

彗星的

物理结构

· 刘麟仲 ·

彗星那千姿百态的变化，自古以来就引起人们极大的兴趣。一个发育充分的彗星，有着完整的头和尾。彗头中央明亮部分称为彗星的亮度核，核的中央有一个半径几公里到十几公里的固体核，它是彗星真正的物理核心。亮度核外面绒毛状的模糊亮团称为彗发。彗核和彗发合起来构成彗头，彗头大体上呈圆形。空间探测发现彗发外面还有氢云。在彗头背向太阳的一侧伸展着长长的彗尾。彗尾常常有两支，长而直且窄的一支是离子彗尾。短而弯且粗的是尘埃彗尾。肉眼可看到的彗星，其彗发半径大至几万公里。尘埃彗尾长几百万公里到上千万公里。而离子彗尾长达几千万公里至上亿公里。

1986年哈雷彗星回归，苏联、欧洲空间局、美国和日本分别发射了6个空间探测器进行了实地考察，开辟了人类研究彗星的新纪元。可以说，20世纪80年代和90年代是彗星物理研究的黄金时代。这不仅丰富了人们对太阳系的认识，也必将促进物理学的发展。

尘埃彗尾

当彗星走近太阳时，由于阳光的加热，彗核表面升华出大量气体分子；尘埃和冰粒也跟着飞出，离开彗星，构成了尘埃彗尾。

以硅酸盐微粒为主的尘埃和冰粒在离开彗核后，受太阳辐射压力（即光压）和引力两种力的作用而运动。前者径向离太阳，后者向太阳，其合力仍为有心力。彗核本身太小，对粒子引力作用可略去不计。假定辐射压力与太阳引力之比为 $1-\mu$ ，系数 μ 在研究彗星尘埃尾结构时很重要。此时，粒子的运动方程为

$$\frac{d^2r}{dt^2} + \mu \frac{GM_{\odot}}{r^3} r = 0$$

如果辐射压力为0，则 $\mu = 1$ ，我们得到只有太阳引力作用下单个质点的运动，彗核就沿这样的轨道运动。如果辐射压力与引力正好相抵消 ($\mu = 0$)，质点将做直线运动。不同大小的尘粒其 μ 值不同，就有不同的运动；不同时刻释放出来的尘粒也有着不同的轨迹。许

许多不同时刻释放出来的不同大小的尘粒构成了短而宽且弯的尘埃彗尾(图1)。一般说来， μ 值越大，尘

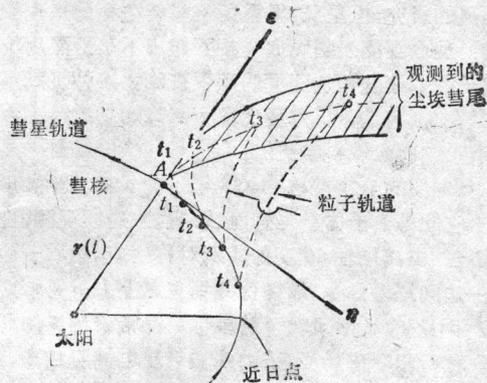


图1 粒子的轨迹和尘埃彗尾的形成

粒越大，它们分布在弯离日—彗联线最大处。III型尾（弯得最大的一种彗尾） μ 值在 0.9 至 0.7 之间，II型尾（弯得少些） μ 值在 0.5 至 1.2 之间（图2）。1968年，芬森和普罗布斯坦两人找到了一种尘埃彗尾的动

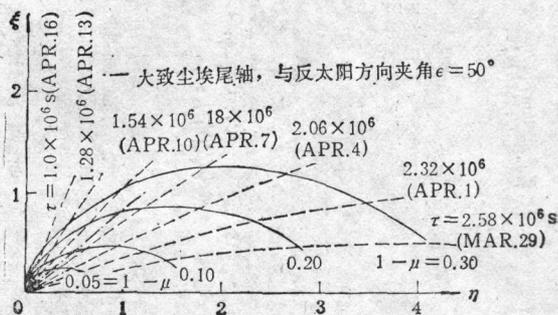


图2 1957年4月27日阿仑德-罗兰彗星(1957 III)的等势线(实线)和等时线(虚线)，垂直轴在反太阳方向；彗核位于坐标原点，垂直、水平轴的距离单位均为 10^7 公里力学模型，可以由观测到的亮度分布确定其尘粒大小、密度分布、释放率和速度。他们的理论是现今研究尘

等离子体慧尾

等离子体慧尾又称离子慧尾或 I 型慧尾(不弯曲, 靠近日-慧连线)。它主要由一氧化碳、二氧化碳、水、氮等离子构成。观测表明, 这些离子以巨大的速度和加速度沿着很接近于反太阳方向离开慧星, 速度超过每秒 100 公里, 加速度往往超过太阳引力加速度的数十倍乃至上百倍。这么巨大的加速度无法用光压来解释。1951 年, 贝尔曼首先提出了太阳风这一新概念。他认为, 是太阳风使慧星等离子体尾中的离子获得如此巨大的速度和加速度。太阳风乃太阳日冕中吹出的高速质子和电子流。它们通过库仑相互作用把慧星中离子和电子带跑。贝尔曼的这一新思想开始了人们对太阳风的研究, 恒星风、星系风这些新概念后来也相继问世。现今观测表明, 库仑相互作用不是慧星离子尾中离子巨大速度和加速度的产生机制, 这种机制至今尚未解决。可是, 贝尔曼发现太阳风的功绩并不因此而逊色, 它将永载科学史册。

从题图的哈雷慧星(1986 年 1 月 9 日)照片可以看出, 它的等离子体慧尾有射线结构。连续观测得出, 射线往往由离尾轴 60 度处成双对称生成, 然后一边伸长, 一边向尾轴靠拢, 最终合并到主尾上去。阿尔文于 1957 年认为, 太阳风吹至慧星时, 携带着约 5 伽马的磁场(称行星际磁场)。磁力线被慧星电离层扫荡, 挂到慧星电离层上, 形成了所谓“折伞效应”。慧星离子沿这些磁力线运行, 形成我们看到的射线构造。少数慧星有断尾现象。现在认为, 慧星通过行星际磁场的扇形边界(图 3)时, 会发生断尾现象。看来, 这一问题还需作持久的深入研究。

由于太阳风的变化, 及其与慧星等离子体相互作用时, 后者所表现出的不稳定性, 我们会在离子慧尾中看到许多怪现象。例如, 慧尾弯曲、尾方向突然改变、慧尾中的团块、凝聚、扭曲、螺旋波、天鹅状云等等。

对这些问题的研究才刚起步。它涉及极稀薄情况下等离子体性质和各种不稳定性的出现, 问题很复杂。

由慧核升华出来的气体和尘埃在它们离开慧核时构成了慧星的大气层。这些尘粒、分子、原子、基和离子散射太阳光或发荧光而发亮, 形成慧星亮度核和慧发。观测表明, 它们大约以每秒 1 公里的速度离开慧核向外膨胀。太阳光的光致离解, 太阳风粒子与慧星中性大气组分的电荷交换等原因, 使慧星大气电离, 形成慧星的电离层。慧星离子又与磁场相互影响, 构成了慧头中复杂的结构。

1967 年, 贝尔曼等人首先得到了一种理论结构模型(图 4), 认为: 由于太阳风与慧星相互作用改变了慧星离子和太阳风质子和电子的运动, 从而在慧头中形成了复杂结构。太阳风除把慧星离子吹向慧尾外, 还在慧头上形成弓形激波、接触间断面和内弓形激波等结构。

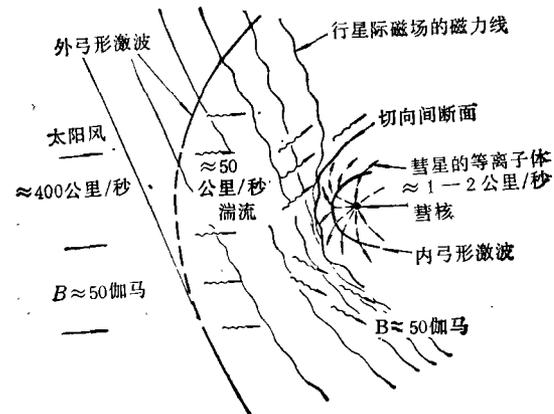


图 4 太阳风和慧星相互作用示意图

外弓形激波是由于高速太阳风受慧星大气层阻碍突然减速而形成的。1984 年, 门迪斯等人发展了贝尔曼的工作, 他认为: 对哈雷型慧星(中等亮度水冰为主的慧星)来说, 当日慧距大于 5 天文单位时, 太阳风不受阻碍地吹到慧核表面。当日慧距进一步减小时, 慧星大气层形成, 在其附近行星际磁场增大, 太阳风减慢。日慧距等于 3.14 天文单位时, 外弓形激波形成。而当慧星更靠近太阳时, 外弓形激波离慧核距离也随之而增大, 离太阳约 1 天文单位时, 外弓形激波离慧核约 10⁶ 公里, 太阳风过弓形激波时风速由每秒 40 公里一下突减为每秒 50 公里, 行星际磁场由 5 伽马增大至 50 伽马。

接触间断面, 即慧星的电离层顶。它把向内流的太阳风和向外流的慧星离子分隔开。太阳风在它外面拐弯, 向太阳方向流的慧星离子在它里面也拐弯向慧尾跑。计算表明, 对哈雷型慧星, 当日慧距约 2.65 天文单位时, 切向间断面开始形成。从此, 太阳风再也吹不到慧核表面上。当日慧距到达 1 天文单位时, 切向

行星际磁场的扇形结构图

图 3 行星际磁场的扇形结构图

间断面离彗核约 10 万公里。

1986 年哈雷彗星回归时，探测器观测证实了外弓形激波和切向间断面的存在。至于贝尔曼所预言的内弓形激波，尚未得到证实。此外，探测器还发现接触间断面之内的磁瓶中有一个磁腔，那儿磁场为 0，磁腔边离彗核 4000 多公里。有人则认为磁腔是由于彗星中性气体分子向外跑时，与受磁场约束外流速度很低的离子碰撞而形成的。

彗核

没有直接的方法可了解彗核的内部结构，只能从观测特征去推出有关核结构的一些可能特性。根据核分裂的特征意味着它是易碎的，杨于 1904 年首先提出了“沙堆模型”，认为彗核是由无数不知其大小的固体碎块构成，它们彼此分得很开，每个碎块有一含大量碳氢化合物的气体包层。各碎块几乎沿着同样的轨道绕太阳运行，它们集结成彗核。美国的惠普尔分析了“沙堆模型”所碰到的困难，特别是掠日彗星为何不瓦解而和从前差不多等问题，于 1950 年提出了彗核构造的“脏雪球模型”。他认为彗核是一个冰和尘埃冻结在一起的整块，好像一个脏雪球或冰尘胶合体。

探测器对哈雷彗星的探测结果表明，惠普尔的彗核模型是正确的。哈雷彗核表面不是过去所认为的 -100°C 以下的严寒，而是 30°C 以上的高温。彗核表面被 1 厘米左右的、比煤还黑的尘埃层覆盖着，它大量吸收阳光，只反射掉 4%，所以才有那样的高温。然而，它又起绝热作用，不让表面高温传至彗核内部。在哈雷彗核表面，只有约 20% 是活动区，那儿向外喷出大量气体和尘埃(图 5)。

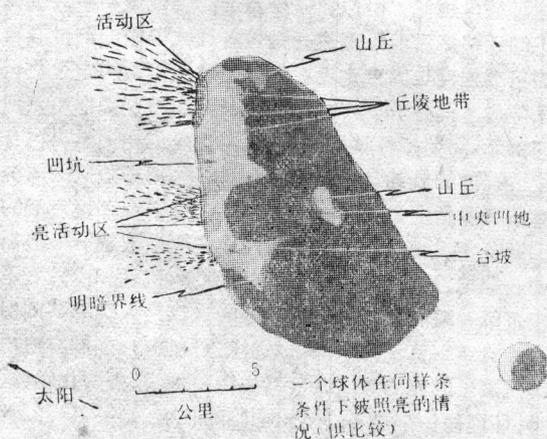


图 5 哈雷彗核示意

彗星的起源与演化

苏联发射的“韦加”探测器飞越哈雷彗星时，测得

当时哈雷彗核每秒钟释放出 1.3×10^{30} 个分子，其中主要是水分子。这就是说，它每秒钟要失去 40 吨冰，还要失掉 7 吨多尘埃。彗核大小为 $15 \times 8 \times 8$ 立方公里，质量约 1000 亿吨，似乎不用多久就会损耗光。实质上，彗星只在它接近太阳时，才放出大量的气体和尘埃。彗星的一生大部分时间在远离太阳的地方缓缓运行，只有很短的时间在太阳附近快走，这时它才损失大量物质。经估算，哈雷彗星每绕太阳一周(约 76 年)，就要损失 2 亿吨物质，它再运行几十周就将瓦解。

现在认为，彗星不停地在瓦解，它最终瓦解为流星群。例如，19 世纪 40 年代以前人们看到的比拉彗星，1846 年 1 月，它分裂为 2 颗彗星。1852 年看到它之后，人们再也未见过它。1872 年，地球穿过它的轨道时，看到一阵灿烂的流星雨。有人估计，流星总数在 15 万颗左右。看来，比拉彗星已经瓦解掉了。

我们看到的彗星来自何方？现在认为，在太阳系的边缘，离太阳几万天文单位的地方，有一个巨大的彗星库，我们把它叫做奥尔特云。1950 年，天文学家奥尔特对长周期彗星的轨道进行统计研究，发现它们大多来自太阳系边缘，从而确认那儿是一个巨大的彗星仓库。统计分析表明，那儿大约有 1 万亿颗彗星。在这众多的彗星中，少数彗星受恒星或其它力量的扰动，改变原有轨道，有的走出太阳系，有的走到太阳系内部地区，成为我们观测到的彗星。这些来自远方的彗星，当它们走到某大行星附近，行星的摄动力或把它们变成短周期彗星，或把它们再推出太阳系。

奥尔特云中的彗星如何形成，有人认为它们来自太阳系内：在太阳系形成时，部分行星未吸积到的星子，受某种力作用推到太阳系的边缘。也有人认为，它们来自太阳系外，来自恒星际空间：恒星际空间中的气体和尘埃云，由于引力不稳定性瓦解为许多小气体尘埃团，再凝结为小晶粒，这些小晶粒聚合成彗星(实为彗核)。太阳在银河系中运行，把这些彗核吸引到太阳系的边缘上。看来彗星起源之谜，是个尚未解决和有待深入探讨的问题。

简讯·吉大物理系向优秀生赠阅

《现代物理知识》

【本刊讯】吉林大学物理系，在系副主任周介文提议下，最近作出决定，为全系 31 名优秀生每人订阅一套《现代物理知识》杂志，以表彰他们在学习中的成绩。

(尧水)