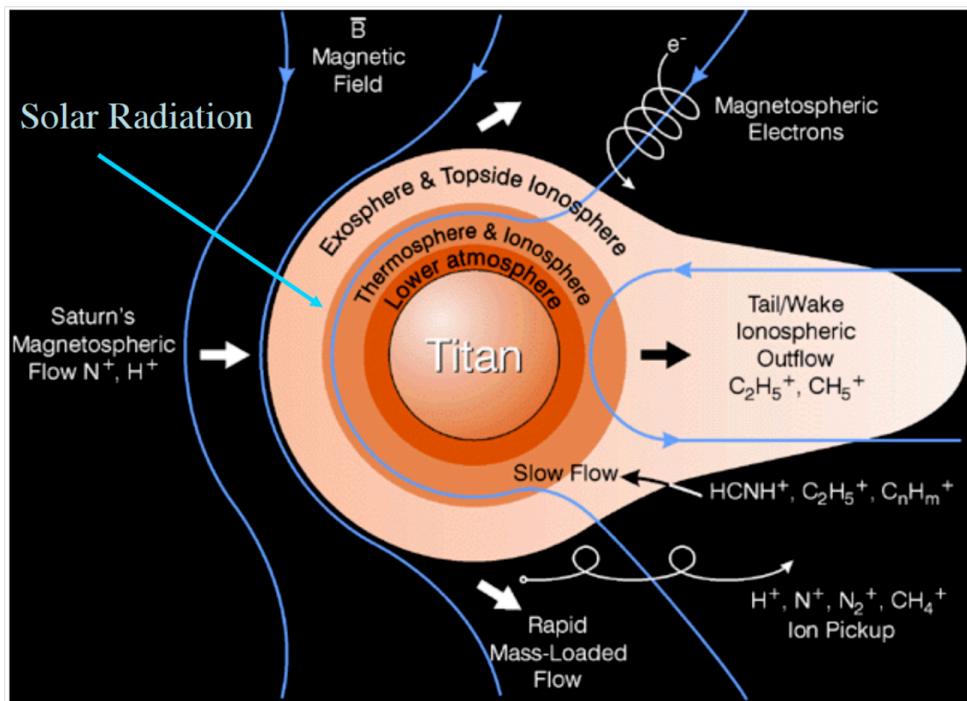


図 89：タイタンの電離圏付近の概念図

タイタンにも Ionopause と思われる境界は存在している。土星磁気圏のプラズマのエネルギーは 1eV ほどであり、明瞭な境界は見えないが、下層との境目は高度 1400km 前後にあると考えられる。これはかなり高高度であり、電離圏がよく発達していると言える。その理由はメタンにあるかもしれないが詳細は不明である。

金星と同様のホールのような構造があることが想像されるが、見つかってはいない。

1. Jeans escape (thermal escape)
2. Nonthermal escape
3. Hydrodynamic escape
4. Photo ion pickup
5. Sputtering
6. Ion escape
7. Electric fields

図 90：イオンの流出メカニズム

惑星ごとにこれらのメカニズムが複雑に作用していると考えられる。SGEPPS では 2 や 6 がメインだが、他のメカニズムも無視できないだろう。

過去に太陽の EUV が強かったとすれば、流出フラックスはもっと大きかっただろう。その効果が惑星大気進化にどう出てくるかは全くわからない。