

哈雷彗星与彗星研究

胡中为

阎林山

(南京大学天文系) (中国科学院上海天文台)

提 要

彗星是太阳系的一种奇特天体。在太阳辐射和太阳风作用下,彗星发生一系列物理过程和化学过程,表现为外貌形态(彗发、彗尾)、亮度、光谱及运动特性等多种变化。彗星研究是天文学和空间科学的重要课题,对于了解太阳系起源、有机分子乃至生命起源、太阳风及等离子体过程都有重要意义。

著名的哈雷彗星将在1985—86年再次回归到内太阳系。它有多种彗星现象,从地面到近地空间及空间会合的各种观测及样品分析,预料会取得彗星研究的新进展。本文先概述国际哈雷彗星联测(IHW)的计划;然后,评述彗星研究的一些进展,包括:(1)彗星的化学组成和化学过程;(2)尘埃彗尾和颗粒;(3)等离子体彗尾;(4)彗发;(5)彗星的亮度、爆发和分裂;(6)彗核的蒸发、寿命及非引力效应;(7)彗核,其中也包括我国的彗星研究情况。

一、引 言

彗星是太阳系的一种奇特成员,它们在绕太阳公转运动中发生一系列复杂的物理过程和化学过程,表现为形态、亮度、光谱及运动特性等多种变化。彗星现象能引起科学家的极大兴趣,是因为有重要的科学研究意义。

彗星研究能够提供太阳系形成条件和过程的重要线索。彗星富含挥发物质,一般认为彗星代表太阳系的原始物质。彗星质量不大,又长期运行在外太阳系,较好地保留其形成时期的状况,而这种原始状况的信息对于认识太阳系起源是十分关键的^[1,2,3,29]。彗星撞击地球和行星,带来挥发物质,对于地球和行星大气的形成、演化及地质过程有显著作用^[4]。有一类看法认为,彗星带给地球第一批有机分子,在地球的适宜条件下,演化出生命^[5]。

彗星的各种现象都与太阳辐射和太阳风等因素紧密联系,而且呈现奇特的变化。太阳活动与彗星现象和相互关系涉及许多重要科学问题。太阳风就是最先由彗星现象(等离子体彗尾)推测而知的。彗星可以作为等离子体物理学以及许多有关太阳作用过程的空间实验室,例如从等离子体彗尾现象推求太阳风和行星际磁场情况,特别是大轨道倾角彗星和掠日彗星的资料尤为重要;从彗星的 L_{α} 亮度推求太阳 L_{α} 辐射流量。此外,彗星研究也为了解星际分子及化学过程提供线索^[1,2,6]。

当彗星离太阳较远时, 呈朦胧状雾斑是“彗发”。随彗星移近太阳, 彗发更发育, 并在背太阳方向延伸为很长的“彗尾”。彗星物质不断散失到行星际空间, 成为“行星际介质”及“行星际尘”。它们散射和反射太阳辐射而表现为“黄道光”, 它们有些高速闯入地球大气, 因摩擦而发光, 呈现为“流星”现象。

彗星质量的绝大部分集中在不大的彗核中。迄今尚缺乏彗核的直接观测资料。从彗发、彗尾及行星际尘等研究推测, 彗核是由冰和尘组成的“脏雪球”。在彗星走近太阳过程中, 太阳辐射使彗核表面活化, 冰物质蒸发并带出尘粒及冰粒, 形成彗发。典型情况是在彗星的日心距大于4个天文单位(AU)就出现彗发, 到1.5~2.0AU时彗发最大, 大于或小于这个日心距时彗发都小; 在日心距大于2.5AU时, 比水冰更易挥发的物质(如CO₂冰)就活化和蒸发; 到2AU时, 水冰开始升华。同时, 彗星不仅因散射和反射太阳辐射以及本身的热辐射而呈现连续光谱, 而且受太阳辐射和太阳风作用而发生一系列化学过程和物理过程, 出现分子、原子及离子的光谱发射带和发射线, 在3AU至2.5AU时开始出现CN分子发射带; 在2AU左右时, 开始出现C₃、NH₂分子发射带; 到1.8AU以内, 出现C₂分子发射带; 到0.7AU以内, 出现Na及其它原子的谱线。太阳风及其磁场作用于彗星的气体离子, 形成沿背太阳方向延伸且较直的等离子体彗尾(又称为I型彗尾)。它呈现很多精细的结构: 细束状的射线(tailrays)或流(Streamers), 移动的纽(kink)和结(knot), 有时还出现“断尾事件”(disconnection events)。另一方面, 太阳辐射压力推斥彗星尘粒, 形成弯曲的尘埃彗尾。尘埃彗尾又按弯曲程度分为II型和III型彗尾。它们都向彗星运动反方向弯曲, 比较缺乏精细结构, 其长度也比等离子体彗星尾短, 有时还看到指向太阳方向由大尘粒组成的“逆彗尾”。此外太阳风与彗发气体相互作用还形成类似于地球磁层的激波面^[5,16]等。彗星的结构特征示于图1。

迄今已知的彗星约1000颗, 1979年版彗星轨道表^[8]列出1027颗彗星出现的轨道根数。有些是同一颗彗星的多次回归, 实际上只是658颗彗星, 其中大约113颗彗星是自转周期小于200年的短周期彗星。各彗星的情况有相当大的差异, 有的只有一种彗尾, 有的无尾而只有彗发; 甚至同一颗彗星也出

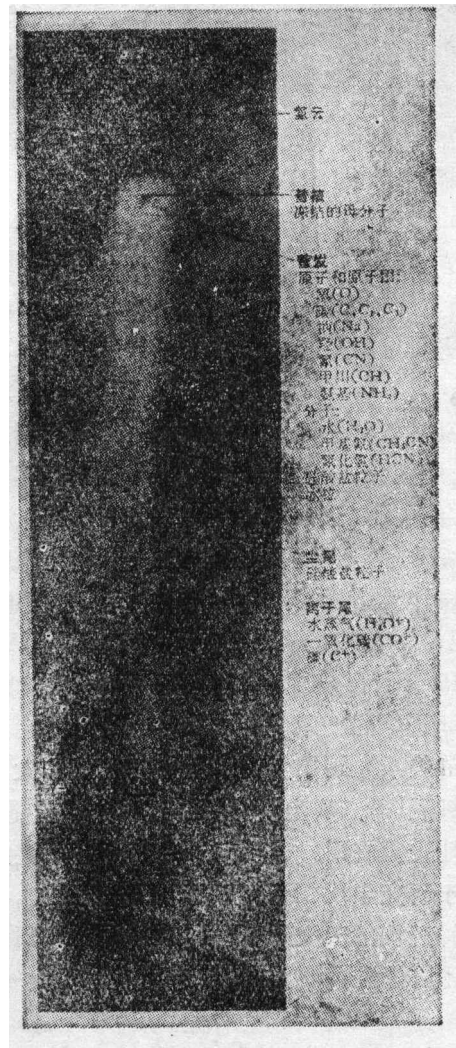


图1 彗星结构

现不规则的变化,如发生彗核分裂和爆发,出现“喷流”(jet)和“包层”^[5,7,16]。

著名的周期彗星——哈雷彗星将在1985—1986年回归到内太阳系。它是颗较年青的彗星,有多种彗星现象。过去哈雷彗星多次回归已取得不少宝贵资料,尤其是照相术发明后1910年回归时的大规模观测^[19]。人们对这次回归寄予更大期望。早在1979年夏就开始筹办国际哈雷彗星联测(IHW),以求通过系统的联合观测在彗星研究上取得某些突破。IHW将进行地面、近地空间及太空飞行器交会等多种观测。观测波段包括从紫外、可见光、红外、射电的全波段以及样品分析。这个庞大计划从1982年10月16日帕洛玛山5.1米望远镜最先再发现远离太阳约11AU的哈雷彗星(1982i)而揭开序幕。IHW计划^[9,10,11]将在下节概述。

二、国际哈雷彗星联测计划

经第18届国际天文学联合会大会(1982年)批准^[10],IHW为哈雷彗星观测的国际机构。IHW的目的是:①“倡导”,IHW鼓励和支持研究哈雷彗星的任何科学方面;②“协调”,为了使全部观测有最大的科学价值,IHW协调地面之间及与空间的观测;③“标准化”,确保观测技术和仪器尽可能标准化;④“归档”,汇总和交流观测资料,1989年在“哈雷彗星档案”中发表所有归算的资料。IHW有两个中心:一个设在美国帕萨迪纳的喷气推进实验室(JPL),由R. L. Newburn领导;另一设在西德班贝格的Remeis天文台,由于J. Rahe领导。IHW计划分以下七个方面。

1. 天体测量,负责人D. K. Yeomans (JPL)和R. M. West (ESO)

主要目的是获取哈雷彗星的准确天体测量数据,以计算精密轨道和星历表,供有关方面使用。1981年Yeomans^[11]编著《哈雷彗星观测指南》(“天文进展”,2卷,3期,1981年)在1982年10月哈雷彗星再发现之后,又根据最新观测修订为第二版,给出“哈雷”位置、日心距、地心距、速度、星等、位相角等数据。美国海军天文台R. S. Harrington正在编制哈雷彗星1984—1986年间所经天区的专用星表,以供底片归算之用。E. Bowell作“哈雷”掩星及掩射电源的预报。R. M. West在研究红敏底片作晨昏时的天体测量。此外,Harrington在探讨空间望远镜作天体测量,Yeomans在改进非引力效应的数学模型等。

2. 红外光谱学和辐射测量,负责人R. Knacke和T. Encrenaz

IHW红外观测网将进行1—500微米波段的光度和光谱测量。地面观测包括Johnson的JHKLMNQ光度系统;测量选择的红外色度(例如测量强度比率 $I_{4.3\mu}/I_{3.5\mu}$ 和 $I_{4.3\mu}/I_{3.5\mu}$ 跟日心距的关系)可用于得到质点的组成和大小分布的资料。近年在彗星模型及对参数解释方面已有进展^[14]。从尘埃热辐射还可定出质量损失,多色光度测量冰(3μ)和硅酸盐(10μ 和 18μ)的特征也很有用。重要问题是各仪器系统的标准化。中等分辨率($\lambda/\Delta\lambda \approx 50 \sim 100$)的红外光谱对于研究尘埃、研究原子和分子谱线、寻找新的气体成及对光谱作解释都很有用^[18],能够作这样观测的天文台不多(15—20个),而作高分辨率($\lambda/\Delta\lambda \gg 100$)红外光谱观测的天文台则更有限。远红外观测需在飞机、气球及大气外观测。希望在选定的观测日协调进行,如使观测的日心距范围加大就更有益。

3. 大尺度现象,负责人J. C. Brandt, M. B. Niedner, Jr和J. Rahe

该组的作用是: ①提供时间分辨率很高的照片, 以便研究迅速变化的等离子体彗尾现象; ②可用太阳风性质(空间测定)“定标”等离子体彗尾事件, 从而把彗星作为太阳风探测器; ③大尺度现象作为“晴雨表”, 有助于飞行器空间资料的解释。此外还结合光度测量研究彗发和彗尾形态及亮度变化, 以探讨“哈雷”的物理-化学过程。哈雷彗星有些时候存在两类(等离子体和尘埃)彗尾, 宜用大视场($\geq 5^\circ$)的照相机(如施密特望远镜)。因最强的发射带是波长4273埃的 CO^+ 发射, 宜用兰敏底片(如Kodak II_a-O型)。全世界约50个天文台已参加大尺度网, 按IHW提出的定标要求把原片或拷贝汇总处理分析。

4. 近核研究, 负责人 S. Larson, J. Rahe, Z. Sekanina.

目的是深入探讨哈雷彗核的大尺度表面形态, 热物理学性质, 自转轴取向及自转周期, 确认彗核结构上有不均匀性。过去观测发现的哈雷大气尘埃各向异性分布及喷流、壳层、包层等结构, 通过协作以期获得这些特征的逐日变化。这次联测还能结合太空观测, 综合分析获取三维的活动图象。此外, 尘埃发射可作为彗核活动的天然“探测器”, 优先考虑连续光谱波段照相, 用IAU标准滤光片作彗星发射照相, 以期解释狭缝光谱的一维分布。近核观测主要在1985年底至1986年中进行。

5. 光度测量和偏振测量, 负责人 M. F. A'Hearn 和 V. Vanysek

联测目的是: ①用标准窄带滤光器确定气体和尘埃丰度随日心距的变化, 以建立彗发的化学模型; ②用同样的滤光器在哈雷彗星增亮时连续测光, 用于阐明彗星因自转或爆发而产生的短期变化; ③用连续光谱波段滤光器进行偏振联测, 并与实验对比, 可“诊断”尘粒大小和吸收系数; ④当“哈雷”掩食恒星时测量光变曲线, 以期获得彗发光学深度的直接测量; ⑤结合其它观测, 可得彗星的物理学和化学的大量信息。

6. 射电科学, 负责人 W. M. Irvine, F. P. Schloerb, E. Gerard

亮彗星射电观测具有很大潜力。彗发分子的谱线观测可提供彗核组成的信息。厘米波和毫米波连续射电观测, 结合可见光及红外观测, 以了解尘粒性质及等离子过程。雷达可能测彗核大小及彗核表面的性质, 但很困难。已观测到10余颗彗星的OH射电谱线, 预料从哈雷彗星的OH射电观察可能得到OH产率、动力学及空间分布; 也有可能去观测CH和CN分子射电辐射, 并与光学情况比较, 观测其它分子(H_2O , CO , NH_3 , HCN 等)以及连续射电辐射。

7. 光谱学和分光光度测量, 负责人 S. Wyckoff, P. A. Wehinger 和 M. Festou

观测的目的是: ①尽可能进行日心距范围很大的观测, 可了解彗核表层, 彗核分裂和挥发性物质等; ②证认新的化学成分; ③测定各种成分的产率和柱密度; ④尽量多地测定化学成分; ⑤用长狭缝光谱技术测定各种分子、原子和离子的标高; ⑦用高分辨光谱得到膨胀彗发和等离子体彗尾的速度场, 以期确定哈雷彗星的化学组成、演化历史、彗星和太阳辐射及太阳风相互作用的性质。

此外, 大量素有训练的爱好者作为专业观测的补充而参加联测。这次哈雷观测将是空前的, 尤其是包括空间的联测, 将谱写出彗星研究的新篇章, 对彗星本质的认识必将有所突破。

三、彗星研究进展

彗星研究内容甚为广泛，论著繁多，这里仅概要评述几个问题。

1. 彗星的化学组成与化学过程

自 G. B. Donati 第一次对 Tempel 彗星(1864 II) 作目视光谱观测以来，光谱成为研究彗星化学组成及其它性质的有效方法。P. Swings 等对彗星光谱研究作出了重要贡献，编纂了《彗星光谱集》^[12]。1970 年轨道天文台 2 号(OAO-2)第一次记录到 Tago-Sato-Kosaka (1969 IX) 的远紫外光谱，发现了 L_{α} 发射的巨大氢(原子)云。以后又对 Bennett(1970II), Encke, Kohoutek (1973XII), West (1976VI), Seargent (1978XV), Bradfield (1979X) 等彗星进行紫外光谱观测，除原子氢(H)外，还发现 O、C、S、CO、C₂、CS、OH、CO⁺、CO₂⁺ 的紫外发射。同时，射电观测不仅证实了已知成分的某些射电谱线，而且还发现了新的分子，例如发现 Kohoutek 彗星的有机分子 HCN, CH₃CN；在红外探测到 10 和 18 微米的硅酸盐特征。近年射电和红外技术又有很大提高，有潜力去证实和发现新的光谱特征或新分子。此外，从跟彗星有关的行星际尘以及流星光谱研究，也可得到一些化学组成的线索。迄今已观测到的彗星化学成列分子于表 2，其中金属光谱仅在“掠日彗星”中观测到^[4,6,7]。

表 2 彗星光谱中已观测到的化学成分

有机成分:	C C ₂ C ₃ CH CN CO CS HCN CH ₃ CN
无机成分:	H NH NH ₂ O OH H ₂ O S
金属:	Na K Ca V Mn Fe Co Ni Cu
离子:	C ⁺ CO ⁺ CO ₂ ⁺ CH ⁺ H ₂ O ⁺ OH ⁺ Ca ⁺ N ₂ ⁺ CN ⁺
尘埃:	硅酸盐

彗星中各种化学成分的定量分析涉及许多观测资料、实验资料及理论方面的因素复杂，尚缺乏很好的结果。Kohoutek 彗星的 H/O=1.5±0.7, C/O=0.23±0.1, West 彗星的 C/O=0.28^[4]。重要的基本参数——尘埃/气体比率也仅只是少数彗星作了测算，如 Arend-Roland

表 3 “新”彗星元素丰度的“探索”模型(归化到 Si=10⁵)

元 素	宇宙丰度**	彗 星 丰 度*			
		尘 埃	气 体	总 计	占宇宙丰度%
H	26,600,000	2,000	21,000	26,000	0.1
C	11,700	700	4,200	4,900	42
N	2,130	50	1,100	1,150	50
O	18,400	5,000	13,400	18,400	100
S	500	350	150	500	100
Mg	1,060	1,060	—	1,060	100
Si	1,000	1,000	—	1,000	100
Fe	900	900	—	900	100
Ni+Cr	60	60	—	60	100

* 尘埃/气体的质量比为0.70 ** 取自 Cameron (1980)

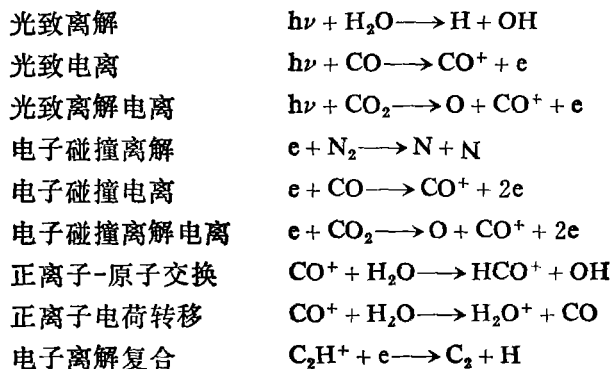
Bennett, Seki-Lines 等。而且尘埃/气体比率往往伴随爆发而变化^[4,7]。有些证据(掠日彗星的金属丰度、行星际尘的样品分析、流星光谱等)说明彗星的尘埃物质基本与球粒陨石相似。Delsemme^[6,7] 作了一些较合理的论述后, 提出“新”彗星(如 Arend-Roland)的平均元素丰度“探索”模型(表 3)^[6,7]。实际上各彗星、甚至同一彗星在不同时间结果都不同, 或许飞行器与哈雷彗星交会能得出新的结论。

彗星的化学过程已有不少探讨^[2,6,16], 但仍未很好解决。一般说来已观测到的彗星分子中有少数(如H₂O, HCN, CH₃CN)可能是从彗核表面直接蒸发出来的“母分子”, 而大多数分子、原子、离子是母分子受太阳辐射及太阳风作用而离解的产物或化学反应产物。Delsemme^[6]建立了跟表 3 及彗星光谱符合的彗星化学“探索”模型(表 4), 其中括号中的子分子是用母分子不能很好解释的。下表中的某些母分子尚未观测到。

表 4 彗星化学的“探索”模型

I “雪”(分子数目百分比)			I 型尘埃(质量百分比)	
母分子		光谱观测到的分子		
H ₂ O	73.0%	H ₂ O ⁺ OH H O(H ₂ O)	铁镁硅酸盐	78%
CO ₂	7.3	CO ₂ ⁺ O[D] CO ⁺ (CO, C)	水(结合水+被吸收的)	12%
CO	4.9	(CO C O ⁺ C)	碳化物	6%
CH ₂ O	4.4	CH (CO CO ⁺ C)	硫化物	4%
HCN	2.9	CN (HCN)	(尘/雪)质量比	0.70
CH ₃ CN	1.4	(CN CH ₃ CN)		
N ₂ H ₄	1.8	NH ₂ N ₂ ⁺ (NH)		
C ₂ H ₂	2.2	C ₂	* 不包括母分子贡献小于 10% 的	
C ₂ H ₄	0.7	C ₂		
CS ₂	1.4	CS		

在 Huebner 的化学动力学模型计算^[6]中, 包括约 100 种光致离解反应, 计划对约 500 种化学成分(在假定初始组成下)的 500 种左右化学反应作计算。一些反应的实例如下



2. 尘埃彗尾与颗粒

Bessel (1876) 和 Bredikhin (1903) 提出太阳辐射压力排斥从彗发流出的尘埃而形成彗尾的力学理论。同一时间从彗核表面外流的各种尘粒描绘出等时线 (Synchronone), 而受辐射压力相同的尘粒描绘出等力线 (Syndynome or Syndyne)。这种理论大致说明了尘埃彗尾的

形状。Finson和Probstein (1968)发展了这种理论,使之跟光度测量结合起来^[17]。这一理论有两种计算方法:①先计算彗尾中一种大小尘粒的面密度,然后对所有可能大小的尘粒积分(微分等力线法);②先计算同时从彗核外流的各种大小尘粒在彗尾中的面密度,然后对所有彗尾尘粒的时间积分(微分等时线法)。这样就得到尘埃彗尾的总面密度(正比于亮度)的理论公式,同观测亮度分布比较,便可同时定出尘粒大小分布函数,尘埃产率随时间的变化,气体产率与尘埃产率比,外流速度。这一理论成功地用于Arend-Roland彗星,以后又用于Kohoutek (1973×11)、Bennett (1970II)、P/D'Arrest (1976XI)、P/Encke (1977XI)等彗星。Minson和Prostein的理论用了一些简化假设(如尘粒运动是两维的)。木村博和刘彩品用更严格的理论方法研究了Arend-Roland彗尾^[20],得出“修正的 γ (太阳辐射压力和引力之比)分布函数”有双峰($\gamma=0.10$ 和 0.01),日心距1AU时的尘埃抛射率 p_d 为: $p_d \langle C_{sca} \rangle = (1.3 \pm 0.5) \times 10^9$ 厘米² 秒⁻¹ ($\langle C_{sca} \rangle$ 是平均有效散射截面)。一般地说,尘粒典型大小为微米量级,逆尾含更大尘粒(几十微米到毫米级),典型抛射率为 4.5×10^{17} 到 2.7×10^{18} 尘粒/秒,相应的尘粒质量抛射率约 10^9 克/秒,所需曳引气体抛射率约 6×10^7 克/秒或 1.5×10^{30} 分子/秒^[15,16]。

Houppis和Mendis最近系统地讨论了尘粒抛射机制^[21],主要有:①被升华曳出尘粒;②太阳风质子溅射导致尘埃抛射,若彗核有较多比H₂O挥发性大的冰,日心距大时也有明显尘埃抛射;③太阳风及紫外辐射(在彗星日心距大时)直接照射彗核,导致日射面带正电势,明暗界面及背阳面带负电,彗核表面松散细尘层被静电“吹出”;④彗核自转离心力作用抛出松散尘粒;⑤突然释放能量(冰的相变或宇宙线辐射),导致抛出尘粒。不同彗星主要抛射机制不同,同一彗星在不同日心距时的主要机制也不同。

从五十年代以来,Delsemme等提出彗核由固态水合物(Clathrate hydrates)组成。固态水合物是由H₂O等形成结晶结构,在结晶点阵中有足够的空穴被其它分子或原子占据,由范德瓦尔斯力包封和束缚。固态水合物冰粒大小为亚毫米级到厘米级。它们从彗核低速抛出,形成近彗核的冰粒晕反射太阳光,表现为日心距大时看到的“光度彗核”或“假彗核”。Burnham (1960II)和Bennett (1970II)彗星冰粒晕大小达 10^4 公里以上。抛出的冰粒中也含基分子(CN, C₂, CH等)。它们从冰粒中蒸发,对彗发的结构和过程起相当大作用。从Bennett彗星观测得出冰粒晕的大小,大致与日心距成正比。已观测到Kohoutek彗星冰粒的3.71厘米射电辐射。冰粒晕在“新彗星”中起更大作用,可说明Kohoutek彗星亮度的反常变化^[1,5]。

3. 等离子体彗尾和激波面

等离子体彗尾(即I型彗尾)由电离分子(CO⁺, CO₂⁺, H₂O⁺, OH⁺, CH⁺, N₂⁺等)组成。因主要成分CO⁺发射而呈兰色。I型彗尾而细长(往往长达 10^6 公里,甚至更长),向背太阳方向延伸,有复杂而多变的结构(如射线、运动的钮结等)。

早在1908年对Morehouse彗星观测时就发现结点运动加速甚大。Öpik曾测定和论述哈雷彗尾凝聚块的巨大加速^[22],其加速度是太阳引力加速的 $10^2 \sim 10^3$ 倍。这一问题使天文学家困惑了半个世纪之久。Biermann (1951)首先引入太阳微粒流(太阳风)与彗尾等离子体的强耦合来解释彗尾物质块的加速运动^[23]。太阳风概念为Parher (1958)的理论研究及人造卫星和太空飞船探测所证实。在太阳风动量流如何转移给彗尾离子的机制和方式上迄今看法不一。

较流行的观点认为通过彗尾中激发的不稳定性可以加速动量转移。Hoyle和Harwitt研究了零磁场组态下的二流不稳定性。陈道汉和刘麟伸认为这不能引起不稳定性, 彗尾中的加速现象由其它机制所产生^[24]。

同光以有限速度运动而引起光行差一样, 太阳风的运动使彗尾落后于日彗联线方向。其偏离 ϵ 称风行差(Abberation)满足下列方程

$$\operatorname{tg}\epsilon = \frac{V\sin\gamma - \omega_s \cos i}{\omega_r - V\cos\gamma}$$

其中 $V\sin\gamma$ 和 $V\cos\gamma$ 是彗星轨道速度在矢径和切向的分量, ω 为太阳风速度, γ 是彗星矢径和彗星轨道速度方向间的夹角, i 为彗星轨道平面对太阳赤道平面的倾角。但由于彗星的位置、方向和离太阳距离的变化范围极大, 太阳风速度 ω 除 ω_r , ω_s 分量以外, 第三分量 ω_τ 是随太阳距离和纬度而变化。Brandt (1973) 利用上述原理求得太阳风的平均速度约为 401 ± 12 公里·秒⁻¹, ω_s 为 7.0 ± 1.8 公里·秒⁻¹, 太阳风矢量对径向偏离大约 1° 。但是由于观测限制, 还不能精确求得太阳风随太阳纬度方向上的变化。

关于具有等离子体尾的彗星数目, 在六十年代初 Lüst 和 Antrack 等人的统计大约 30~40 颗。李中元和顾顺勇^[25] 的统计结果, 在 625 颗彗星中只有 16.6% 为等离子体尾彗星, 在 102 颗周期彗星中, 具有等离子体尾的彗星不过占 8.8%。可见其数量是相当稀少的。

即使等离子体尾是太阳风和彗星耦合所致, 但 Lüst 研究表明 I 型彗尾与太阳活动两者的相关性极小。李中元和顾顺勇认为只要彗星具备内因, 即使最低的太阳风速也能导致等离子体彗尾。关于彗星等离子体流或射线, 早年 Eddington 以 Morehouse 为样版曾进行过研究, 李中元和阎林山^[26] 利用佘山站所拍 Morehouse (1908III) (见照片 1), Halley (1910II) 和 Brooks (1911V) 三颗彗星照片绘出射线的形态图。等离子体射线从彗核中喷射出来, 被太阳风压弯, 并转向背日方向。射线和彗轴夹角, 越往后越小, 大约到 10° 才闭合起来, 而在彗头前方射线可达 $60^\circ \sim 70^\circ$ 。

在等离子体彗尾中有时会观测到螺旋波。为了解释它的产生, Ershkovich 等提出一种 I 型彗尾的模型。陈道汉和刘麟伸认为在太阳风等离子体和彗尾等离子体之间引入一个有限厚度边界层, 在等离子体不可压缩情况下解释了螺旋波扰动^[27]。等离子体彗尾与地球磁场的交互作用, 迄今国际上尚未找到可靠的观测。阎林山和李中元^[28] 得出 1910 年 5 月 18 日莱茵记录的地球磁暴可能是由于哈雷彗尾扫过地球而产生的。

太阳风可能在氢层上发生间断, 形成类似太阳风—地周磁场相互作用的弓形激波面^[5]。从等离子体彗星射线等现象推测彗星有磁场存在, 但其大小与起因尚无定论。

4. 彗发

彗发基本上是由中性气体分子和尘埃组成近球状大气, 大小为 $10^5 \sim 10^6$ 公里, 不同分子的彗发范围不同, OH 彗发延伸范围较大, 而 H 彗发(氢云)范围更大(达 10^7 公里)。可以根据不同分子(光谱发射带)和尘埃(连续谱)的特征来研究彗发中各成分的情况。尘埃彗发的分析



Morehouse 彗星(1903 年 11 月佘山摄)照片 1

往往与尘埃彗尾同时进行。分子彗发可由分光光度测量及窄带单色光度测量得出的单色亮度径向分布资料,结合彗星的物理过程和化学过程的合理假设,作出模型,从而得到该种分子气体的标高、外流速度及平均寿命、产率及随日心距变化等知识。

Malaise 把彗发分为物理上不同的三个区域^[5]:近彗核区、碰撞区和外区。近核区是前节所述的光度彗核(或假核),气-尘耦合作用强,半径几百公里,碰撞区外界到气体密度下降 e 倍处,分子间碰撞过程起重要作用,该区半径可达几千到上万公里。但有效碰撞区半径要小1—2个量级。外区无碰撞。除近核区及内碰撞区外,大部分彗发是光学薄的。主要辐射机制是荧光。其它机制(碰撞激发、电子复合等)是次要的。因此通常假定亮度 $I(\rho)$ 正比于柱密度 $N(\rho)$,其中 ρ 为离彗核的投影距离。在 Haser 模型中,把彗发作为以彗核为中心的球体积,假定母分子从彗核以径向速度 v_1 蒸发出来,经平均寿命 τ_1 ,后离解为子分子;子分子径向外流速度为 v_0 。寿命为 τ_0 。母分子和子分子的标高分别为 $R_1 = v_1\tau_1$, $R_0 = v_0\tau_0$ 。子分子的数密度的径向分布可写为^[5]:

$$n(r) = n(r_c) \left(\frac{r_c}{r} \right)^2 \left[e^{-r/R_0} - e^{-r/R_1} \right]$$

其中, r_c 为彗核半径, r 为离彗核中心距离。由此可导出以 R_0 和 R_1 为参数的彗发分子投影柱密度 $N(\rho)$,由观测的 $I(\rho)$ 与理论 $N(\rho)$ 拟合,可定出标高, R_0 和 R_1 。由光谱分析可得出 v_0 和 v_1 ,从而定出寿命 τ_0 和 τ_1 。而由 $n(r_c)$ 可定出分子产率。Haser 方法甚少在 50% 精度以内较好地代表了彗发实际情况^[5,6]。

实际彗发情况要复杂得多。Cambi 和 Delsemme 提出平均随机行走模型^[30],考虑了母分子离解子分子按随机方向抛出,结果得出实际标高比上述 Haser 方法所得标高大。Festou 提出“矢量模型”^[15],考虑了:①内彗发存在碰撞使分子作非径向运动,仅在远核区非径向运动才不显著;②产生分子时有能量释放,从而造成整个彗发中的非径向运动;矢量模型可说明下述观测事实:近核区气体速度小而远核区速度大,但计算中要求准确的速度分布。Festou 以及 Yamamoto^[32]也研究了母分子→第一代子分子→第二代子分子过程。Yamamoto 认为 C_2 、 C_3 是第二代子分子。在 Swift 和 Mitchell 模型中^[33],考虑了彗发对太阳辐射不透明度的影响。此外, Keller 等^[34]还专门研究了太阳 L_α 辐射及辐射压力对形成不对称的 H 彗发的过程,得出双麦克斯韦速度分布。

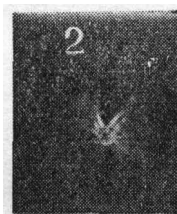
对十余颗彗星的彗发的研究表明,归算到日心距 1AU, CN 分子标高为 $4 \sim 20 \times 10^4$ 公里,其母分子标高为 $1.67 \sim 5 \times 10^4$ 公里, C_2 分子标高为 $6 \sim 15 \times 10^4$ 公里,其母分子标高为 $1.1 \sim 4.6 \times 10^4$ 公里,母分子速度约 0.6 公里/秒,子分子速度约 1~3 公里/秒,氢气产率为 $10^{27} \sim 10^{30}$ 原子/秒,平均外流速度约 8 公里/秒,平均寿命为 2.5×10^6 秒, H 电离以太阳风电荷交换过程为主,辐射压力加速度大致跟太阳引力加速度相等^[2,5]。

5. 彗星的亮度变化、爆发和分裂

彗星的视亮度 I 跟彗星的日心距 r , 地心距 Δ , 观测仪器、方法及观测条件有关。一般用下面关系来拟合观测亮度^[16]: $I = I_0 \Delta^{-2} r^{-n}$

各彗星的 n 值不同。Bobrovnikoff 对 45 颗彗星得出 n 值在 -1.8 到 +11.4 很大范围之间,平均 $\bar{n} = 3.3$, n 值与近日点之前或之后无系统关系。Vanysek 按彗星轨道(半长径 a 及偏心率 e)的

分类研究表明, 短周期彗星的 n 值大于其它彗星。许多彗星的亮度在短时间有很大变化, 称为“彗星爆发”^[16, 35]。爆发时亮度一般增加 3~10 倍。突出例子是 P/Tuttle-Giacobini-Kresak 彗星。它在 1973 年 5 月底至 6 月初亮度突增 10000 倍。P/Schwassmann-Wachmann 1 (P~16.4 年, 近日距~5.5AU, 远日距 6.3AU) 彗星多次增亮 100 倍以上。爆发常伴随有(气体、尘埃)“喷流”从彗核喷出, 往往形成圆形或卵形甚至不对称的气壳, 气壳膨胀速度约为 100—500 米/秒, 可达距离 10^5 公里; 爆发常伴随有彗核分裂, 最突出的是 P/Biela 彗星在 1846 年分裂为二。1976 年 West 彗星分裂为四块。爆发时有连续光谱, 表明是颗粒反射太阳光。1910 年 5 月中国余山站拍摄到哈雷彗星爆发时的“喷流”及气壳(照片 2, 3)。5 月 31 日奥地利维也纳看到哈雷彗核分裂为多重凝聚点。Всехвятский 统计近 40 年来已知过近日点的 79 颗彗星中 59 颗有爆发, 可能大多数彗星都有爆发, 但也有的彗星(如 P/Oterma 1958IV, 其轨道与 P/Schwassmann-Wachmann 1 相似)无爆发。关于彗星爆发机制已提出几种看法^[35]: ①彗核近表面下的挥发物升华而成为高压气囊, 气囊爆发而抛出气体和部分表面物质; ②涉及自由基(如 CH, OH, NH)的爆发性化学反应; ③非结晶冰相变为立方冰时放出能量, 引起应力使彗核粉碎; ④行星际“漂砾”(boulders)碰撞; ⑤彗核破坏, 许多彗星在分裂之后有爆发, 可能是较小碎块破裂, 可能彗星内部放射物衰变加热, 物质从核心向外围转移。当太阳辐射流量大时, 热激波使彗核分裂; ⑥彗核较深区挥发物耗空, 导致壳层收缩和部分破裂, 抛出气体和尘埃。此外当彗星接近木星或太阳(掠日彗星)时将被潮汐撕裂, 如 P/Brooks 2 (1889V) 进入木卫五轨道内而被撕裂, 掠日彗星 1882II, 1965 VIII 是一个大彗星的分裂碎块。总之,



照片 2 哈雷彗星彗核爆发(1910年 5 月 24 日余山摄)



照片 3 哈雷彗星彗核色层(1910年 5 月 29 日余山摄)

彗星爆发仍是个谜, 可能不只一种机制起作用。

6. 彗核的蒸发、彗星寿命及非引力效应

太阳辐射照射彗核表面, A (反照率)部分被反射掉, 而被吸收的 $(1-A)$ 中, 一部分变为红外再辐射和升华冰(及带出颗粒), 另一部分热量传导到内部。Delsemme 等研究了蒸发平衡理论^[5], 用同时解能量平衡方程和 Clausius-Clapeyron 型方程的方法得出气体产率和彗核表面温度。图 2 为各种“雪”的蒸发率与日心距关系。Cowan 和 A'Hearn 研究了彗核蒸发的

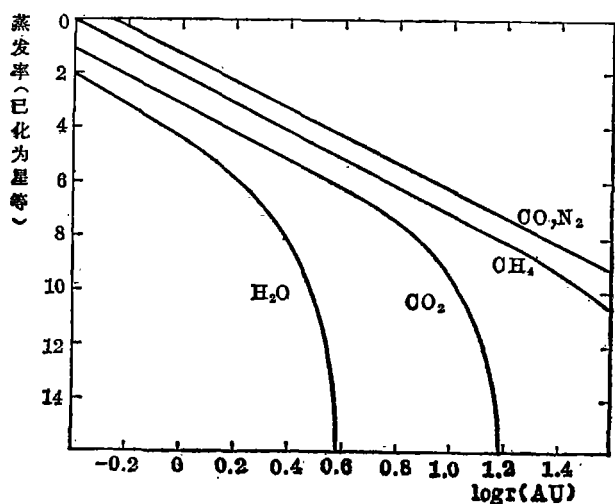


图 2 各种“雪”的蒸发率与日心距关系

“纬度效应”^[36]。

对于蒸发平衡下自转很快的彗核，Delsemme^[5] 得出各种冰的升华率 Q 与日心距 r 有如下关系(准确到 $\pm 5\%$)

$$Q(r) = \alpha \left(\frac{r}{r_0} \right)^{-m} \left[1 + \left(\frac{r}{r_0} \right)^n \right]^{-k}$$

其中 m, n, k 为常数, α 为归化因子, r_0 与彗核的吸收率、再发射率及蒸发热有关。

有些彗星的轨道运动在作了行星摄动改正后仍有长期变化(加速或减速)称为“非引力效应”。例如,哈雷彗星公转周期增加 4 天/每周期,一般认为,非引力效应起因于彗核抛射物质的反冲(“火箭效应”)及彗核自转。Marsden 等经验地把非引力加速度分量 F_i 表示为 $F_i = A_i Q(r)$, 取 $r_0 = 2.808 \text{ AU}$, $m = 2.15$, $n = 5.093$, $k = 4.6142$, $\alpha = 0.1113$ 。 A_i 称为非引力参量($i = 1, 2, 3$ 分别表示轨道面内径向、切向及轨道法向), 一般 $A_3 = 0$; 已对 40 多颗彗星求出了非引力参量, 对于哈雷彗星 $A_1 = 0.0589 \pm 0.0215$, $A_2 = 0.0154 \pm 0.0002$ ^[11]。非引力参量 A_i 还随时间变化, 归因于自转轴方向的改变。

彗星的寿命有两种定义: ①动力学寿命, 大行星摄动以及非引力效应改变彗星轨道, 最终使彗星逃离太阳系或落到行星上。彗星的平均动力学寿命较长(百万个公转周期)^[37]; ②物理-化学演化寿命: 彗星走近太阳过程中, 物质被蒸发而逸散, 乃至最后瓦解或留下枯萎残核, 一些估算的结论是每公转周期损失质量 0.1—0.5%, 因而演化寿命为几百至几千个公转周期^[38]。

7. 彗核

彗发和彗尾只是彗星外部的短期表现, 彗星问题的关键在于彗核。然而, 迄今缺乏彗核的直接观测资料。只能用彗发和彗尾等观测资料来建立彗核模型, 并阐明各种彗星现象。已提出多种彗核模型: 早期有“沙砾模型”与“致密核模型”之争。越来越多的观测资料支持后一

类模型。其中有代表性的是 Whipple 在五十年代提出的“冰冻团块模型”, 即俗称“脏雪球”, 这一模型又被进一步发展完善^[2]。Sekanina 讨论了两种彗核模式的质量蒸发损失及非引力效应, 得出核-幔模式的结果与观测符合^[39]。Shul'man 提出污斑模式, 认为彗核表面演化中形成斑状矿物壳。Huebner 提出多相(或不均匀)模式, 随着彗星走近太阳, 彗核表面受热并向内部转移, 表层下气囊爆裂成喷流。O'Dell 认为彗核是多气的尘球而不是脏雪球。Donn 认为彗核是挥发物组成的大小不一的彗星星子的团块。内部结构如图 3 所示。在较大星子外面是小的冰-尘集合体, 低密度彗核结构是易碎的。Hughes 提出的彗核模型示于图 4^[35]。

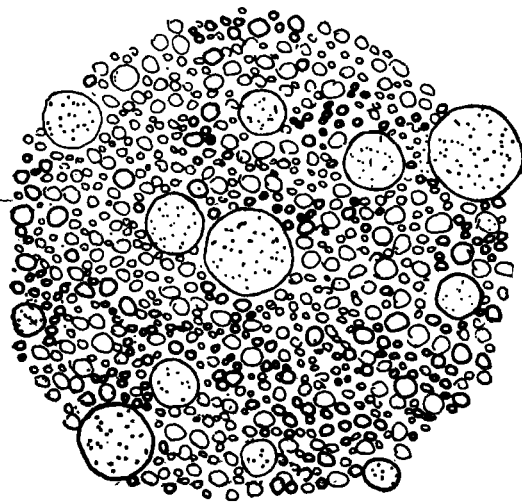


图 3

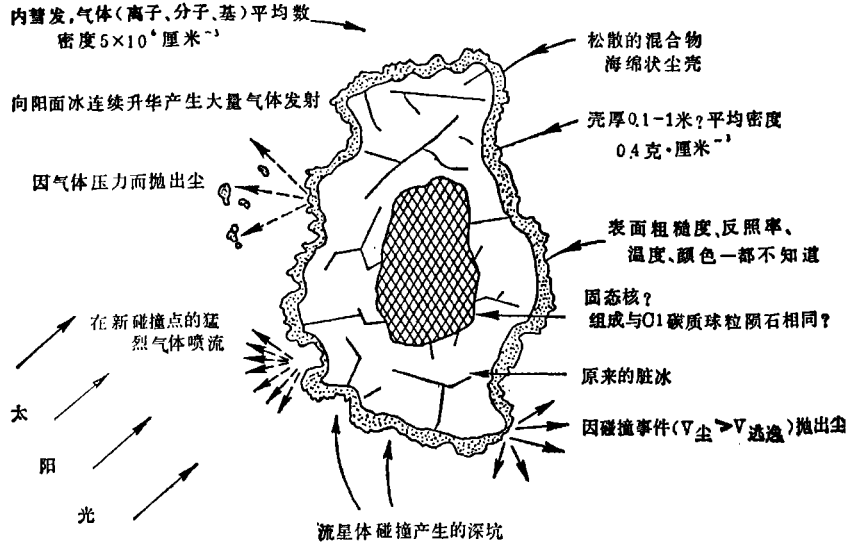


图4 彗核模型(剖面)

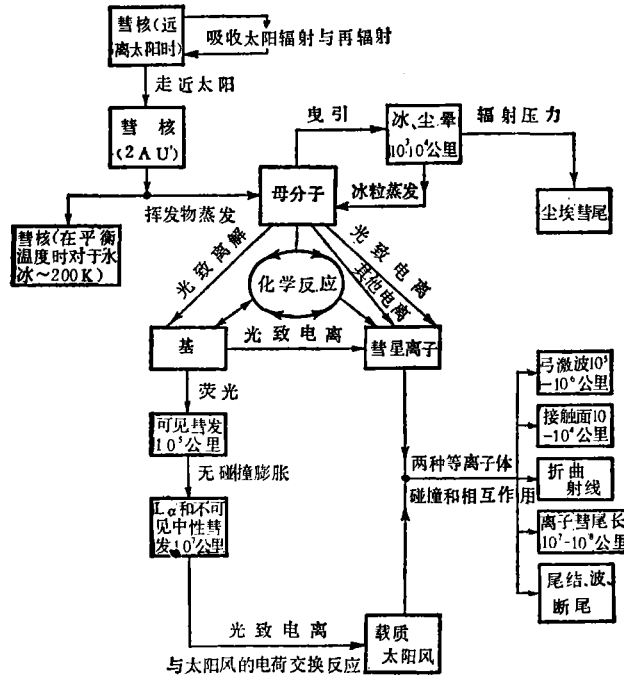


图5 太阳辐射与太阳风跟彗星相互作用的特征和过程

彗核的半径已有一些估算。一种方法是在彗星的日心距大时,由光度核的星等得出光度截面 AS (A 为Bond反照率, S 为有效截面), A 值可由实验得出。Delsemme等(1973)由 H_2O 产率定出 $(1-A)S$ 。另一种方法是利用径向非引力效应和大日心距时亮度作合理假定或由观测定出,例如对一些彗星的计算得出彗核半径是几百米到几公里。Öpik估算掠日彗星的母体半径达50公里以上^[16]。

彗核的密度很不确定,些估计^[5]是从 ≤ 1 克/厘米³到1.7克/厘米³,彗核质量的测定也很困难。从彗星与其它天体引力作用推算出的质量都很不准确。最近Sekanina(1977)建立起彗核分裂碎块的运动来计算彗核质量。从彗星半径和密度估算出彗星质量为 $10^{14}\sim 10^{19}$ 克。

彗核有自转、非引力效应、喷流、色层、射线等现象,这表明彗核表面不均匀,由这些现象分析可得出自转周期及轴的取向^[7,89]。迄今已定出十多颗彗星的自转周期,从几小时到几天,哈雷彗星的自转周期为10.3天。自转轴倾角是多样的。彗星活动如喷流也导致自转的变化。

迄今,彗星研究可以概括如图4。所示的特征和过程仅仅是初步的,许多问题尚待深入探讨。

参 考 文 献

- [1] Whipple, F. L., Huebner, W. F., "Physical Processes in Comets", *Ann- Rev. Astron. Astrophys.* 14 (1976), 143-172.
- [2] Donn, B. et al, (eds), *The Study of Comets*, NASA SP-393 (1976).
- [3] Richter, N. B., *The Nature of Comets*, New York: Dover (1963).
- [4] Delsemme, A. H. (ed), *Comets, Asteroids, Meteorites: Interrelations, Evolution and Origins*, Toledo: University of Toledo Press (1977).
- [5] Brandt, J. C., Chapman, R. D. *Introduction to Comets*, Cambridge University Press (1981).
- [6] Ponnamperna, C. (ed), *Comets and the Origin of Life*, D. Reidel Publ. Co. (1981).
- [7] Brandt, J. C. et al, (eds), *Modern Observational Techniques for Comet*, NASA JPL (1981).
- [8] Marsden, B. G., *Catalogue of Cometary Orbits*, Cambridge, Mass.: S. A. O. Central Bureau for Astronomical Telegrams.
- [9] Internatioeal Halley Watch.
- [10] *International Halley Watch, Newsletter* No.1, No.2.
- [11] Yeomans, D. K., *The Comet Halley Handbook: An Observer's Guide* (1981), 2nd edition (revised and enlarge) (1983).
- [12] Swings, P., Haser, L., *Atlas of Cometary Spectra*, Liege (1975).
- [13] Rahe, J. et al, *Atlas of Cometary Forms*, NASA SP-198, (1969).
- [14] Wilkening, L. L. (ed), *Comets: Gases, Ices, Grains, and Plasma*, Univ. Arizona (1982).
- [15] Festou, M. C., *Astron. Astrophys.* 95 (1981), 69.
- [16] Whipple, F. L., in "Cosmic Dust" (ed. McDonnell J. A. M), Wiley, New York (1978).
- [17] Finson, M. L., Probst, R. F., *Ap. J.*, 154 (1968), 327-380.
- [18] Yamanoto, T., *Astron. Astrophys.*, 109 (1982), 326.
- [19] Bobrovnikov, N., *Ap. J.*, 66 (1931), 145.
- [20] 刘彩品, 木村博, *天文学报*, 23(1982), 3, 232.
- [21] Houppis, H. L. F., Mendis, D. A., *The Moon and the Planets*, 25 (1981), 797.
- [22] Öpik, E. J., *Ap. Z.*, 58 (1964), 192.
- [23] Biermann, L., *Z. Ap.*, 29 (1951), 274.
- [24] 陈道汉, 刘麟仲, *中国科学*, (1981) 11, 1350.
- [25] 李中元, 顾顺勇, *空间科学学报*, 3(1983), 1, 51.

- [26] 李中元, 阎林山, 顾顺勇, 天体物理学报, 3(1983), 2, 81。
[27] 陈道汉, 刘麟仲, 中国科学, (1982)5, 453。
[28] 阎林山, 李中元, 顾顺勇, 空间科学学报, 3 (1983), 4。
[29] 胡中为, 杨克中, 空间科学学报, 2 (1983), 2, 104。
[30] Combis, M. R., Delsemme, A. H., *Ap. J.*, 237 (1980), 641;
[31] Gray, G. A. (ed), *Comet Kohoutek*, NASA (1975)。
[32] Yamanoto, T., *The Moon and the Planets*, 24 (1981), 453。
[33] Swift, M. B., Mitchell, G. F., *Icarus*, 47 (1981), 412。
[34] Keller, H. U., Thomas, G. E., *Astron. Astrophys.*, 39 (1975), 7;
[35] Hughes, D. W., *Q. Jl. R. Astron. Soc.*, 16 (1975), 410。
[36] Cowan, J. J., A'Hearn, M. F., *The Moon and the Planets*, 21 (1979), 155。
[37] Öpik, E. J., "Interplanetary Encounters" Amsterdam, Elsevier, Sci. Publ. Co. (1976);
[38] Weissman, P. R., *Bull. Amer. Astron. Soc.*, 9, (1977), 465。
[39] Sekanina, Z., *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, 9 (1981), 113。

HALLEY COMET AND STUDIES OF COMETS

Yan Lin-shan

(Shanghai Observatory, Academia Sinica)

Hu Zhong-wei

(Astronomy Department, Nanjing University)

Abstract

Comet is a peculiar object in the solar system. Under the action of solar radiation and the solar wind, comet experiences various physical and chemical processes, resulting in the variations of the appearances (coma, tails), brightness, spectrum and kinetic character of the comet. The study on comets is an important subject in astronomy and space science, which is of significance in studying the origin of the solar system, the origin of the organic molecule and even life, the solar wind and plasma processes.

Famous Hally Comet will return to inner solar system in 1985—1986. Varied cometary phenomena are to be observed. The sample analysis and the various observations from both groundbases and redevous spacecrafts will help advance the study of comet to a new stage. In this paper, the plan of the International Halley-Watch (IHW) is introduced briefly. Then, some progresses in the study of comets are reveiwed, including (1) chemical composition and chemical processes of comets; (2) dust tails and grains; (3) plasma tails; (4) coma; (5) cometary brightness, outburst and splitting; (6) vaporization, lifetime of the cometary nucleus and the non-gravitational effects; (7) the cometary nucleus, in which some studies of comets in a China are also mentioned.