

A new Cusp Model and its Viking Observation

M. Yamauchi and R. Lundin

Swedish Institute of Space Physics
Box 812, S-98128 Kiruna, Sweden

A new model for the exterior cusp is proposed based on Viking observations and Prognoz-7 observations as well as on the fluid dynamic consideration when the interplanetary magnetic field (IMF) is southward. Unlike the previous models of solar wind injection into the magnetosphere, e.g., the reconnection models, we expect that high β magnetosheath plasma may enter the exterior cusp rather directly experiencing a standing compressional transition which belongs to a magnetohydrodynamic (MHD) fast mode. Both a shock and a more smooth transition (wave) are possible inside the exterior cusp because the special geometry of the flow passage (cross section of the flow first decreases toward the exterior cusp, and increases later toward the plasma mantle) allows us to employ the Laval nozzle concept for it when the direct inflow is possible. Energy conversion by such a "Laval nozzle" is rather straight forward: cross-field currents lying inside the wave front directly decelerate the magnetosheath inflow working as a direct dynamo. There are two components for these currents: ordinary transversal current inherent to the MHD fast waves, and a longitudinal polarization current due to the non-linear effect since the wave (or shock) is finite in amplitude.

From the dayside reconnection's view point, the Laval nozzle model is equivalent to having the reconnection site at very high-latitude instead of at the subsolar point. However, the model is essentially different from the reconnection model because the magnetosheath pressure, instead of the IMF, determines the whole feature. Yet the model is valid only when the IMF is southward, when the magnetic field is in the same direction between the upstream side (magnetosheath) and the downstream side (plasma mantle). Otherwise, i.e., when the IMF is northward opposite to the direction of the cusp geomagnetic field, the magnetic field must modify the plasma flow heavily near the neutral point, to the extent that we may not have such a smooth flow passage from the magnetosheath to the cusp. This gives us an alternative explanation to the reconnection models for the dependence of magnetospheric activity to the IMF direction because the energy inflow is direct for the southward IMF while it is not straight forward when the IMF is northward.

The predicted standing MHD fast wave or shock at the outer-most part of exterior cusp explains many cusp-associated features observed by Viking when the IMF is southward, e.g., sudden appearance of strong influx of the cusp particles at the equatorward-most part of the cusp, gradual decrease of its intensity and characteristic ion energy, coexistence of the region 1 field-aligned current and the cusp particles, and the "traditional" cusp current as the result of the longitudinal polarization current inside the finite amplitude MHD fast wave. The existence of such a shock is confirmed by Prognoz-7 observations near local noon, where the satellite encountered unusual "magnetopause" across which both the plasma pressure and the magnetic pressure increase toward the earth, indicating that the transition belongs to the MHD fast mode.

外部カスプ流の新モデルおよび その証左となるカスプ観測例

山内正敏、リカード・ルンディン (Rickard Lundin)
スウェーデン立スペース物理研究所、キルナ

1. はじめに

強い固有磁場の為外部プラズマからほとんど遮蔽されている地球磁気圏に於いて、例外的に外部カスプだけは太陽風がかなり直接に侵入している(Haerendel et al., 1978)。従って、外部カスプの形態を知ることは、太陽風エネルギーの地球への侵入を考える上で非常に重要な事であるが、残念ながら観測例が少なく、未だに満足しうるモデルが出来ていない。スウェーデン立スペース物理研究所 (IRF) ではソ連の人工衛星Prognoz-7 で外部カスプに関するデータを (Lundin, 1985)、更にスウェーデンの人工衛星Vikingで中高度カスプのデータを (例えば Kremser and Lundin, 1990) かなり豊富に収集しており、これらのデータをもとに、外部カスプへの太陽風の侵入についての研究がすすめられている。ここでは惑星間磁場 (IMF) が南向きの時に話を絞って、その観測例および現時点でのモデルを紹介する。

2. Vikingの観測例

図1は、1986年8月25日1350UTに於けるVikingのカスプ観測例である。上段に電子および正イオンのエネルギー別粒子束度 (50eV-40keV)、下段に磁場の東西成分 (その傾きから求めた沿磁力線電流の向きと相対的強度を白抜き矢印で現わした) と南北成分を示す。人工衛星は北半球の昼間側 (12MLT) を低緯度から高緯度へと飛行しており、図では左側が低緯度側に当たる。IMFは南向き ($B_z = -2$ nT) で、これは正イオンのエネルギー時間分散 (極に向かって平均エネルギー、総粒子束度ともに減少) から明らかである (Woch and Lundin, 1992)。IMFの B_y 成分は -3 nTで、これも大規模電流系の向き (Region 1電流が上向きで、いわゆる「カスプ」電流が下向き) と合致している (Iijima and Potemra, 1976)。

図1のデータから、まず、カスプ付近の大規模電流系が、位置においても強度においてもカスプ粒子と密接な関係に在ることが示唆される。これを統計的に調べると、特に以下の2点が「IMFが南向きのカスプ付近の電流系」の新たな特徴としてあげられる。

1. 真昼付近 (1100-1230MLT) のRegion 1電流は、カスプ粒子の存在する所以外には流

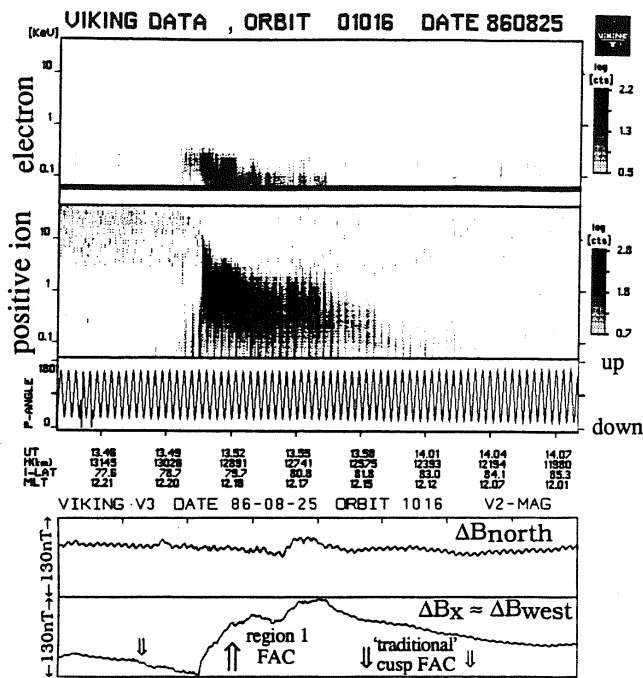


Fig. 1.: Viking energy-time particle spectrogram and magnetic field data for the midnoon traversal of orbit 1016. Equatorward to the left and poleward to the right. The empty arrows indicate directions and relative intensities of the field-aligned currents. Notice the striking coincidence between the particle flux and the field-aligned current intensity.

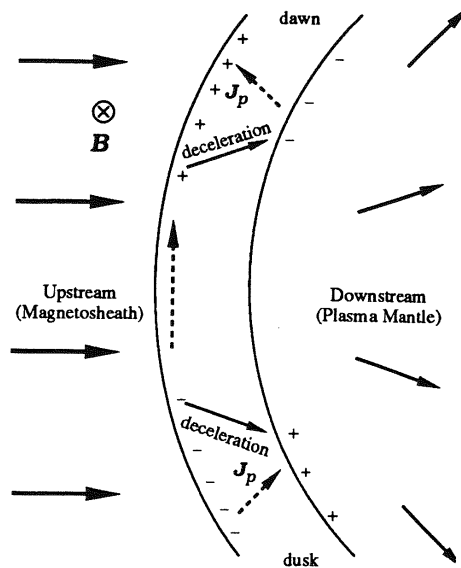


Fig. 2.: Illustration of solar wind injection into a finite-amplitude MHD fast wave or shock standing at the outer-most part of the exterior cusp. The surface current (the dashed arrow) is always found in ordinary (linear) MHD fast waves, while the polarization current J_p appear as the result of non-linear effect. Detailed discussions are found in Yamauchi *et al.* (1992).

れていない (統計的にはViking観測24例中19例) が、真昼から少し離れた (1000~1330MLT) Region 1 電流は、カusp以外にカuspの赤道側にも流れている (統計的には22例中16例)。

2. いわゆる「cusp」電流はRegion 1 電流とペアとして存在し、しかもその強度分布は「減衰項効果」の様な非対象性 (Region 1 電流よりも弱く、しかも極に向かって次第に弱くなる) を示す。

今までも既に明らかにされているカusp Region 1 電流の他の特徴、例えば向きや強度の経度方向分布などと併わせて上記の特徴を説明する為に、我々はカuspの上空、即ち外部カuspに、大振幅のMHD磁気音波 (fast mode)が発生していると云うモデルを考えた (Yamauchi *et al.*, 1992)。図2にその様子を模式的に示す。外部カuspに直接流入した太陽風は、そこに定在しているMHD磁気音波 (を形成する横向き電流系=図2の中央の破線矢印) によって直接減速され、その際、直接的なエネルギーの変換が行われている。ここで、カuspの東西向きの幅が有限なために、波面に沿って流れる電流が東西両端で電離層に向かって流れ出して、そのままRegion 1 電流に寄与している。

だが、これだけでは不十分である。波は有限振幅波 (或いは衝撃波) だから、非線形効

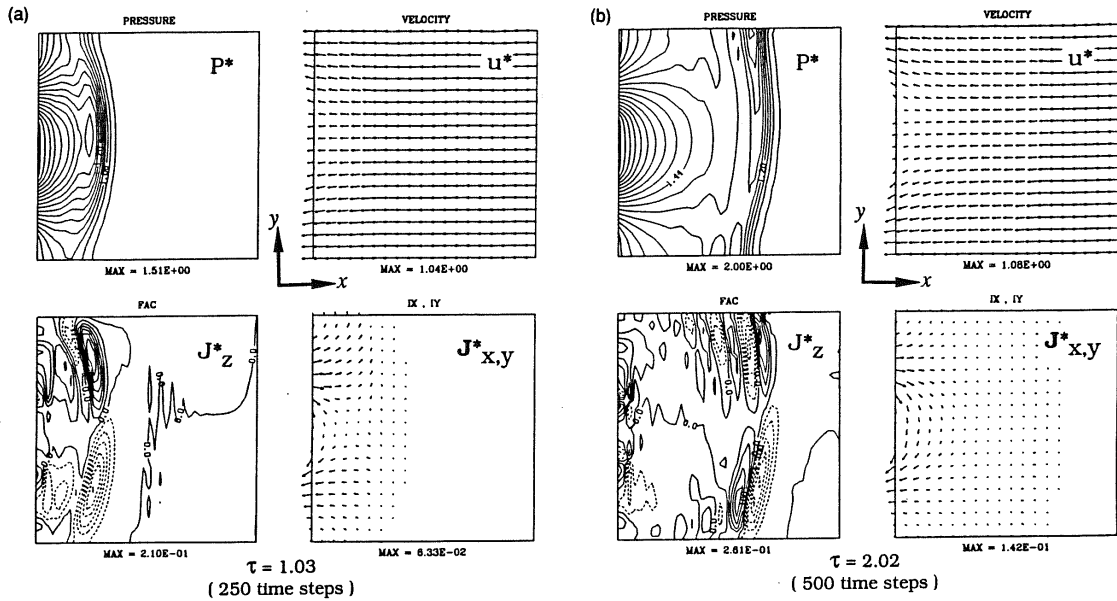


Fig. 3.: Numerical results of 2-D MHD simulation. Normalized pressure, convection, and currents are shown. Normalization reference values for pressure P_0 , magnetic field B_0 , and convection U_0 are their upstream values; for length L_0 , it is the size of the simulation box; for time, it is L_0/U_0 ; and for currents, it is $B_0/L_0\mu_0$. Parameters are: Alfvén Mach number $M_A = 0.45$; plasma $\beta = 0.8$; ionospheric conductivity normalized by Alfvén conductivity $\Sigma V_A\mu_0 = 0.45$, Hall effect is half of the real dissipation, and height is $1/5$ of L_0 (taken from Figure 6.9 of Yamauchi, 1990).

果の現れとして下流側に反対向きの電荷が発生する筈である。この電荷に伴う電流系は図2に J_p として示した。理論の詳細は Yamauchi et al. (1992) を参照されたい。ここでは2次元MHD数値シミュレーションの結果だけを図3に示す。このシミュレーションは2段階 Lax Wendroff 法によるもので、外部減衰項として電離層散逸を導入し、自由境界条件のもとに下流側の圧力値だけを与え、電離層散逸以外の3次元効果は無視してある。図3では定在波ではなく伝播する有限振幅波について調べているが、それでも、MHD磁気音波の内部に(2つではなく)4つの沿磁力線電流が存在している事、しかもこの電流系が図2のように分布している事は十分に確認できる。詳細の説明は別の機会に譲る。

図2のモデル及び図3のシミュレーション結果によれば、Region 1 電流のみならず、その高緯度側の通称カスプ電流(図1で下向き白抜き矢印)についても、その分布、向き、カスプ粒子との共存、非対象性、IMFの B_y 成分依存性(図4を参照)等が自然に説明出来るが、問題もいくつかある。

1. このような有限振幅波(或いは衝撃波)は果たして外部カスプ存在し得るのか。
2. なぜ、南向きIMFの時だけに上記の様なカスプ形態となるのか。
3. 外部カスプの観測は上記のモデルと合致しているか。

以下、これらの問題について答えていく。

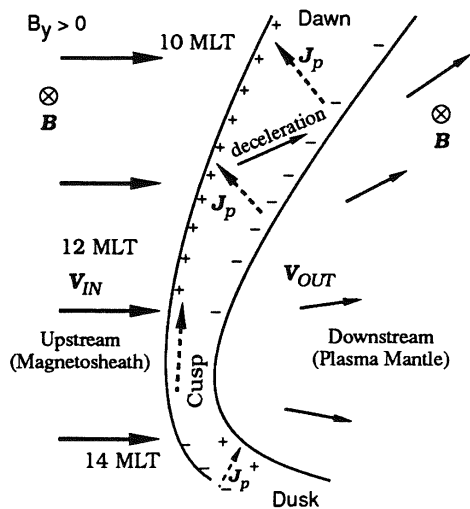


Fig. 4.: The IMF $B_y (> 0)$ effect is added to Figure 2. It causes a shift of the solar wind injection point toward postnoon. The resultant deformation of the standing MHD wave or shock provide strong asymmetry in the intensity of the polarization current J_p . Also, the flow direction becomes mostly downward inside the wave.

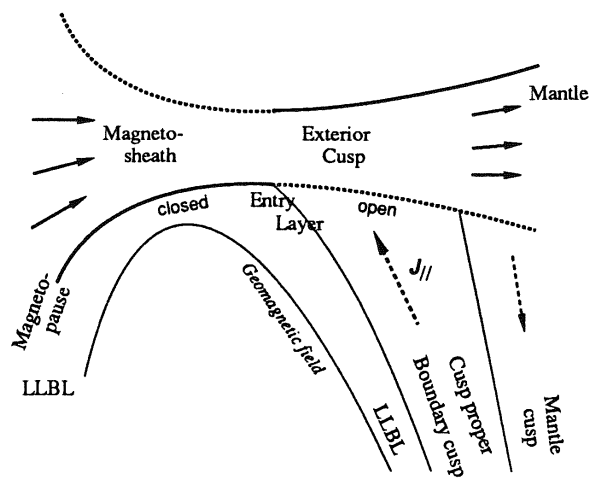


Fig. 5.: Geometry of the flow passage which goes through the exterior cusp is illustrated for southward IMF conditions. The cross section change of the flow resembles that of a Laval nozzle. Since we are considering the MHD fast mode when the magnetic field direction does not change (downward in the figure) for the whole passage, we expect that the role of the magnetic field is basically only to add extra pressure to the plasma pressure, and that the result of the gas dynamics can be refrained. Detailed discussions are found in *Yamauchi and Lundin (1992)*.

3. ラバル管モデル

一般に磁気シースではプラズマ圧（ここでは動圧）が磁気圧よりも高い。その為この領域の大規模な流れは、複雑なMHDでなく、より簡単なガス力学で可成り良く近似できる。そこで我々は、外部カuspにおける太陽風の流れにもガス力学を応用することを考えた。この場合、特別に考慮しなければならない事が2点ある。ひとつは流れの断面積が特殊であるという事、もう一つは磁場の影響である。

マグネトポーズと云う障害物は太陽風の流れの断面積を縮小させる効果をもつ。更に、もしも太陽風が外部カuspに入り得るなら、その流れは外部カuspを通り抜けたあとマントルに向かって広がっていく。この様子を模式的に描くと図5にも示す様にラバル管と同じ形状となり、磁場が流れを変形しない限りに於いて、ガス力学の成果が殆どそのままに適用出来る筈である (Yamauchi and Lundin, 1992)。たとえば、下流側の圧力の値によって、圧縮波が管の「喉」の下流で発生したり、それが衝撃波になったりして太陽風を直接に減速することが十分に予想される。いずれにせよ「喉」の下流側で圧力の上昇が見られる筈である。もちろんラバル管の流れには「下流側の圧力が低すぎて圧縮波が存在し得ない」と云う解もあるが、今の場合は下流側に磁気圏プラズマが存在しているので、下流側

の圧力は十分に高いと仮定出来よう。ラバル管中の流れの外部カuspへの応用に関する詳細はYamauchi and Lundin (1992)を参照されたい。

さて、磁場の影響を考える。もしも IMF が南向きなら、磁場の向きは流れの上流側でも下流側でも同じになり、MHDの磁気音波モードを考える限りに於いては磁場による変形は無視できるであろう。だが IMF が北向きの場合は、反平行磁場が流れを大きく乱すと考えられ、更にはこのような流れ自体が存在し得なくなると考えられる。つまり、磁気圏シースと外部カuspの磁場が平行な時にのみカuspに侵入する流れが発生し太陽風のエネルギーを取り込まれると考えるのであって、これはリコネクションのモデル (Dungey, 1961) とは全く正反対だが、これでも磁気圏の IMF に対するダイオード的な応答は十分に説明できる。

昼側リコネクションの見地からラバル管モデルを考えるならば、図5のopenとclosedの境界、即ち、非常に高緯度に於いて磁場の再結合の起こっているモデルと云う事になるが、上述のとおり、このモデルの物理的本質は従来のリコネクション・モデルとは全く違うので、混同すべきではない。

4. Prognoz-7の観測例

上記のラバル管モデルで予想されるMHD磁気音波モードの衝撃波は、実際にPrognoz-7で観測されている (Lundin, 1985)。図6にその例 (三角印) を示す。Lundin (1985) では、これは「特殊」なマグネトポーズと分類されているが、そのモードを調べれば、磁気圧 (P_B)、プラズマ圧 (P_P) とともに、そこを境に増加しており、明らかに磁気音波 (fast) モードである (Yamauchi et al., 1992)。このような「特殊な」マグネトポーズは、高緯度の、しかも真昼付近にしか存在し

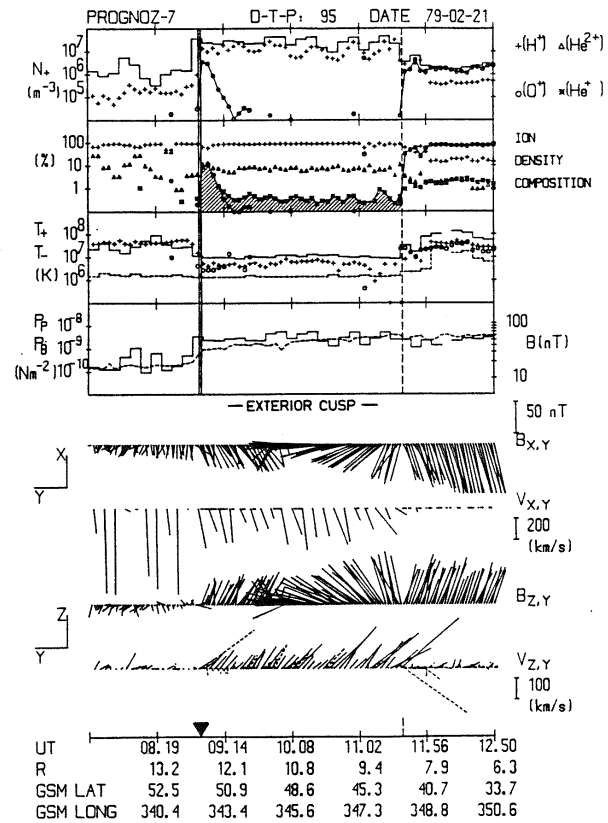


Fig. 6.: Low time resolution plasma and magnetic field parameters for an exterior cusp traversal near the noon meridian (taken from Figure 5 of Lundin, 1985). Velocities are given for H^+ (solid lines) and O^+ (broken lines). A magnetopause-like transition is found at the outer-most part of the exterior cusp (indicated by the solid bar), but it actually belongs to the MHD fast mode.