第9卷 第4期 空间科学学报 Vol. 9, No. 4
1989年10月 CHINESE JOURNAL OF SPACE SCIENCE Oct., 1989

I型彗尾风差角的分析及其所显示的太阳风的传播特性

李中元 王从容
（中国科学技术大学地球和空间科学系，合肥）

摘 要

文章分析了I型彗尾风差角的大量资料，得出其变化和日心距离的关系是不大的；但对日心黄纬，却显示出逐渐减小的趋向．文章还得出，风差角的变化随着彗星的切向速度而单调上升，从而进一步证实了动力风差原理是形成风差角的主要因素．在此基础上，分析了太阳风速度场的分布特性，得出了平均太阳风速度随日心距离的变化是不明显的，而随日心黄纬有着缓慢增强的趋势．

一、概 述

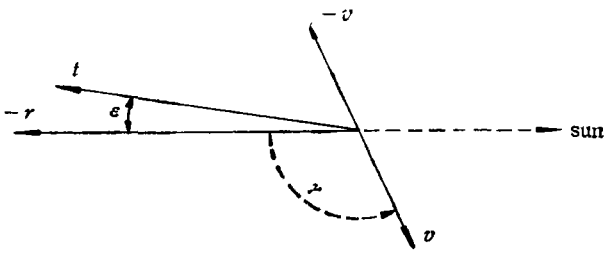
近年来，I型彗星的研究已是人们十分感兴趣的课题． 太阳风和等离子体彗星的相互作用，导致了I型彗尾的形成，对此科学家不再存在疑问．当然，具体的作用机理和耦合过程，还是众说纷纭的；问题仍然没有得到解决．所以，进一步收集其资料，分析彗星和太阳风互为因果的相互关系，将十分重要．

Belton 等人，曾编纂了彗尾取向表[1]；该表给出60颗不同彗星的1600次观测的记录．借此，能计算出彗尾的方向．去掉尘埃彗星，再去掉可疑的记录，选出可采用的42颗I型彗尾的1205次记录．另外，根据文献[2,3]对I型彗尾的统计，已确认了104颗I型彗星；同 Brian 的彗星总表[4]进行对照，其中92颗的轨道根数可完全确定．这92颗中包括 Belton 表中所选用的42颗；其余50颗，除少量彗星外，都无法精确得到彗尾方向．较少的一些彗星，例如 Bennett (1970II)、Kohoutek (1973 f)、Giacobini-Zinner(1985)、Halley (1985、1986)、Encke (1977、1980、1986)、Bradfield (1974b)、West (1976n)和 Ikea-Seki (1965 III)等十几颗彗星，它们的数十次观测记录[5-11]，可以从不同的文献资料中获得．本文对I型彗尾风差角的讨论，主要也是基于这些资料而展开的．

二、彗尾风差角的某些统计上的特征

风差角 (Aberration Angle)，即“彗尾轴线”和“彗星矢径”之间的夹角，这个夹角不是

本文于1988年9月26日收到．



r——彗星矢径方向 (The direction of vector radius from sun to comet), t——彗尾轴线方向(The axial direcion of I type tail), v——彗星轨道运动速度 (The orbital velocity of comet), ε——彗尾风差角 (The aberration angle of I type tail),γ——彗星速度方向角 (The angle from r to v)

图 1 彗星轨道平面中的矢量 r、t 和 v，及其夹角 γ 和 ε 示意图

Fig. 1 The vectors r, t and v in the plane of comet's orbit showing the angles γ and ε

很大，它是由太阳风和等离子体彗星特征决定的. 由于太阳风和 I 型彗星的相互耦合过程还不甚清楚，所以风差角的产生机制还不能说已经有了一致的看法. 有人认为可用动力学的风差原理来解释，但也有人并不完全支持这种看法[12].

56 颗 I 型彗尾的 1200 多次记录，是在不同的彗星轨道速度情况下得到的. 首先讨论风差角 ε 和彗星轨道速度 v 之间的内在联系. 设 v_ϕ 为彗星的切向速度，有

$$v_\phi = v \sin \gamma .$$

在 Belton 表中，给出了彗星的 v 和 γ 的值，通过运算即可得 v_ϕ. 对 Belton 表中没有给出的、少量已被我们采用的 I 型彗星，有的可在文献中直接找出 v 和 γ；有的找不到，则由彗星总表[4] 中的轨道根数，通过天体力学的公式，算出 v 和 γ，即可得到 v_ϕ. 然而，把所有通过计算得到的 $|v_\phi|$ 的值，划分为 8 个类别，分别是:

(1) $|v_\phi| \leqslant 10$km/s; (2) 10km/s $< |v_\phi| \leqslant 20$km/s;

(3) 20km/s $< |v_\phi| \leqslant 30$km/s; (4) 30km/s $< |v_\phi| \leqslant 40$km/s;

(5) 40km/s $< |v_\phi| \leqslant 50$km/s; (6) 50km/s $< |v_\phi| \leqslant 60$km/s;

(7) 60km/s $< |v_\phi| \leqslant 70$km/s; (8) $|v_\phi| > 70$km/s.

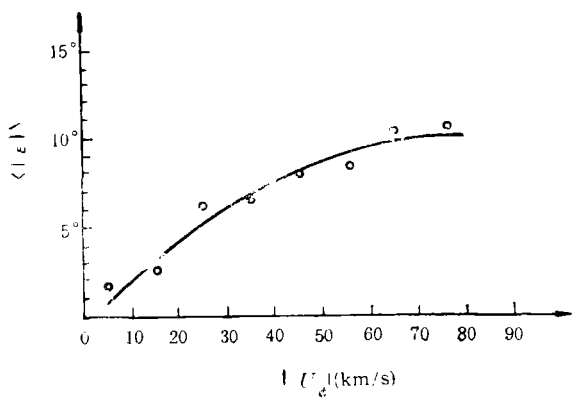


图 2 $\langle|\varepsilon|\rangle$ 和 $|v_\varphi|$ 的相关曲线

Fig. 2 A correlation curve of the $\langle|\varepsilon|\rangle$ with $|v_\varphi|$

根据资料看，大多数的 $|v_\phi|$ 值是处于(2)—(6)的范围之内；而处于(1)、(7)和(8)的 $|v_\phi|$ 值是很少的．在每一类中，都有或大或小的许多风差角 $|\varepsilon|$ 的出现；对每一类，求出其平均值 $\langle|\varepsilon|\rangle$ 和 $\tan\langle|\varepsilon|\rangle$．将所有数据，可以作出 $\langle|\varepsilon|\rangle$ 和 $|v_\phi|$ 的相关图示；图 2 中显示给我们的是一条平滑的统计曲线．

某一次 $|\varepsilon|$ 记录，是反映不出什么内在联系的．进行大量观测的系统统计以后，太阳风随时空的变化和涨落起伏，已经可以在统计过程中自动地消去．在消除了太阳风的随机涨落后，如果真是动力风差的原因，导致了 ε 的形成，那么应该近似地有

$$\tan\langle|\varepsilon|\rangle\propto|v_\phi|,\quad \tan\langle|\dot{\varepsilon}|\rangle\propto|v\sin\gamma|.$$

图 2 是一条单调的上升曲线，虽然与上述比例式不完全一致，但总的来讲还是比较接近的．所以，统计的结果告诉我们，即使太阳风和彗星之间相互作用的本质还没有解决，但动力风差应该是 ε 产生的原因；或者说，至少是诸因素中一个比较主要的因素．

另外，大量风差角的资料，是在不同彗星处于不同日距的情况下得到的．日距 r，在 Belton 的彗尾表和 Brian 的总表中都已给出．下面来讨论风差角随日距的分布特性．同样，将日距 r 分成为 8 个档次，分别是：

(1) $r\leqslant 0.4$AU；　　(2) $0.4\text{AU}<r\leqslant 0.6$AU；

(3) $0.6\text{AU}<r\leqslant 0.8$AU；　　(4) $0.8\text{AU}<r\leqslant 1.0$AU；

(5) $1.0\text{AU}<r\leqslant 1.2$AU；　　(6) $1.2\text{AU}<r\leqslant 1.4$AU；

(7) $1.4\text{AU}<r\leqslant 1.6$AU；　　(8) $r>1.6$AU．

记录到的彗尾资料中，绝大多数处于 (2)—(6) 范围内．为了消除太阳风的涨落和非定常的变化特性，对每一档次中的 $|\varepsilon|$ 取平均值，可得 $\langle|\varepsilon|\rangle$．以 $\langle|\varepsilon|\rangle$ 为纵坐标、r 为横坐标，将 8 组数据的值点出来，绘出图 3．去掉太阳风的涨落起伏后，图 3 所给出的，是一种随机分布的特征；亦即 $\langle|\varepsilon|\rangle$ 和 r 之间，似乎是没有多大的关系．看图 3，可用一条平行于横坐标的直线 S_1，来近似表示其相关曲线．当然，更精确些，可用向下略有微小倾斜的虚线 S_2 来表示，似乎 S_2 更恰当些．但是，S_1 和 S_2 相差无几，S_2 也并不能说明 $\langle|\varepsilon|\rangle$ 和 r 之间有什么密切关系．

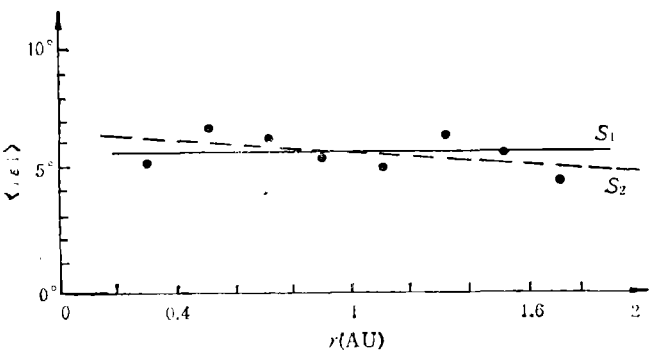


图 3　平均风差角 $\langle|\varepsilon|\rangle$ 和日距 r 的关系图

Fig. 3　A diagram on the aberration angles with heliocentre distance

三、风差角所反映出的太阳风特性

根据前面的统计分析，以及文献 [13,17] 所持的观点，动力风差原理是 ε 形成的主要原因之一．如果是如此，那么近似应该有

$$\tan\varepsilon \propto 1/u,$$

这里 u 为太阳风的速度．近二十年里，对一些彗星的记录，有的可以同时采集到太阳风的速度值，有的还可以利用国际空间科学资料中心的太阳风数据进行核实[18]．彗星 Bennett (1970 II)、Kohoutek (1973f)、G-Z (1985)、Halley (1985、1986) 等 22 次信得过的太阳风速度值已被同时记录下来．应用公式

$$\tan\varepsilon \cong A/u,$$

可求出比例系数 A．上式实际上是 22 个公式，用最小二乘法进行求解，可得到 $A = 39.15$km/sec．在动力风差为主要因素的前提下，可以作出 u-$|\varepsilon|$ 的相关曲线图；在图 4 中，显示出了一条单调下降的平滑曲线．

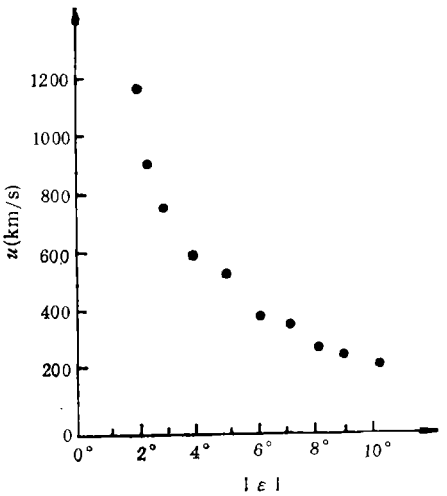


图 4 太阳风速度 u 和风差角 ε 的关系曲线

Fig. 4 A correlation curve on the average velocity of solar wind with the aberration angles.

我们的彗尾取向资料，主要是在日距 $r = 0.4$—2AU 之间得到的．根据本文第二节的统计，可以得到风差角的总平均值 $\langle|\varepsilon|\rangle_0$，其值为 $\langle|\varepsilon|\rangle_0 = 5.^\circ65$．应用数据 $A = 39.5$km/s $\langle|\varepsilon|\rangle_0 = 5.^\circ65$ 和公式 $\tan\varepsilon \cong A/u$，即可得到太阳风的总平均值

$$\langle u\rangle = 395.73\text{km/s}.$$

这里的 $\langle u\rangle$，是消去了随时空的随机变化因素的，是对时空变化进行平均化以后的一个常数值；显然，这个值应该是观测上出现的最大几率值．

由图 3 看出，$\langle|\varepsilon|\rangle$ 不随日距 r 而改变；由图 4，显示了太阳风速度和风差角的反比关系．设在日距 r_1 处，平均太阳风速为 $\bar{u}_1$；在 r_2 处，平均太阳风速为 $\bar{u}_2$……在 r_n 处，平均太阳风速为 $\bar{u}_n$．由于图 3 和图 4 是同时都成立的，又是自洽的；为了不与上述结果相矛盾，必然得出：

$$\bar{u}_1 \doteq \bar{u}_2 \doteq \cdots\cdots \doteq \bar{u}_n \doteq \langle u\rangle = 395.73\text{km/s}.$$

也就是说，由前面风差角的统计结果，也同时可以得出，对各个不同档次的日距而言，“平均太阳风速度”也是几乎不随着日距 r 的改变而改变．在 0.4AU—2AU，平均太阳风几乎是一个常数值；该结果和 Parker 的太阳风日冕膨胀理论结果，有某些出入；但是，这个结果和观测的矛盾不大．事实上，Parker 的理论，在 60×10^6km ($\cong$ 0.4AU) 以后，u 随 r 的增长很缓慢，曲线已变得十分平坦．

下面讨论 ε 和 u 随日心黄纬 b 的分布特性．在 Belton 的表中[1]，给出了彗星观测时

刻的日心直角坐标 (X, Y, Z) 和日面经纬度 $(L_\odot, b_\odot)$. 太阳赤道面和黄道面的交角是 7°15′，通过简单的运算，即可得到观测时彗星的日心黄纬. 对 Belton 表中没有的、少量的、文中采用的 I 型彗星，可以根据 Brian 总表中给出的根数，通过一般天体力学的换算，即求出日心黄纬. 由于彗星的轨道倾角 i 是杂乱无章的，所以在极广阔的黄纬范围内，彗星都有观测记录. 为了消除太阳风在时间上的随机变化影响，需要进行统计平均. 将日心黄纬分成 8 个区间范围，它们分别是：

(1) $|b| \leqslant 5°$;　　(2) $5° < |b| \leqslant 15°$;

(3) $15° < |b| \leqslant 25°$;　　(4) $25° < |b| \leqslant 35°$;

(5) $35° < |b| \leqslant 45°$;　　(6) $45 < |b| \leqslant 55°$;

(7) $55° < |b| < 65°$;　　(8) $|b| \geqslant 65°$.

对每一个黄纬区间范围，求出其风差角的平均值 $\langle|\varepsilon|\rangle$，表 1 中列出了所有的结果. 图 5 显示了 $\langle|\varepsilon|\rangle$ 和 b 之间的关系. 总的看来，关系不是密切的. 如果用直线 S_3，表示其最佳的中心线，那么似乎可以这样说，风差角 ε 是随着黄纬 b 而缓慢地减小的.

表 1　日心黄纬 b 和象差角 $|\varepsilon|$、太阳风速度 u 的统计关系

类　别	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
$\|b\|$	≤5°	5°—15°	15°—25°	25°—35°	35°—45°	45°—55°	55°—65°	≥65°
$\langle\|\varepsilon\|\rangle$.	5°.08	6°.02	6°.91	7°.18	5°.01	4°.47	4°.92	5°.10
$\tan\langle\|\varepsilon\|\rangle$.	0.0839	0.1055	0.1212	0.1260	0.0877	0.0782	0.0861	0.0893
$\langle u\rangle_n$. km/s	440.40	371.24	323.05	310.78	446.59	500.80	454.80	438.67

采用动力风差理论，则根据上面的讨论，可得到每一个黄纬区间范围中的平均太阳风速度 $\langle u\rangle_n$（见表 1 所示）. 当然，这里的 $\langle u\rangle_n$ 仅仅是统计上的概念，用来粗略地看看它们在量级上的大小. 早年，Pflug 曾对太阳风和黄纬的关系，进行过一些讨论[19]；他认为，随着离开黄道面，太阳风的速度是减小的. Bertaux 等人，对彗星 Bennett (1969 i) 中的、大范围的、中性氢晕云的观测，指出了更大的太阳风通量是在高纬地区，在高纬的值将要增强 30% 左右[20,21]. 基于行星际射电闪烁的观测，似乎也认为如此[22]. 将我们的结果绘

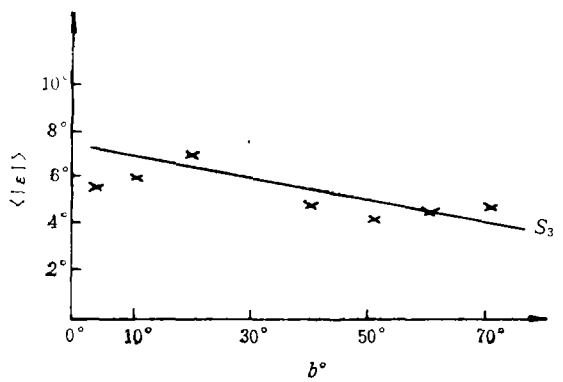


图 5　风差角 $\langle|\varepsilon|\rangle$ 随黄纬 b 的变化

Fig. 5　The aberration angles change with the solar latitude.

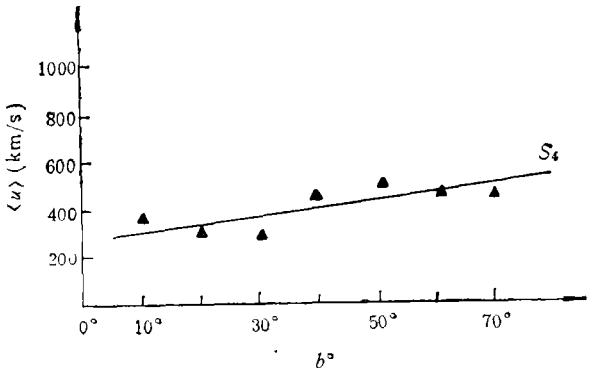


图 6 平均太阳风速度⟨u⟩随黄纬 b 的分布

Fig. 6 A distribution on the average velocity of solar wind with the solar latitude.

于图 6，似乎看不出平均太阳风对黄纬有很强的依赖性. 看不出 $\langle u\rangle_n$ 随 b 减小的特性；$\langle u\rangle_n$ 随 b 增长的现象，也不突出. 图 6 中，直线 S_4 是最佳中心位置，用 S_4 来表示 $\langle u\rangle_n$ 和 b 的相关曲线；那么，显示出的趋势是"平均太阳风的速度"随着"黄纬"的增高而有一个缓慢的增长.

四、结 束 语

通过本文的讨论和分析，可以在此作一个简单的小结：

(1) "等离子体 I 型彗尾风差角"是随着"彗星切向速度"的增加而单调上升；从而更进一步证实了动力风差原理是产生风差角的一个主要因素.

(2) "风差角"对"日心距离"的依赖性是不明显的.

(3) "平均太阳风速度"随着"日心距离"的变化是弱的；在 0.4AU—2AU 之间，平均太阳风以 $\langle u\rangle = 395.73$km/s 传播.

(4) "风差角"随"黄纬"的增高而缓慢地减小，"太阳风速度"随"黄纬"的增高而缓慢地增强；但看不出两者有强相关.

本文的资料，部分来自上海天文台，大部分是取自西德 Remeis 天文台和马普空间所；作者在此表示感谢. 另外，对 J. Rahe 教授、H. Drechsel 博士和 H. Böhnhardt 博士对本工作的支持和帮忙，也一并在此表示深切的谢意.

参 考 文 献

[1] Belton, M. S. and J. C. Brandt, *Ap. J., Suppl.*, Vol. 13, p. 125, 1966.
[2] 李中元和顾顺勇，空间科学学报，第 3 卷，第 59 页，1983.
[3] Li Zhongyuan, Proc. of 20th ESLAB Symposium, ESA Pub. Division, ESTEC, Noordwijh, p. 161, 1986.
[4] Brian, G. M., Cataloque of Cometary Orbit, Third Edition, p. 10, 1979.
[5] Jockers, K. and R. L. Lust, *Astron. Astrphys.*, Vol. 26, p. 113, 1973.
[6] Huppler, D. et al., *Ap. J.*, Vol. 202, p. 276, 1975.
[7] Reinhard, R. et al., *Exploration of Halley's Comet*, ESTEC, Vol. 1, p. 47, p. 53, p. 145, 1986.
[8] Greenstadt, E. W., TRW Tech. Rept., No. 20513-6006-RO-00, 1972.

[9] Crump, P. C. et al., *Icarus*, Vol. **23**, p. 611, 1974.
[10] Wehinger, P. and S. Wychoff, *Ap. J.*, **Vol. 190**, L43, Vol. **193**, L41, 1974.
[11] Mendis, D. A. and L. F. Harry, *Rev. Geophys. Space Sci.*, Vol. **20**, p. 885, 1982.
[12] Mendis, D. A. et al., *Space Sci. Rev.*, Vol. **20**, p. 141, 1976.
[13] Brandt, J. C., Comets (Ed. by L. L. Wilkening), Univ. of Arizona Press, p. 519, 1982.
[14] Brandt, J. C. and E. D. Rathe, The Study of Comet, NASA Sp-393, Part 2, p. 878, 1976.
[15] 李中元，地球动力学进展，海洋出版社，北京，p. 56, 1988.
[16] Jockers, K., *Astron. Astrophys., Suppl. Ser.*, Vol. **62**, p. 791, 1985.
[17] Niedner, M. B. et al., *Ap. J.*, Vol. **234**, p. 723, 1979.
[18] King, J. H., Interplanetary Medium Data Book, NSSDC/WDC-A-R-&S, 77-04a, 1977.
[19] Pflug, K., Proc. of 13th Liege International Astrophysical Symposium, Liege, p. 363, 1966.
[20] Bertaux, J. L., J. E. Blamont and M. Festau, *Tsiron. Astrophys.*, Vol. **25**, p. 415, 1973.
[21] Blamont, J. E., Proc. of the 3rd Solar Wind Conference, Asilomar, California, p. 321, 1974.
[22] Coles, W. A. and S. Maagoe, *J. Geophys. Res.*, Vol. **77**, p. 5622, 1972.

A STATISTICAL ANALYSIS ON THE ABERRATION ANGLES OF I TYPE COMETS AS WELL AS THE FEATURES OF SOLAR WIND PRESENTED BY THE ANALYSIS

Li Zhong-yuan　Wang Cong-rong

(Dept. of Earth and Space Science, University of Science and Technology of China, Hefei)

Abstract

In this paper, it is shown that the aberration angles of I type cometary tails do not have a clear change with the heliocentric distance, but they have a slow change with the solar latitude. It is also shown that the change of aberration angles with the tangential velocity of comets can be expressed by a monotonic, ascendant, relevant curve. Thus, it is further tested and verified that the dynamical aberration mechanism is a main reason for the formation of aberration angles.

In addition, a further analysis by which the features of the velocity field of solar winds are discussed is presented. It is pointed out that the correlation of the average velocity of the solar wind with the heliocentric distance is weak, but the average velocity correlates to the solar latitude. A trend which shows that the average velocity of solar winds strengthens slowly with the solar latitude is given in the paper.