

宇宙尘

胡中为

(南京大学天文系)

提 要

宇宙尘研究是近年来天文学、空间科学等多学科的活跃的研究领域,它不仅对揭示宇宙的物质过程、太阳系天体的形成演化等基础科学很重要,而且也有一定的实际意义。由于应用现代空间探测和实验技术及理论,宇宙尘研究进展迅速,本文评述行星际宇宙尘研究的一些进展情况和主要结果。第一部分概述研究宇宙尘的一些方法及可得到的资料,包括黄道光观测、流星观测、宇宙尘取样分析、空间实地探测、月球的微陨坑。第二部分综合评述宇宙尘研究的主要结果,包括宇宙尘的物质密度、化学成分、结构特征、流量、空间分布、质量分布、轨道分布特征、某些动力学问题及宇宙尘的来源。

天文学中通常把在行星际空间绕太阳运行的小物体称为流星体(meteoroid),其质量范围从 10^{-16} 克到 10^8 克。大多数流星体是很小的固体颗粒,常称为行星际尘(interplanetary dust)或宇宙尘(cosmic dust);宇宙尘的含义更广,也包括恒星际尘(interstellar dust)。本文只讨论行星际宇宙尘,以下简称宇宙尘。宇宙尘在黄道面附近较集中,它们散射太阳光而呈现为黄道光(zodiacal light)。流星体高速闯入地球大气时,会产生烧蚀物质的余迹,呈现出被光学或射电观测到的流星(meteor)现象;较大流星体在大气中仅表层烧蚀,其残体落到地面成为陨星或陨石(meteorite)。虽然对黄道光观测、流星观测、陨石及沉积物中宇宙球粒(cosmic spherule)分析已有一个多世纪历史了,但宇宙尘研究的新阶段始于宇宙航行,因为很担心流星体的撞击对飞船仪器和宇航员的伤害。尽管实际上这种伤害并不严重,但科学家认为研究宇宙尘是个很重要的问题,在黄道光和流星的地面和空间观测、宇宙尘的取样分析、空间实地探测及有关理论方面作了大量研究,不断地取得新进展。现在,宇宙尘已成为天文学、空间科学等多学科共同研究的很活跃的科学领域。近几年我国在海洋沉积物、古地层中及高空气球上收集到一些宇宙尘,并作了其成份、结构及分类等研究^[1,2]。

研究宇宙尘有多方面的意义^[1-5]。大多宇宙尘没有经历过地球物质那么严重的地质演变,较好地保留了原始太阳系物质的讯息,例如,原始的元素丰度和同位素丰度;从宇宙尘的化学成分和矿物相研究,可了解原始太阳星云乃至恒星际的环境条件和物质过程,为探讨行星及整个太阳系起源提供重要线索。宇宙尘主要来源于彗星和小行星,它的研究有助于认识彗星和小行星的起源演化。从宇宙尘在月球岩石、陨石和飞船上产生的微陨坑研究,可了解太阳系演化中的陨击作用。从宇宙尘中被注入的太阳风粒子研究,可了解太阳风的作用过程及

太阳风粒子的成分和流量；类似地，也可了解宇宙线粒子作用的情况。据估计，每年有16,000吨宇宙尘落到地球上，它们在大气中烧蚀的残留物成为气溶胶，影响大气的物理和化学过程乃至气象和气候。流星的电离余迹可用于秘密通讯。沉积物中的宇宙尘可为地层序列的划分、对比及岩石成因提供参考。F. Hoyle等人甚至认为彗星抛出病毒随雨落到地球上而产生流行感冒^[7]。前生命的有机物是否来自宇宙尘，这也是在热烈讨论的问题^[8]。宇宙尘的研究发展迅速，内容十分广泛，文献繁多，并且有些结果是矛盾的，尚无肯定结论，又限于篇幅，作全面评述是很困难的。本文先概述研究宇宙尘的一些方法，然后综合评述主要研究结果。

一、宇宙尘的研究方法

宇宙尘的研究内容很多，从大的方面说，有宇宙尘的流量、空间分布、质量分布、轨道分布特征、动力学问题及来源问题；从小的方面说，有个别尘粒的化学成分、结构特征等。由于宇宙尘十分小，又广布行星际空间，研究它们是十分困难的。虽然有许多技术方法用于探测宇宙尘，但各种方法都有一定局限，也不够精确，所得资料需借助实验和理论来解释，这里仅概述研究宇宙尘的一些方法及可得到的资料。

1. 黄道光观测

从十七世纪以来已有许多黄道光地面观测。近年来，为减少大气辉光污染，用飞机、气球、火箭、卫星及宇宙飞船到高空和大气外进行黄道光观测^{[9], [4], [8]}。观测波段也扩展到远紫外(1,180埃)和远红外(20微米)^[10]。观测项目有亮度、偏振、色指数和光谱。

黄道光主要由两种物理过程产生^[5]：(1)行星际尘散射的太阳辐射，具有偏振性质；(2)行星际尘吸收太阳辐射后的再发射。黄道光的完整表达是4个Stokes参数I、Q、U、V，大多数观测者忽略椭圆偏振(V=0)，而仅观测线偏振，即测量总亮度 B_t 和偏振亮度 B_p （或偏振度 $p = B_p/B_t$ ）。图1和2分别绘出黄道面上黄道光的总亮度 B_t 和偏振度 p 的一些观测结果^[5]，其中 ϵ 是距角（即观测方向与太阳方向的夹角）， S_{10} 是以每平方度里等效亮度为10等星的星数为单位。在 $\epsilon = 180^\circ$ 附近的黄道光部分称为对日照（*gegenschein*或*counterglow*）。各观测结果的差异（尤其大 ϵ 时）主要是观测误差造成的。Wolstencroff和Kemp(1972)得出最大圆偏振(V/I)约0.5% ($\epsilon = 120^\circ$)；对 $\epsilon = 180^\circ$ 附近负偏振问题仍有争议^[5]。对 $\epsilon \geq 20^\circ$ 和波长2,600埃—2微米，黄道光与太阳的色指数相近($C = 0.9 - 1.1$)^[4]。远离黄道面， B_t 和 p 都减小。

黄道光空间观测结果如图3，其

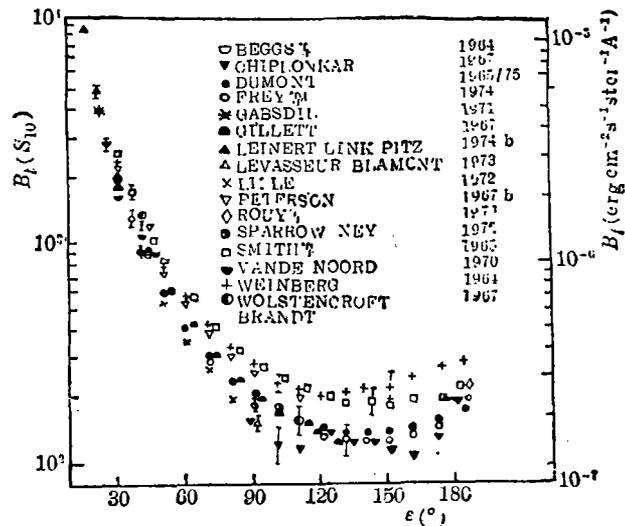


图1. 黄道光的总亮度。

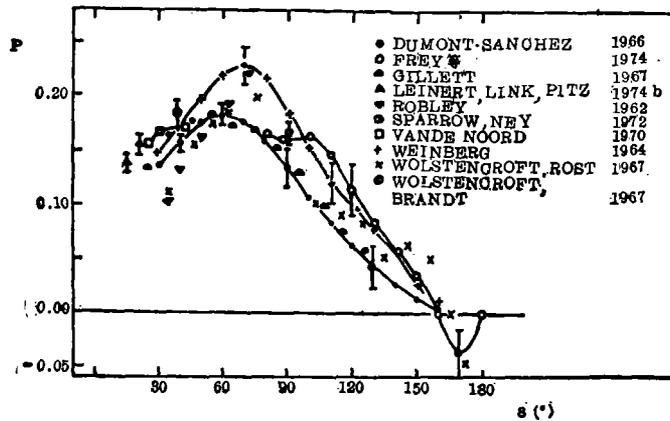


图2. 黄道光偏振度。

中大于日心距 1 AU 的是 Pioneer 10 与 11 的观测, 而小于 1 AU 的是 Helios 1 与 2 的观测 (黄纬 -16° 与 -32° 平均)^[4]。国际太阳极区计划和黄道光/背景星光 (ISPM/ZLE) 计划将观测 $\epsilon=30^\circ-180^\circ$ 、1,800—8,000 埃范围内 12 波段的黄道光亮度和偏振^[10]。

借助各种理论模型拟合观测资料, 可定出宇宙尘的空间分布、尘粒大小和性质^{[4], [5]}。假定尘粒数密度是日心距 R 和离黄道面距离 h 的函数 $n(R, h)$; 太阳辐照为 $B_0(R_0/R)^2$, 下标 0 可取 $R=R_0=1$ AU 的值, 尘粒平均散射函数为 $\sigma(\theta)$, θ 为散射角, 则空间 (R, H) 处观测到来自 (ϵ, i) 方向 (i 为对黄道倾角) 的黄道光亮度为^[5]

$$B(\epsilon, i, R, H) = B_0 R_0^2 \int_{\Delta=0}^{\infty} \frac{\sigma(\theta) n(R, h)}{R^2} d\Delta \quad (1)$$

式中 Δ 为视向距离。利用实验或理论的 $\sigma(\theta)$ 合理值 (跟尘粒大小分布及光学性质有关), 用 (1) 式和观测资料可导出 $n \propto R^{-\gamma}$ 。从 Helios 资料得, $\gamma = 1.3 \pm 0.1$ ($0.09 \text{ AU} < R \leq 1 \text{ AU}, i = 0$); 从地面观测得 $\gamma = 1.2$; 从 Pioneer 资料得 $\gamma = 1$ ($R = 1-3.3 \text{ AU}$)^[4]。一般情况可用 $n(R, h) \cong n(R, \beta) = n_0 (R/R_0)^{-\gamma} f(\beta)$ 表示^[4], $\beta = \sin^{-1}(Z/R)$ 为黄纬, Leinert 等 (1981) 得出 $f(\beta) = \exp(-2.1 \cdot |Z/R|)$ ^[10]。黄道光主要来自半径 5—100 微米的尘粒散射, 对于尘粒的大小分布及其光学性质, 虽已有不少探讨, 但仅从黄道光资料尚难作出肯定结论^[4]。

黄道光亮度分布 (或宇宙尘分布) 的对称面并不跟黄道面或太阳系不变平面重合, 甚至对称面不是平面^{[4], [5]}。黄道光的光谱多普勒位移说明行星际尘大多绕太阳顺行^[6]。地面观测曾得出黄道光亮度随时间变化, 且跟太阳活动或流星群有关, 但 Helios 未测到这种变化^{[4], [5]}。

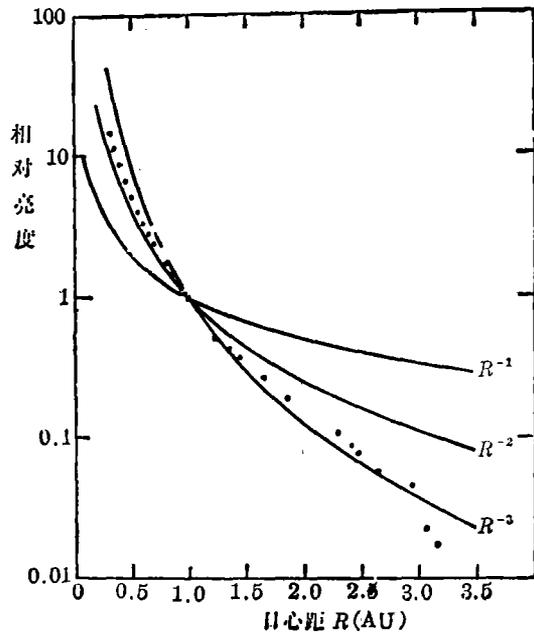


图3. 黄道光亮度随日心距的变化。

2. 流星观测

流星体进入地球大气时,地心速度为11.2—72公里/秒,在离地面115—70公里大气中耗散能量,可发生烧蚀,激发余迹辐射而呈现为光学流星;也产生电离原子和分子余迹,可反射雷达波,成为射电流星。其原来的流星体质量大多在 10^{-6} — 10^6 克。流星有单个零散出现的偶现流星;也有定期成群出现的流星雨,其相应流星体构成流星群。流星群的轨道与彗星轨道相近,表明它们来自彗星^{[1],[5]}。

流星的目视和照相观测已进行很久了,近年在技术方法上又有重大发展,如使用强光力($F/0.8$)超施密特照相机和高速底片、电视摄像、雷达探测、光谱观测及高空探测等。从流星的定位观测可推算流星体的空间轨道,从亮度观测可推算流星体的大小、质量及密度,从流星计数可得出流量,从光谱观测来定化学成分,还可以研究流星与大气相互作用过程等^[5]。

目视观测进行流星计数、测亮度及轨迹。一般是多站、多人联合观测,虽然观测精度较低,但简单易行,仍有一定价值。从六十年代以来建立了照相观测站网,进行经常的系统观测,其中著名的有美国的Prairie Network(16个站)、德国和捷克的European Network(46个站)、加拿大的MORP Network(12个站),苏联、日本和印度等国也开始组织站网观测。很可贵的是站网成功地拍摄下三个陨石(Lost city, Innisfree, Pribram)的陨落过程。

电视(光导摄像加上像增强器)观测可记录很暗(9等)的流星,而且记时分辨高,可得到流星余迹的运动和亮度分布,有助于了解流星体烧蚀、碎裂和结构问题。

雷达观测不受天气和时间限制,而且能观测到极暗(16等)流星。多站雷达观测可定出流星轨迹和亮度,以推求流星体性质及其对大气的作用。从流星余迹 P 点反射的回波最大功率为^[5]

$$P_R = \begin{cases} \frac{P_T G^2 \lambda^3 a^2}{32\pi^2 R^3} r_e^2 (\text{尔格}), & \text{当 } a \ll 2.4 \times 10^{12} (\text{电子数/厘米}) & (2a) \\ \frac{P_T G^2 \lambda^3 a^{1/2}}{105\pi^3 R^3} r_e^{1/2} (\text{尔格}), & \text{当 } a \gg 2.4 \times 10^{12} (\text{电子数/厘米}) & (2b) \end{cases}$$

其中, P_T 为雷达发射脉冲功率, a 为余迹的电子线密度, G 为天线在 P 向的功率增益, λ (厘米)为波长, $r_e (=2.8179 \times 10^{-13}$ 厘米)为经典电子半径, R 为到 P 点倾斜范围。(2a)用于低密度余迹,产生衰减型回波;(2b)用于高密度余迹,产生持续回波;在 $a \approx 2 \times 10^{12}$ 时,有上两种混合的过渡型回波。为使回波不因余迹前、后反射波干涉而降低功率,雷达工作最大频率约100兆赫;另一方面,因回波功率正比于 λ^3 ,人为干扰和天线大小使得不能用很低的频率。流星雷达观测常用波长为4—10米,并多站联合观测。

光谱观测已有150多年历史,在4,000多流星光谱中已认证出30多种成分^[4]:Na I、Mg I、Al I、Si I、Ca I、Cr I、Mn I、Fe I、Ni I、H I、N I、O I、Ti I、Co I、Mg II、Si II、Ca II、Fe II、N II、O II、Ti II、Cr II、Sr II、N₂、CN、FeO、C₂、N₂⁺,可能还有C I、Sr I、Ba I、CH。但光谱定量分析很困难,Harvey(1973)分析了金牛座、双子座和英仙座中的三个流星的已测元素丰度,结果跟典型石陨石相似,而另一颗偶现流星的元素丰度跟镍铁陨石相似^[11]。Goldberg和Aikin(1973)用离子质谱仪在101和114公里高空测量了金牛座 β 流星雨(与恩克彗星有联系)的元素丰度,结果(除Sc外)与球粒陨石相似^[7]。

3. 宇宙尘的取样研究

宇宙尘样品研究是唯一直接了解它们的化学成分、构造和类型的方法。虽然发现沉积物中含地外物质已有一个多世纪了, 但近年才在取样(地面的、尤其高空和空间的)技术和实验分析方面取得重大进展^{[3], [5]}。

(1) 地表收集。进入大气的流星体残存物落到地表, 与地球物质混合。近年, 在海洋沉积物及锰结核(manganese nodules)中、沙滩(beach sands)、古盐床(ancient salt deposit)甚至屋顶上都进行宇宙尘样品收集, 困难的是如何把它们与地球物质区分开来。在古沉积物中的黑色磁性球, 若具有下述特性, 几乎肯定是来自地外的宇宙尘。这些特性是: (i) 含有相当于陨石比例的 Fe、Ni、Co; (ii) 含方铁(维氏)(Wüstite, $Fe_{1-x}O$); (iii) 含铁、镍金属; (iv) 宇宙不丰富元素(Mn、Ti、Cr等)的丰度低。方铁是在高温和氧分压低的条件下形成的亚稳氧化铁, 仅近代工业过程才产生这种地球矿物。在海洋沉积、冰床和沙滩中已找到含方铁、镍和金属的球粒, 它们常常是有方铁与磁铁矿的外壳包着铁核。另一方法不是对个别颗粒, 而是对大量样品探测宇宙尘, 最成功的是测量宇宙线成因放射物和地壳中稀有、而陨石中普遍有的某些痕量元素。宇宙线成因核中最可靠的是⁵³Mn, 它是5—100MeV宇宙线质子溅射地外物质中的铁而产生的放射同位素, 因此⁵³Mn也是地外物质的有力证据(但1952年以后的样品要考虑热核弹产生的⁵³Mn)。痕量元素铍和钪在陨石中比地壳中含量高, 深海沉积物中铍和钪含量高说明有来自地外的物质。除少数外, 大多数证认的宇宙球粒大于50微米。

(2) 大气中收集。近二十多年来, 用气球、火箭和高空飞机收集大气中的宇宙尘。大气中收集的最大优点是能得到未改变的宇宙尘, 而且小尘粒(直径10微米)的空间密度比外空高6个量级; 主要困难也是地球物质污染问题。几十微米以下的宇宙尘粒进入高空大气时, 受空气阻力而减速, 由于它们表面热辐射很有效, 不发生烧蚀, 因而不损失物质。若尘粒是黑体且不损失质量, 其瞬时温度近似为

$$T = \left[\frac{\rho v^3}{8\sigma} \right]^{1/4} \quad (3)$$

其中, ρ 为空气密度, v 为尘粒速度, σ 为斯忒藩-玻耳兹曼常数。对于10微米尘粒, 若进入大气速度为15公里/秒, 进入角为45°, 其温度仅800°C左右, 不会烧蚀。这种进入大气而结构与成分未改变的小尘粒称为微陨石(micrometeorites)。当然, 大气中还有因进入速度大或质量大而发生烧蚀的尘粒。探空火箭可飞行到100公里以上的大气逸散层。100公里以下用惯性碰撞器(inertial impactor)收集, 但120公里以上则产生尘粒高速撞击坑。虽然火箭收集器可用于微米大小尘粒, 但主要用于亚微米尘粒。火箭已收集到的尘粒有好几种类型, 如低密度的集合体, 核-幔结构尘粒。火箭收集的缺点是飞行时间短。气球可飞行到35公里至50公里, 飞行时间为5至10小时甚至更久, 常用沉降板收集器(settling plate collector)和惯性碰撞器, 不仅收集到微米以下尘粒, 最近也收集到大于50微米的尘粒, 已收集的尘粒有FeNi球, Fe、S球及成分类似于球粒陨石物质的尘粒。飞机用于收集20公里以下的尘粒, 也是用碰撞器收集, 1974—76年NASA用U-2飞机多次飞行到20公里同温层, 共收集到150颗以上地外尘粒, 直径为3—38微米; 除了它们的成分类似于陨石物质, 还有镍纹石和方铁外, 尤其是太阳风注入³He的强力证据, 证明其来自地外。在这些宇宙尘中, 约60%是球粒陨石型的, 30%是铁硫

镍(FSN)型的, 10%是铁镁硅酸盐型的。球粒陨石型尘粒的元素丰度与球粒陨石相同, 又可按硫含量和形态分为两个亚型: 球粒集合体(由 $1,000\text{\AA}$ 大小的小颗粒组成的集合体, 色黑, 其中一半尘粒含C和S大于4%)和球粒陨石烧蚀球(无孔隙、不含S, 其结构与成分类似于陨石的熔壳)。FSN是含百分之几的镍的铁硫尘粒, 成分类似于陨石的陨硫铁(FeS)或磁黄铁矿, 形状有球形及不规则形。铁镁硅酸盐型尘粒是贫铁橄榄石和辉石的, 表面附有球粒集合体。有少数地外尘粒不属以上三型, 有两颗类似于玻璃球。

4. 空间实地探测

为搞清远地空间的宇宙尘情况, 用卫星和飞船带探测器进行了实地探测。探测器有多种, 大致可分几类(表1), 各类探测技术示意于图4^[5]。综合各种探测结果, 可得到宇宙尘的空间轨道、空间分布、尘粒的化学成分等资料^[5]。由于宇宙尘对探测器的相对速度大, 难于收集到保

表1 宇宙尘的空间探测器

类 型	传感器件	测量参数	优点	灵敏度	主要结果
Microphone(传声器)	压电晶体或电容	动量交换	简单	10^{-14} 克	尘粒动量
Impact plasma (碰撞等离子体)	(a) 电等离子体 (粒子或电流放大器)	等离子体电离	灵敏、可靠	10^{-17} 克	尘粒元素成分, 质量和速度
	(b) 光学发射 (感光计)	等离子体和靶的 光发射	简单		
Penetration(穿透)	(a) 电容绝缘破坏(放电 电流或电压脉冲放大)	穿透(有/无)	简单、可靠	10^{-17} 克	穿透功率和剥 蚀限
	(b) 光学转换 (感光计)	穿透(面积)	简单、可靠	10^{-12} 克	
	(c) 气压损失 (电-机械传感控制)	穿透(有/无)	简单、可靠	10^{-11} 克	
Electrostatic charge Sensing(静电测向)	静电计放大器	(太阳光作用下) 尘粒的静电荷	无破坏	10^{-11} 克	尘粒电荷和速 度
Optical reflection (光反射)	感光计和望远镜	尘粒反照率	无破坏、遥测	10^{-5} 克	尘粒反照率及 速度

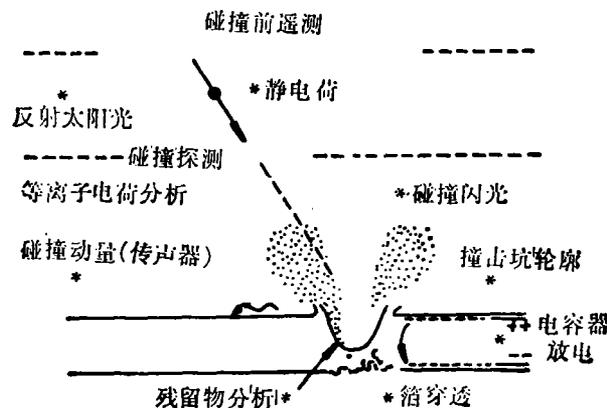


图4. 探测技术示意。

持原状态的样品，一般仅得到少量撞击残留物，此外，为进行探测器定标和使其准确工作，需复杂的实验室模拟。

5. 月球上的微陨坑

无大气的月球保留了丰富的流星体陨击记录。这里不讨论月海盆地及环形山，仅就月岩上的微陨坑而言，其大小、形状和构造也是多样的。很小的微陨坑只有微坑和周围隆起，大些的还有中央断裂及周围溅射区，也有无坑而仅有断裂的。从微陨坑及浮土可得到行星际尘（微陨石）的信息^{[5], [6]}。模拟实验表明，微陨坑外形跟弹（微陨石）的形状及入射角有关，坑深度与弹密度及撞击速度有关^[5]。Brownlee等得出^[5]，微陨石近于球状，大多密度为2—4克/厘米³，Smith等得出，微月坑可分为三类，其深度/直径比分别为0.94、0.50、0.33，相应地由微陨铁（密度7.9）、石质和碳质微球粒陨石（密度2.7）及多孔微流星体（或冰晶，密度1.2）陨击产生，对2微米微流星体而言，三类的百分比为40%、20%和40%；Nagel等分为两类，其坑的深度/直径比分别为0.7和0.5，相应的流星体为微陨铁和石质微陨石，可能还有第三类（深度/直径比为0.4，相应于弹的密度1克/厘米³），还有小的（直径小于30微米）坑由铁弹、大的（大于80微米）坑由石弹形成的趋势^[5]。实验得到坑直径 D 与弹体的速度 v 和质量 m 的关系为 $D=Cv^{2\lambda}m^\lambda$ （厘米），若弹和靶的密度都是3，则 $\log C = -3.827$ 到 -3.982 ， $\lambda = 0.333-0.377$ ^[5]。用太阳及银河系粒子径迹、短寿命放射同位素、宇宙成因惰性气体三种技术，可确定样品的径迹或气体的保留时间（年龄），从而研究宇宙尘流量的时间变化，但因涉及许多复杂问题，尚无肯定结论。此外，月土及月震仪记录也提供流星体情况。对于行星及其卫星，目前还只限于从照片上研究较大陨击坑，尚无岩石样品上的微陨坑结果。

综合起来，宇宙尘的研究方法及其适用的质量范围可概括于图5。由于许多情况下不知道尘粒形状和密度，作为近似取尘粒为密度 $\rho=1$ 的球体，以示其大小（直径）。

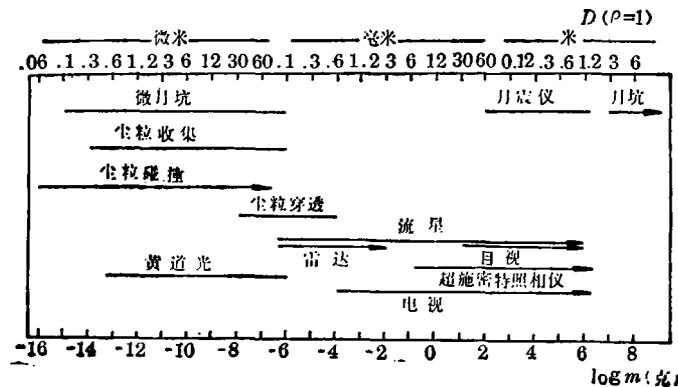


图5. 宇宙尘的研究方法及其质量范围。

二、宇宙尘的主要研究结果

宇宙尘的每种研究方法都有一定局限，不同方法得到的结果甚至不一致。现在来总结评述宇宙尘的一些主要研究结果。

1. 宇宙尘的物质密度和构造

宇宙尘样品很小，其物质密度很难直接测定，一般是用间接方法算出的。

从流星观测可间接算出相应流星体的密度^[5]。图6中a是从平均星等8^m.2射电流星得出的密度分布，在质量范围10⁻⁸到10⁻⁵克内，平均密度为0.8克/厘米³，b是220个偶发照相流星（质量约1克）的密度分布，平均密度约0.28克/厘米³；流星雨观测也表明平均密度小于0.8克/厘米³（只双子座流星雨为1.1克/厘米³，但此流星群轨道远日距仅2.6AU）。流星体密度与其轨道特性有关，例如，远日距2AU左右的流星体密度比远日距4AU左右的大50%。火流星可分为三类：I 球粒陨石类，II 碳质球粒陨石类，III 更易碎的彗星物质类，其物质密度分布如图7。从月岩上的微陨坑分析得出，在质量范围10⁻⁸—10⁻¹⁴克的微流星体密度为2—4克/厘米³。Millman(1975)总结宇宙尘的平均密度与其质量的大致关系如表2^[2]。

从宇宙尘密度分布可见，它们大多是低密度的，推测其结构是易碎和多孔的，但也有密度大的致密体；月岩上的微陨坑形状表明微陨石是扁球体；黄道光资料的一种可能解释是宇

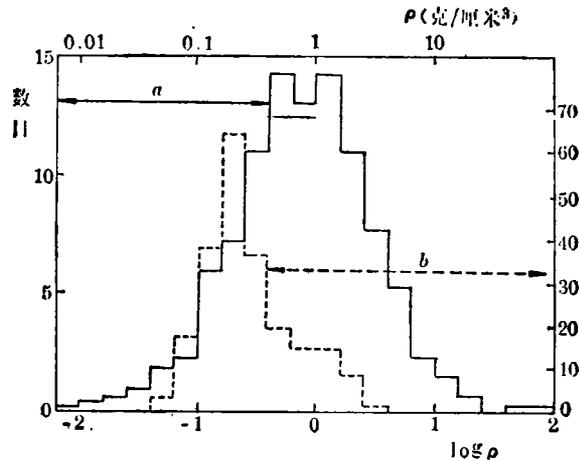


图6. 流星体的密度分布。

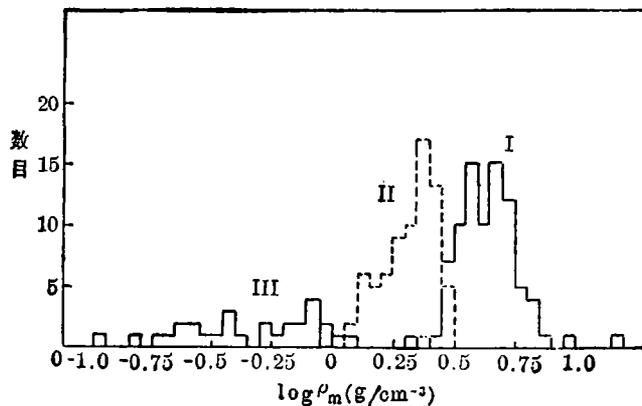


图7. 火流星的物质密度 ρ_m 。

表 2 宇宙尘的平均密度

质量范围 (log m 克)	密度 (克/厘米 ³)
-1—+1	0.3
-4—-2	0.8
-14—-8	3
<-14	>4(?)

宇宙尘是绒毛状的。宇宙尘构造的直接资料是大气取样分析给出的, 即多数尘粒是微粒集合体, 因而多孔隙、密度小, 而小微粒则是致密的; 但有些大尘粒也可能是致密的^{[4], [5]}。

2. 宇宙尘的化学成分

前面已述及, 从流星光谱可证认出元素种类, 但元素丰度定量分析很困难, 离子质谱仪在高层大气中测量了流星雨的元素丰度。近年来高精度现代测试技术 (如电子探针、中子活化、离子探针、扫描电镜、透射电镜、固体径迹探测器、激光探针质谱) 的应用, 使毫米到微米的宇宙尘分析成为可能^{[4], [5]}。图 8 为 U-2 飞机收集的 6 个 (球粒陨石型集合体) 宇宙尘和天空实验室 (skylab) 的直径 110 微米宇宙尘撞击坑中残留物的元素丰度 (对 Si 的重量比)^[5], 显然它们与 Murchison 碳质球粒陨石的丰度 (图中实线) 相近, 或者说至少所测 10 种元素接近于宇宙丰度。流星光谱还表明流星体富含 H、N、O、S 等挥发物, 因而它们与 CI 陨石等代表太阳系原始物质。

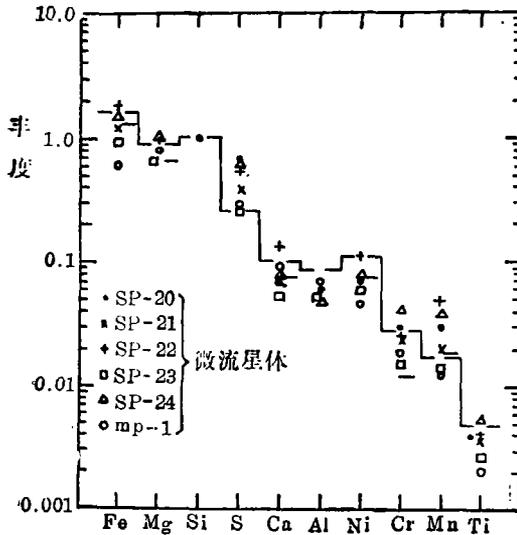


图 8. 宇宙尘的元素丰度。

但是, 宇宙尘实际情况比以前预想的更复杂。个别尘粒 (尤其微米量级以下的) 的元素丰度有较大差异, 甚至有的尘粒是单矿物颗粒, 如 FeS、镁橄榄石— $MgSiO_4$ 或顽辉石— $MgSiO_3$ 、FeNi 金属、方解石、镁磷酸盐, 在同位素比 (如 $^{25}Mg/^{24}Mg$) 上各种尘粒也有差别, Brownlee (1980) 认为, 大多数 5—50 微米尘粒至少是两类母物质碎裂产生的。最普通的尘粒是没有陨石对应物的一种不同物质的产物, 这种物质的特征是有大致等尺度颗粒组成的多孔集合构造^[5]。

3. 宇宙尘的流量

宇宙尘的累积流量 $\phi(m)$, 是半球面内各方向 (2π 球面度) 每秒钟撞击到单位面积 (米²) 的、质量大于 m (克) 的尘粒积分数目, 常用 $\log \phi(m) - \log m$ 图表示。图 9 综合各种技术得到的累积流量, (a) 图中粗实线是微月坑分析结果, 细实线是近地模型, 右下虚线是 Alvarez 对穿透资料的结果, 左上断折线是流星体技术卫星 (MTS) 得到的最大流量^[8]; (b) 图包括对较大流星体的各种结果: a. 黄道光, b—f. 雷达流星, g 和 h. 陨石, i. 和 j. 月震, k. 彗星, l. 阿波罗型小行星, m. 小行星, n. 月坑^[5]。Dohnanyi (1973) 用下面双模式微分流量来拟合 1 AU 处各种资料^[5],

$$d\phi(m) = \begin{cases} 3.0 \times 10^{-18} m^{-13/6} dm & 10^{-10} \text{kg} \leq m \leq 1 \text{kg} \\ 1.4 \times 10^{-11} m^{-1.5} dm & m \leq 10^{-10} \text{kg} \end{cases} \quad (4)$$

宇宙尘流量的各结果是有相当差异的, 其原因很多, 如各技术条件的局限性, 选择效应等。尚难肯定流量是否随时间改变。看来, $m < 10^{-11}$ 克的近地宇宙尘增强是肯定的, 这可归因于地

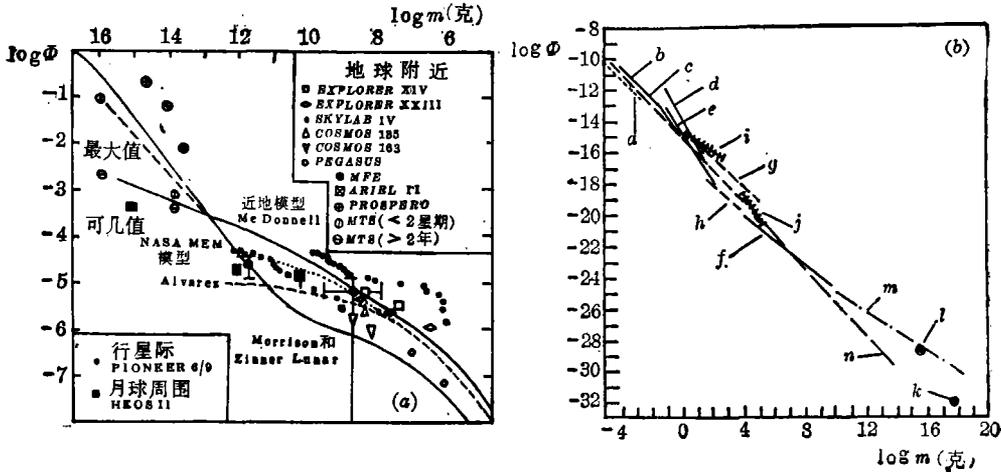


图9. 宇宙尘的累积流量.

球引力场聚焦作用, 以及较大尘粒碎裂为小尘粒.

4. 宇宙尘的质量分布

图9 可得出斜率 $a = -d(\log\phi)/d(\log m)$, 或 $d\phi = -a\phi d(\log m)$. 由此可导出在单位质量间隔内尘粒的总质量

$$\mathcal{M}(m) = m d\phi = a\phi \tag{5}$$

Millman(1975) 得出各质量间隔的尘粒总质量百分比列于表 3^[21], 可见宇宙尘总质量的绝大部分(2/3)在尘粒质量 $10^{-6.5}$ 到 $10^{-2.5}$ 克范围内. 由此还可得出^[21], 在质量范围 10^{-12} 到 10^3 克内, 2π 球面角内行星际总质量为 6.8×10^{13} 克/米²·秒, 这等价于每天地球接收 30 吨宇宙尘; Whipple(1967) 的估算结果约为此值一半, 而 Anders等(1973) 的结果是 7.6×10^{13} . Hughes (1978) 得出每年到地球的流星体总质量 (10^{-13} — 10^6 克范围) 为 16,100 吨, $m < 10^{-2}$ 克的为 15,700 吨/年(43 吨/天)或观测值 3,750 吨/年(10.3 吨/天)^[5].

表3 各质量间隔的尘粒总质量百分比

$\log m$ (克)	-10.5	-9.5	-8.5	-7.5	-6.5	-5.5	-4.5	-3.5	-2.5	-1.5	-0.5	0.5	1.5	2.5	3.5
%	0.1	1	3	8	16	21	18	14	9	5	3	1	0.5	0.2	

5. 宇宙尘数密度随日心距的变化

有许多探测器研究尘粒数密度 n 随日心距 R 的变化^[5], 其中较可靠的结果是: (1) Helios 的黄道光观测得 $n(R) \propto R^{-1.5}$ ($0.08 \text{ AU} < R < 1.5 \text{ AU}$); (2) Pioneer 10 和 11 光学观测得 $n(R) \propto R^{-1}$ ($1 \text{ AU} < R < 3.3 \text{ AU}$), $n(R) \approx 0$ ($R > 3.3 \text{ AU}$). 图 10 中虚线是 Pioneer 10 穿透资料(较大尘粒), 实线是假定尘粒轨道为圆和椭圆时的相应归算结果, 断线是 NASA 模

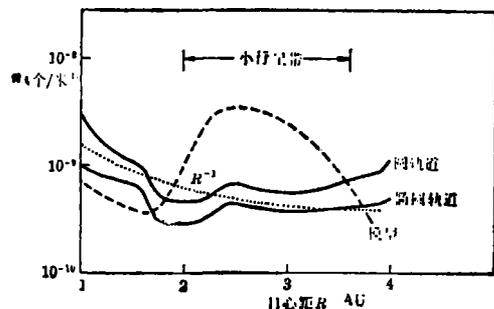


图10. Pioneer 10 穿透资料及其限模型比较.

型。Dohnanyi(1978)给出拟合黄道光资料的另一模型为

$$n(R) = \begin{cases} \text{常数} \times R^{-1.5} & R < 2.3 \text{ AU} \\ \text{常数} \times (R^{-1.5} + 0.13) & 2.3 \text{ AU} \leq R \leq 3.3 \text{ AU} \\ 0 & R > 3.3 \text{ AU} \end{cases} \quad (6)$$

最近(1983)国际红外天文卫星 (IRAS)发现小行星带区域存在尘埃物质环^[11]。各种探测结果有很大差异,其原因之一是各探测的尘粒大小范围不同;还有一个重要结果是尘粒流量的各向异性^[6];地球运动向点方向和太阳方向的小尘粒($m < 10^{-9}$ 克)流量大。前者显然跟地球运动有关;后者跟太阳辐射压(见后)有关,Zook和 Berg(1975)称这种来自太阳方向的高速小尘粒为 β -流星体。

6. 流星体的轨道

虽然空间探测也可用于推求流星体的空间轨道,但精度低,目前流星体轨道大多是从流星观测推算的。Hughes(1978)总结了已观测的雷达流星(12,500个,其中偶现流星9,000个,

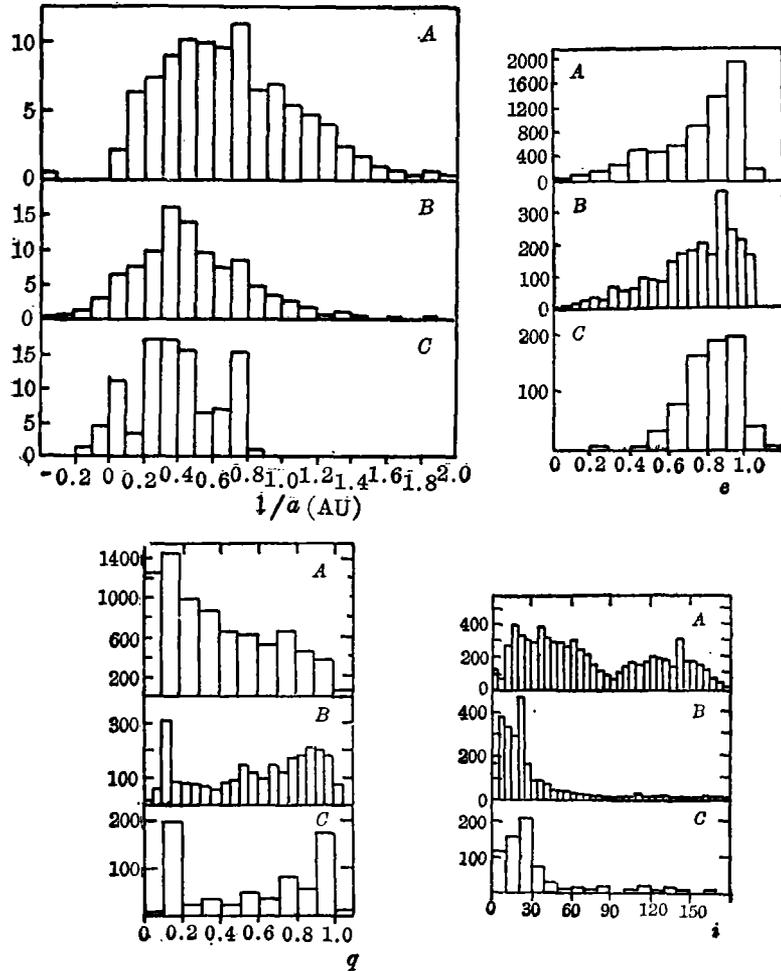


图11. 流星体轨道分布: A. 雷达流星; B. 暗的照相流星; C. 亮的照相流星。

流星雨流星3,500个)和亮、暗照相流星的轨道半长径 a 、倾角 i 、偏心率 e 、近日距 q 的数目分布(图11)^[5],可看出雷达流星与照相流星的轨道分布有差异。Whipple把亮的照相流星轨道分为三组:72%轨道与短周期彗星相似(即 $a \leq 5\text{AU}$, $i < 35^\circ$, $e > 0.7$),18%轨道与长周期彗星相似(a 很大, $e \sim 1$, i 随机),10%为小行星型轨道^[5]。暗的照相流星轨道也如此。但雷达流星(尘粒质量小)轨道则不同,可分为两组:一组的轨道 i 随机分布(大多在 $i = 30^\circ - 165^\circ$,此范围外的数目很快减少), q 均匀分布从 $e = 0.1$ 到1的数目系统地增加;另一组的 i 小, $a \leq 3\text{AU}$, $q < 0.2$, $e > 0.7$ 。大多数偶现流星和少数流星雨流星属前一组,而大多数流星雨流星和少数偶现流星属后一组^[5]。图12是流星体的远日距分布^[5],若不计双子座流星群,照相流星与Prairie Network火流星的远日距分布相似,分布峰约4AU,而短周期彗星的峰在木星轨道附近,很可能照相流星和火流星来自彗星,因为木星摄动在一千年就使远日距近木星的轨道变为很不同的轨道。射电流星远日距分布在1AU的峰,是由于相应小尘粒被地球俘获的概率大。

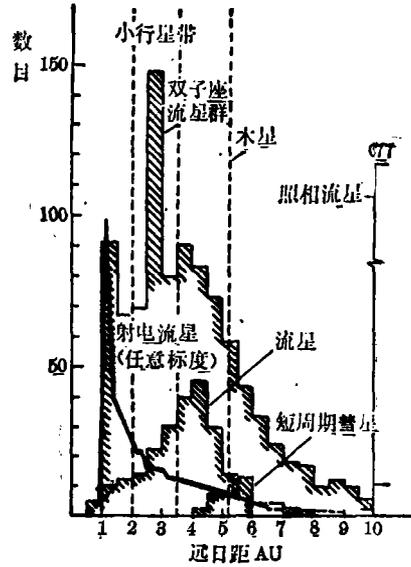


图12. 流星体的轨道远日距分布。

7. 宇宙尘的动力学问题^[5]

除了太阳引力和大行星摄动外,宇宙尘还受到较大的其他作用,因而其轨道演化是很大的,具体分析也是复杂困难的,这里仅评述几个动力学问题。

(1) 行星的引力聚焦

不计行星引力场时,若尘粒数密度为 n_∞ ,相对行星的速度为 v_∞ ,则尘粒流量为 $\phi = n_\infty v_\infty$ 。在行星引力场中, $v = v_\infty (1 + v_e^2/v_\infty^2)$, v_e 为逃逸速度,因而流量增大 $(1 + v_e^2/v_\infty^2)$ 倍。在地球附近,质量 $10^{-7} - 10^{-11}$ 克尘粒流量增大2倍左右,而 10^{-15} 克以下尘粒的流量增大2个量级以上,在木星附近也测到 10^{-10} 克尘粒流量增大2个量级。月球引力场弱,聚焦作用不大,但由于月球无大气,陨击抛出的小尘粒可逃离月球引力场,已探测到月球附近 $10^{-12} - 10^{-14}$ 尘粒流量增大, Alexander和 Corbin(1980)推算有80%月球抛出物进入地球磁层,20%进入地球大气^[4]。

(2) 太阳辐射压斥力^{[4], [5]}

半径 s 的尘粒受太阳辐射压斥力为,

$$f_r = \frac{\pi s^2}{c} \cdot \frac{L_\odot}{4\pi R^2} Q_r \quad (7)$$

其中, c 为光速, L_\odot 为太阳辐射功率, Q_r 为转移给尘粒的动量系数(对理想黑体球, $Q_r = 1$, 对全反射平面, $Q_r = 2$)。辐射压斥力 f_r 与太阳引力 f_g 之比为

$$\beta = f_r/f_g = 5.73 \times 10^{-5} (s\rho)^{-1} Q_r \quad (8)$$

式中, ρ 为尘粒物质密度。 f_r 与 f_g 方向相反, 等效于太阳引力减小 $(1-\beta)$ 倍。若取 $\rho=3$ 克/厘米³ 和 $Q_r=1$, 则 $s < 1.9 \times 10^{-5}$ 厘米时, $\beta > 1$, 这样尘粒必然被辐射压排斥出太阳系。但是, 当 s 与辐射波长接近时, 上式不成立, 因为衍射效应起重要作用。图 13 给出安山岩 (Andesite)、黑曜岩 (Obsidian) 和水 (冰) 小球粒的 β - s 关系^[5], 图中也画出理想黑体球的相应 β 值。当尘粒大小或质量改变时, 其 β 值改变, 因而受太阳有效引力改变, 导致轨道变化。如果只计及太阳引力和辐射压斥力, 那么尘粒从太阳系逃逸速度为 $v_e = [2(1-\beta)GM_0/R]^{1/2}$ 。对于 $m < 10^{-10}$ 克尘粒, 若其密度 ρ 大, β 值则变小, 比起 ρ 小的尘粒来, 它们不被辐射压斥走, 因而较多, 这可说明微月坑主要是富铁微陨石撞击形成的, 也可说明来自太阳方向的 β 流星体的流量大。

(3) 坡印廷-罗伯逊效应 (Poynting-Robertson effect)^{[4], [5]}

绕太阳运行的尘粒受到的辐射压不同于上面相对静止尘粒情况, 因为存在多普勒效应。若尘粒运动速度的径向和切向分量分别为 v_r 和 v_t , 则辐射压的径向和切向分量分别为 $-f_r(1-2v_r/c)$ 和 $-f_r v_t/c$, 结果尘粒绕螺旋轨道落向太阳, 这称为坡印廷-罗伯逊效应。若尘粒最初在近日距 q 、偏心率 e 的轨道上, 则它的降落时间为^[5]

$$t = 7 \times 10^5 s \rho q^2 Q_r E(e) \text{ (年)} \quad (9)$$

对 $e=0, 0.5, 0.75, 0.9$ 和 0.99 , 函数 $E(e)$ 值分别为 1、2.73、5.28、10.4 和 41.3; 对 1 AU 处圆轨道上的 $s=0.1$ 厘米、 $\rho=3$ 克/厘米³ 尘粒, $t=2 \times 10^6$ 年。

太阳风粒子对尘粒也有类似于辐射压的作用, 但因太阳风粒子速度远比光速小, 其作用也小。然而太阳风与太阳共转、有切向分速度 ($R=1$ AU 处约 12 公里/秒), 若尘粒在远日点的 v_t 比该处太阳风切向速度小, 则顺行尘粒被加速^[5]。此外, 太阳辐射可使尘粒带静电势, 它们会受太阳风磁场作用而改变轨道 (如 Grün 等, 1980)^[4]。

(4) 碰撞效应^[5]

行星际物体可能发生碰撞, 产生撞击坑、碎裂及蒸发。两物体 (弹、靶) 碰撞有三种情况: (i) 若弹比靶小得多, 撞击所产生激波在靶内耗散, 结果在靶上形成撞击坑并抛出物质, 这是剥蚀碰撞; (ii) 若弹较大, 激波可达靶的背面, 靶的受撞面和背面都会抛出物质; (iii) 若弹很大和撞击速度大, 靶外层破碎, 仅留下小核心部, 这是灾难碰撞。在剥蚀碰撞中, 抛出质量和最大碎块质量都跟碰撞速度及弹、靶的物质性质有关; 若靶为岩石质的, 各碎块的质量分布函数大致为 $g(m) \propto m^{-1.8}$ 。碰撞将改变宇宙尘的质量分布, 只有存在补充源时才能达到定态 (如 4 式) 分布。

(5) 尘粒寿命^[5]

在碰撞效应、坡印廷-罗伯逊效应及太阳风粒子溅射作用 (sputtering) 下, 尘粒的寿命有

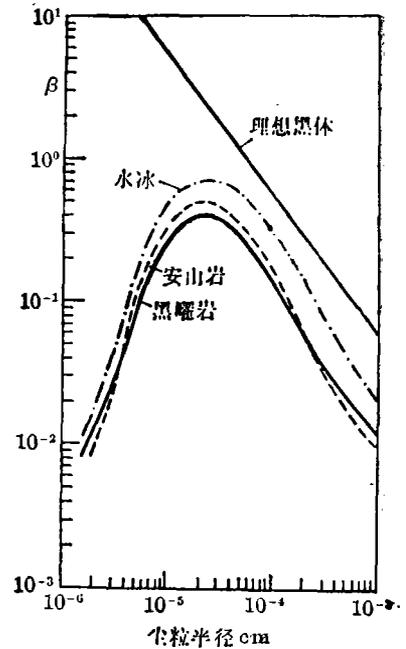


图 13. 几种矿物小粒的 β - s 关系。

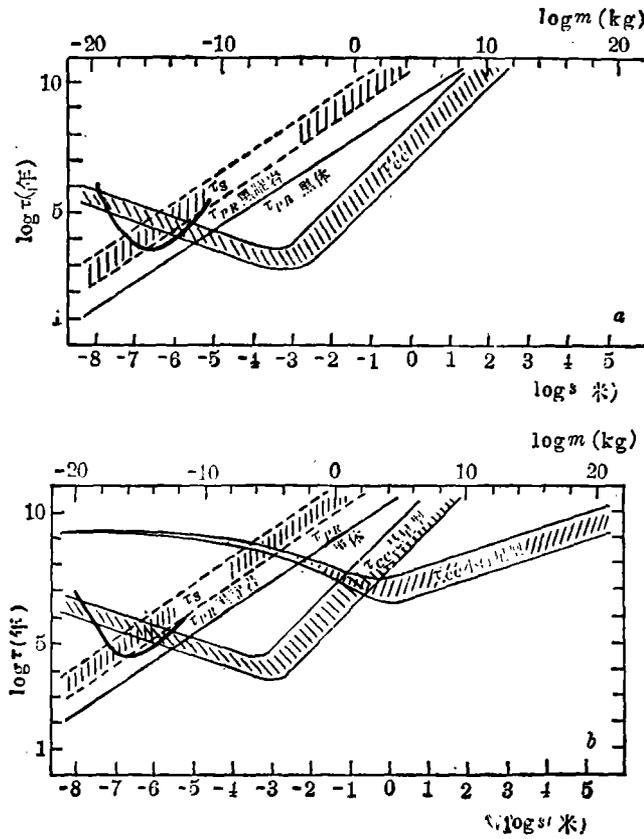


图14. 尘粒的寿命 a. 1 AU; b. 小行星带.

限。尘粒寿命的计算是复杂困难的。图14a和b分别给出日心距 1 AU 和小行星带处几种效应导致的尘粒寿命 τ 与其半径(质量)的关系。在日心距 1 AU 处, $m > 10^{-12}$ 千克(几微米)以上尘粒的寿命主要由灾难碰撞寿命 τ_c 决定, 微米以下尘粒的寿命也跟坡印廷-罗伯逊效应寿命 τ_{PR} 有关, 亚微米以下尘粒溅射寿命 τ_s 变为重要的。在小行星带也有类似情况(但 τ_c 分别对彗星型和小行星型尘粒给出)。

(6) 自转效应^[51]

由于碰撞及辐射压的不对称性而施力矩作用, 尘粒会自转。由于碰撞的随机性, 尘粒自转角速度矢量 $\vec{\omega}$ 也随机改变, 直到自转很快、发生不稳定而破坏。Dohnanyi (1976) 得到尘粒自转分布为

$$f(\omega, m) d\omega dm = (15/2) [\omega_s(m)]^{-5} f_1(m) dm [\omega_s^2(m) - \omega^2] \omega^2 d\omega \quad (10)$$

式中, $\omega_s(m)$ 是作为质量函数的尘粒未(自转)破坏的最大自转角速度, $0 \leq \omega \leq \omega_s$ 。尘粒自转定态分布的最可几角速度为, $\omega = \omega_s(m) / \sqrt{2}$ 。自转可导致尘粒灾难碰撞寿命变小。辐射压对自转作用犹如风车, 使自转轴总朝光线方向, 若不计其他力矩, 辐射压会一直加速尘粒自转, 直到不稳定破坏, 但尘粒的导磁率等因素可阻尼自转。

若自转的尘粒表面温度分布不均匀, 其热辐射也不对称, 这等效于轨道运动中坡印廷-罗

伯逊效应改变。Yarkovsky 和 Radzievski 各自独立地提出这种影响, 常称为 Radzievski 效应, 后者导出尘粒从 R_0 (AU) 改变到 R 的时间为

$$t = 9 \times 10^5 \frac{s \rho^{3/7}}{p^{1/2}} (R^3 - R_0^3) \text{ 年} \quad (11)$$

其中, p (秒) 为尘粒自转周期, s (米) 和 ρ (克/厘米³) 为其半径和密度。可见, 对自转快的小尘粒此效应是重要的。

8. 宇宙尘的源

前面看到尘粒寿命远小于太阳系年龄(46 亿年), 现在观测结果表明至少近 10^5 — 10^6 年尘粒流量无显著变化, 因此宇宙尘必然有源来补充。对源的问题已有一些探讨, 源的可能候选者有彗星、小行星和月球, 以及恒星际来的宇宙尘^{[4], [5]}。但主要源是什么? 它对宇宙尘的贡献是多大? 作为源的母体提供宇宙尘的重要机制是什么? ……对这些问题仍有争议。已提出母体放出尘粒的机制有^[5]: 蒸发外流气体的曳引、撞击抛射和碎裂、自转或潮汐破碎、静电破碎、火山活动等, 不同机制决定了放出尘粒的大小分布、频数、轨道分布及化学成分等方面是不同的。母体放出尘粒的唯一观测依据是彗星蒸发出含尘彗发和尘埃彗尾, 一般认为放出尘粒机制是蒸发气体曳引出尘粒, 但也不排除撞击及静电等作用^[6-7]。

流星群与母彗星的轨道相似证明其演化关系^{[1], [5]}; 低密度、富挥发物的尘粒性质也说明它们来自彗星。偶现流星与流星雨流星的性质无显著差异, 这说明彗星也是偶现流星的重要源, 但是有些密度较高的大宇宙尘未必来自彗星^{[2], [5]}。从彗星的尘埃产额、尘粒大小分布和寿命的估计表明^[5], 短周期彗星仅能提供宇宙尘总质量的 2—3%。从动力学观点出发, Kresak (1980) 计算了彗星尘演化, 得出的结论是: 各种公转周期的活动彗星不仅不足以提供宇宙尘的数量, 而且也不能说明宇宙尘的轨道分布^[4]。他还指出, 虽然 Apollo 型小行星与大多数流星体的动力学性质相似, 但不会是低密度流星体的源。富挥发物的碳质小行星碎裂为宇宙尘, 但也有困难。几个特殊母体(如, 2060 号小行星 Chiron、掠日彗星) 可能提供大部分宇宙尘, 这也可以跟彗星及小行星分布、偶现流星的季节变化及流星群情况自洽, 但此观点将导致宇宙尘流量在 10^4 — 10^5 年明显改变, 从而与观测基本不变又有矛盾^[4]。笔者从演化关系讨论也得出^[9], 大多数较小的宇宙尘主要来自彗星, 而较大的流星体可能来自小行星一类母体的碎裂。现在的流星体(尤其小的尘粒) 不会是太阳系早期遗留下的。Pioneer 探测到绝大多数 10^{-10} — 10^{-13} 克尘粒轨道是顺行的, McDonnell 等由此估计来自恒星际的尘粒不会超过 5%^[5]。总之, 定性地可认为宇宙尘的来源主要是彗星, 其次是小行星, 但定量计算还有困难, 需要更多的观测资料和实验及理论研究, 包括本文未论述的彗星、小行星、行星环及陨石等研究。

参 考 文 献

- [1] Hemenway, C. L. et al. (eds.), *Evolutionary and Physical Properties of Meteoroids*, NASA SP-319, (1973).
- [2] Field, G. B. and Cameron, A. G. W. (eds.), *The Dusty Universe*, Neale Watson Academic Publications, Inc., (1975).
- [3] Elsässer, H. and Fichtig, H. (eds.), *Interplanetary Dust and Zodiacal Light (Lecture Notes in Physics, 48)*, Springer-Verlag, (1976).

- [4] Halliday, I. and McIntosh, B. A. (eds.), *Solid Particles in the Solar System* (IAU Symposium, No. 90), D. Reidel Publishing Company, (1980).
- [5] McDonnell, J. A. M. (ed.), *Cosmic Dust*, John Wiley & Sons., (1980).
- [6] McDonnell, J. A. M., *Nature*, 309 (1984), 237.
- [7] Brandt, J. C. and Capman, R. D., *Introduction to Comets*, Cambridge University Press, (1981).
- [8] Ponnamperna, C. (ed.), *Comets and the Origin of Life*, D. Reidel Publishing Company, (1981).
- [9] 胡中为, 宣家余, *空间科学学报*, 2 (1982), 111.
- [10] *Transactions of the IAU, Vol. XVIII* (1982), *Reports on Astronomy*, D. Reidel Publishing Company.
- [11] 王思潮, *自然杂志*, 7 (1984), 747.
- [12] 第二次全国陨石学、空间化学和空间地质学学术讨论会论文摘要汇编(1984).

(责任编辑 谢应纯)

Cosmic Dust

Hu Zhongwei

(Department of Astronomy, Nanjing University)

Abstract

Cosmic Dust has been in hot pursuit in recent years by researchers in astronomy, space science as well as in many other subjects. The work is important not only because it reveals some basic problems concerning cosmic mass process and the formation and evolution of the solar system, but also involves practical significance. Due to the application of modern space probe and experimental techniques and their theories, great progress has been made on investigation of cosmic dust. In this paper, some of the progress and major results in researching interplanetary dust are briefly reviewed. The first part of this paper relates briefly some methods used in and available data from the research of cosmic dust, including observations of the zodiacal light, meteor observations, sampling of cosmic dust, the in-situ detection in space and microcraters on lunar surface. The second part summarizes and reviews main results of the research including density, chemical composition and structure of cosmic dust, the flux, spatial distribution, mass distribution and orbital distribution of cosmic dust, some dynamical problems and the sources of cosmic dust.