

電離圏起源 重イオンダイナミクス研究の現状

山田 学 DM2 ゼミ 2005/07/05

お品書き

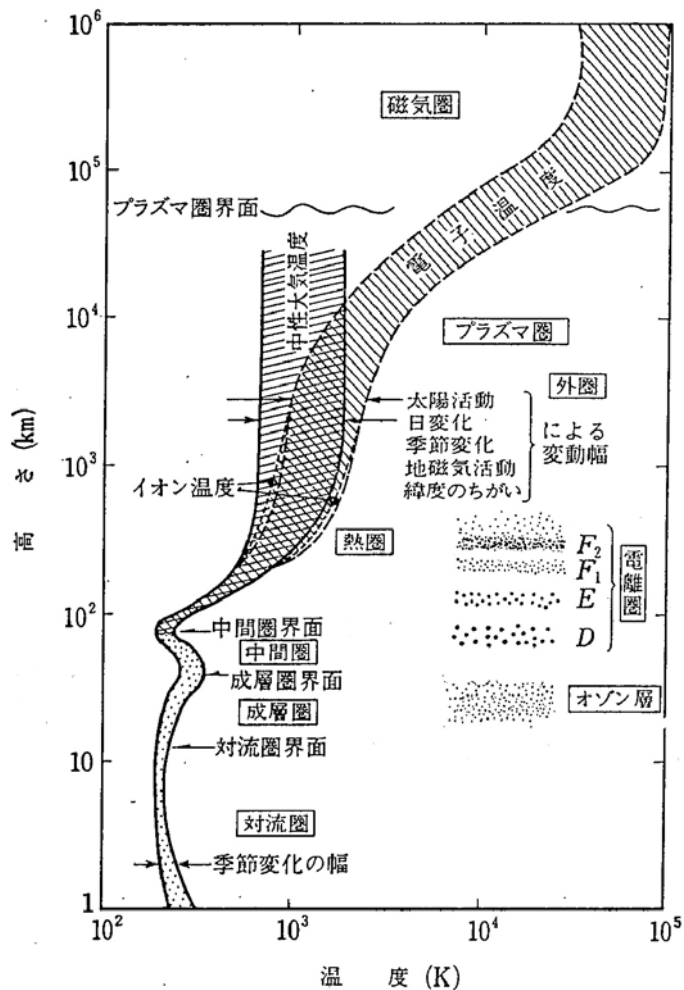
- 重イオンダイナミクス研究の現状紹介
 - 観測方法
 - 各領域での研究
 - 電離圏
 - 加速領域
 - 磁気圏
 - まとめ
- 現在行っている研究について

なぜ重イオンに注目するのか？

- 確実に惑星起源のイオンである
- 重イオンにエネルギーを与えるプロセスそのものへの興味
- 磁気圏を構成する枠組みを再検討すべきかもしれない
- 惑星大気の散逸に対する寄与が未知数
(現在の H^+ に関してはジーンズエスケープと同程度)

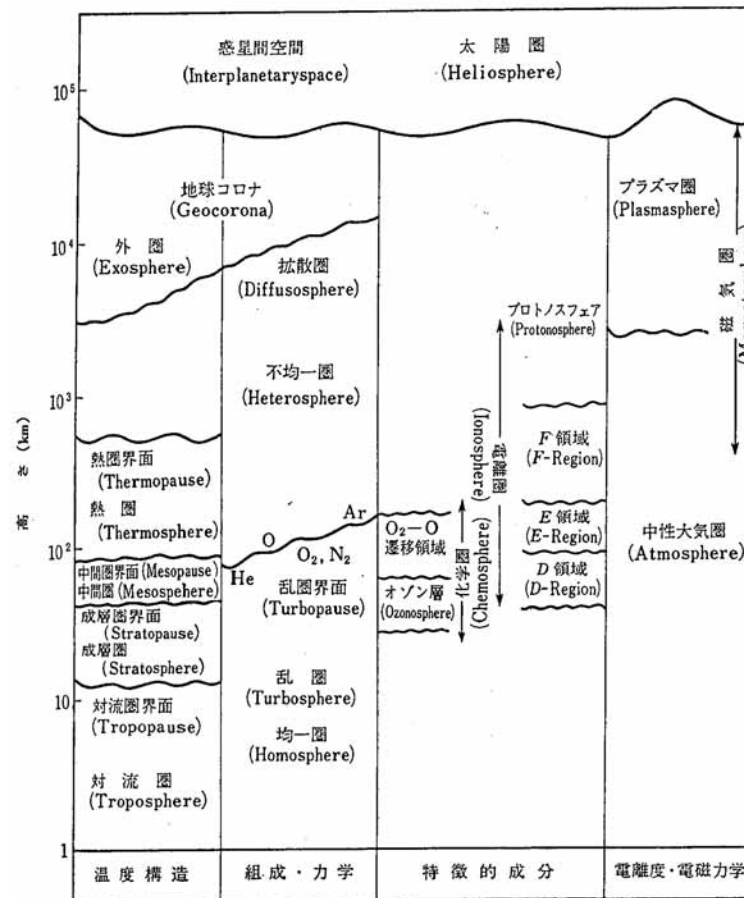
おさらい

大気領域の分類



2-1図 地球大気温度の鉛直分布と各大気領域の名称

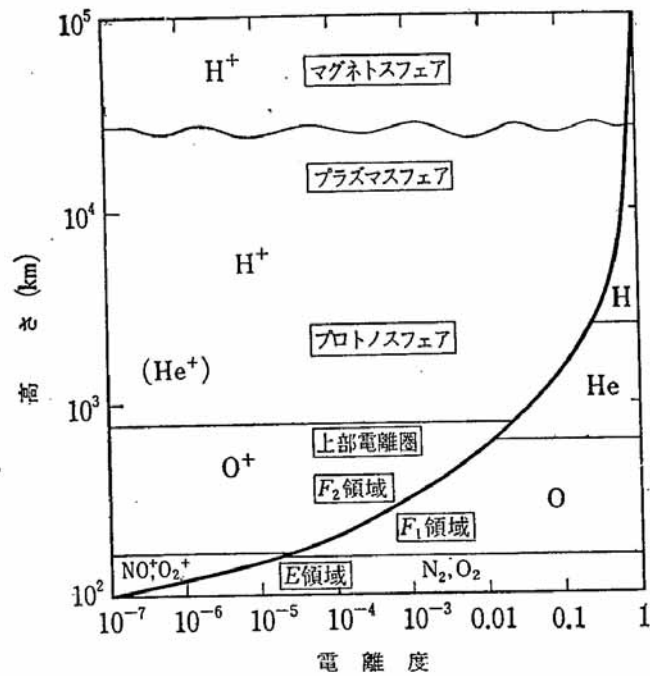
永田,等松(1973)“超高層大気の物理学”



2-4図 大気領域の各種の命名法

永田,等松(1973)“超高層大気の物理学”

おさらい 磁気圏の描像



2-3 図 超高層大気の電離度の鉛直分布. 各大気領域での主要大気成分とイオン種も示してある

永田,等松(1973)“超高層大気の物理学”

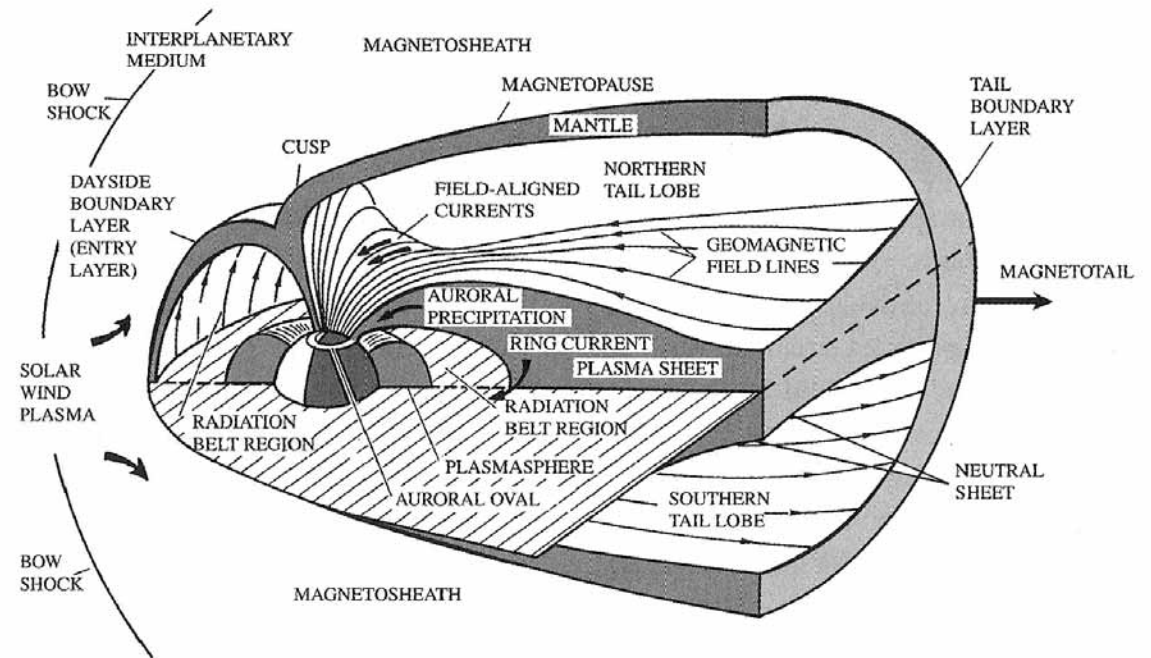
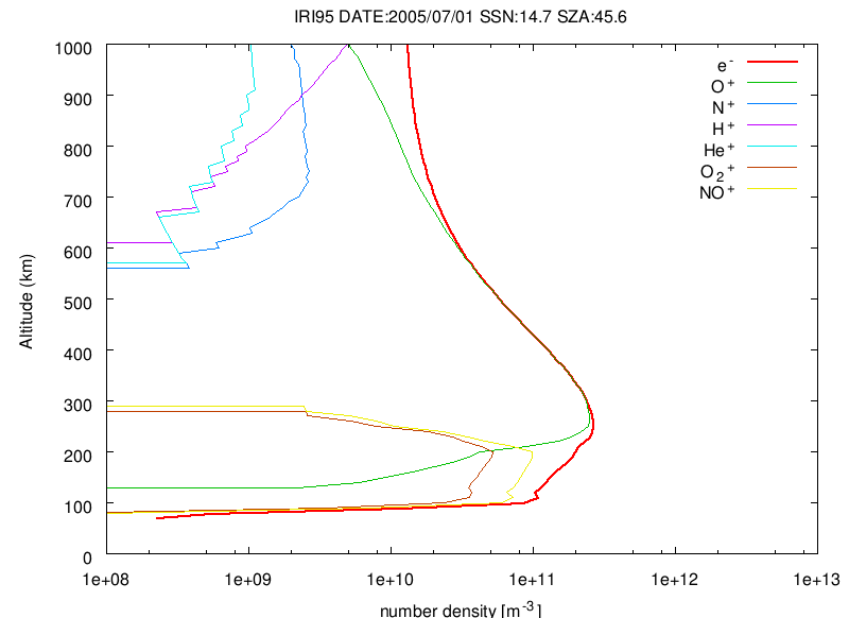
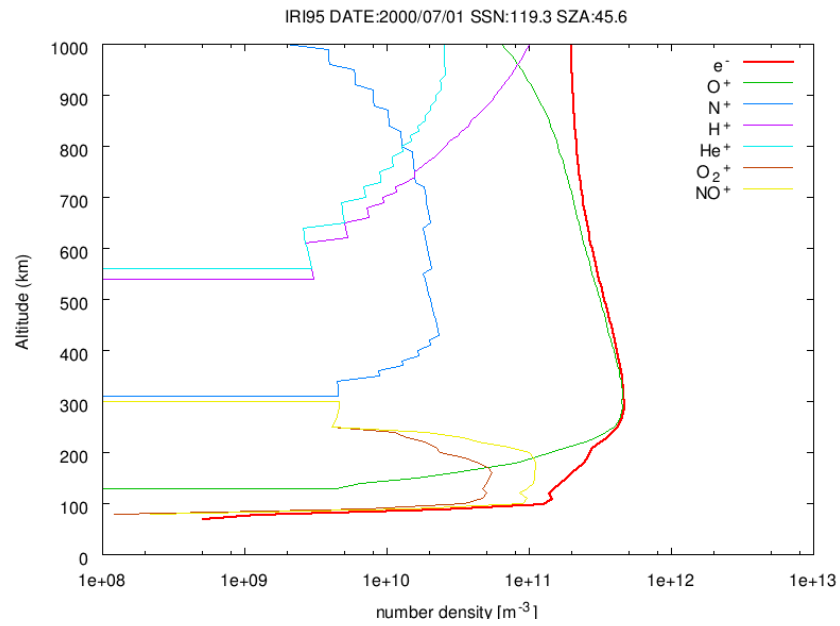


Figure 2.10 Schematic diagram of the Earth's bow shock and magnetosphere showing the various regions and boundaries.⁹ (Courtesy of J. R. Roederer, Geophysical Institute, University of Alaska.)

Schunk and Nagy(2000), "Ionospheres"

極域電離圏の描像



イオン散逸の観測手法

- 非干渉散乱レーダー
- ロケット実験
- 衛星観測
 - 粒子観測
 - 光学観測

イオン散逸の観測手法

非干渉散乱レーダー

- 観測高度: 100 ~ 数100km
- 磁気緯度固定であるが定常観測が可能
- イオン種の詳細はわからない.

ex. EISCATレーダーシステム

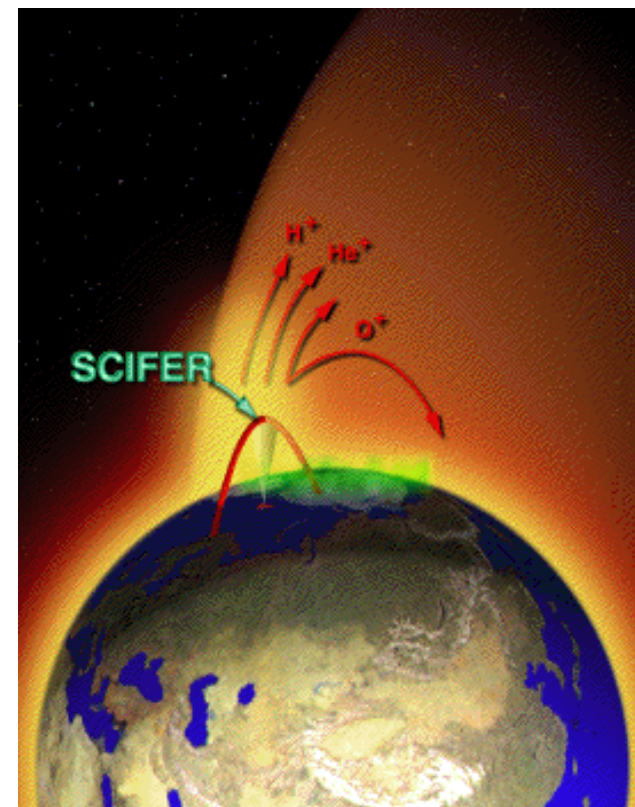


イオン散逸の観測手法 ロケット実験

- 観測高度: 数百 km ~ 千 km 強
- 知りたい領域に特化した観測が可能. 高分解能のデータセットが得られる.
- 打ち上げタイミングが重要

これまで行われた主なロケット実験

- SCIFER (USA), Jan. 1995
- AMICIST (USA), Feb. 1995
- CAPER (USA), Jan. 1999
- SS-520-2 (JPN), Dec. 2000
- SERSIO (USA), Jan. 2004



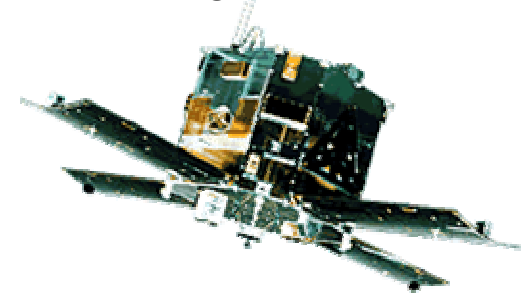
<http://science.nasa.gov/ssl/pad/sppb/Scifer/>

イオン散逸の観測手法 衛星観測

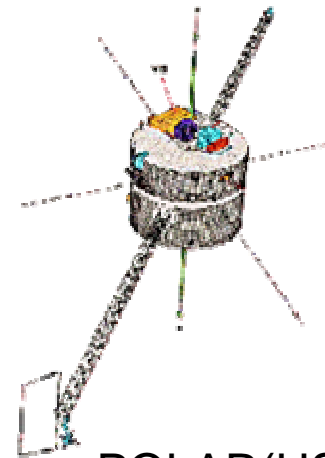
- 観測高度 1000km程度
~
- 粒子観測: 速度空間分布関数を計測. 低エネルギーの計測に工夫が必要.
- 光学観測: イオン上昇流に関しては未開拓.



Viking (Sweden)



Akebono (Japan)



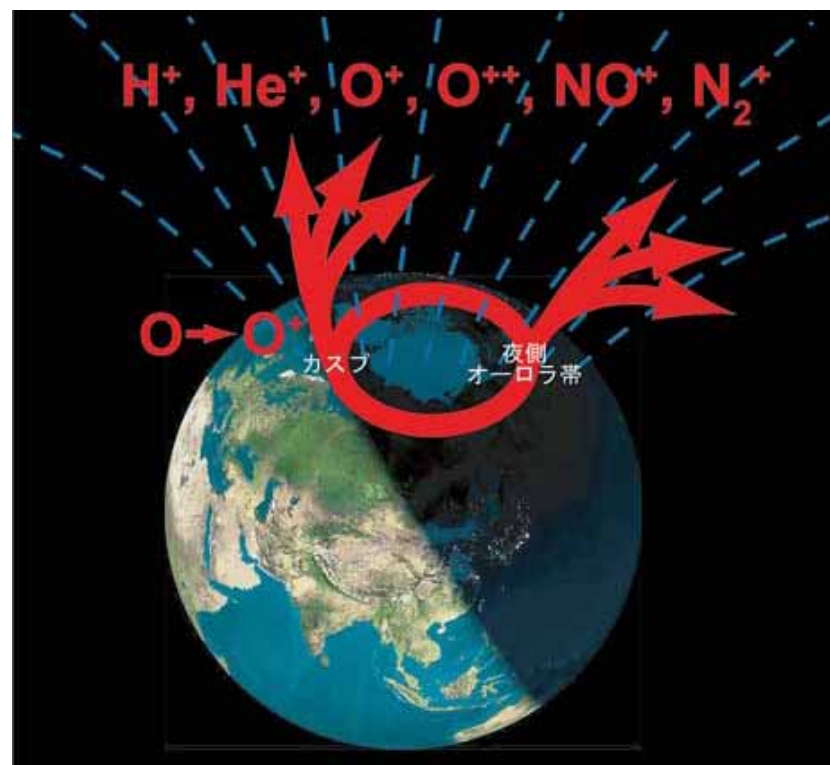
POLAR(USA)

極域電離圏

～ 地球起源イオンの供給源 ～

イオン上昇流 (Ion upflow)

- 極域電離圏で生じるイオンの上向き bulk 流
- 典型的な速度は数100 ~ 1000m/s程度
- 上空で更なる加熱・加速を受けた場合、磁気圏プラズマのソースとなる。



STEL Newsletter No. 40, 2005.

イオン上昇流発生にいたる素過程

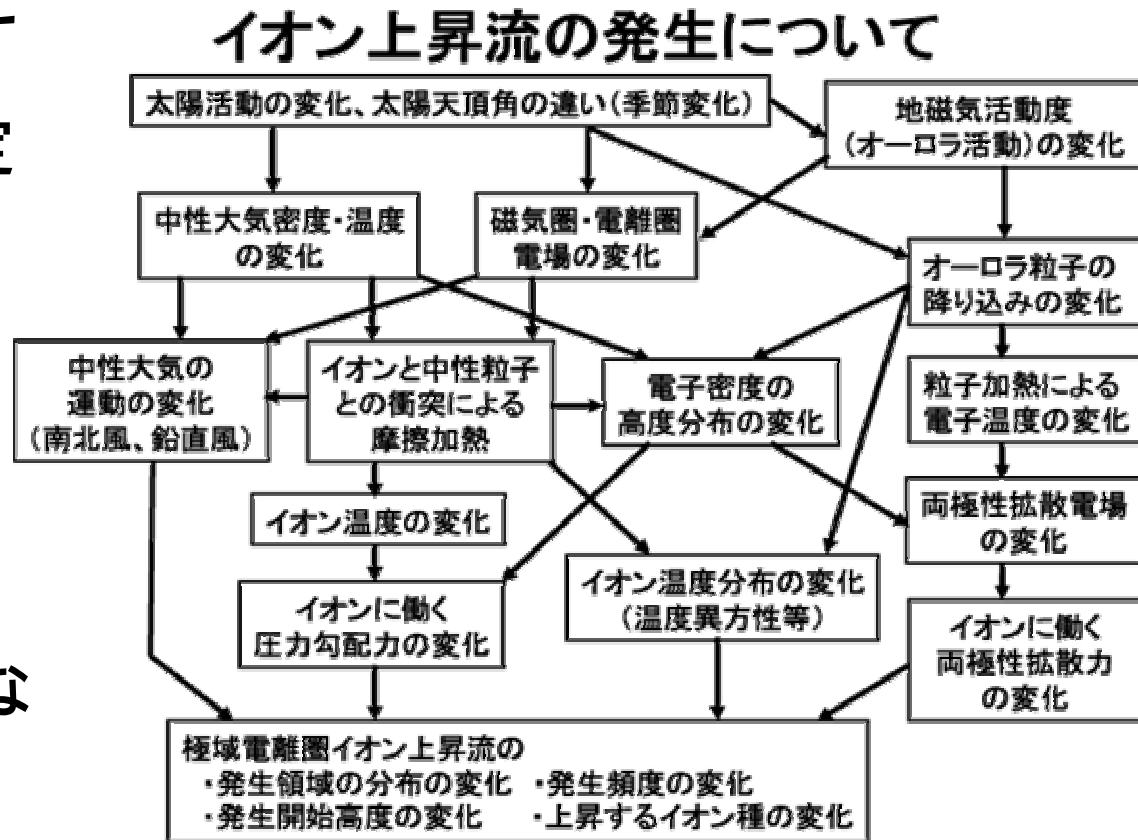
アップフロー発生にいたる流れは見当がついてきたが、各プロセスの定量的な効果が研究されている

•電子加熱

- 電子の降り込み
- 磁気圏からの熱フラックス (観測例少ない)

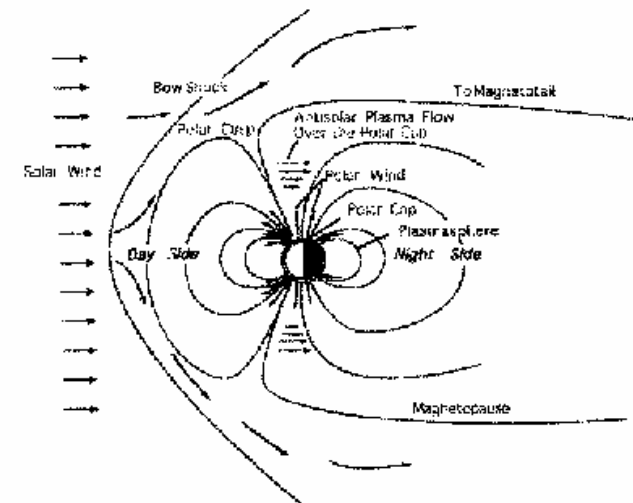
•イオン加熱

- Frictional Heating



加速領域(電離圏上端から数Re)

～ 重イオンを磁気圏に運ぶキーを担う～



古典的Polar Wind 理論

Solar Wind との類似から命名 (Axford, 1968)

以下の力を考える

- 両極性電場
- 圧力勾配による力
- 重力
- 中性粒子との衝突による効力

軽いH⁺, He⁺ が散逸.

観測される重いO⁺の散逸は説明できない.

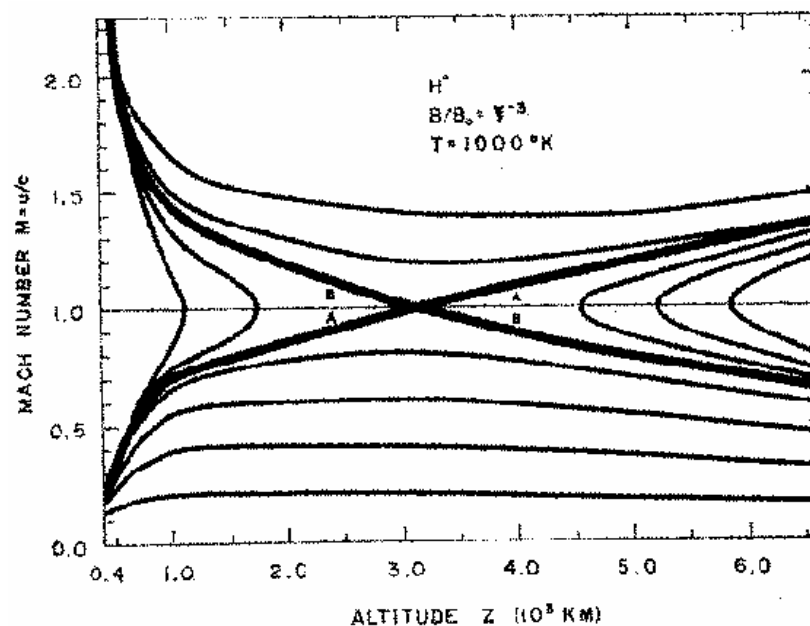
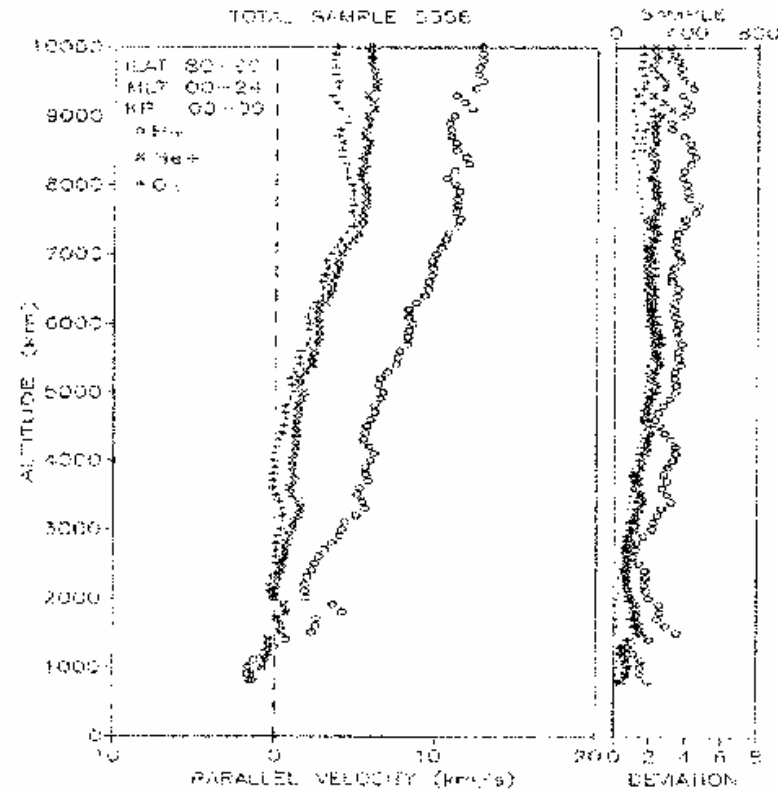


Fig. 1. Solutions for the H⁺ plasma Mach number as a function of altitude when $T = 1000^\circ\text{K}$, $A \propto r^3$, and when ion friction and ion production and loss are included. The ascending critical solution, shown by the heavy line marked A, is the only solution which gives a low speed at low altitudes coupled with zero charged particle pressure at infinity. The point of transition to supersonic flow occurs where $M = 1$. Subsonic solutions ($M < 1$) occur when the imposed plasma pressure boundary condition is greater than the asymptotic pressure of the descending critical solution (curve B).

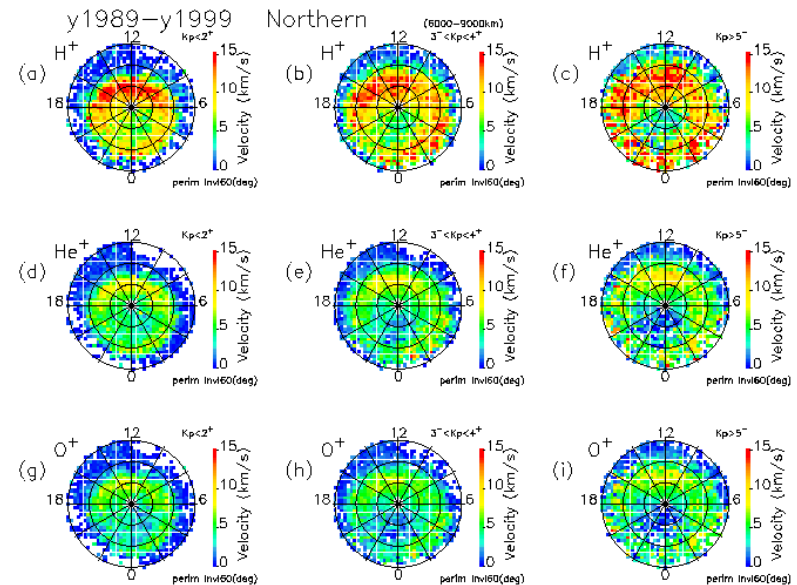
Banks and Holzer (1968)

O⁺イオン散逸

- Akebono 高度で観測されたO⁺ Polar wind
- 極冠域にて H⁺, He⁺ に加え O⁺ の流れ.
- 質量による速度の違いなどの性質は古典的 Polar Wind と同じ.

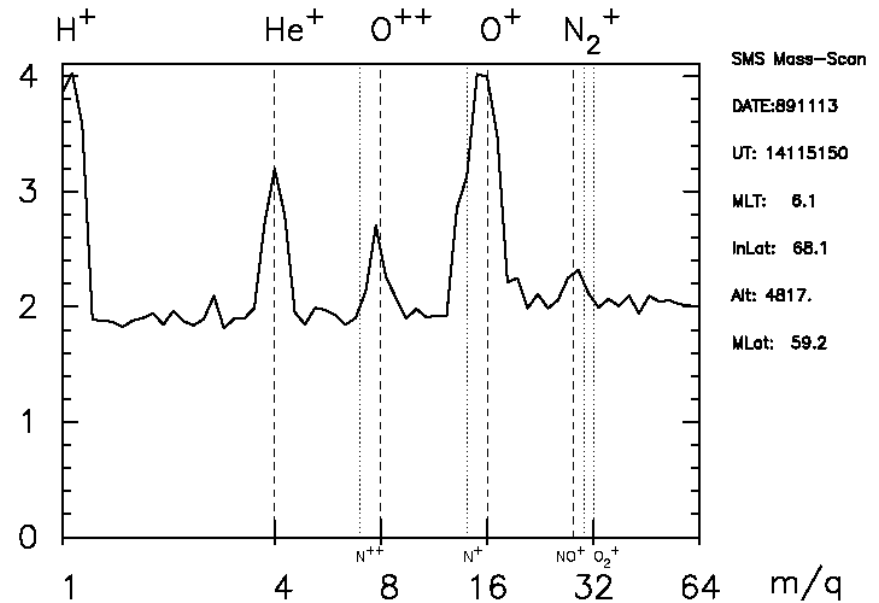


- 1980年代～1990年代までの衛星観測によって、流出の描像(どこでどれだけ流出しているか)は大体わかってきた
- メカニズムに関しては統一的な見解はまだない。



電離圏からの重イオン流出

- O^+ だけでなく N^+ , N_2^+ , NO^+ などが流出している場合も観測される.
- 分子イオンに関する研究はほとんどなし.
(観測している機器が少ない)



イオン流出現象の分類

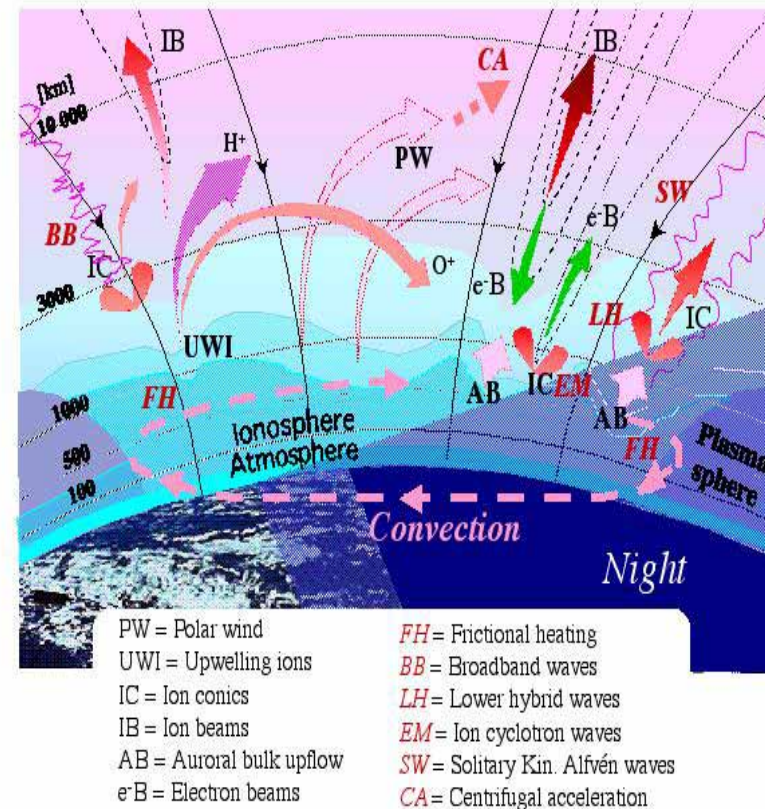
Yau and André (1997) による

- Thermal Ion Outflow
 - Polar Wind
 - Auroral Bulk Upflow
- Suprathermal Ion Outflow
 - Ion Beame
 - Ion Conics
 - Transversely Accelerated Ion
 - Upwelling Ion

加速・加熱メカニズム

重イオンを散逸させるには熱的な散逸だけでは無理

- プラズマ波動に起因する加熱
- 磁気緯度, 地方時, 高度, その他の要因により支配的過程が異なる

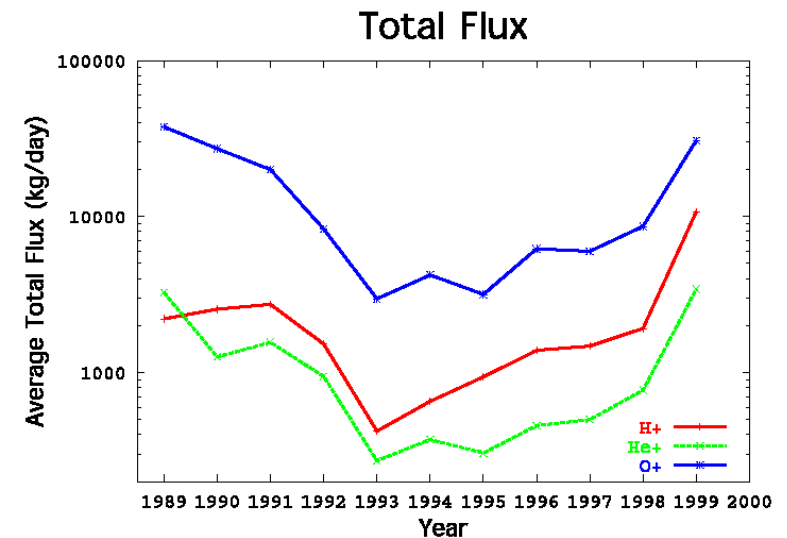


From IRF(Swedish Institute of Space Physics)
<http://quasar.irf.se/>

加速領域研究のまとめ

電離圏上部からのイオン散逸現象の特性はわかって来たが、未解決の問題は山積み.

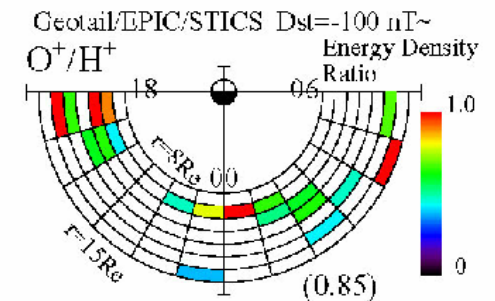
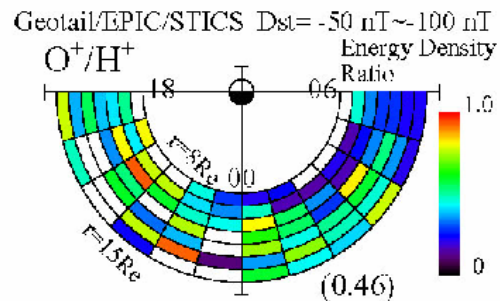
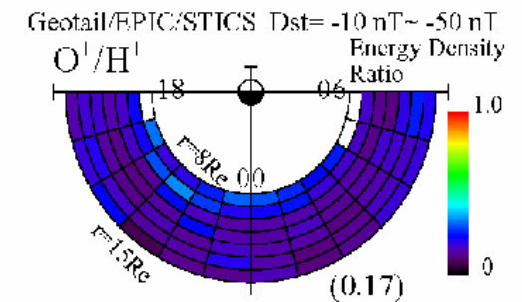
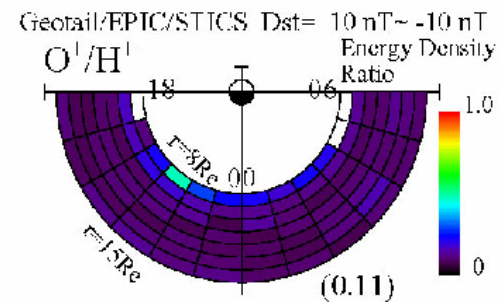
- エネルギー獲得方法.
(分子イオンについては全く手つかず)
- 素過程の相対的重要性, どういった場合に効果的に起こるのか?
- どこにどれだけ流れ, 影響はどの程度であるか?



磁気圏 (プラズマシート, リングカレント etc.)

プラズマシートで観測される O^+

- O^+/H^+ エネルギー密度比は磁気嵐時に10~20と非常に高くなる。(O^+ が90%以上)
- サブストームに伴って電離圏から O^+ が供給されている



能勢 et al. (2005) 電離圏起源重イオンダイナミクス研究会 . Geotail/EPIC による1995年1月から2003年5月までの統計解析結果

磁気圏重イオン研究の概要

- 存在する粒子のエネルギーを説明するにはプラズマシートやリングカレントに到達するまでに更なる加熱が必要.
- 現時点で観測できていない低エネルギー領域に粒子が存在する可能性もある.
- O^+ が存在するとプラズマが不安定になりやすいという研究があるものの、実証する観測はまだない(むしろ否定的観測はあり)

観測事実おさらい

- 重イオン (O^+ , N^+ , NO^+ , N_2^+) が電離圏より流出している (この時点では脱出速度に達していない) .
- プラズマシートにおいて数keV ~ 数十keV に達する O^+ が見つかる .
- 磁気嵐時のプラズマシートやリングカレントにおいてプロトンよりも O^+ の方が多くのエネルギーを担う場合がある .

重イオンに関係した未解決の問題

- 加速機構の解明(どのようにエネルギーをえるのか)
- ダイナミクスの統一された見解(どのように輸送されるのか)
- これまでの理論に対するインパクトはあるのか(どういった影響があるのか)

現状のまとめ

- 観測・理論・シミュレーション研究が相互に成果を結びつける必要性が高まっている。
 - 重イオンが存在することによる効果の詳細はこれから
- 重イオンを意識した新しい観測が必要
 - 広いエネルギーレンジ, 高い分解能の観測機
 - 複数衛星による観測等の計画
 - アウトフローの光学観測可能性 (OII 732nm, N₂⁺ first negative 427nm 等)
- 理論: 他の惑星に適応させる方法は無いだろうか？
 - 次元解析的手法？