

流出イオンによる太陽風減速と M-I 結合が引き起こすダイナモの重要性

山内正敏 (IRF, Kiruna, Sweden)

R. Slapak (EISCAT, Kiruna, Sweden)

Yamauchi, M. and Slapak R. (2018),
Energy conversion through mass loading of escaping ionospheric ions for different Kp values,
Ann. Geophys., 36, 1-12, 2018. doi:10.5194/angeo-36-1-2018

Outline

(1) Mass loading とは？

地球では cusp や plasma mantle で起こっている
量的に無視できない？

(2) Mass loading に M-I coupling を組み入れる

地球と彗星・火星の大きな違い
エネルギー変換の定式化の試み

(3) 電離層の効果はそれだけではない

O^+ loading の量をもコントロールする効果を考察

(4) K_p 依存性の推定と、過去45億年への応用

(1a) Mass-load とは非弾性の混合である

(1) **Momentum conservation:** 流れに沿って momentum flux が保存

$$\Rightarrow \rho u^2 S|_{\text{before}} = (\rho + \Delta\rho)(u + \Delta u)^2 S|_{\text{after}}$$

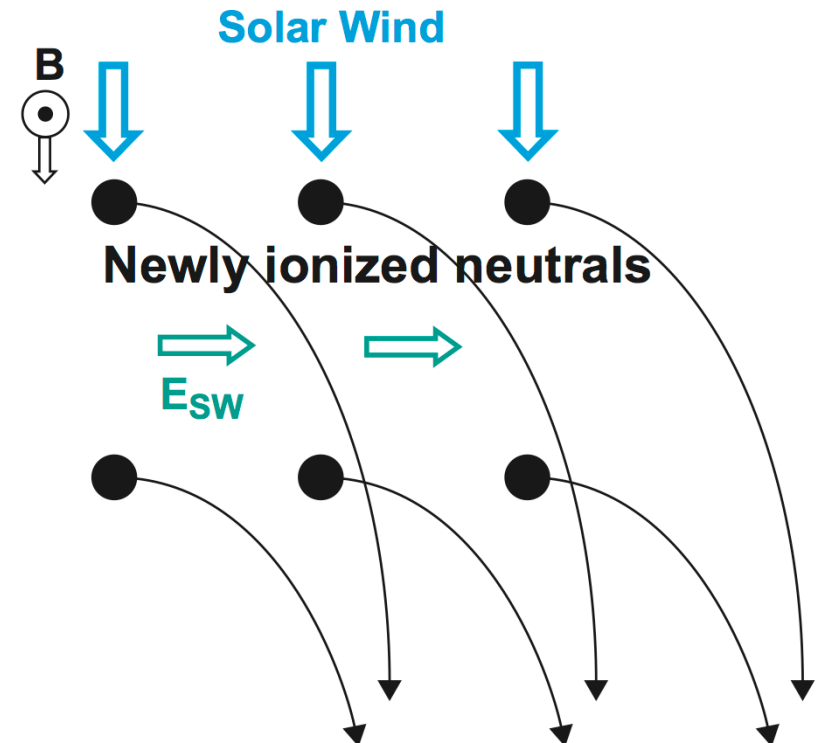
(2) **Inelastic mixing:** 最終速度が同じ場合、kinetic energy flux (K) は？

$$\text{混合前 } K = \rho u^3 S / 2|_{\text{before}} \quad \& \quad \text{混合後 } K + \Delta K = (\rho + \Delta\rho)(u + \Delta u)^3 S / 2|_{\text{after}}$$

$$\Rightarrow \Delta K / K = \Delta u / u = -\Delta\rho / 2\rho$$

$\Rightarrow$ エネルギー変換率 $\propto$ 減速率

例1 (彗星や火星): Exosphere
中性原子・分子 (H , H_2O) が
太陽風内で電離して pick-up



(1a) Mass-load とは非弾性の混合である

(1) **Momentum conservation:** 流れに沿って momentum flux が保存

$$\Rightarrow \rho u^2 S|_{\text{before}} = (\rho + \Delta\rho)(u + \Delta u)^2 S|_{\text{after}}$$

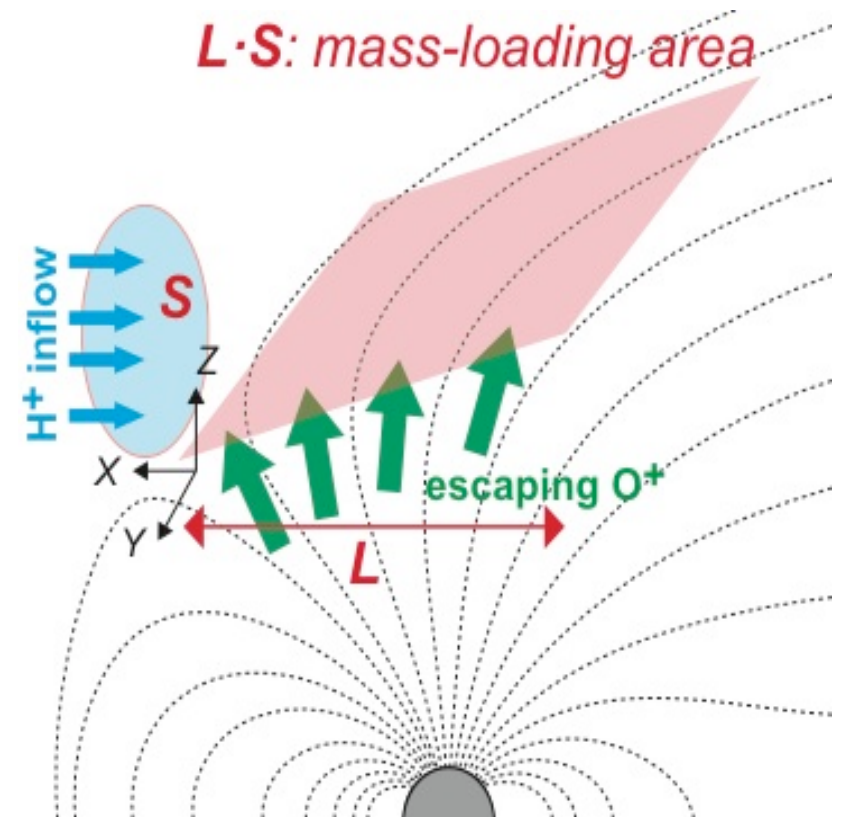
(2) **Inelastic mixing:** 最終速度が同じ場合、kinetic energy flux (K) は？

$$\text{混合前 } K = \rho u^3 S / 2|_{\text{before}} \quad \& \quad \text{混合後 } K + \Delta K = (\rho + \Delta\rho)(u + \Delta u)^3 S / 2|_{\text{after}}$$

$$\Rightarrow \Delta K / K = \Delta u / u = -\Delta\rho / 2\rho$$

$\Rightarrow$ エネルギー変換率 $\propto$ 減速率

例2 (地球): cusp や plasma mantle
流出イオンが太陽風によって
pick-up



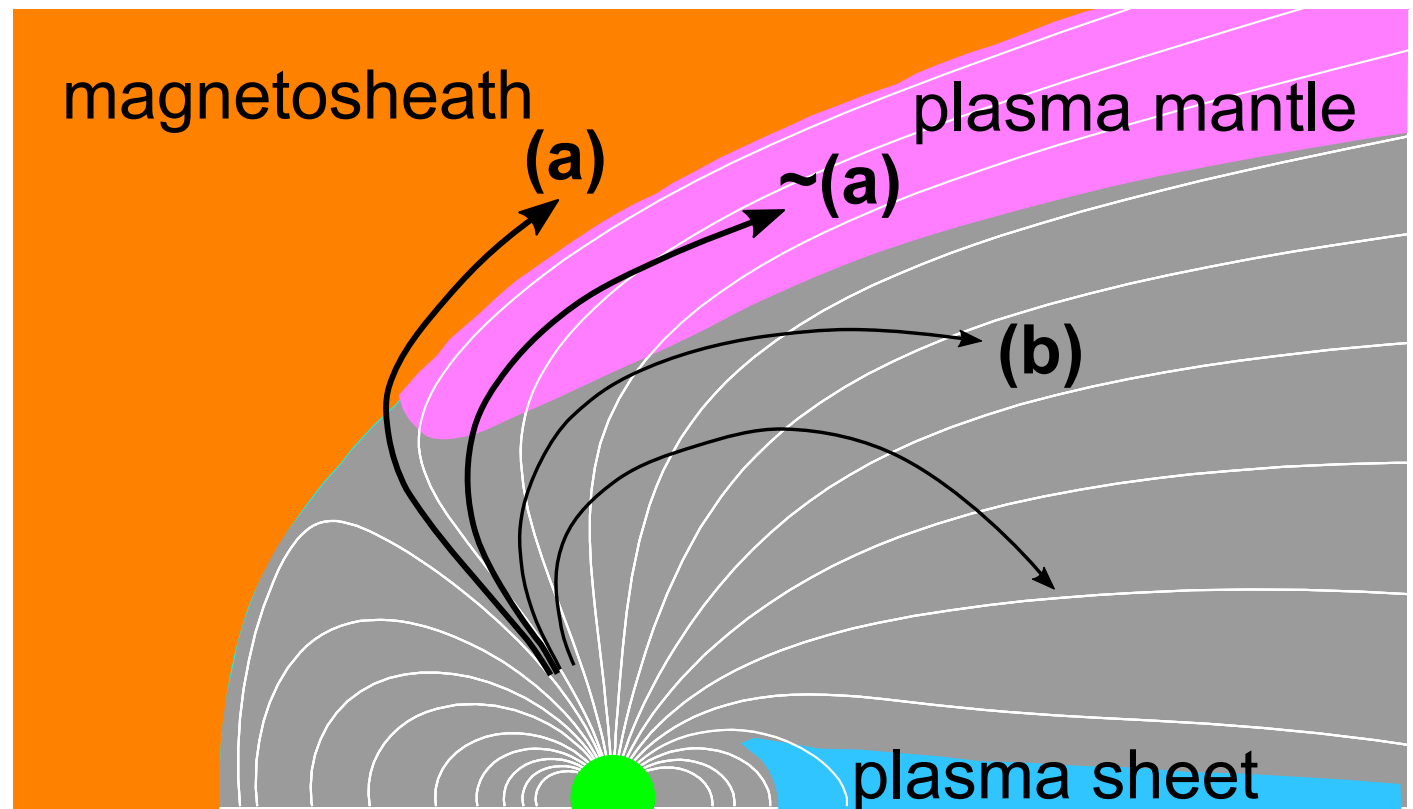
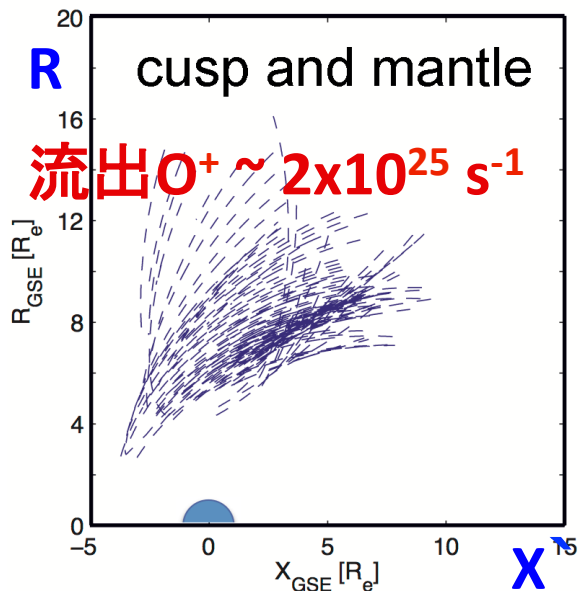
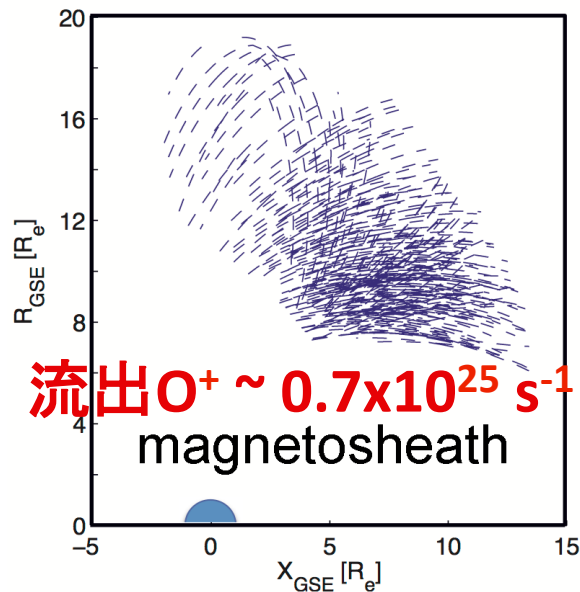
(1b) Plasma Mantle での O^+ の観測

Cluster は 高緯度を十分にカバー

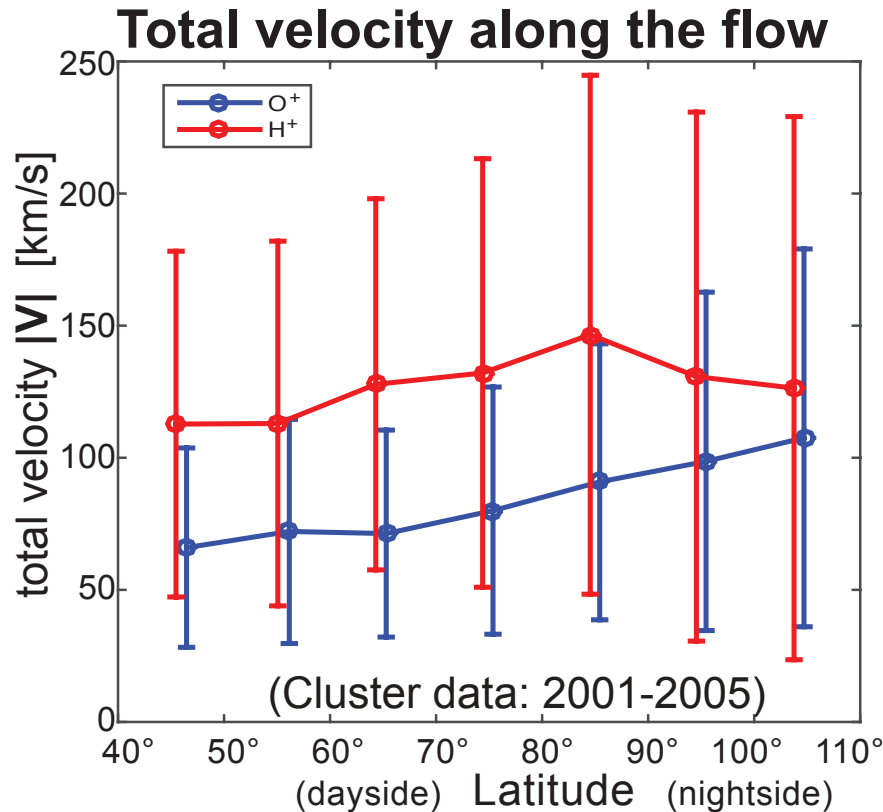
(a) は完全に流出

(a)' は概ね流出

(b) は plasma sheet へ



(1b) Plasma Mantle での O^+ の観測



(a) 太陽風 (tailward 速度 V_{H^+}) は mantle (緯度 $> 80^\circ$) で減速する

流出イオン (tailward 速度 V_{O^+}) は次第に加速し mantle でほぼ追いつく

⇒ 確かに inelastic mixing が起こってる

(b) 密度比 (n_O/n_H) は1%程度

⇒ mass density 比だと $\rho_O/\rho_H \approx 20\%$

⇒ 太陽風エネルギーの 10% が変換？

⇒ 量的に無視できない？

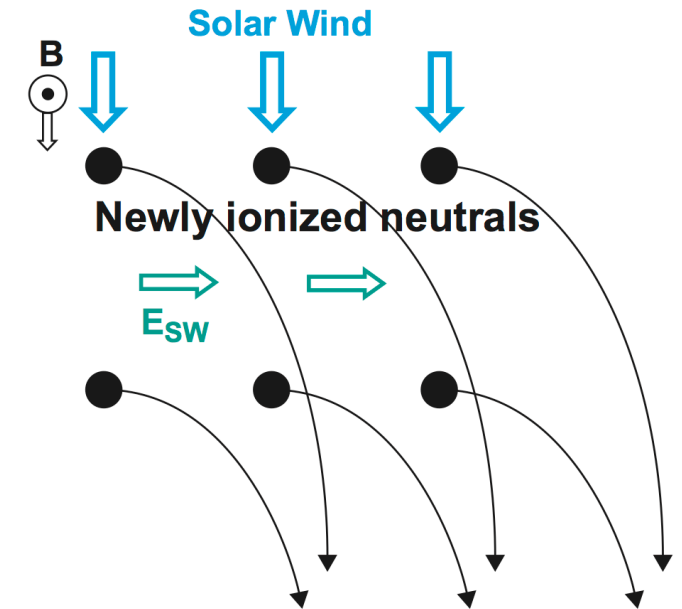
ただし、速度変化はゆっくりなので、定式化は積分 ($\Delta K = \int dK$) で

(2a) 電離層と M-I coupling の役割

変換されたエネルギー ΔK の行き先は？
初期は H^+ と e^- の分離に使われる

例1: unmagnetized planet (彗星など)

⇒ gyromotion (実質的溫度) に使われる



(2a) 電離層と M-I coupling の役割

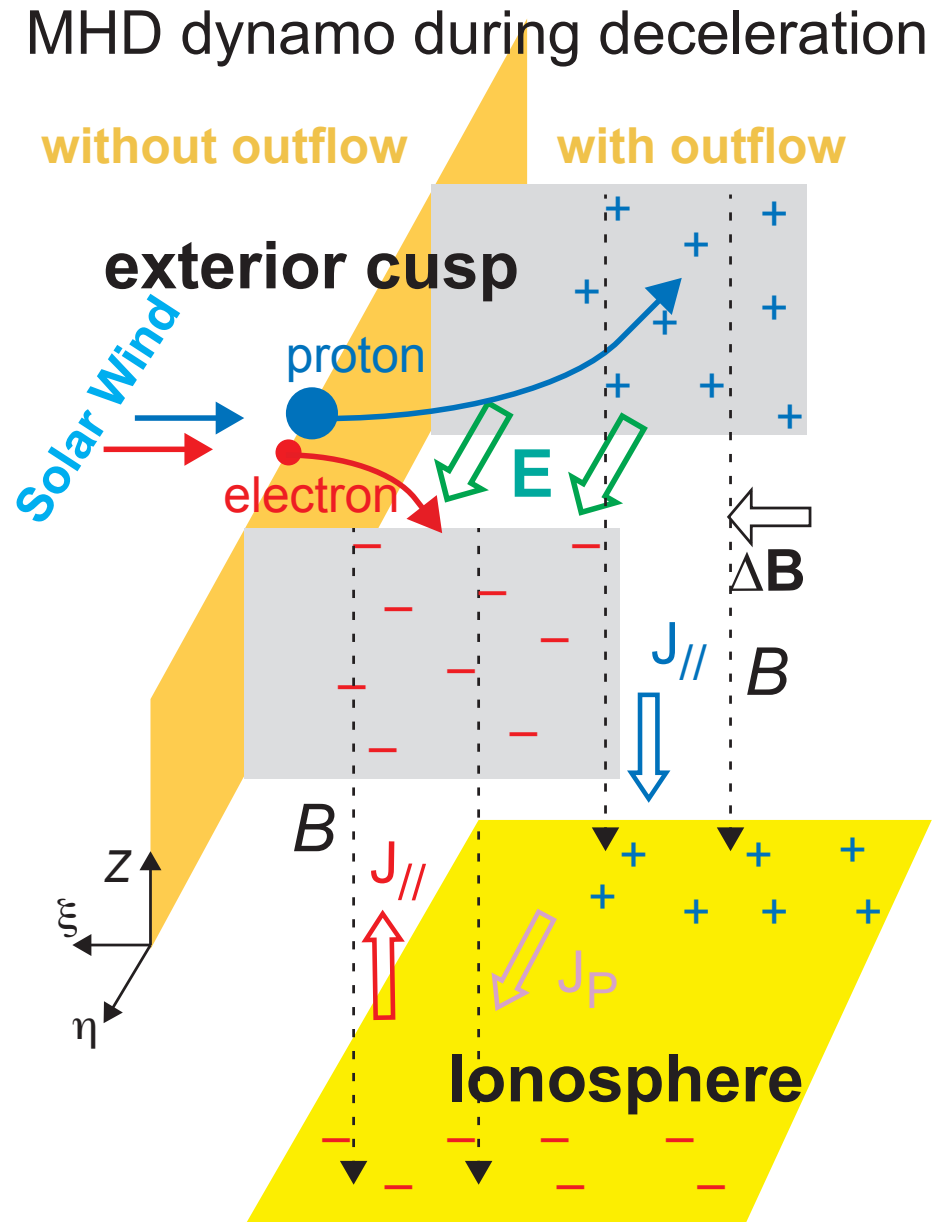
変換されたエネルギー ΔK の行き先は？
初期は H^+ と e^- の分離に使われる

例2: 地球の plasma mantle:

⇒ 磁力線 + 電離層という電導度の高い経路が存在する

⇒ 分離した電荷は電離層へ流れだす
("extra open" in open magnetosphere)

⇒ 電離層でエネルギーを消費する
(対流 + Joule 熱)



(2b) エネルギー変換量の定式化

$d\rho \equiv$ "dx の距離で追加する O^+ 質量/行き先の体積" $= dF_{load}/uS$

$K_{in} \equiv$ " $L \cdot S$ (mass-loading area) に流入する太陽風の kinetic energy flux"

$F_{load} \equiv$ " $L \cdot S$ に流入する O^+ 総質量" $= \int_x dF_{load}$

$\Rightarrow$

$$\begin{aligned}\Delta K/K_{in} &= (-1/2) \cdot \int^L d\rho(x)/\rho(x) \\ &= (-1/2) \cdot \int^L dF_{load}(x)u^2(x)/(\rho(x)u^3(x)S(x)) \\ &= (-1/4K_{in}) \cdot \int^L dF_{load}(x)u^2(x)\end{aligned}$$

$$\Rightarrow \Delta K \approx (-1/4) \cdot u_{sw}^2 \cdot F_{load}$$

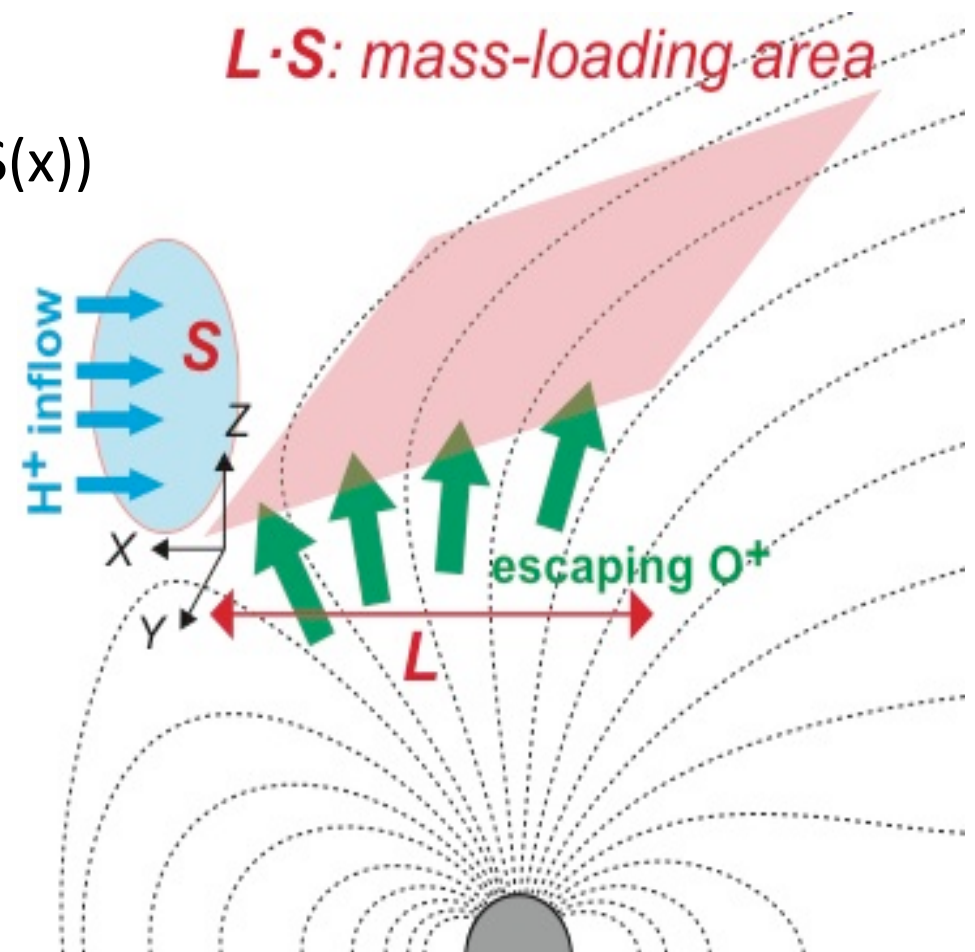
概算してみる:

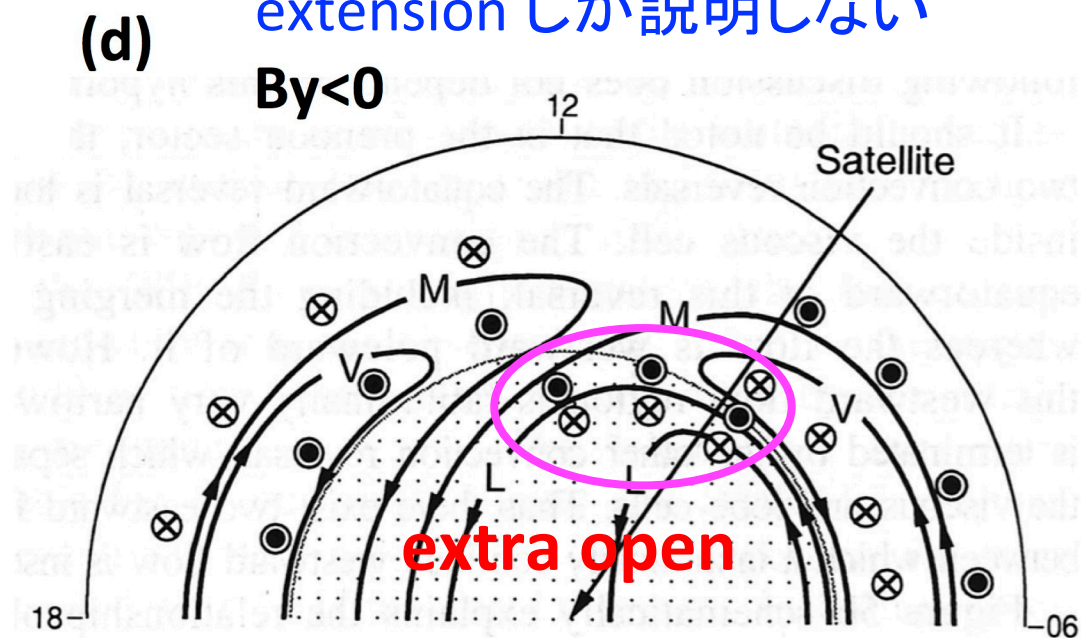
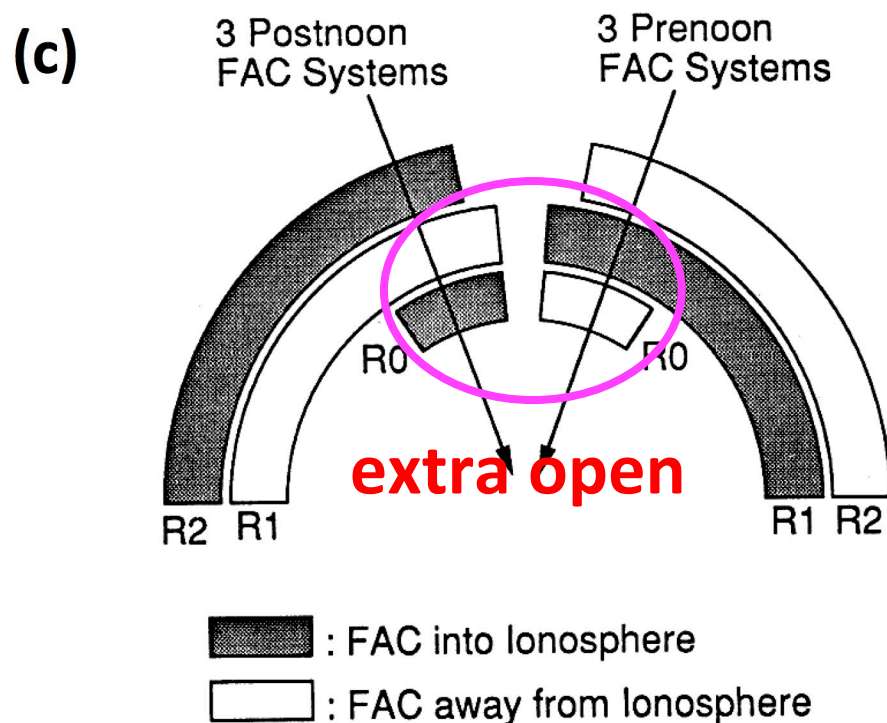
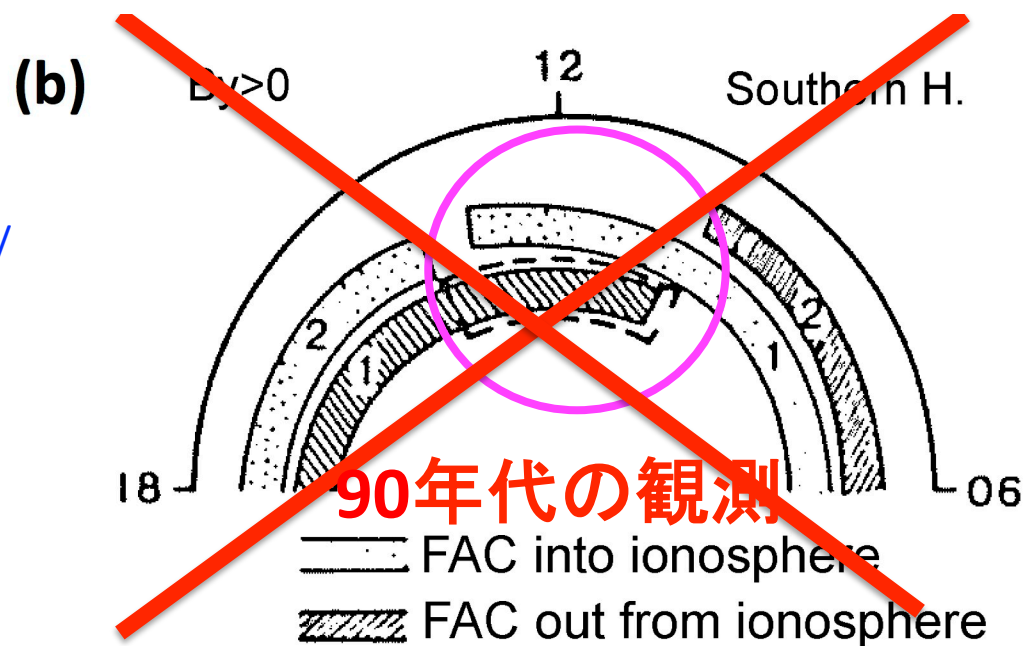
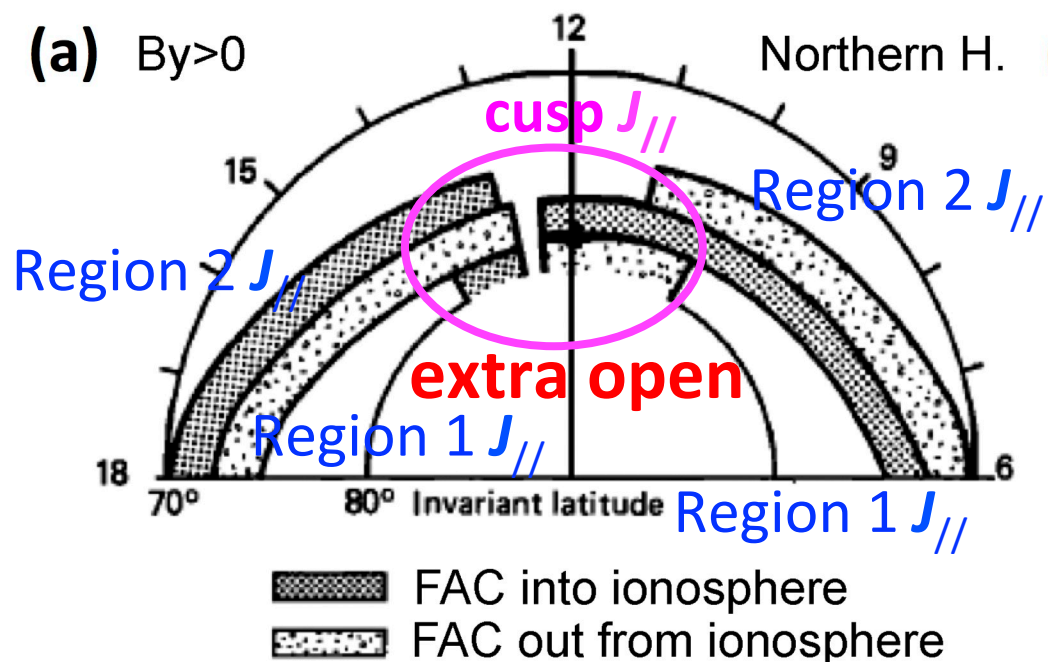
$$n_{O^+}/n_{sw} \sim 0.01 \Rightarrow \rho_{O^+}/\rho_{sw} \sim 0.16$$

$\Rightarrow$ 運動エネルギーの 7% が変換

$\Rightarrow \Delta K \approx 10^{9-10} \text{ W}$ が電離層に流入

$\approx$ cusp 電流系の総エネルギー！





90年代の観測

Reconnection は Region 1 の extension しか説明しない

(3) 電離層は loading の量もコントロール

エネルギー $\Delta K \approx (-1/4) \cdot u_{sw}^2 \cdot F_{load}$ は電離層で消費される
& 流出量 F_{load} はエネルギー消費量 ($\propto \Delta K$) に依存する

⇒ Positive feedback !

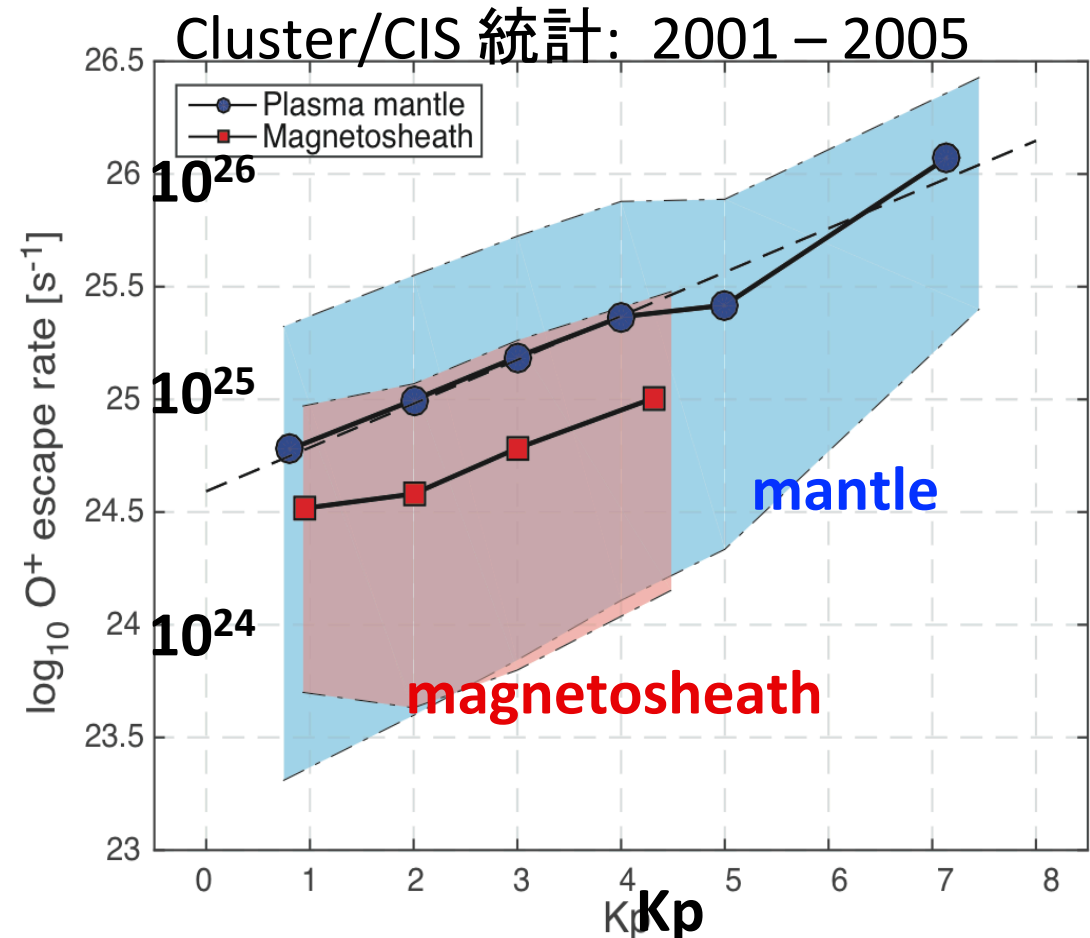
(3) 電離層は loading の量もコントロール

エネルギー $\Delta K \approx (-1/4) \cdot u_{sw}^2 \cdot F_{load}$ は電離層で消費される
& 流出量 F_{load} はエネルギー消費量 ($\propto \Delta K$) に依存する

⇒ Positive feedback !

(1a) Slapak et al., 2017 ($K_p < 7$):

$$F_{load} \propto \exp(0.45 \cdot K_p)$$



(3) 電離層は loading の量もコントロール

エネルギー $\Delta K \approx (-1/4) \cdot u_{sw}^2 \cdot F_{load}$ は電離層で消費される
& 流出量 F_{load} はエネルギー消費量 ($\propto \Delta K$) に依存する

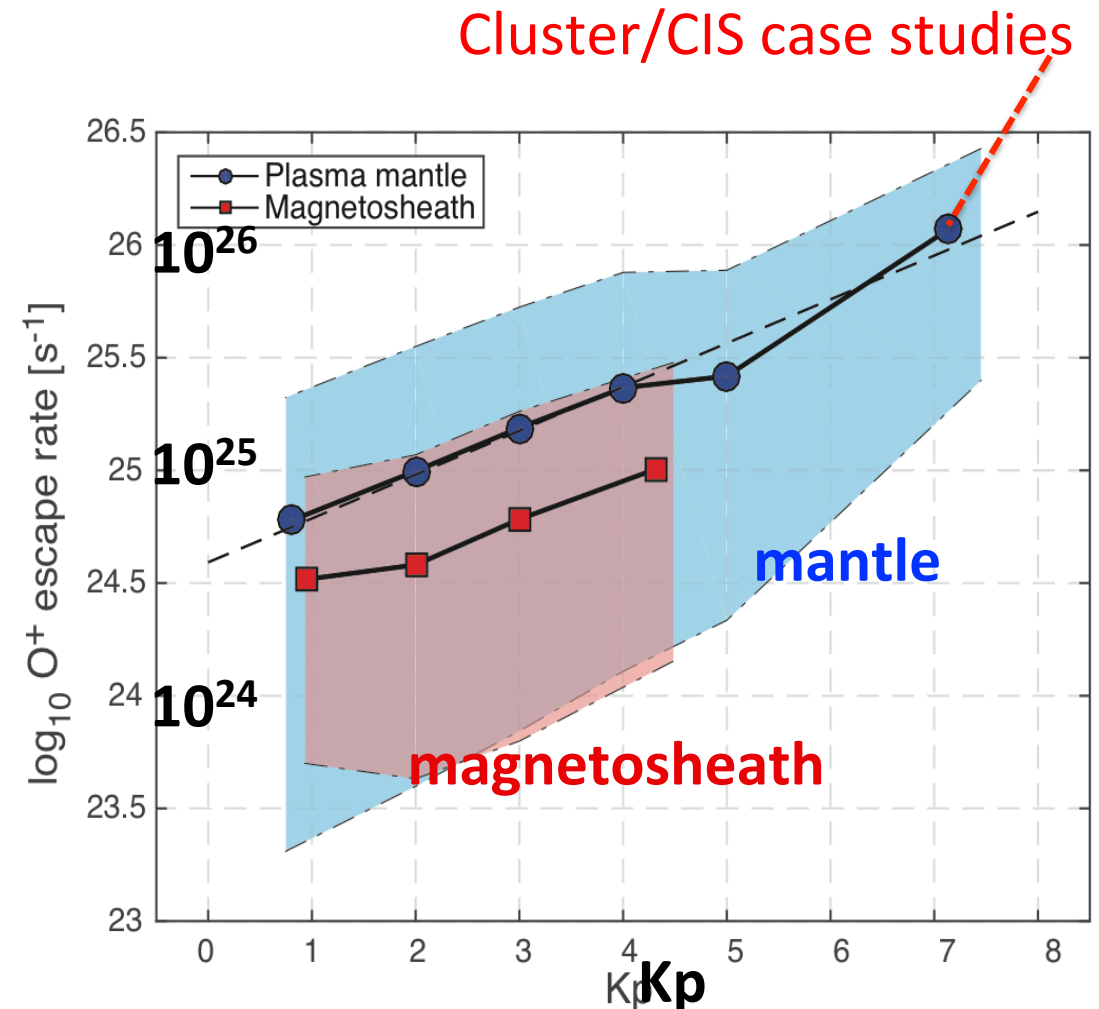
⇒ Positive feedback !

(1a) Slapak et al., 2017 ($K_p < 7$):

$$F_{load} \propto \exp(0.45 \cdot K_p)$$

(1b) Schilling et al., 2017 ($K_p > 7$):

$F_{load} \gg \exp(0.45 \cdot K_p)$ の予想値



(3) 電離層は loading の量もコントロール

エネルギー $\Delta K \approx (-1/4) \cdot u_{sw}^2 \cdot F_{load}$ は電離層で消費される
& 流出量 F_{load} はエネルギー消費量 ($\propto \Delta K$) に依存する
 $\Rightarrow$ Positive feedback !

経験則(統計)によると

(1a) *Slapak et al., 2017* ($K_p < 7$):

$$F_{load} \propto \exp(0.45 \cdot K_p)$$

(1b) *Schilling et al., 2017* ($K_p > 7$):

$$F_{load} \gg \exp(0.45 \cdot K_p) \text{ の予想値}$$

(2) K_p と V_{sw} の関係 (OMNI 50年分):

$$V_{sw} \propto 135 \cdot (K_p + 1.2)$$

$$\Rightarrow \Delta K \propto K_p^2 \cdot \exp(0.45 \cdot K_p)$$

$\Rightarrow$ exp項、つまり (1) が振る舞いを決める

(3) 電離層は loading の量もコントロール

エネルギー $\Delta K \approx (-1/4) \cdot u_{sw}^2 \cdot F_{load}$ は電離層で消費される
& 流出量 F_{load} はエネルギー消費量 ($\propto \Delta K$) に依存する

⇒ Positive feedback !

経験則(統計)によると

(1a) *Slapak et al., 2017* ($K_p < 7$):

$$F_{load} \propto \exp(0.45 \cdot K_p)$$

(1b) *Schilling et al., 2017* ($K_p > 7$):

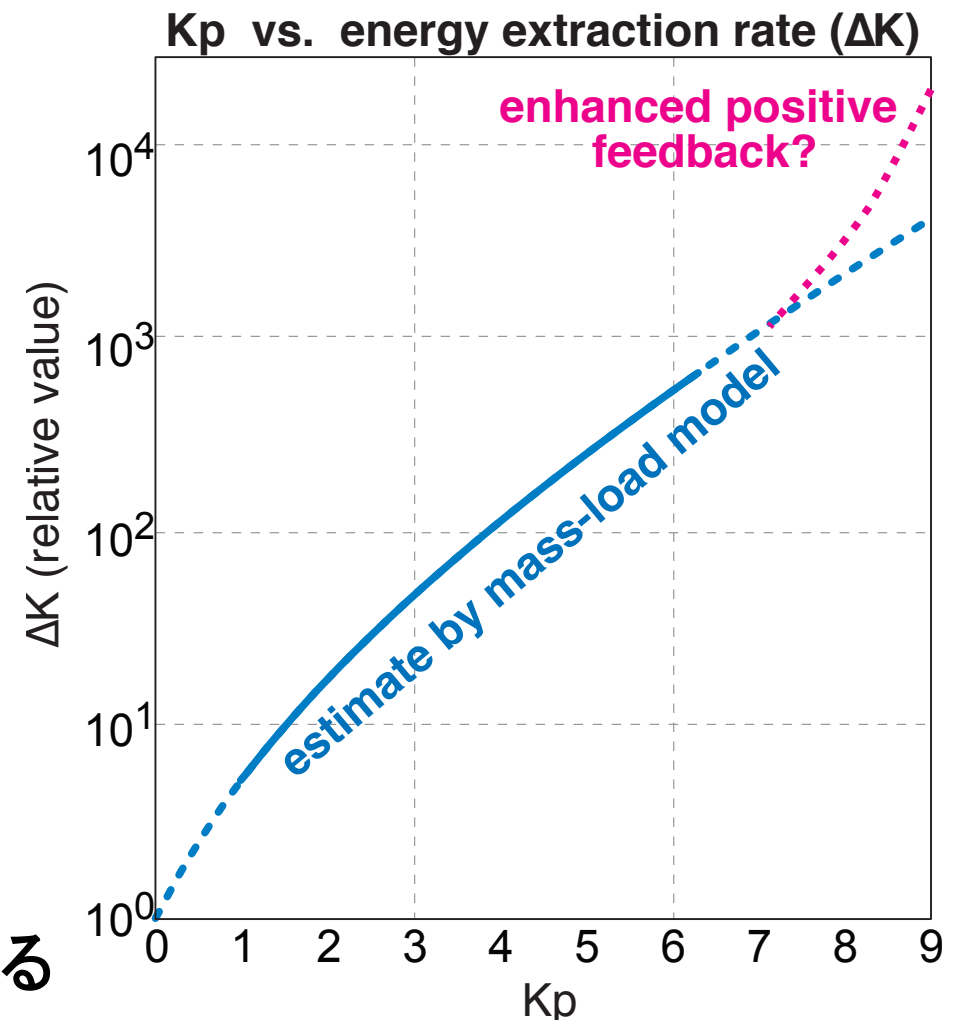
$F_{load} \gg \exp(0.45 \cdot K_p)$ の予想値

(2) K_p と V_{sw} の関係 (OMNI 50年分):

$$V_{sw} \propto 135 \cdot (K_p + 1.2)$$

$$\Rightarrow \Delta K \propto K_p^2 \cdot \exp(0.45 \cdot K_p)$$

⇒ exp項、つまり (1) が振る舞いを決める



Key Point

- (a) 流出イオンの Mass loading は太陽風から M-I 電流系へのダイナモとして機能する ($\Delta K \propto F_{\text{load}} \cdot v_{\text{SW}}^2$)。量的には cusp 電流系と同等。
- (b) 電離層が太陽風を感じる open (reconnection) と異なり、mass loading によるエネルギー変換機構は太陽風が電離層イオンを感じる extra open で起こる。
 - Reconnection $\Rightarrow$ 磁気圏全体 / 磁場が決める
 - Mass-loading $\Rightarrow$ 局所的 / 電離層起源のイオンが決める
- (c) イオン流出が $F_{\text{load}} \propto \exp(0.45 \cdot Kp)$ という依存性を持つ効果との Positive feedback により、 $\Delta K \propto \exp(\varepsilon_{\text{赤祖父}})$ という急激な依存性を持つ (Kp 依存性が reconnection よりはるかに強い)
 - Reconnection efficiency $\propto \varepsilon$ (coupling function): linear
 - Mass-loading efficiency $\propto \exp(0.45 \cdot Kp)$: non-linear
- (d) Positive feedback が無ければ、 $F_{\text{load}} \propto \exp(0.45 \cdot Kp)$ という強い依存性は維持しにくい可能性が高い

Key Point (cont)

(e) cusp 電流系が region 1 とは独立しているという観測に合致する。

(f) イオン流出は space weather hazard を増幅する。Kp=9 のようなイベントでは reconnection (エネルギー変換効率が coupling parameter に線形) よりも重要かも知れない。

M-I coupling は電離層現象だけでなく、
太陽風流入現象でも重要である。

蛇足

Slapak et al. (2017) for $K_p < 7$ では、40億年前の常態を $K_p=10$ に相当すると仮定して

$$F_{\text{load}} \propto \exp(0.45 \cdot K_p) \Rightarrow F_{\text{load}} \approx 10^{27}/\text{s} @ 40\text{億年前} \\ \Rightarrow \int F_{\text{load}} \approx 10^{18} \text{ kg}$$

と推定した。これは**現在の大気中の O_2 総量**に匹敵する

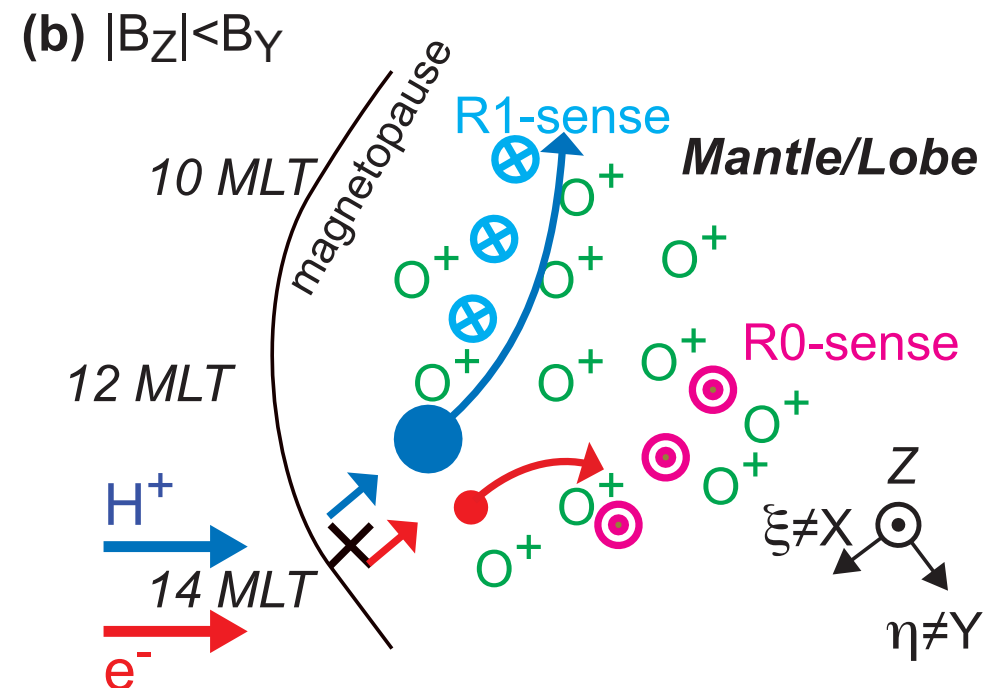
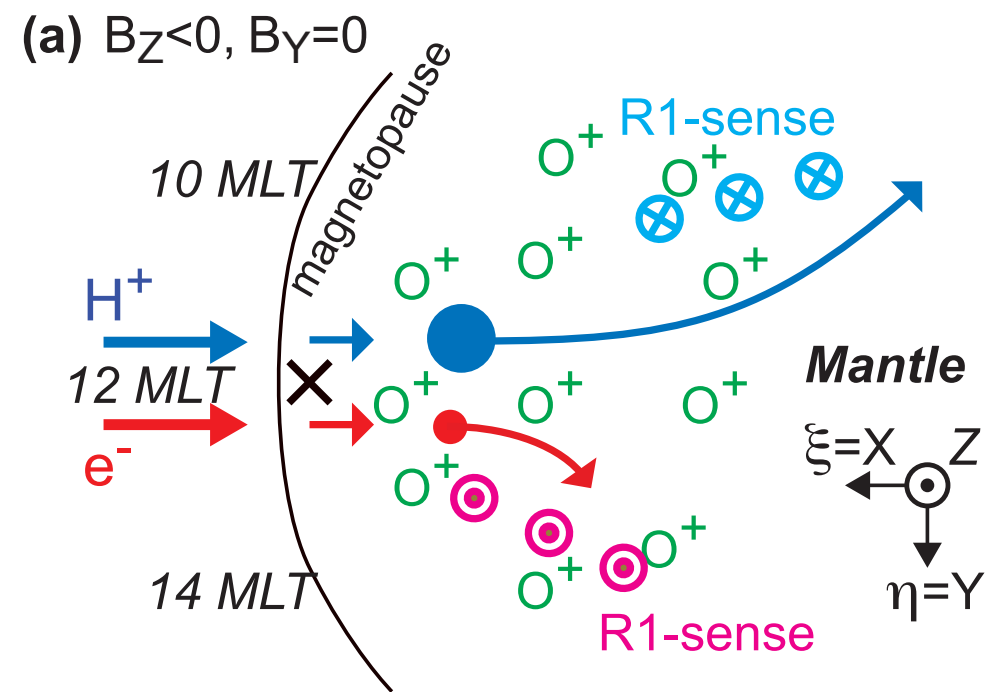
もしも $K_p > 7$ の時の極端に多い流出が (*Schillings et al.*, 2017) エネルギー取り入れにも効いているならば、40億年前のエネルギー取り込みは mass loading がメインであったかも知れない。その場合の総流出量は

$$\int F_{\text{load}} \geq 5 \times 10^{18} \text{ kg}$$

も十分にあり得る。これは**現在の大気総量**に匹敵する

End

IMF B_Y effect も説明可能



Future direction

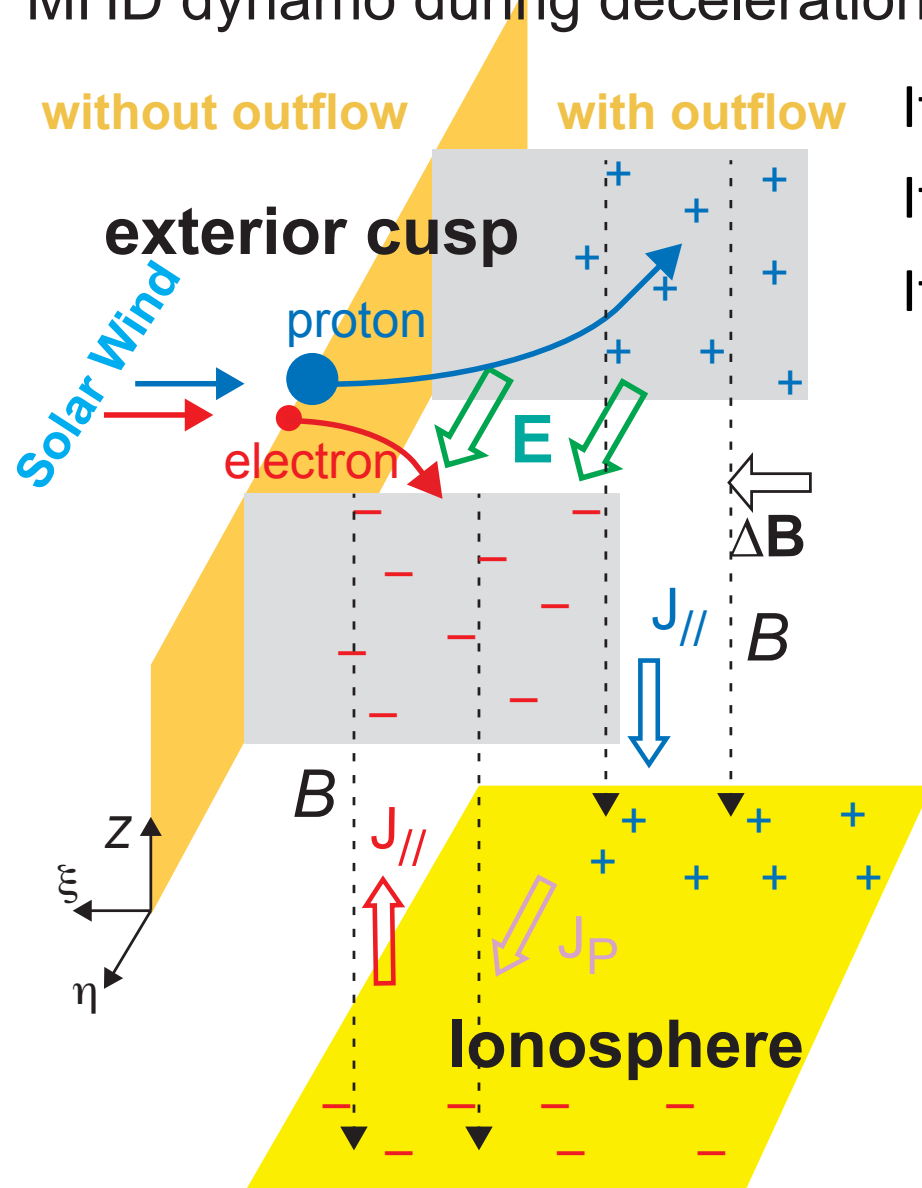
(A) Numerical simulation: **fluid model** allowing finite mass flux (in) and energy flux (out) should do the job.

(B) Apply to **Mars/Comet** where solar wind and "conducting environment" are magnetically connected.

- localized open magnetic field (Mars)
- localized draping IRF to ionopause (comet)

(2a) 電離層と M-I coupling の役割

MHD dynamo during deceleration



If $\Sigma_p = \infty$, charges are canceled & $E = 0$

If $\Sigma_p = 0$, charges cause $E = -U \times B$

If $\Sigma_p = \text{finite}$, $E = \text{finite}$ & $I_p \cdot \Sigma_p = \text{finite} \propto \Delta E$