

哈雷彗星等离子体彗尾亮度 分布的理论分析

胡 中 为

(南京大学天文系)

阎 林 山

(中国科学院上海天文台)

摘 要

本文借助 Nazarchuk 的扩散理论模型和有关资料,分析了 1986 年 1 月 4 日哈雷彗星等离子体彗尾的尾轴方向及其垂直方向的相对亮度分布,推算出 CO^+ 离子的平均寿命、纵向(沿尾轴)和横向扩散系数,估算了磁场强度,最后进行一些讨论。

一、引 言

等离子体彗尾的观测研究是哈雷彗星国际联测 (IHW) 的重要课题,其目的在于探讨太阳风与彗星等离子体的相互作用^[1,2]。目前,这方面工作多数放在等离子体彗尾形态特征的研究,而很少进行其光度测量与分析。这是因为等离子体彗尾一般都很暗,难于进行光度测量;另一方面,等离子体彗尾又经常呈现多种复杂的活动形态,诸如尾射线、扭折、凝聚区、断尾事件等,使得理论分析极其困难。

哈雷彗星在 1985—1986 年回归提供观测研究彗星的良好时机,国际联测取得了丰富资料^[3]。虽然哈雷彗星出现了多种等离子体彗尾活动形态,但有些时间等离子体彗尾较单调,可作为准稳形态,有利于进行光度测量和理论分析。哈雷彗星在 1986 年 1 月 4 日就属这种情况。对该日拍摄的三张哈雷彗星大尺度底片进行光度测量*,得到沿其等离子体彗尾轴及几个垂直于尾轴方向的相对亮度平均分布。本文借助 Nazarchuk 的扩散理论模型^[4]及有关资料,对所得亮度分布进行理论分析,得出了 CO^+ 离子的平均寿命、纵向(沿尾轴)和横向的扩散系数,并估算出磁场强度。最后,对分析结果进行总结和讨论。

二、等离子体彗尾的物理参量

对于等离子体彗尾的亮度分布, Nazarchuk 提出了一种扩散理论模型。他把从彗核(坐标原点)飞出的物质云作为点源,并发生紊流扩散;利用格林函数 G 来表述物质云的面

本文于 1987 年 10 月 10 日收到。

* 胡中为等,哈雷彗星文集(待出版)

密度;假定点源的物质产率 f 与时间无关, f 为常数; 又假定物质沿尾轴方向有不变的加速度 a ; 考虑到发光物质的平均寿命 τ 以及纵向(沿尾轴,取为坐标 Y) 和横向(X) 的不同扩散系数 $D_{\parallel}$ 和 $D_{\perp}$; 格林函数取为如下形式:

$$G = \frac{1}{2\pi t(D_{\perp}D_{\parallel})} e^{-\frac{x^2}{2D_{\perp}t} - \frac{(y-\frac{a}{2}t)^2}{2D_{\parallel}t} - \frac{t}{\tau}} \quad (1)$$

进而导出彗尾发光物质的面(数)密度分布:

$$n(x, y) = \frac{f}{2\pi[D_{\perp}(D_{\parallel}\cos\beta + D_{\perp}\sin\beta)]^{1/2}} \Phi(x, y, \Gamma), \quad (2)$$

$$\Phi(x, y, \Gamma) = \int_0^{\infty} \frac{d\xi}{\xi} e^{-\frac{x^2 + (y - \Gamma\xi)^2}{2\xi} - 2\xi}, \quad (3)$$

$$\Gamma = \frac{a\tau^{3/2}\cos\beta}{(D_{\parallel}\cos^2\beta + D_{\perp}\sin^2\beta)^{1/2}}, \quad (4)$$

$$L_{\parallel} = 2(D_{\perp}\tau)^{1/2}, \quad (5)$$

$$L_{\parallel} = 2[D_{\parallel}\cos^2\beta + D_{\perp}\sin^2\beta]\tau^{1/2}, \quad (6)$$

$$x = \frac{X}{L_{\perp}}, \quad y = \frac{Y}{L_{\parallel}}, \quad \xi = \frac{t}{2\tau}. \quad (7)$$

其中, β 是真尾轴(在彗星轨道面上)与底片上(观测)尾轴的夹角.

因为彗尾的亮度正比于发光物质的面密度,所以可以把理论亮度分布写为

$$\frac{I(x, y)}{I_0} = \Phi(x, y, \Gamma). \quad (8)$$

其中, I_0 只跟 $D_{\perp}$ 、 $D_{\parallel}$ 及 β 、 f 有关,而跟 x 、 y 无关.

对于观测的尾轴, $X = 0$ (因而 $x = 0$), 上式可改写为

$$\lg I(0, y) = \lg \Phi(0, y, \Gamma) + \lg I_0. \quad (9)$$

若选取适当的 Γ 值,使理论曲线 $\lg \Phi(0, y, \Gamma) \sim \lg y$ 与观测的尾轴亮度分布 $\lg I'(0, Y) \sim \lg Y$ 拟合时,其横坐标之差即为 $\lg L_{\parallel}$. 因此,由观测的尾轴亮度分布拟合理论曲线,可以得出 Γ 值和 $L_{\parallel}$ 值.

对于垂直尾轴方向的 i 截面,可以算出无量纲数 $y_i = \frac{Y_i}{L_{\parallel}}$. 不考虑尾轴 $X = 0$, 可以作出理论亮度分布, $\lg \Phi(x, y_i, \Gamma) \sim \lg x$; 而观测的亮度分布为 $\lg I(X, Y_i) \sim \lg X$. 类似地,对于适当的 Γ 值,由观测的亮度分布拟合理论分布曲线,可以得出 $L_{\perp}$. 当然,对于不同 Y_i 截面,得出的 $L_{\perp}$ 值应当一致. 经过反复地进行观测亮度分布与理论分布的拟合,最后确定最佳拟合时(图 1、2), 得出如下结果:

$$\Gamma = 12, \quad L_{\parallel} = 1.62 \times 10^{11} \text{cm}, \quad L_{\perp} = 7.24 \times 10^{10} \text{cm}.$$

从(4)和(6)式,可以得出

$$\tau = \left(\frac{\Gamma L_{\parallel}}{2a \cos \beta} \right)^{1/2}. \quad (10)$$

从等离子体彗尾特征的运动,已测出平均加速度 $a = 30 \text{ cm/s}$ (离彗核 10^7 km 以内)^[5]. 根据等离子体彗尾的几何关系和哈雷彗星的历表^[6],可以算出 $\beta = 26.34^\circ$. 将有关数据代入(10)式,求出彗尾发光物质(对于所用兰敏底片,主要是 CO^+ 离子)的平均寿命为

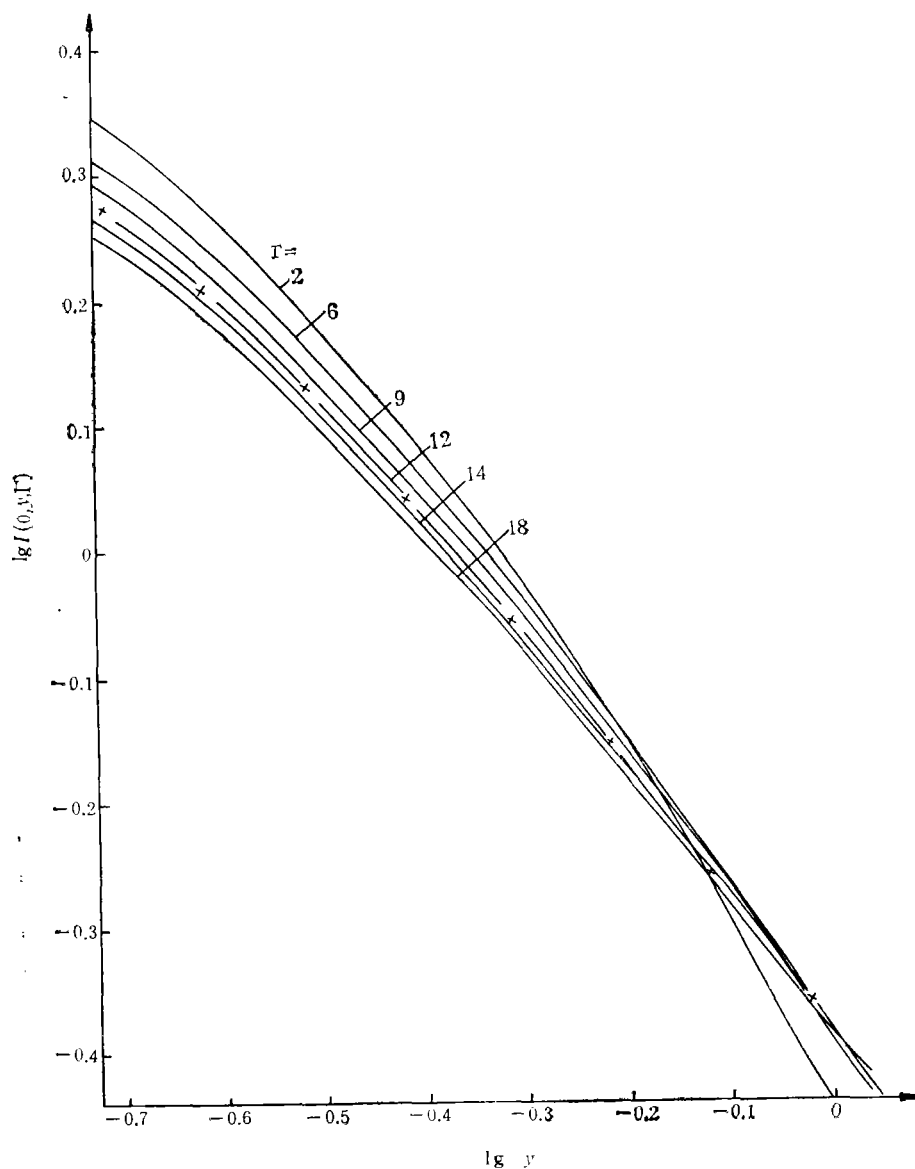


图1 沿尾轴的观测亮度分布与理论亮度分布的拟合

Fig. 1 Fitting of observed with theoretical brightness profiles along tail axis

$$\tau = 1.90 \times 10^5 \text{s}.$$

利用(5)式,求出横向扩散系数为

$$D_{\perp} = \frac{L_{\perp}^2}{4\tau} = 6.90 \times 10^{15} \text{cm}^2/\text{s}; \quad (11)$$

再利用(6)式,求出纵向扩散系数为

$$D_{\parallel} = \frac{1}{\cos^2 \beta} \left[\frac{L_{\parallel}^2}{4\tau} - D_{\perp} \sin^2 \beta \right] = 4.13 \times 10^{16} \text{cm}^2/\text{s}. \quad (12)$$

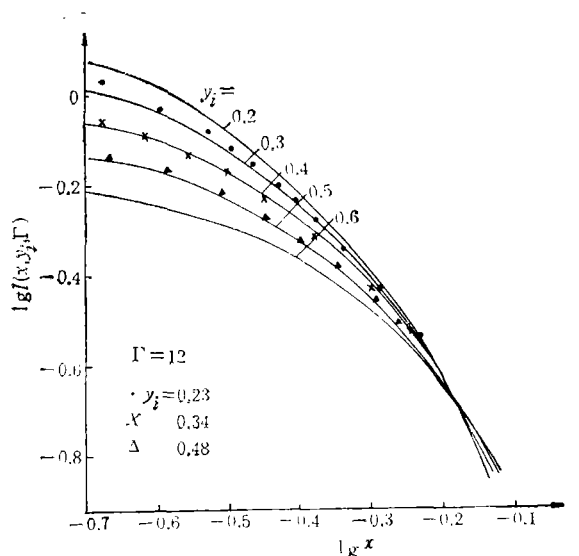


图2 彗尾截面的观测亮度分布与理论亮度分布的拟合

Fig. 2 Fitting of observed with theoretical brightness profiles for tail sections

如 Nazarchuk 引用的等离子体物理学关系:

$$\frac{D_{\parallel}}{D_{\perp}} = 1 + \frac{\lambda^2}{r_i^2}, \quad \lambda \approx \frac{D_{\parallel}}{V_e}. \quad (13)$$

其中, λ 和 V_e 分别为电子沿磁场方向的自由程和平均热速度, r_i 为离子的拉莫尔半径。取电子的平均热速度和 CO^+ 离子的拉莫尔半径^[7],

$$\begin{cases} V_e = 550.6 T^{1/2} \text{ (cm/s)}, \\ r_i = 0.945 T^{1/2} A^{1/2} / H \text{ (cm)}. \end{cases} \quad (14)$$

其中, T 为温度, H 为磁场(沿尾轴方向)强度, 并取 $A = 28$ 为 CO^+ 离子的质量(原子质量单位)。由(13)、(14)式, 可以得出

$$H = 2.753 \times 10^6 \frac{T}{D_{\parallel}} \left(\frac{D_{\parallel}}{D_{\perp}} - 1 \right)^{1/2} \text{ (G)}. \quad (15)$$

将前面得出的扩散系数值代入, 并取温度 T 的值 $1 \times 10^5 \text{ K}$ 和 $4 \times 10^6 \text{ K}$ ^[8], 则估算出磁场强度的可能下限为 $H = 1.49 \times 10^{-5} \text{ G}$ (或 1.49 nT)、上限为 $H = 5.95 \times 10^{-4} \text{ G}$ (或 59.4 nT)。

三、总结和讨论

综上所述, 从 1986 年 1 月 4 日哈雷彗星等离子体彗尾亮度分布的理论分析, 得出以下物理参量(在离彗核 $1.24 \times 10^6 \text{ km}$ 以内):

CO^+ 离子的平均寿命: $\tau = 1.90 \times 10^5 \text{ s}$, 纵向扩散系数: $D_{\parallel} = 4.13 \times 10^{16} \text{ cm}^2/\text{s}$, 横向扩散系数: $D_{\perp} = 6.90 \times 10^{15} \text{ cm}^2/\text{s}$, 磁场强度下限: $H_{\min} = 1.49 \text{ nT}$, 磁场强度上限: $H_{\max} = 59.5 \text{ nT}$ 。

现在对本文所得结果进行一些讨论。为了便于比较,取 CO^+ 离子的平均寿命跟彗星的日心距 R 的关系^[9]为 $\tau \propto R^2$, 则归算到 $R = 1\text{AU}$ 时, CO^+ 离子的平均寿命为 $\tau_0 = 2.10 \times 10^5\text{s}$; 在分析哈雷彗星的单色彗发资料时^[10], 我们得出 $R = 1\text{AU}$ 时, CO^+ 离子的平均标高(下限) $h_0 = 1.68 \times 10^5\text{km}$, 若取彗发中 CO^+ 离子外流速度 $v = 1\text{km/s}$, 则算出平均寿命(下限) $\tau_0 = h_0/v = 1.68 \times 10^5\text{s}$ 。显然, 尽管采用的观测资料及分析方法不同, 两种结果基本上是符合的。

虽然本文所用的扩散理论模型是在一定的简化假设下作出的, 但是作为近似, 由其分析观测资料仍得到一些有益结果。纵向与横向的扩散系数不同, 说明等离子体彗尾的物理性质是各向异性的; 纵向扩散系数大于横向扩散系数, 表明沿尾轴方向存在纵场磁场而起阻碍离子横向扩散的作用。虽然没有飞船直接探测哈雷彗星等离子体彗尾的磁场; 但是国际彗星探测器 (ICE) 穿越了 P/Giacobini-Zinner 彗星的等离子体彗尾, 磁场探测结果表明沿尾向磁场分量占优势^[11], 而且显示复杂的情况。因此, 需要结合等离子体彗尾各种观测资料, 进一步发展理论研究。

由于没有哈雷彗星等离子体彗尾磁场资料, 作为近似估算, 本文仅得出纵向磁场的可能下限和上限。考虑到哈雷彗星等离子体彗尾中存在着随远离彗核而加速度增大^[5], 其彗尾离子和电子的热运动温度可能较高 (10^6K 以上), 因而推求的磁场强度上限 (59.5nT) 可能更接近真实情况。实际上, Vega 飞船于 1986 年 3 月跟哈雷彗星相遇时, 探测到其彗发(朝太阳侧, 离彗核 8000—9000 km) 中磁场强度峰值为 70—80 nT^[12]; 而 P/Giacobini-Zinner 彗星的彗尾磁场强度峰值大约 60 nT。因此, 本文估算的磁场强度以及其他等离子体彗尾参量可以作为等离子体彗尾深入研究的参考。

参 考 文 献

- [1] IHW Newsletter, No. 1, 1982.
- [2] Swamy, K. S. K., Physics of Comets, World Scientific Publishing Co. Pvt. Ltd., 1986.
- [3] Mendis, D. A., Proc. 20th ESLAB Symposium on the Exploration Halley's Comet, ESA SP-250, Vol. 11, p. 441, 1986.
- [4] Назарчук, Г. К. Физика Комет, Изд. Наукова Думка, Киев, стр. 77, 1969.
- [5] Celnik, W. E., ESA SP-250, Vol. 1, p. 53, 1986.
- [6] IHW Newsletter, No. 8, 1986.
- [7] 艾伦, C. W., 物理量和天体物理量(杨建译), 上海人民出版社, 第 63 页, 1976.
- [8] McComas, D. J. et al., ESA SP-250, Vol. 1, p. 301, 1986.
- [9] Wyckoff, S., Comets (Ed. by L. L. Wilkening), University of Arizona Press, p. 3, 1982.
- [10] Hu, Zh-W., ESA SP-250, Vol. 111, p. 35, 1986.
- [11] Slavin, J. A. et al., ESA SP-250, Vol. 1, p. 81, 1986.
- [12] Riedler, W. et al., Nature, Vol. 321, p. 288, 1986.

THEORETICAL ANALYSIS OF BRIGHTNESS PROFILES FOR PLASMA TAIL OF COMET HALLEY

Hu Zhong-wei

(Astronomy Department, Nanjing University)

Yan Lin-shan

(Shanghai Observatory, Academia Sinica)

Abstract

In this paper, relative brightness profiles along plasma tail axis and several sections perpendicular to the axis for comet Halley on 4 January 1986 are analysed with the aid of Hayarchuk's theoretical diffusion model and other relevant data. By fitting observed brightness profiles with theoretical profiles, some of physical parameters for the plasma tail are estimated, such as the mean lifetime of CO^+ ions, longitudinal (along tail axis) and transverse diffusion coefficients, possible lower and upper limits of magnetic field intensity in direction of the tail axis. Finally, certain conclusions and discussions are made briefly.