

EXOS-D SMS によって測定された陽子の半分のジャイロ周波数を持つイオンについて

渡辺 成昭・佐川 永一・巖本 巖

B.A. Whalen・A.W. Yau

Ions with Half Gyrofrequency of Proton Measured by EXOS-D SMS

By

E. Sagawa, I. Iwamoto, S. Watanabe, B.A. Whalen, A.W. Yau

Abstract: Radio waves with right-hand polarization of extremely low frequency (ELF), emitted by lightning strikes, can penetrate the ionosphere into the lower level of the magnetosphere. The right-hand polarized waves change to left-hand polarized waves (ioncyclotron waves) at the crossover frequency in the multicomponent and inhomogeneous plasma. Upward and transequatorial (downward) deuteron whistlers caused by the minor ionic component of the ionospheric and magnetospheric thermal plasma, principally deuteron (density ratio of deuteron to proton perhaps 10^{-3}) and a small amount of He^{++} , have been found [4, 5] from ISIS VLF data. Usually we cannot observe the large flux of thermal $M/Q=2$ ions, however, the large flux of descending $M/Q=2$ ions, measured with the density ratio to H^+ of 10^{-1} , appeared in the geomagnetical calm period in the low altitude (1000 km) cusp region. In the morning side of the auroral region, a large flux of $M/Q=2$ ions was observed as principally omnidirectional thermal plasma during a geomagnetic storm at a relatively high altitude (10000 km). These cases seem to be caused by He^{++} from the solar wind. In these case, then, the density of $M/Q=2$ ions which make up the deuteron whistler may also depend on He^{++} from the solar wind.

1) 郵政省通信総合研究所

2) カナダ国立研究院ヘルツベルグ天体物理学研究所

あらまし

上部電離圏と磁気圏内の中にある $AMU/Q=2$ 熱粒子はプロトンホイストラと作用して、新しいイオンホイストラを作り出す。このイオンは D^+ 、 He^{++} が考えられる。電磁圏中の各領域でどちらのイオンが主役を示すかを SMS によって観測されたが、その初期の報告をする。地球磁気擾乱がない場合でもカサブ領域に於いて下降のイオンが大量に観測された。又、磁気嵐中に流れのない熱イオンが大量にオーロラ帯で観測された。これ等の熱イオンは太陽風の α 粒子が磁気圏に侵入してからエネルギーを失ったものと考えられる。又、通常は、予期されていた様に、SMS の測定限界付近であり、あざやかな測定結果を示さないが、今後さらに解析を進める事が必要である。1965年に INJUN-3 によって熱的 H^+ がホイストラ波動(右偏波)に作用して出来るプロトンホイストラ(左偏波)が発見され[1]、この後 Alouette-2 によってヘリウムホイストラ[2]が発見された。Intercosmos-5 によって赤道越えのプロトンホイストラが発見され[3]、磁気赤道上の H^+ の総イオン数に対する密度比が、波動解析によって求める事が出来るようになった。

1975年に H^+ の半分のジャイロ周波数を持つイオン(以後簡略のため $M/Q=2$ イオンと略称する)がプロトンホイストラ波に作用して生ずるイオンホイストラを ISIS によって発見した[4,5,6,7]。一般に、イオンホイストラは電放電によるホイストラ波に各種の熱イオンが作用し、イオンサイクロトロン波を作り出す事によって形成される。しかし、 $M/Q=2$ イオン(重水素イオン D^+ 、 He^{++})は極めてその量が少く、地球電離圏中では H^+ と D^+ の密度比は $10^{-3}\sim 10^{-4}$ 程度と考えられている。又 He^{++} はさらに微量と考えられている、このため $M/Q=2$ イオンはホイストラ波に直接作用してイオンホイストラを形成出来ず、プロトンホイストラとなったイオンサイクロトロン波に作用し、これを著しく変形したイオンホイストラ波を作り出す。波動解析では周波数-時間ダイアグラム ($f-t$ ダイアグラム) 上でのパターン解析が基本的手段となるが、 D^+ 、 He^{++} によるイオンホイストラは同形であり、区別出来ない、

電離圏上空を飛ぶ ISIS-1、-2 衛星によって発見したので、主として電離圏の延長上にある重水素イオン D^+ によるものと考え、重水素ホイストラとした。一方、太陽風中では He^{++} は主成分の一種であり、 H^+ の 1/10 程度に多量に含まれており、地球磁気圏に大量に供給していると考えている。すなわち、 $M/Q=2$ イオンは、電離圏起源の場合

$$H^+ > He^{++} \gg D^+ > He^{++}, \quad D^+/H^+ \sim 10^{-3}$$

太陽風起源の場合

$$H^+ > He^{++} \gg He^+, \quad D^+$$

となる。従って He^{++} は、磁気圏内で He^+ が少量の場合太陽風侵入の良いトレーサーともなるであろう[8]。

第1図は ISIS-2 で観測された赤道を越えて伝搬して来た重水素ホイストラとプロトンホイストラの $f-t$ ダイアグラムである。衛星は 1973年12月18日、高度 1,368 km、磁気緯度 $11.6^\circ N$ 、不変磁気緯度 25.5° の位置にある。Gp はプロトンのジャイロ周波数、Gpm は衛星を貫ぬく地球磁力線が磁気赤道付近で最小の値を示す記号である。Gp/2 以上は赤道越えのプロトンホイストラを示し、Gpm/2 から Gp/4 の間にある CC の形は赤道越えの重水素ホイストラを示す。南北両半球の電離層の上部で反射を繰返すので C 印のエコーパターンが見られ

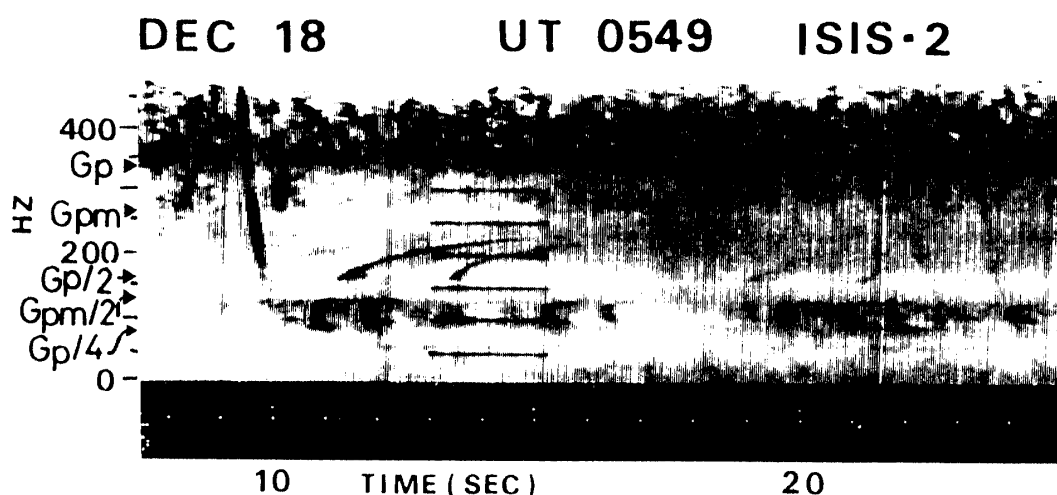


図1 赤道越えのプロトン・重水素ホイッスラのf-tダイアグラム。GpmとGp/2の間にある上昇型のパターンは赤道越えのプロトンホイッスラ。Gpm/2とGp/4の間に見えるここ型のパターンが赤道越え重水素ホイッスラ。

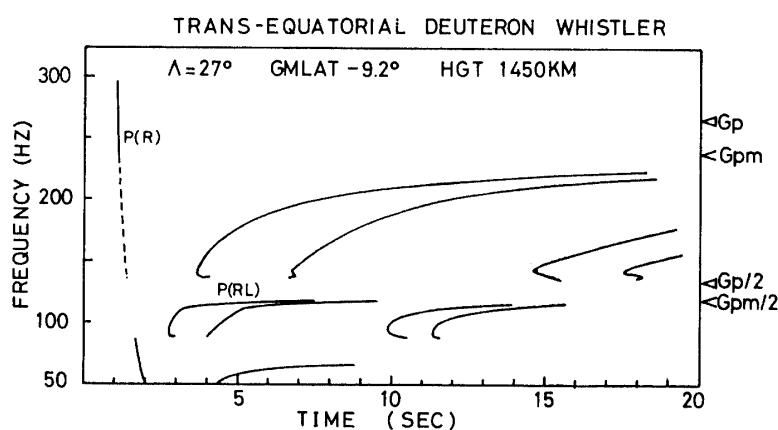


図2 $M/Q=2$ を含ませた多成分プラズマ中を地球磁力線に沿って伝搬するイオンホイッスラの計算例。第1図と極めて良く似ている。

る。第2図は、磁力線に沿って伝搬するイオンホイッスラを計算し、パターンを表示したものであるが、第1図に極めて良く似ている。温度を2,000度以上、F2層で総イオンが $20,000$ 個/cm³以上、 $M/Q=2$ イオンと H^+ との密度比が 10^{-3} 以上の時、このパターンが得られる。尚、このパターンは、 D^+ 、 α 粒子の微量さゆえ、静電サイクロトロン高調波のせいではないかとの説もあったが、主要なイオンである H^+ のGpの高調波は見られず、なぜ He^+ の一次高調波のみで止まるかなどの理由により説明が困難であり、波動粒子相互作用と思われる。理論的に $M/Q=2$ イオンの微量さが予測されるので、そのイオンの量、分布状況等を調べる事は重要と考え、SMSに対する期待は大なるものがあった。

重水素ホイッスラは、通常、 H^+ が総イオンの半分以下でない限り、常に受信される極めて普遍的現象である。

SMSによる統計的解析は緒についたばかりであるが注目される2例を紹介する。

予測されたように H^+ と $M/Q=2$ イオンとの密度比 $N(M/Q=2)/N(H^+)$ は 10^{-3} 程度と考えられ、SMSの精度ギリギリであって、万人を納得させる図を常に示す事は出来ない。しかし、カスプ領域とか、地磁気擾乱時にはこの密度比が大きくなる傾向がある。

第3図はその例である。4枚の図が示されているが、上2枚は $0.1\text{ eV}\sim 1\text{ eV}$ の熱的プラズマを示し、下2枚がスプラ・サーマル($1.0\sim 25.5\text{ eV}$)イオンを両対数表示してある。左の上下2枚は磁力線とのピッチ角が $0\sim 90^\circ$ のイオン質量分布を示し、右の上下がピッチ角 $90^\circ\sim 180^\circ$ のイオンを示してある。高度は $1,056\text{ km}$ と云う低高度ではあるが磁気緯度が 80.6° 、磁気地方時 13.4 でカスプ領域と思われる。図面の横軸は M/Q (AMU/Q)であるが、左上図に於いて、 $M/Q=2$ の所に高いピークがある。右上図にもピークはあるが、左上図に比べ、明らかに低いピークである。衛星の位置は北半球なので、磁力線に対して $0\sim 90^\circ$ のピッチ角を持つ事は下方に向う $M/Q=2$ イオンである事を示す、その H^+ との密度比も 10^{-1} 弱と極めて高い値を示し、かつ He^+ の高いピークは無い。これはカスプ領域に於いて、太陽風が入り込んで来て、エネルギー(太陽風中では、風速から換算して α は数KeV)を熱粒子(1 eV 以下)まで失って、下方に向けて落ちてゆく He^{++} の様子を表わしている図と考えられる。この時、地磁気活動は静かであるが、カスプ特有の現象と考えられ

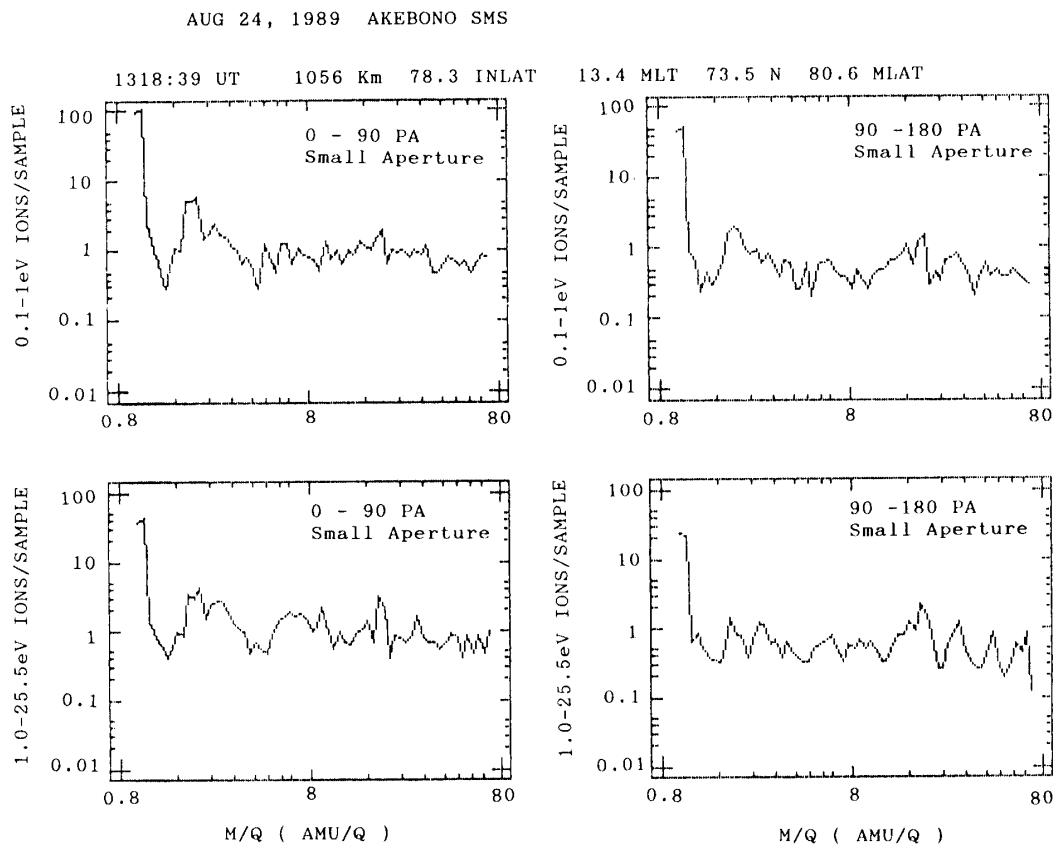


図3 1989年8月24日に、カスプ領域で観測されたサーマル・イオン($0.1\text{ eV}\sim 1.0\text{ eV}$)とスプラサーマル・イオン($1.0\sim 25.5\text{ eV}$)フラックスの AMU/Q に関する分布。

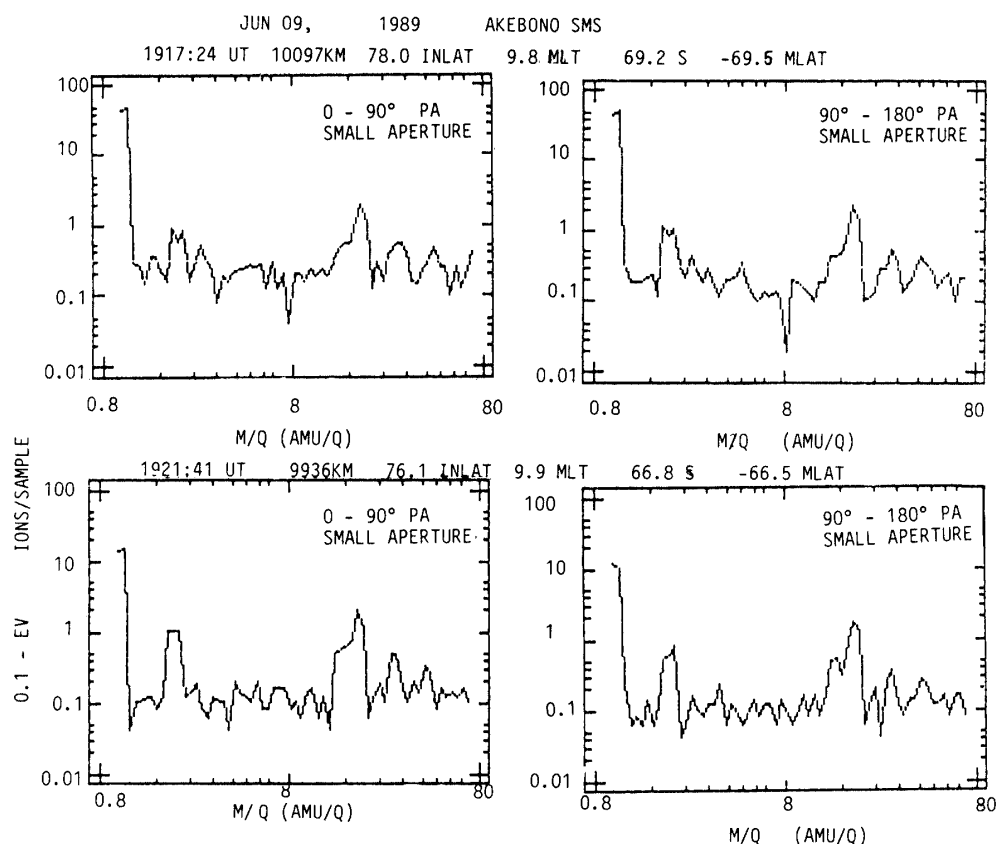


図4 1989年6月9日にオーロラ帯で観測されたサーマル・イオン(0.1~1eV)のみのM/Q分布. 1917UTと1922UT頃のフラックスが示されている.

る.

第4図は、6月8日1953 UTに始まり11日1500 UTに終る磁気嵐の最中6月9日1917-1922 UTに観測された例である。磁気地方時は9.8時という朝方で磁気緯度 -69.5° ~ -66.5° である。中間の1919 UTでは、衛星を貫いた磁力線は高度100kmの電離層で、磁気緯度 -71.7° というオーロラ帯に位置する。M/Q=2イオンは、左右同程度のピークを持ち、上下流は無いものと考えられる。H⁺との密度に注目すると、1917 UTでは $N(M/Q=2)/N(H^+)$ は 10^{-2} 強、1922 UTで 10^{-1} 弱であり、この範囲に関しては低緯度の方が密度比が高い(あるいは、低緯度の方がH⁺の密度が低い事をしめしているかも知れない)。この時、M/Q=2イオンに関して正確に云えないが、嵐の時でもあり、かつ地球電離圏に大量に含まれているO⁺は見えるものの、He⁺があまり見えないので、太陽風から入り込んでいるHe⁺⁺が主イオンかと思われる。

尚、M/Q=2イオンの存在は、第3、第4図の如く誰にでもはっきり認められるものを可とし、人によっては測定器のノイズかと思われる様なピークは除外してある。

まとめ

M/Q = 2 イオン（陽子の半分のジャイロ周波数を持つイオン）が周波数-時間ダイアグラム上に特異なパターンを持つイオンサイクロトロン波動を作り出す。そのイオンはD⁺, He⁺⁺と考えられるが、どの領域でどのような時に主となるイオンはなにかを統計的に調べ始めた。その初期の速報として、いくつかの特性を報告した。

1) 通常は、D⁺, He⁺⁺が熱プラズマとしては、密度が少なくSMSの精度ギリギリかそれ以下で、同定出来なかったが、これはある程度予測出来た事である。H⁺との密度比で $\sim 10^{-3}$ 程度と思われる。

2) カスプの領域で、特に地球磁気擾乱がない場合でも高いフラックスを持ち、H⁺との密度比で 10^{-1} までの値を示し、下降の流れを持っていた。これは太陽風中のHe⁺⁺が地球磁気圏でエネルギーを放出し観測されたものと思われる。

3) 磁気嵐中にオーロラ帯で高いH⁺との密度比 ($10^{-1} \sim 10^{-2}$) を持つイオンが測定されたが、これも太陽風起源のHe⁺⁺と思われる。

この様に太陽風起源のHe⁺⁺が、地球電磁圏中のM/Q = 2の熱的イオン密度を高め、波動解析によって得られた重水素ホイストラ形成に大きな役割を果しているものと考えられる。今後さらに緻密な統計処理を重ね、熱的イオンの微量成分の特性を明らかにしたい。

参考文献

- [1] Gurnett, D.A., S.D. Shawhan, N.M. Brince, and R.L. Smith, J. Geophys. Res., 70, 1665, (1965).
- [2] Barrington, R.E., J.S. Belrose, and W.E. Mather, Nature, Lond., 210, 80, (1966).
- [3] Likhter, Ya. I., Ya. P. Sobolev, F. Jiricek, and P. Triska, Space Res., 14, 265, (1974).
- [4] Watanabe, S. and T. Ondoh, J. Radio Res. Labs., 22, 63, (1975).
- [5] Watanabe, S. and T. Ondoh, Planet. Space Sci., 24, 359, (1976).
- [6] Watanabe, S. and T. Ondoh, J. Atmos. Terr. Phys., 42, 427, (1980).
- [7] Watanabe, S. and T. Ondoh, Planet. Space Sci., 32, 955, (1984).
- [8] Chappell, C.R. T.E. Moore, and J.H. Waite, Jr., J. Geophys. Res., 92, 5896, (1987).