

太阳风质子束流密度的径向变化^{*}

覃争锐 涂传诒

(北京大学地球物理系 北京 100871)

Eckart Marsch

(Max Planck Institute for Aeronomy, Katlenburg-Lindau, Germany)

摘 要

利用 Helios2 飞船的数据, 对太阳风速度分布中质子束流部分与整个质子的密度之比随日心距离的变化做了分析. 为了排除碰撞因素的影响, 有针对性地分析了太阳风高速流 ($600 < v_s < 700$ km/s) 的数据. 通过三维插值及平面积分的方式, 把太阳风质子分布分为核部分和束流部分, 并通过三维积分分别算出它们的相对密度. 结果表明, 太阳风质子束流密度与整个质子密度之比沿径向并没有明显的增加趋势. 而 Marsch 等算出的结果显示, 质子束流密度与整个质子密度之比沿径向有缓慢增加. 对于这一区别产生的原因, 进行了简要的讨论.

关键词 太阳风; 质子核分布; 质子束流分布

1 引言

在空间探测的早期^[1]就发现, 在太阳风中质子的速度相空间分布通常有两个峰值. 主峰附近的分布为质子的核分布, 次峰附近的分布为质子的束流分布. 这种分布随后又被 Helios 飞船在 0.3 AU 处观测到^[2], 最近又被 Ulysses 飞船^[3]和 Wind 飞船^[4]所证实. 图 1 是在距离太阳 0.7 AU 处太阳风质子速度的双峰分布. 如图 1 所示, 在太阳风速度矢量与磁场矢量所在平面内的速度相空间中, 横轴为太阳风速度方向, 纵轴为垂直太阳风速度的方向 (单位为 km/s), 虚线为磁场方向. 图中闭合曲线为速度分布的相空间等密度线, 原点密度为 1, 向外各等值线所对应的密度分别为 0.8, 0.6, 0.4, 0.2, 0.1, 0.032, 0.01, 0.0032, 0.001. 可以看到, 太阳风质子的分布在沿着磁场的方向有明显的核分布和束流分布. 通过数十年的研究, 关于质子束流的形成机制仍然不明朗, 有待于进一步解决. Tu 等^[5]认为束流是由回旋共振波引起的准线性扩散形成的, 并预测束流相对密度将沿径向增加. Marsch 等^[2]根据 Helios 飞船的观测指出, 束流密度与核密度的比值随日心距离缓慢增加, 但是并没有给出其均值的误差. 研究束流密度沿径向变化的目的在于, 如果束流密度沿径向增加, 则说明质子束流是在太阳风向外传播的过程中形成的, 如果减少, 则说明由于不稳定性等原因导致束流衰减. 为了进一步澄清这个问题, 并检验前人所得到的理论和观测结果, 我们分析了 Helios 2 号飞船所测得的太阳风高速流 ($600 \text{ km/s} < v_s < 700 \text{ km/s}$) 的数据. 太阳风高速流中的等离子体可以认为是无碰撞的. Helios 2 号飞船所测得的太阳风的数据中, 质子核部分, 束流部分及 α 粒子的分布是混在一起的.

^{*} 国家自然科学基金项目 (40174045), 国家重点基础研究项目 (G-2000078405) 共同资助
2003-11-05 收到原稿, 2004-03-20 收到修定稿

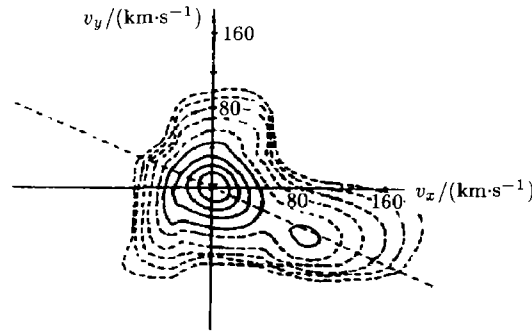


图1 太阳风质子速度的双峰分布 [2]

Fig.1 Proton double peaked velocity distribution in the solar wind

2 Marsch 等的处理方法及结果

图2是Marsch等[2]得到的沿着磁场方向的质子双峰速度分布函数. 在无碰撞的等离子体中, 质子束和核在沿着磁场方向有漂移. 图2是这样得到的, 首先对飞船得到的原始三维分布数据进行三维插值, 在插值后的数据中找到速度分布函数最大的点, 然后找出过最大值点, 沿磁场方向的各点的速度分布密度, 得到一个沿磁场方向一维的速度分布函数. 图中的速度零点选在速度分布函数最大值点, 定义为 $v_{\max}$; v_p 为质子整体速度沿磁场方向的投影; v_{sec} 为曲线第二个峰对应的速度值. 束与核的漂移速度为 $v_d = v_{\text{sec}} - v_{\max}$, $v_p - v_{\max}$ 定义为 $\Delta v_{\max}$. 在计算质子束与整个质子的密度之比时, Marsch 用了个近似公式 $N_s/N_p = \Delta v_{\max}/v_d$, 这个公式是在如下假设下导出的, 即把两个峰值的速度分别作为质子束和核的整体速度, 也就是认为束分布和核分布都是 Maxwell 分布. 图3为 Marsch 得到的 0.1 AU 范围内 N_s/N_p 随径向的变化, 可以看出, 束流密度与整个质子密度之比随径向有缓慢的增加. 该图中没有给出误差范围.

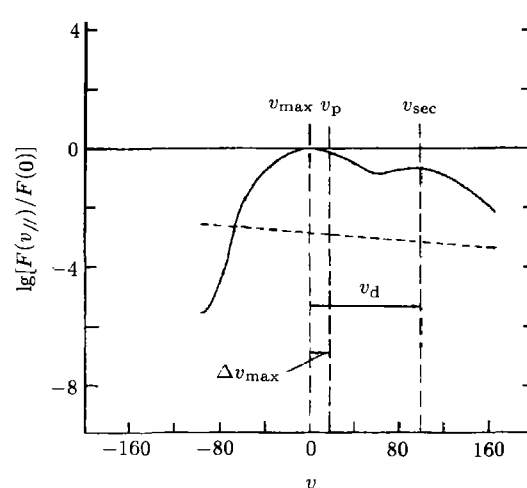


图2 沿磁场方向的质子速度分布函数 [2]

Fig.2 Proton distribution function in the direction of the magnetic field vector

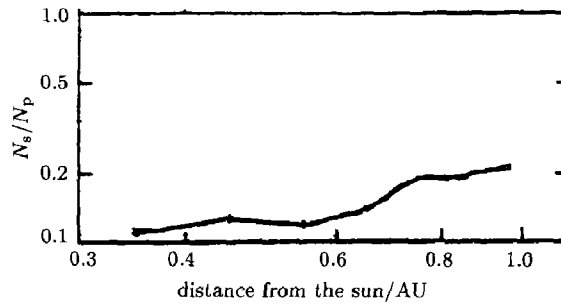
图 3 质子束流密度与整个质子密度之比沿径向的变化^[2]

Fig.3 Ratio of the beam density to proton density versus heliocentric radial distance in AU

3 数据处理方法

我们对计算 N_s/N_p 的方法做了一些改进. 主要基于这样的考虑, (1) 质子束分布和核分布并不一定是 Maxwell 分布, (2) 质子整体速度 v_p 并不是严格地正好在过最大值点的沿磁力线方向的那条线上, (3) Marsch 等^[2] 用最大值速度估算束与整个质子分布的密度比, 误差较大. 我们在处理数据时采取的方法如下, 先找到原始数据分布函数最大值在速度相空间的位置, 以该点为基点, 在沿着磁场方向的一个柱体内对原始观测数据点进行三维插值. 然后计算沿磁场方向和太阳风方向所在平面的速度分布, 如图 4 所示, 水平方向为磁场方向, 闭合曲线为速度分布的相空间等密度线, 原点密度为 1, 向外分别为 0.8, 0.6, 0.4, 0.2, 0.1, 0.032, 0.01, 0.0032, 0.001. 将这个平面上的速度分布函数沿着垂直磁场方向积分, 该积分值是一个沿着磁场方向的一维分布, 如图 5 所示. 这样做的优点是可以有效地处理磁场方向并不严格为漂移速度方向的情况. Marsch 的方法在磁场方向与束流漂移速度方向之间有一定角度时产生的误差会很大, 而由于观测误差, 这种情况是会经常出

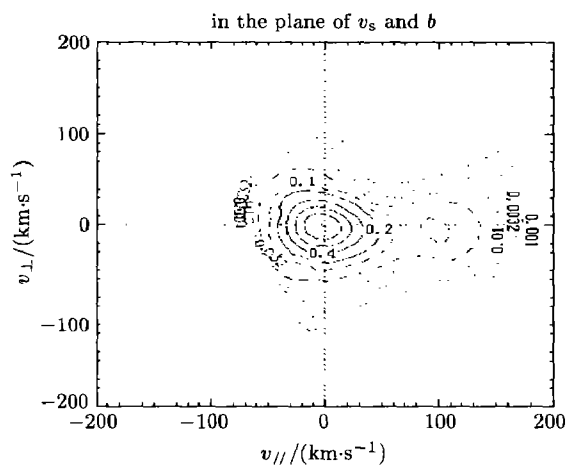


图 4 在太阳风方向与磁场方向所在平面内质子速度分布

Fig.4 Proton velocity distribution measured in the plane defined by the solar wind velocity vector and the magnetic field vector

现的. 如图 5 所示, 我们找到一维分布的两个峰值的位置 $v_{\max}$ 和 v_{sec} (如果不存在两个峰值则不予考虑), 并在两个峰值之间找到最小值 $v_{\min}$, 这个最小值即作为核和束的分界点, 过这个分界点且垂直于磁场的面把整个质子的分布分为两个部分, 一个部分即为质子束分布, 另一部分即为质子核分布. 将这两个部分的分布函数分别在速度相空间积分, 即分别得到质子核密度和质子束流密度.

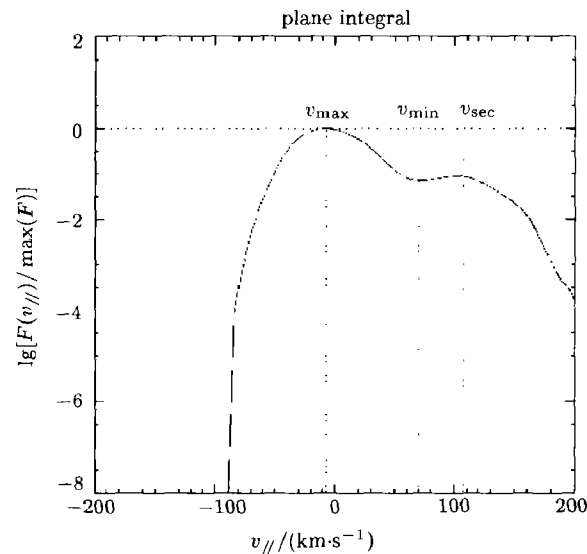


图 5 磁场方向和太阳风方向所在的平面的速度分布函数沿垂直磁场方向积分值的一维分布

Fig.5 The one-dimension distribution along the magnetic field direction after plane integral

4 结果与讨论

按照第 3 节所述的处理方法, 我们对 Helios2 飞船前 100 天的数据进行了分析处理. 数据采集点分布在距离太阳 0.3 AU 到 1 AU 之间, 把 0.7 AU 的距离平均分成 14 段, 对各段的数据进行统计, 并用插值后的分布函数积分求出束流密度与整个质子密度之比 (N_s/N_p) 的值, 在此基础上求出其均值并计算其误差, 如图 6 所示, 中间的 * 点为均值, 线段为其标准差 (有两个点由于统计的数据量比较小, 对其求平均以及计算误差都没有统计意义, 所以没有标于图中). 另外, 我们把找出的这个分界面, 代入原始数据, 分别对核和束流部分积分, 也可以得到束流密度与整个质子密度之比 N_s/N_p , 同样求出各个距离上均值及误差, 如图 7 所示.

从图 6 和图 7 可以看出, N_s/N_p 沿着径向并没有明显的增加 (在 0.3 AU 到 0.5 AU 之间稍有增加, 但与 0.5 AU 以外的比较并不明显), 并且标准差比较大, 说明即使在离太阳的位置一定时, N_s/N_p 的数值在时间不同时也有很大的差异. 由于本文所用方法不需要对分布函数的形状做假设, 所以比 Marsch 等^[2]的方法更可信.

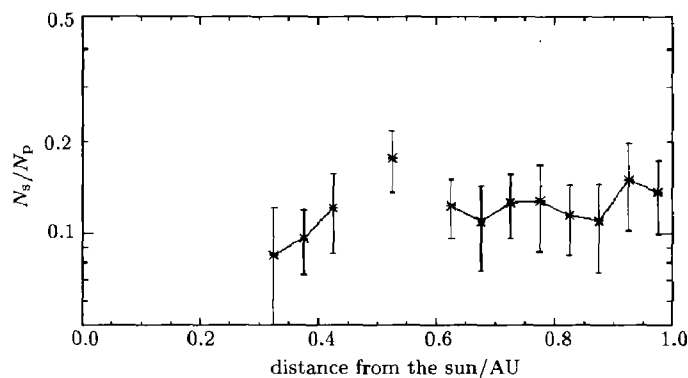


图 6 由三维插值数据得到的质子束流密度与整个质子密度之比沿径向的变化

Fig.6 Ratio of the beam density to the total proton density integrated from the interpolation data versus heliocentric radial distance

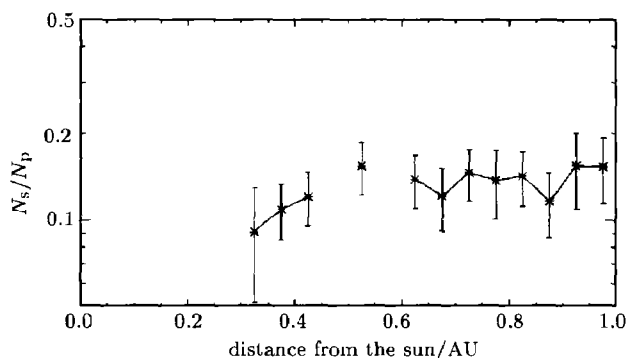


图 7 由原始观测数据积分后得到的质子束流密度与整个质子密度之比沿径向的变化

Fig.7 Ratio of the beam density to the total proton density integrated from the original observation data versus heliocentric radial distance

5 结论

本文通过 Helios2 飞船 100 天数据的分析, 得到与 Marsch 等不一样的结果, 发现太阳风中质子束流密度与整个质子密度之比 N_s/N_p 沿径向并没有明显的增加趋势. 这一结果既不支持质子束流在太阳风膨胀过程中形成的观点, 也不支持不稳定性限制束流发展的观点, 很可能质子束流在 0.3 AU 以前就已经形成, 并在太阳风随后的传播中, 一直到 1 AU 的距离, 基本上维持原来的状态. 然而, 由于数据结果的标准差很大, 束流密度是否有径向变化的问题, 仍然需要更多的数据来研究.

参 考 文 献

- [1] Feldman W C *et al.* Interpenetrating solar wind streams. *Rev. Geophys. Space Phys.*, 1974, **4**:715—720
- [2] Marsch E *et al.* Solar wind protons: three-dimensional velocity distribution and derived plasma parameters measured between 0.3 and 1 AU. *J. Geophys. Res.*, 1982, **87**:52—77
- [3] Goldstein B E, Neugebauer M, Zhang L D *et al.* Observed constraint on proton-proton relative velocities in the solar wind. *Geophys. Res. Lett.*, 2000, **27**(1):53—56
- [4] Kasper J C *et al.* Solar wind temperature anisotropies. *Solar Wind*, 2002, **10**:538—541
- [5] Tu Chuanyi *et al.* Cyclotron-resonant diffusion regulating the core and beam of solar wind proton distributions. *Solar Wind*, 2002, **10**:389—392

RADIAL EVOLUTION OF THE PROTON BEAM DENSITY IN THE SOLAR WIND

QIN Zhengrui TU Chuanyi

(*Department of Geophysics, Peking University, Beijing 100871*)

Eckart Marsch

(*Max Planck Institute for Aeronomy, Katlenburg-Lindau, Germany*)

Abstract

In the solar wind the proton velocity distributions usually have two maxima. The part of the distribution around the major maximum of the distribution is called the core part, and that around the second maximum is called the beam part. How the proton beam is formed in the solar wind is still a problem to be solved. The radial evolution of the beam density places an observational constraint on the theory. To clarify the issue the plasma data obtained by Helios 2 in high-speed wind with $700 \text{ km/s} > v_s > 600 \text{ km/s}$ was analyzed. And the 3-D proton velocity distributions were integrated to get a 1-D distribution along the magnetic field direction. The mean values and standard deviations of the ratios of the beam density relative to the total proton density in 0.05 AU interval were calculated. It was found that the relative beam density in high-speed wind doesn't increase obviously with increasing heliocentric distance, thus it is concluded that the proton beam probably is formed inside 0.3 AU, and doesn't change much during the solar wind expanding outward.

Key words Solar wind, Proton core distribution, Proton beam distribution