

流出イオンによる太陽風 Mass-loading の際の太陽風運動エネルギーの M-I 結合系への取り込みは無視できない

山内 正敏 [1]; Slapak Rikard[2]
[1] IRF-Kiruna; [2] EISCAT HQ

Importance of mass-loading energy extraction from the solar wind to the ionosphere through positive feedback M-I coupling

Masatoshi Yamauchi[1]; Rikard Slapak[2]
[1] IRF-Kiruna; [2] EISCAT HQ

<http://www.irf.se/%7Eyamau/index.html>

Cluster statistics in the high-latitude magnetospheric boundary (exterior cusp, magnetosheath, plasma mantle) showed that ion loss rate from the open part of the polar magnetosphere increases exponential to Kp up to Kp=7, with number density ratio of O/H about 1% in average. This means that the mass density of escaping O⁺ compared to the solar wind is about 20%, which can no longer be ignored. In fact, Cluster observed substantial deceleration of the solar wind H⁺ while acceleration of O⁺ in plasma mantle. The conservation of anti-sunward momentum means, for inelastic mixing of O⁺ into the H⁺ flow, that the kinetic energy is no longer conserved, with about 10% loss when the O⁺ velocity reach the H⁺ velocity. The energy conversion rate, simply calculated from the momentum conservation, is proportional to total mass flux of O⁺ (F_O) into the incident solar wind and to the square of the solar wind velocity (u_{sw}²), and not dependent on the injection area or solar wind density.

Unlike Mars or comets where the energy is converted to cycloid motion (random gyration), magnetic connectivity to the ionosphere (load) for the Earth's case allows the energy is converted to the electric current in the Magnetosphere-Ionosphere coupling system. Applying the observed O⁺ value and area, this means 10¹⁰⁻¹¹ W, and is large enough to explain the electric current system flowing in the cusp region, which is the most intense current system in the dayside.

Since the ion heating due to the Joule heating of such an ionospheric current system is the main driver of the ion outflow, the entire cycle constitute a positive feedback energy extraction, explaining the observed exponential dependence of the escaping flux to Kp or solar wind velocity. Inversely, it is difficult to explain the exponential dependence to Kp without such a positive feedback, because the solar wind dependence gives only near-linear dependence to the solar wind "coupling function", which is at most u_{sw}⁴ but not exponential. Considering the ancient condition that corresponds to Kp=9-10, the mass-loading is extremely important in the atmospheric evolution.

Thus the ionosphere and escaping ions in the M-I coupling system is more important than we traditionally thought. The present positive feedback model with the mass-loading effect assumes that information of "deceleration" propagate upstream faster than the information of transversal electric field caused by O⁺ deflection (shift of the guiding center), such that electric field by the H⁺ deceleration appears before O⁺ pickup motion.

Cluster 衛星の高緯度磁気圏境界領域 (cusp, plasma mantle, magnetosheath) のイオンデータ (>30 eV) の統計によると、地球から直接太陽風へ (磁気圏尾部に入らずに) 流出するイオンの量は、中高度 (DE-1 など) の結果同様に地磁気活動 Kp に対して指数関数的に増加していることが判明している。これらの領域では O/H 比 (電離層起源酸素イオンと太陽風の比) が 1%程度あることも分かっている。Mass-loading という視点では、密度比が 1%でも、質量密度比に直すと 2 割近くとなり、太陽風の運動エネルギーが 1 割近くが熱エネルギーか電磁エネルギーに変換され得ることを意味する。最大値は地球起源 O⁺と太陽風 H⁺の速度が同じになった時点で達成される (それは非弾性衝突と同じ効果をもたらす)。この数字は運動量保存則を用いているので、酸素と太陽風の混合プロセスに依存しない。

これが火星や彗星であれば、この余剰エネルギーの大半は、サイクロイド運動という巨視的にはランダムな運動 (熱エネルギー) に変換されようが、地球の場合は、サイクロイド運動の初期の電場加速で起こるイオンと電子の分離が、分極電場として素早く電離層に伝わることで、電磁エネルギーに変換され得る。要するにダイナモであり、そのエネルギー総量を概算すると 10¹⁰⁻¹¹ W となって、実にカスプ電流系のエネルギーに合致する。このエネルギーが電離層でジュール熱等へと変換される際にイオン流出のエネルギーにも使われることまで考慮すると、このダイナモは全体として positive feedback を形成する。となれば、このダイナモを具体的な形状で定式化することは、極域の M-I 結合系を考える上で不可欠である。

太陽風から見た場合、磁場に対して通して電離層につながっている (open) かどうかでダイナモの有無が議論されてきたのに対し、ここでは太陽風に流出イオンが混ざるかどうかでダイナモの有無が決まる。その意味では磁場でなくイオンで電離層との結合 (open か closed か) が決まる。そこで流出イオンが太陽風 (カスプを含む) にぶつかる最上流を

モデルの境界とし、そこでの太陽風速度 (u_{sw}) と有効断面積 (S)、及び、太陽風内に入り込む流出イオンの質量 flux 総量 (F_O) として簡単なモデルを組んだ。それによると、失われる太陽風運動エネルギーの総量 (その半分だけが流出イオンの夜側への加速に使われる) は、 $F_O \propto u_{sw}^2$ のみに比例し、 S は式の中に入ってこない。また運動エネルギーのみを議論しているので太陽風磁場も式の中に入ってこない。それは極域昼側の S_q 振幅が太陽風速度に最も依存している観測に合致する。

この式において、 F_O は K_p に対して指数関数的に依存しており、 u_{sw}^2 の項よりも変動が極めて大きい。それは、イオン流出が K_p に対して指数関数的に増えるという経験則が K_p が 8 以上のいわゆる宇宙天気イベントでも成り立つことを示唆する。ここで、リコネクションや KH 不安定など、地球磁場を通して変換されるエネルギーが太陽風速度等のべき程度にしか比例していないことを考えると、地磁気活動が極端に高くなるほど、流出イオンの Mass-load によるダイナモの重要性が増し、場合によっては地球磁場を通したダイナモよりも昼側の電離層活動に影響を与えうることが予想される。

極めて高い地磁気活動は、数十億年の過去では今よりはるかに頻繁に起こっていたと考えられている。従って、過去においては電離層並びに流出イオンの役割、並びに流出量は今以上にあった筈だ。それを概算すると 40 億年で現在の地球大気と同等の量が既に流出しきった勘定になる。そのうちの酸素は海洋から供給されるが、窒素がそういう訳にはいかない。そして O/N 比が数パーセント変化するだけでバクテリア等の活動が大きく変わることを考慮すれば、イオン流出は地球生命圏の進化にも影響を与えた可能性がある。かように電離層の役割は今まで考えられていたよりはるかに重要である。