

「すいせい」(PLANET-A)による太陽風イオン観測

向井 利典・三宅 亘・寺沢 敏夫・平尾 邦雄*

(1986年2月25日受理)

The Observation of Solar Wind Ions by means of “Suisei” (PLANET-A)

By

T. MUKAI, W. MIYAKE, T. TERASAWA and K. HIRAO

Abstract: Overview of the solar wind ion measurement by means of the interplanetary spacecraft “Suisei” during the initial two month observations are presented. The typical corotating structure near the minimum phase of solar activity is observed. The instrument resolved ions O^{+6} , Si^{+7} and Si^{+8} as well as H^{+} and He^{++} in the low velocity winds. The Alfvén waves and anisotropic temperature distribution of protons were also observed. The large westward change of wind direction was detected simultaneously with increase of the wind velocity, which is interpreted as an interaction of high velocity wind with low velocity wind.

概 要

本論文は、ハレー彗星探査機「すいせい」に搭載された太陽風観測装置の最初の2ヶ月間のイオン観測をまとめたものである。探査機はハレー彗星への巡行中であり、最接近に向けて太陽風そのものの観測を行っている。現在は太陽活動極小期にあるため、太陽風の状態は太陽自転に同期した典型的な変動を示している。観測器の性能は予期した以上のものを発揮し、 H^{+} と He^{++} の区別は勿論、 O^{+6} 、 Si^{+7} 、 Si^{+8} 等、極微量成分の弁別まで可能である。これら重粒子イオンは太陽コロナの情報をもたらす貴重なデータであり、特に低速度の

* 東海大学工学部

太陽風で明瞭に観測されている。又、太陽風のマイクロな物理現象として、アルヴェン波やプロトンの温度異方性の存在も見出された。さらに、流速が低速から高速に変化する時に速度ベクトルが西向きに大きく変化することも判った。これは低速域に高速流が追いついてきたときの相互作用によって生じたものと考えられる。

1. 緒 言

ハレー彗星探査機 PLANET-A は、1985年8月19日に M-3 SII-2号機によって成功裡に打ち上げられ、「すいせい」と命名されて惑星間空間に旅立っていた。「すいせい」は直径1.4 m、高さ80 cmの円筒形の本体の上方に高利得デスパンアンテナを有した形状をしていて、通常6.3~6.4 rpmのスピ安定でスピ軸を黄道面にほぼ垂直な形で姿勢制御されている。搭載された太陽風観測装置の目的は、ハレー彗星への巡行中及び後では太陽風プラズマの諸現象の解明に供すると共に、最接近時に於いてハレー彗星の電離大気との相互作用を研究することである。

本論文では、観測器の概要と巡行中の最初の2ヶ月間の太陽風イオンの観測結果を報告する。Parker〔1958〕が予言した太陽風の存在が地球磁気圏外の直接観測によって確認されて以来、数多くの観測によってその基本的な性質は明らかになってきた〔例えば Hundhausen (1972) による review〕が、その生成機構やマイクロな物理現象については議論の余地が多い。我々の観測結果は、まだ立入った議論をする程のデータ量はないが、これらを解明する糸口になるものと期待している。

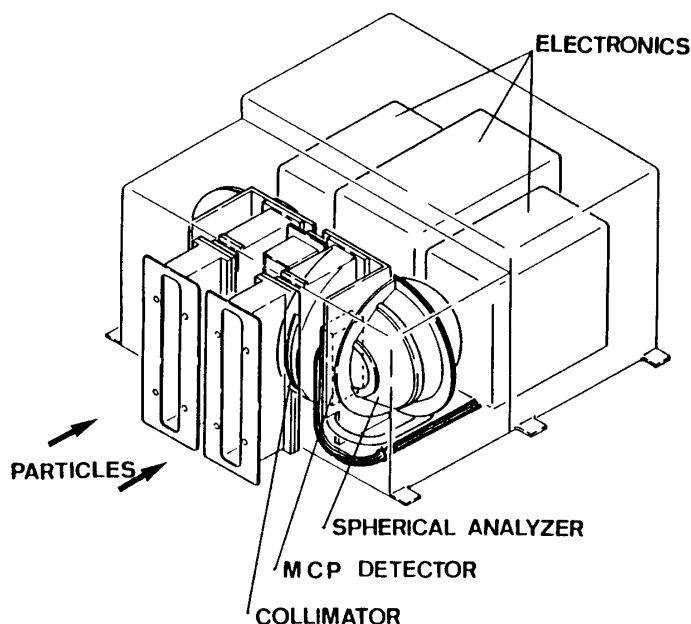


図1 「すいせい」に搭載された太陽風観測器

2. 太陽風観測装置

観測器は 30 eV~16 keV のエネルギー範囲の太陽風電子及びイオンのエネルギー/角度分布を測定するように設計され、電子センサとイオンセンサ及び共通の電子回路部が1つのケースに納められている。図1は観測器ケースの内部を見たようすを示す。各センサは扇形コリメータ、270°球型静電エネルギー分析器及び検出器としてのMCPで構成されている。その視野角は5°×60°で、広い方が黄道面に直角になっていて、MCPの5分割されたアノードによって12°毎のデータが得られるようになっている。270°球型分析器は、荷電粒子のエネルギー/角度分析を行うもので、従来の90°型分析器に比べて格段に良い特性を持っている〔Mukai and Miyake, 1986〕。観測器の特性諸元を表1に示す。

表 1 太陽風観測器の諸元

Analyzer	270° spherical
Energy range	30 eV~16 keV
Energy resolution	6.6%
Geometrical factor cm ²	5.1 × 10 ⁻⁵ (center anode)
cm ² sr keV/keV <GΔE>/E	4.8 " (next ")
	4.2 " (end ")
Field of view	5° × 60°
High voltage levels for MCP	2328 V
	2664 V
	2990 V

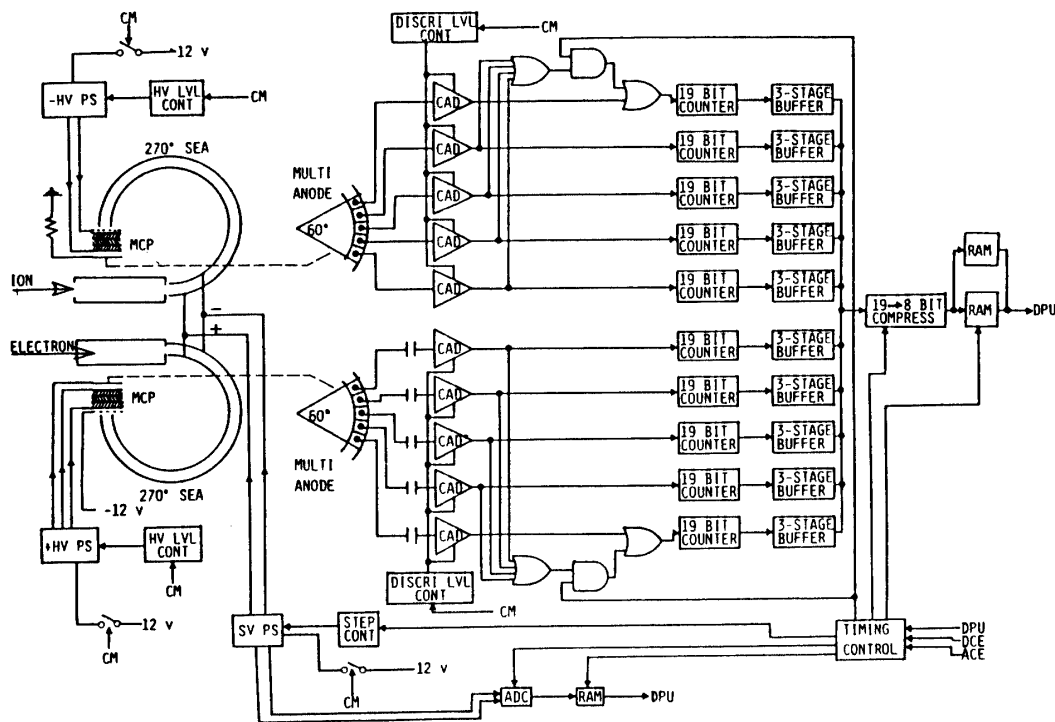


図 2 太陽風観測器ブロック図

観測器のブロック図を図2に示す。MCP アノードに出力された電荷パルスは電圧パルスに変換された後、増幅・弁別されて19ビットのカウンターで計数される。MCP への印加高圧レベルは3段階で選択可能であるが、現在は最低レベルで、将来MCPが劣化したときに昇圧する予定である。又、MCPのゲインを調べるために4段階の弁別レベルも設けている。19ビットのデータは8ビットに圧縮されて、一時的にRAMに貯められた後、DPUに送られて、テレメータで地球に伝送される。19ビットと8ビットの間には次式の関係式が成立する。

$$\left. \begin{aligned} C &= D && ; S = 15 \text{ のとき} \\ C &= 2^{14-S}(D+16) && ; 0 \leq S \leq 14 \text{ のとき} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ここで、 C は元々の19ビット値、 D 及び S は圧縮された8ビットの上位4ビットと下位ビットである。

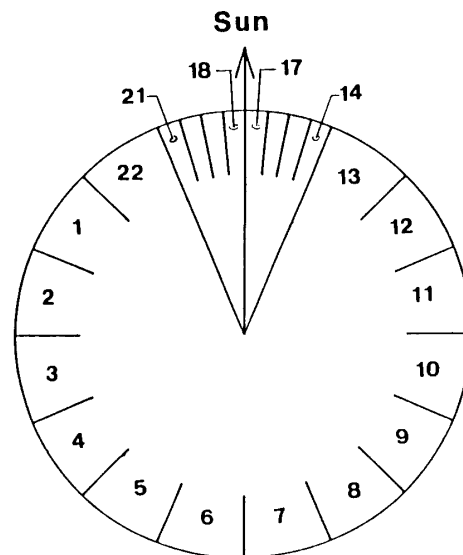


図3 方位角セクター分割

角分布の情報は、図3に示すように探査機のスピンの利用して得るようにする。全部で22分割で、太陽方向は特に細かい分割 (5.625°) で、他の方向での分割は 22.5° 毎である。エネルギー掃引は段階的に、 $E_n = 30 \exp(0.066 \cdot n)$, $n=0,1,2,\dots,95$ に従って行われる。エネルギー掃引モードは表2に示す4種類が用意されているが、本論文で報告するデータは全てE3モードで得られたものである。その掃引方法は図4に示すように角度掃引、即ち、スピン位相に同期して行われている。2048 bpsでは電子・イオン共にMCPの5コのアノードのデータが各ステップ毎に得られるので、3次元速度分布データとなる。その時間分解能は(スピン周期) × (総ステップ数)/4となり、次節以降に示すデータの場合、約2分半である。

64 bps のビットレートでは，データは2次元分布になり，図4に示す E1 モードでは1024 秒，他の掃引モードでは512 秒になる。

表 2 エネルギー掃引モード

mode	n_1	n_2	Δn	total steps	energy (eV)
E 1	0	95	1	96	30~15800
E 2	0	63	1	64	30~1920
E 3	32	95	1	64	250~15800
E 4	1	95	2	48	34~15800

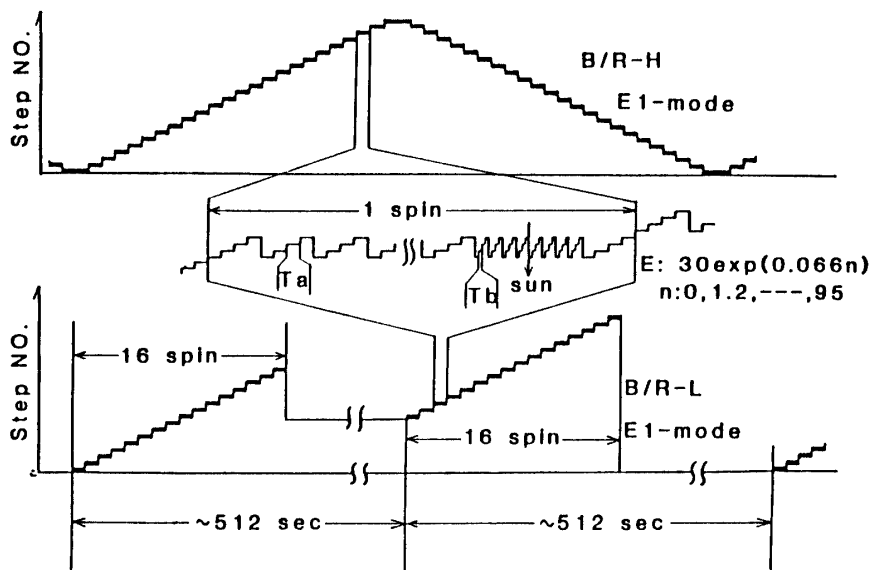


図 4 エネルギー掃引方法。上部パネルは 2048 bps の場合，下部パネルは 64 bps の場合である。中間パネルは 1 スピン間の詳細を示す

3. データ処理の方法

まず PCM データ (8 ビット) を (1) 式に従って元のカウント数に変換した後, サンプルリング時間を考慮して, 1 秒値に直すことから始まる. サンプルリング時間はスピン周期 T_s から次式で求められる.

$$T_a = T_s / 2^6 - T_d \quad (2)$$

$$T_b = T_s / 2^8 - T_d \quad (3)$$

但し, T_a と T_b はそれぞれ広い角度セクター, 狭い角度セクターに対応したサンプルリング時間 (図 4 参照) で, T_d はエネルギーステップを変えるのに要する遷移時間 (15.625 \pm 0.125 msec) である.

粒子の微分フラックス $F(E)$, particles/cm² s sr keV, はカウント数の 1 秒値より $F(E) = C_0 / (\langle G \cdot \Delta E \rangle \cdot \epsilon)$ で求められる. $\langle G \cdot \Delta E \rangle$ は energy-geometric factor で, 表 1 に示した実験値 [Mukai and Miyake, 1986] を用いた. ϵ は検出効率で, MCP の開口率及びその前面の透過率をも考慮して 0.3 とした. 速度分布関数 $f(v)$, s³/m⁶ は微分フラックスから求められる.

$$f(v) = \left(\frac{m}{q}\right)^2 \cdot \frac{F(E)}{2E} \cdot 10^{-2} \quad (4)$$

但し, m と q は粒子質量 (kg) と電荷量 (Coulomb) であり, E は keV の単位の粒子エネルギーである.

データ解析は主としてカウントの 1 秒値を用いて行うが, (4) 式によって得られる速度分布関数を shifted Maxwellian で近似することにより, 流速ベクトル, 温度及び密度を算定する. 但し, 観測器は彗星起源のイオンも測定対象 (ハレー彗星への最接近時) としているために, 太陽風プロトンのピークカウントは 10⁵ を越えている. このデータは飽和している傾向があるので, 処理対象から除外した. この処理で得られる精度は, 流速については 1%, 温度は 10%, 密度は 40% 以内の誤差におさまっている*.

図 5 は静穏時の太陽風イオンの典型的なエネルギースペクトルである. これは, いわゆる, E-t ダイアグラムで, 最も濃く黒い部分が 10⁵ cps, 最低レベルで 10² cps にとつてある. 又, 角度セクターは No. 16~18 (図 3 参照) のデータを平均し, 各アノードのデータは合計されている. 図を見て, 1~2 keV/q に主ピーク, 3~4 keV/q にサブピークがあることが明らかであるが, これらはそれぞれプロトン (H⁺) とアルファ粒子 (He⁺⁺) であると断定できる. 図 6 は, この事をもっと明瞭に見るために示したものである. この図で, 破線はプロトン成分を shifted Maxwellian で最適近似したものである. カウントのピーク部分は前述のように飽和していることは明らかである. 算定されたマクロ・パラメータの時間変動の様子を示したのが図 7 である. 速度がゆっくりと遅くなっている様子がわかるであろう. 但し, 密度のバラツキには実際の変動に加えて近似誤差も含まれる. 例えば, 図 6 の 2:34 UT のデータは近似が悪く, 単純な shifted Maxwellian からのズレが大きいことがその原因である. また, 流速の方向の上面パネルは黄道面からのズレ, 下面パネ

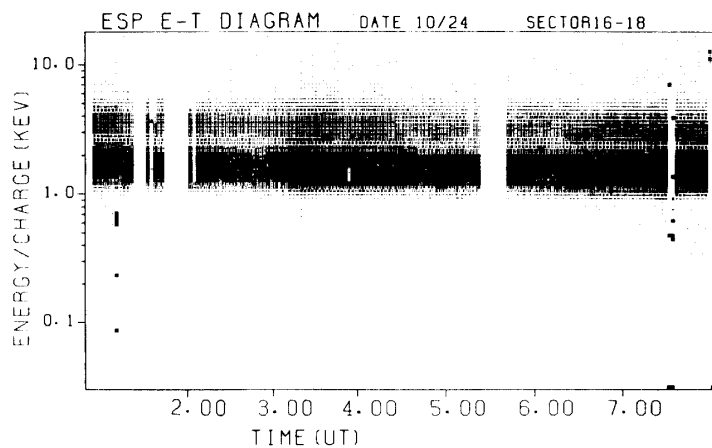


図 5 E-t ダイアグラムの例

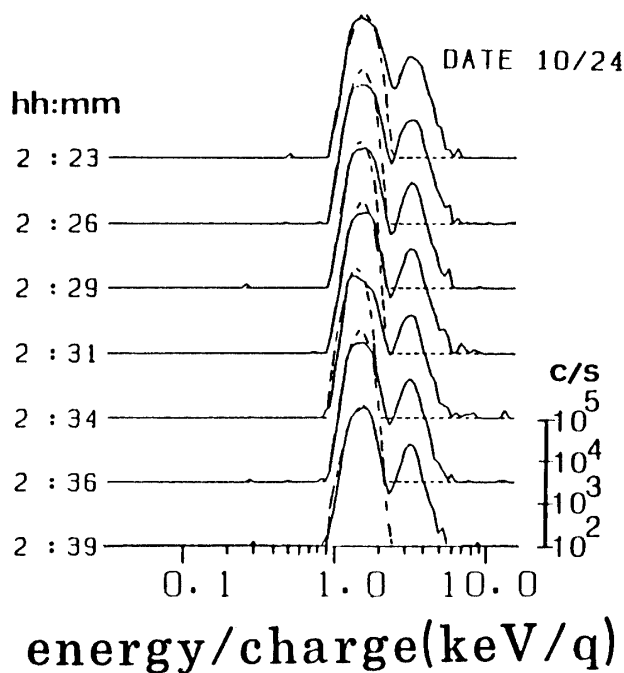


図 6 E/q スペクトル例
 実線は観測データ，破線は shifted Maxwellian で近似したものである

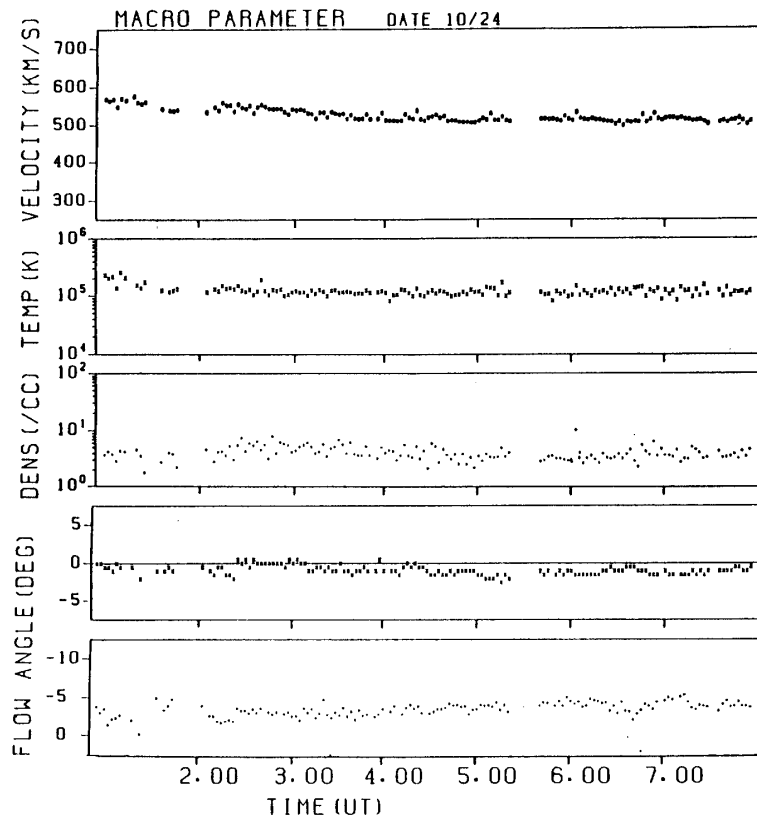


図7 太陽風パラメータの1日分データのサマリー

ルは方位角（太陽から反時計まわり）を示す。探査機の黄道面内での速度は 30 km/s であるので、このデータの場合のように太陽風流速が radial 方向に 530 km/s とすれば、西向きに約 3° ずれる。図の値はほぼこの値になっている。逆に言えば、太陽風は太陽から放射状に吹き出しているわけである。

4. 観測結果と検討

図8は太陽風パラメータを約2ヶ月間のデータについてまとめたものである。探査機と太陽の距離は、10/1で0.97 AU, 11/1で0.88 AU, 12/1で0.77 AUである。この間、10月に1つの大きな流れがあり、それが11月になって2つに分れたことがわかる。温度と流速の関係は $\sqrt{T_p} = a V_{sw} + b$ の関係がある事が過去の1 AU 付近の観測でわかっている [Neugebauer, 1975] が、図8の場合 $a=0.031, b=-2.07$ (但し、速度は km/s, 温度は 10^3 K の単位) になる。これらの値は、従来の観測に比べて若干大きい。太陽から距離の違いがある。太陽風プラズマが単純に断熱的に放射状の膨張で説明できるとすれば、 $R^{-4/3}$ (但し、 R は太陽中心からの距離) に従って冷えるはずである。過去の観測の結果は必ずしもこう単純ではなく、太陽風が惑星間空間に拡がっているときの熱の発生を示唆する (例え

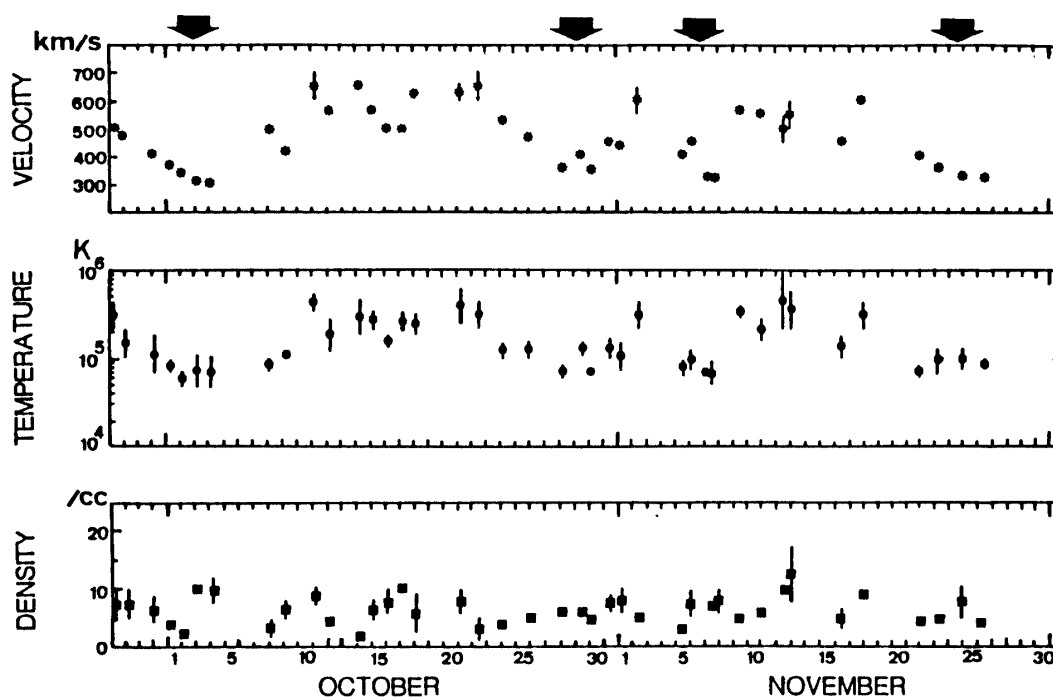


図8 太陽風パラメータの2ヶ月間のデータ・サマリー矢印は重粒子イオンが明瞭に観測されたときを示す

ば, Marsh et al., 1982). 「すいせい」は0.7~1.0 AU の間のデータを得ることができるので, この点については我々自身のデータを基に今後検討する予定である。

以下, 幾つかのミクロな物理現象について興味ある結果が得られたので, 述べることにする。

(a) アルヴェンの速度変調

図9は高温太陽風の1例で, $5\sim 6\times 10^5$ Kにも達している。流速は5:0 UT以降増加し, 大きく変動している。これはE-tダイアグラムで見ても明らかである。又, 流速の角度も大きく変動している(例えば図7と比較)。流速ベクトルが放射状であるとすれば, 偏向角は $-2^\circ\sim -3^\circ$ のはずなのに対して, 実際は -7° 平均で, しかも $\pm 3^\circ$ の変動をしている。この事は, 太陽風が必ずしもradial方向に流れているのではないことを意味している。速度変動と角度変動の間に相関があることは図9からもわかるが, もっと明瞭に示したのが図10である。破線円で囲まれた例外的な点は, 図9の矢印で示した所に対応し, 速度の急峻な変化に対応したものであるが, 全体的な20~30分の振動成分は良い相関を示している。角度変動の幅は600~700 km/sの変化に対応する幅よりも大きく, 図10の右上の部分に流速ベクトルの振動成分と乱れない状態での流速ベクトル V_0 の関係を示している。なお, 速度と黄道面からのズレについても相関があるが, 方位角との相関ほど良くはない。太陽風プラズマ中には種々の磁気流体波や不連続が存在している[Burlaga, 1971]。流速ベクトル

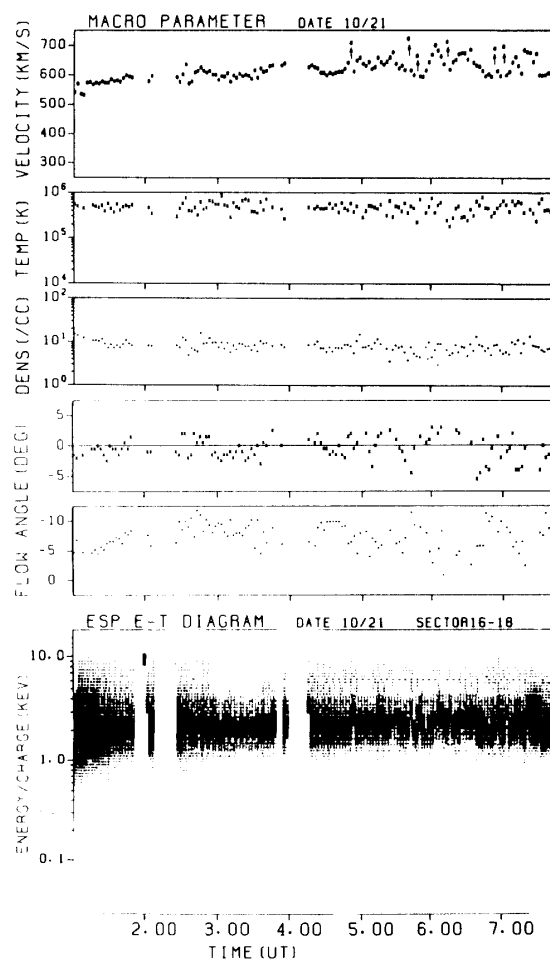


図 9 流速変動が顕著な日の太陽風パラメータの変動のようすと E-t ダイアグラム

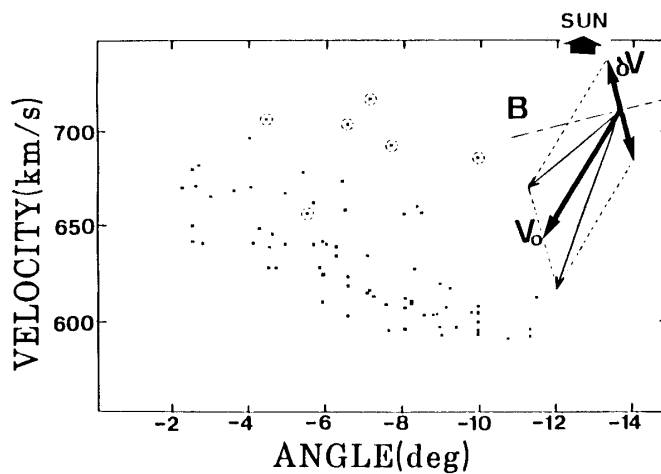


図 10 前図のデータの黄道面内での流速とその方位角変動の相関

ルの変動は、しばしば、磁力線方向の変動と相関があり、磁場強度や密度そのものの変動が少ない例がある。これは線型アルヴェン波の特性であるので、アルヴェンの変動と呼ばれている〔Belhhen and Davis, 1971〕。このとき、流速ベクトルの最小変位方向は平均的な磁場方向に近い〔Burlaga, 1971〕。我々の場合、磁力計が「すいせい」に搭載されていないので正確にはわからないが、図10に示されるように最小変位方向はアルキメデスの渦曲線方向に近く、平均的な磁力線方向と思われる。従って、図9及び図10のデータはアルヴェンの変動を示すものと考えられる。現段階ではまだそのモードまでは確定できないが、図9の矢印で示した急峻な変化の存在は2つの異ったモードの存在を示唆するものである。

(b) ストリーム相互作用

図11の例では、速度は1:0 UT頃より徐々に増加し、5:15 UTに急に変化した。又、

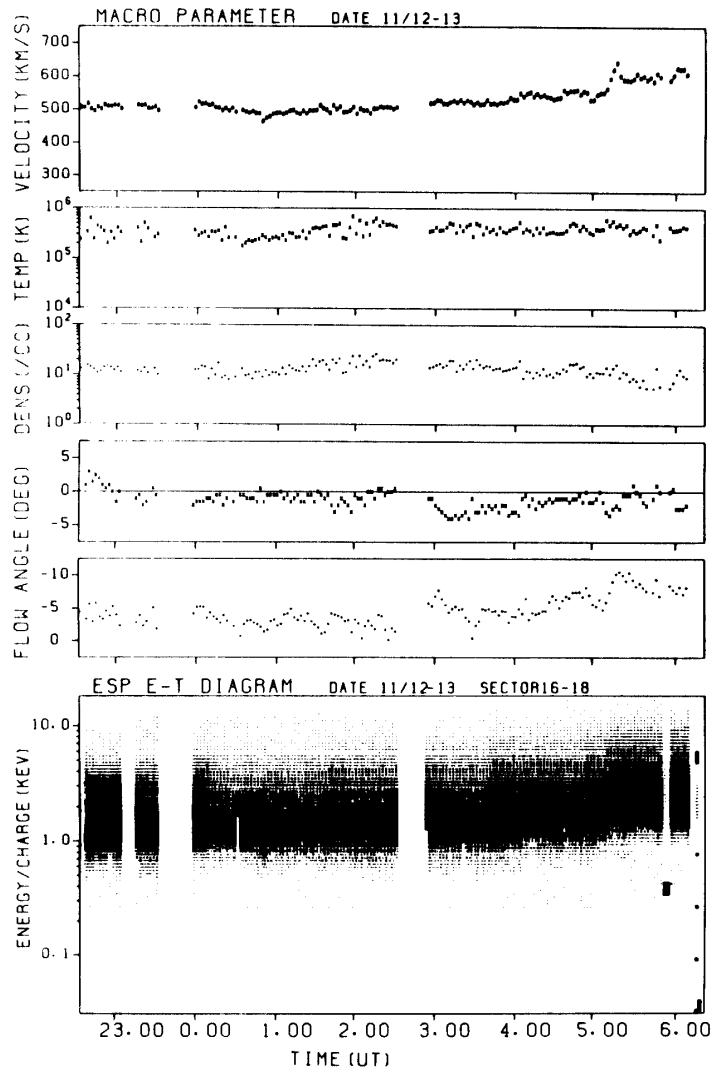


図11 流速上昇に伴った流速方向の変化の例

密度は0:30 UT から増加し始め、およそ2:0 UT で最大になっている。この密度増加は速度増加域におけるストリーム相互作用に依るものではないかと考えられる。その速度上昇に対応して流速方向も変化しているのがわかるであろう。高速流の先端部には圧力上昇部分が形成されることは知られていて、圧力勾配に起因して低速流と高速流の相互作用が生じることが考えられる。即ち、低速流を加速し、高速流自身は遅くなるわけである。一般的にはこのとき、低速流は東側に、高速流は西側に偏向される。図11に示したデータは、まさにこのストリーム相互作用で解釈できよう。さらによく見ると、3:0 UT 頃より方位角の変化と共に黄道面からのズレも変化しているのがわかる。これは前記の圧力上昇部分が必ずしも黄道面に直交していないことを示唆していて興味深い。

(c) 重粒子イオンの検出

前にも述べたように太陽風イオンの主成分はプロトンで、若干の He^{++} (アルファ粒子) を含むことはよく知られているが、更に重いイオンも「すいせい」ではときどき観測されている。それは特に太陽風流速が遅いとき、従って温度も低いときにはっきりと見られている。図12はそのような例で、プロトンによるピークの高エネルギー側に幾つかのピークが見られるが、これらは種々の荷電状態の重粒子のイオンに対応している。太陽風中の各種イオンによって流速は変わらない、という仮定(これはほぼ正しいと思われる)の基に、各種イオンの同定が可能である。その例を図13に示す。下部の影線部はバックグラウンド・レベルである。図13の左側のデータは図12の6掃引、右側は11月8日の11掃引のデータを元に作成した。太陽コロナの各成分比を参照して、図13のように O^{+6} , Si^{+8} , Si^{+7} 及び鉄イオン・グループの同定を行ったが、 $E/q=3.2\sim 4.0$ の10~50%は S^{+10} , S^{+9} , S^{+8} の可能性もある〔Bame et al., 1975〕。太陽風中の各種イオンの存在比は、 $R > 5R_s$ (R_s : 太陽半径) で不変である〔Hundhausen et al., 1968〕ので、この重粒子の情報は太陽コロナ

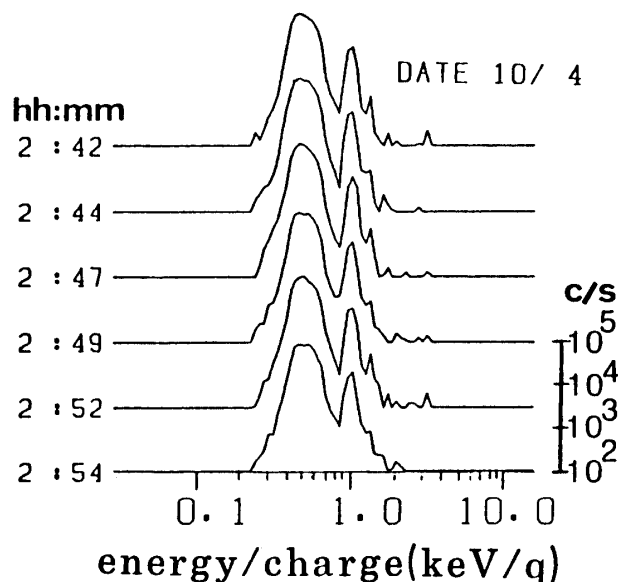


図12 重粒子イオンによるピークが顕著なときのエネルギー・スペクトル

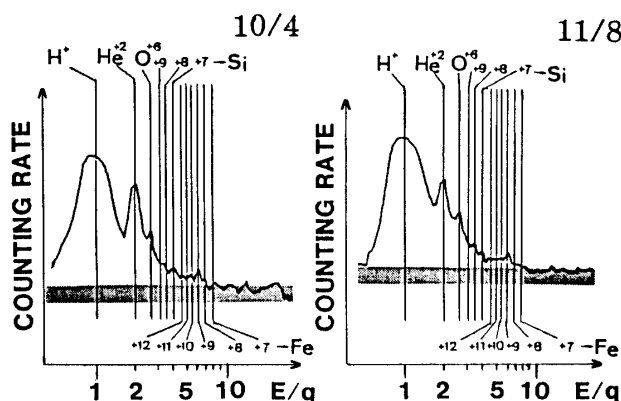


図 13 重粒子イオンの同定

の状態を示唆するものと考えられる。各種イオンの平衡荷電状態はプラズマの電子温度で決まるので、Allen and Dopree [1969] のシミュレーション計算結果を用いて10月4日のデータの $\text{Si}^{+7}/\text{Si}^{+8}$ 及び $\text{Fe}^{+8}/\text{Fe}^{+9}$ の比から電子温度を算定すると $8\sim 9 \times 10^5 \text{ K}$ になった。この値は通常のコロナ温度よりも若干低いように思われるが、太陽風も低速・低温である。 He^{++} よりも重いイオンが検出されたときを図8の矢印で示す。いずれも低温・低速の領域であるが、これは観測器の性能と関係がある。即ち、測定エネルギーは log-linear なので、エネルギーステップ間隔は低エネルギーほど狭くなることに原因があるかも知れない。また測定エネルギー上限が $16 \text{ keV}/q$ であるために、高速流の場合、測定限度を越えている可能性がある。しかし、高温・高速流の場合に、重粒子イオンが少くなる傾向があるように思われ、太陽風の生成メカニズムとの関連があるかも知れない。

(d) プロトンの速度分布の異方性

前節に述べたようにプロトンはしばしば shifted Maxwellian からずれた速度分布をしている。図14は黄道面内における「エネルギー/荷電量—角度分布」を示す。カウント数の1秒値を等高線表示して1/4桁毎の LOG スケールである。角度の 0° は太陽方向で、黄道面内で反時計方向が正の向きである。 0.55 keV の所の主ピークがプロトンに対応し、高エネルギー側に各種イオンに対応したピークが続いている。ここで着目したいのはプロトンの分布の歪みについてである。この原因としてまず第1に考えられるのは温度異方性である。この場合、分布関数は磁力線のまわりに軸対称であり、そのような解釈で図14のデータもみることができよう。Hundhausen et al., [1970] によれば、 T_{\parallel}/T_{\perp} の比は平均1.9で1.1~3.4の間にあるということである。但し、 T_{\parallel} は磁力線方向、 T_{\perp} はその直角方向の温度を示す。一方、Feldman et al. [1973 a, b] は高速度・低密度の所で2つの流速成分の混在を指摘した。この解釈は、惑星間空間の不連続と関連があり、そこで違った流速の2つの流れが入り混じっている、ということである。図14では2つのピークは見えないし、Feldman et al. の条件とは合わないが、流速がほんのわずかに違った2つの流れの混在と見えないことはない。この問題を定量的に調べるにはプロトンの速度分布

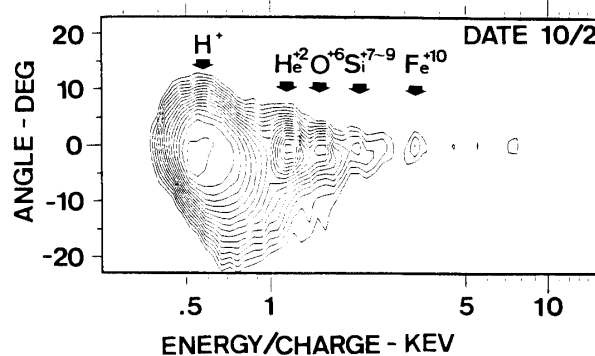


図 14 太陽風イオンの「E/q-angle ダイアグラム」表現の例

関数の近似を単純な shifted Maxwellian ではなく、温度異方性を考慮した近似、或いは二重ストリームで近似してどれが最適かを調べることが必要で、現在その作業を進めようとしているところである。もし、この近似がうまくいけば、その近似でプロトン成分を差し引くことにより、 He^{++} 以上の重粒子成分も定量的な精度が上ることになる。

5. 結 言

本論文では太陽風観測装置の概要と初期観測結果の紹介と若干の検討を行ってきた。観測器の性能は当初考えていた以上に良く、太陽風の興味ある性質として非等方性、非一様性、多種イオンの混在を明らかにするデータが得られている。今後のデータ蓄積により議論を深めたいと思っているが、今後の研究の予定としては(1) 「さきがけ」データとの比較・検討、(2) プロトンの分布関数の近似を温度異方性及び二重速度をとり入れることにより、太陽風プラズマの性質を詳しく調べること、(3) 前記の近似でプロトン成分を差し引くことにより重イオン成分の定量的検討を考えている。

謝 辞

本研究は、PLANET-A プロジェクト・チーム（現マネージャー：伊藤富造教授）全員の一丸となった努力の結果に負う所甚大であり、感謝したい。また M-3 SII-2 号機の打上げ成功に導かれた林友直実験主任を始めとする関係各班に感謝する。打上げオペレーションでは、MCP 保護の為に乾燥窒素ガスをノーズ・フェアリング内に導入したが、ロケット班及び TVC 班にお世話になった。観測器の設計に際して、賀谷信幸博士（神戸大学）の助言が有益であった。また、観測結果の検討に際しては西田篤弘教授から有益なコメントがあった。

センサ部は三鷹光器(株)、電子回路部は松栄電子(株)で製作された。MCP は浜松ホトニクス(株)製である。高圧電源は明星電気(株)とマトリックス社(米国)製である。

参考文献

- Allen, J. W., and A. K. Dupree, Calculations of ionization equilibrium for Oxygen, Neon, Silicon and Iron, *Astrophys. J.*, **155**, 27-36, 1969.
- Asbridge, J. R., S. J. Bame, W. C. Feldman, and M. D. Montgomery, Helium and hydrogen velocity differences in the solar wind, *J. Geophys. Res.*, **81**, 2719-2727, 1976.
- Bame, S. J., J. R. Asbridge, A. J. Hundhausen, and M. D. Montgomery, Solar wind ions: $^{56}\text{Fe}^{+8}$ to $^{56}\text{Fe}^{+12}$, $^{28}\text{Si}^{+7}$, $^{28}\text{Si}^{+8}$, $^{28}\text{Si}^{+9}$, and $^{16}\text{O}^{+6}$, *J. Geophys. Res.*, **75**, 6360-6365, 1970.
- Bame, S. J., J. R. Asbridge, W. C. Feldman, and P. D. Kearney, The quiet corona: temperature and temperature gradient, *Solar Phys.*, **35**, 137-152, 1974.
- Bame, S. J., J. A. Asbridge, W. C. Feldman, M. D. Montgomery, and P. D. Kearney, Solar wind heavy ion abundances, *Solar Phys.*, **43**, 463-473, 1975.
- Bame, S. J., J. R. Asbridge, W. C. Feldman, E. E. Fenimore, and J. T. Gosling, Solar wind heavy ions from flare-heated coronal plasma, *Solar Phys.*, **62**, 179-201, 1979.
- Belcher, J. W., and L. Davis, Jr., Large-amplitude Alfvén waves in the interplanetary medium, *J. Geophys. Res.*, **76**, 3534-3563, 1971.
- Bochsler, P., J. Geiss and R. Joos, Kinetic temperatures of heavy ions in the solar wind, *J. Geophys. Res.*, **90**, 10779-10789, 1985.
- Borrini, G., J. T. Gosling, S. J. Bame, W. C. Feldman, and J. M. Wilcox, Solar wind helium and hydrogen structure near the heliospheric current sheet: a signal of coronal streamers at 1 AU, *J. Geophys. Res.*, **86**, 4565-4573, 1981.
- Borrini, G., J. T. Gosling, S. J. Bame, and W. C. Feldman, Helium abundance enhancements in the solar wind, *J. Geophys. Res.*, **87**, 7370-7378, 1982.
- Burlaga, L. F., Hydromagnetic waves and discontinuities in the solar wind, *Space Sci. Rev.*, **12**, 600-657, 1971.
- Burlaga, L. F., Magnetic fields, plasmas, and coronal holes: the inner solar system, *Space Sci. Rev.*, **23**, 201-216, 1979.
- Eyni, M., and R. Steinitz, The cooling of solar wind protons from Mariner 2 data, *J. Geophys. Res.*, **83**, 215-216, 1978.
- Feldman, W. C., J. R. Asbridge, S. J. Bame, and M. D. Montgomery, Double ion streams in the solar wind, *J. Geophys. Res.*, **78**, 2017-2027, 1973a.
- Feldman, W. C., J. R. Asbridge, S. J. Bame, and M. D. Montgomery, On the origin of solar wind proton thermal anisotropy, *J. Geophys. Res.*, **78**, 6451-6468, 1973b.
- Feldman, W. C., J. R. Asbridge, S. J. Bame, and J. T. Gosling, Long-term variations of selected solar wind properties; Imp 6, 7, and 8 results, *J. Geophys. Res.*, **83**, 2177-2189, 1978.
- Gosling, J. T., J. R. Asbridge, S. J. Bame, and W. C. Feldman, solar wind stream interfaces, *J. Geophys. Res.*, **83**, 1401-1412, 1978.
- Gosling, J. T., G. Borrini, J. R. Asbridge, S. J. Bame, W. C. Feldman, and R. T. Hansen, Coronal streamers in the solar wind at 1 A. U., *J. Geophys. Res.*, **86**, 5438-5448, 1981.
- Hirshberg, J., J. R. Asbridge, and D. E. Robbins, The helium component of solar wind velocity streams, *J. Geophys. Res.*, **79**, 934-938, 1974.
- Hundhausen, A. J., H. E. Gilbert, and S. J. Bame, Ionization state of the interplanetary plasma, *J. Geophys. Res.*, **73**, 5485-5493, 1968.
- Hundhausen, A. J., S. J. Bame, J. R. Asbridge, and S. J. Sydoriak, Solar wind proton properties: Vela 3 observations from July 1965 to June 1967, *J. Geophys. Res.*, **75**, 4643-4657, 1970.

- Marsch, E., K.-H. Mühläuser, R. Schwenn, H. Rosenbauer, W. pilipp, and F. M. Neubauer, Solar wind protons: three-dimensional velocity distributions and driven plasma parameters measured between 0.3 and 1 AU, *J. Geophys. Res.*, **87**, 52-72, 1982.
- Mihalov, J. D., and J. H. Wolfe, Pioneer-10 observation of the solar wind proton temperature heliocentric gradient, *Solar Phys.*, **60**, 399-406, 1978.
- Mukai, T., and W. Miyake, Transmission characteristics and fringing field effect of a 270° spherical electrostatic analyzer, *Rev. Sci. Instrum.*, **57**, 49-55, 1986.
- Neugebauer, M., Large-scale and solar cycle variations of the solar wind, *Space Sci. Rev.*, **17**, 221-254, 1975.
- Ogilvie, K. W., and J. Hirshberg. The solar wind cycle variation of the solar wind helium abundance, *J. Geophys. Res.*, **79**, 4595-4602, 1974.
- Ogilvie, K. W., M. A. Coplan, and R. D. Zwickl, Helium, Hydrogen, and Oxygen velocities observed on Isee 3, *J. Geophys. Res.*, **87**, 7363-7369, 1982.
- Parker, E. N., Dynamics of the interplanetary gas and magnetic fields, *Astrophys. J.*, **128**, 664-676, 1958.
- Schmidt, W. K. H., H. Rosenbauer, E. G. Shelly, and J. Geiss, On temperature and speed of He^{++} and O^{6+} ions in the solar wind, *Geophys. Res. Letts.*, **7**, 1980.
- Siscoe, G. L., Structure and orientation of solar wind interaction fronts: Pioneer 6, *J. Geophys. Res.*, **77**, 27-34, 1972.
- Zastenker, G. N., and Yu. I. Yermolaev, Observations of solar wind stream with coronal conditions, *Planet. Space Sci.*, **29**, 1235-1240, 1981.

K

K

* これは、太陽風が等方的な shifted Maxwellian で表わされる場合である。後述のように非等方性があれば、誤差はもう少し大きくなる。