

行星际尘埃的研究进展

马 月 华

(中国科学院紫金山天文台 南京 210008)

摘 要

宇宙尘物质是太阳系最原始的考古样品,比陨星更具有太阳系初始物质的特性,其整体成分更能代表太阳星云的初始丰度和同位素特征。初步综述了目前国内外对宇宙尘的探测、捕集和研究现状以及最新研究进展。

关键词 宇宙尘: 行星际尘埃 — 仪器: 探测器 — 方法: 数据分析

分类号: P185.9

1 引 言

宇宙尘埃通常是指地球之外起源的微粒物质。从远红外和毫米波的观测可知:在行星际、恒星间、星系内部存在着大量的尘埃。在太阳系范围内称为行星际尘埃。行星际尘埃是人类目前能获得的三种地外物质(月岩、陨星、宇宙尘)中的一种,它是远比月岩、陨星更能提供复杂、丰富信息的天体样品。行星际尘埃是地球的物质来源之一,经统计,自元古代以来的地层中均发现有行星际尘埃;现代每年大约有 5 万吨地外物质降落到地球上^[1]。

行星际空间的尘埃物质由于较大天体的俘获与沉降、尘粒间的相互碰撞而不断消耗,其寿命小于 10^5 yr^[2]。因此,现在的行星际尘埃不可能是原始的,应该存在给予其连续补充的来源。彗星就是行星际尘埃的主要来源,彗星的本体是冻结的冰和尘^[3-5],目前虽然还没有彗星内部化学成分的确切资料,但从彗核分裂等观测资料推断,其内部在大尺度上较为均匀。由于彗星形成和长期运行于太阳系寒冷的外部,其内部很少发生演化,从而可较好地保留太阳系原始物质的状态。从彗星的观测证据估计,除少数挥发性元素(氢、碳、氮)外,彗星的元素丰度应与宇宙丰度相同^[6]。当彗星运行到离太阳较近时,受到较强的太阳辐射作用,就从表面蒸发出气体和尘埃,形成彗发、彗尾,并把气体和尘埃散失到行星际空间,因此,行星际尘埃是研究彗星的组成和演化历史的重要资料。小行星是绕太阳运行的固态小天体,由于其轨道的差异而产生碰撞、瓦解甚至碎裂,陨星可能是其很小的碰撞碎块^[7]。小行星的碰撞和彗星的退变瓦解形成的行星际尘粒,然后再碰撞演化,成为行星际尘埃,大量行星际尘埃进入大气层形成壮观的流星雨。月球的演化程度较差,具有一些太阳系早期行星及卫星状况的信息。行星喷发会把其表面下深层的较原始物质抛射出来成为行星际尘埃。另外,太阳系

形成时遗留的原始太阳星云、新星和超新星爆发的产物以及太阳系穿过浓密的星际云时俘获的少部分恒星际尘埃都可能成为行星际尘埃。

由于宇宙尘不象行星、卫星或小行星那样经历过一个热变质阶段,也没有所谓的岩浆过程和增生过程,所以能较多地保留太阳系形成时的原始信息,即原始的元素成分、同位素丰度和原始太阳星云环境条件。行星际尘埃中的矿物是太阳星云直接凝聚的产物,具有太阳系初始物质的特性,它保留着原始太阳星云中的物理和化学信息,它与当代前沿学科的研究,特别是天体的演化和生命的起源,有着极为密切的关系。近年来,宇宙尘的研究表明,它不仅含有丰富的 Si、Fe、Mg、S、Ca、Cr 等元素,而且还含有丰富的 CH、OH、CH₂、NH₂、H₂O 等生命前物质。生命起源问题的研究表明,早期“生命”所需要的有机物质来自陨星和宇宙尘。在星际云和太阳系中存在着大量的有机分子,对哈雷彗星的观测也表明,其尘埃中存在着 CH、OH、CO₂、NH₂ 等有机分子^[8],因此,宇宙尘不仅是天体的“细胞”,也是生命前物质的载体,研究宇宙尘,有助于我们了解太阳系及其成员的早期状况,能为进一步认识天体的演化、太阳系的起源、生命的起源甚至探索基本粒子提供有价值的科学资料。

2 行星际尘埃的探测

行星际尘埃样品可广泛地从行星际空间、高空大气、地表、古地层、海底沉积物以及极冰中收集到。

目前利用卫星或宇宙飞船携带的探测器在太空中对行星际尘埃探测的范围是 0.3AU 到 18AU^[9],这种方法可实地得到行星际尘埃的空间轨道、分布、通量大小和物质组成等资料。现有的在宇宙飞船和卫星上使用的行星际尘埃探测器可分为两类:冲击电离探测器和穿透探测器。冲击电离探测器所能探测到的最小的尘埃粒子的质量为 10^{-16}g ,但其有效探测面积仅为 0.01m^2 ;多在太阳系较外部运行的先锋 10 号和先锋 11 号宇宙飞船携带的穿透探测器^[10],其接受面是用不锈钢箔制成的,有效探测面积较大,但只能探测到质量大于 10^{-9}g 的尘埃粒子。由于宇宙尘粒子相对于探测器的速度(典型值为 $20\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$)较大,在冲击过程中宇宙尘粒子部分熔融、气化,初始性质会受到一定程度的破坏,这样,挥发成分将部分或全部挥发掉,而这些低原子序数的元素是研究太阳系起源,天体演化非常重要的资料,且行星际空间尘埃粒子的通量很小($10\mu\text{m}$ 的约 $1\text{个}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$, $100\mu\text{m}$ 的约 $1\text{个}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{yr}^{-1}$),一般只能在接受面上的撞击坑中收集到少量的残留物,根据粒子冲击形成的微坑,测量其深度直径比,可计算尘埃通量和大小分布、形状和物质密度。分析冲击微坑中的残余物,可了解粒子的成分。美国于 1984 年发射的 Long Duration Exposure Facility (LDEF) 低轨道卫星^[11],在太空运行了 69 个月,1990 年 1 月回收。它具有在太空暴露时间长、有效探测面积大的特点,主要用于分析尘埃粒子和空间碎片的积分通量。

在大气中采集宇宙尘样品是利用气球和高空飞机。早期史密松天体物理台在气球上放置板状收集器进行尘埃采样工作,以后 Dudley 天文台发展了几种尘埃收集器在气球上进行宇宙尘采样工作。现在利用气球进行宇宙尘采样工作的国家很多,80 年代中期中国科学院地球化学研究所在北京利用气球进行了宇宙尘的采样工作。1958 年 Hodge 和 Rinehart^[12]最早在高空飞机上进行了宇宙尘采样工作;1974 年 Brownlee 等人^[13]采用碰撞收集技术由 U-2 飞机在高度为 20km 的平流层中进行了采样。从 80 年代起,美国 NASA 研究小组利用 U-2 和

ER-2 高空飞机收集平流层的尘埃和宇宙尘物质, 把收集到的样品提供给各国科学家作对比研究。

在大气中收集的优点是大气对宇宙尘有减速作用, 它们以非常低的速度下落, 对于线度小于 10μ 大小的尘粒, 其数密度约为空间尘埃数密度的 10^6 倍。这样的高数密度 (约 10^{-3} 颗 $\cdot m^{-3}$) 和低速度的尘粒容易收集, 它的缺点是严重受地球物质污染和受大气磨擦加热而失去易挥发性物质。

海底沉积物中含有很高浓度的消融型宇宙尘, 并且它们远离大陆, 没有工业污染。80 年代我国一批科学家对我国沿海大陆架和深海沉积物中的宇宙尘球粒作了系统的粒度、表面形态、内部结构、矿物成份和化学成份的研究。但深海尘粒样品中也夹带着地球上的尘粒。

地表、古地层以及极冰中收集到的宇宙尘是宇宙尘样品的重要来源之一。成功的例子是从格陵兰冰冠消融带的“蓝湖”沉积物中收集到的宇宙尘^[14], 我国在元古代变质岩、震旦纪石英岩及古生代、中生代的地层, 甚至在花岗岩中均发现过消融型磁性宇宙尘球粒^[15]。

3 行星际尘埃的分析研究

行星际尘埃的研究历史, 可追溯到上个世纪。早在 1863 年 Cassini 就已正确解释了黄道光 是围绕太阳运行的尘埃粒子对太阳光的散射光^[9]。但真正的科学研究始于本世纪 50 年代。60 年代以来, 宇宙尘的研究进入高潮, 各国学者对深海沉积物中的宇宙尘进行了详细、系统的研究, 同时, 还对地表沉积物, 如冰雪和湖相沉积物的宇宙尘甚至地层中记录的地质历史时期的宇宙尘进行了大量的调查和研究, 并进行了宇宙尘通过大气层的模拟实验研究。

研究的方法有: 从研究黄道光的亮度、偏振和光谱可知尘埃粒子的大小、密度、分布成分等; 通过对黄道光的观测分析建立的行星际尘埃云的空间分布模型, 可描述尘埃粒子的大小范围为 $1-100\mu m$; Mann 等人讨论了辐射压力对不同大小和不同组成成分的粒子的影响, 并把结果与此模型进行了比较^[16], 结果较令人满意。近年来, 建立起来的宇宙尘动力学模型^[9,17,18], 在假设尘埃云是旋转对称的前提下 (这一假设与观测结果相当符合), 只考虑太阳的引力就可给出尘埃云的数密度在空间的分布为:

$$N(r, \lambda) = \frac{(1-e)^{3/2}}{2\pi^3 r r_1 \sqrt{(r-r_1)[(1+e)r_1 + (1-e)r(\cos^2 \lambda - \cos^2 i)]}}$$

式中, r 为其到太阳的距离, λ 为其在对称平面 (这里为黄道面) 以上的纬度, r_1 为近日点距离, e 为轨道偏心率, i 为轨道倾角。

另一种方法是直接采样进行分析研究。宇宙尘样品的分析技术有: 中子活化和质子激发 X 射线分析, 分析灵敏度为 $10^{-9}-10^{-15}g$; 激光和离子探针, 可分析 1μ 大小的尘粒; 扫描电子显微镜, 可作 1μ 大小尘粒的形态和结构研究; 透射电子探针, 可分析 $10^{-15}g$ 大小的样品; 还有高分辨率的二次离子谱仪, 质谱分析范围 $1-280u$, 质量分辨率 $200-10^4$ 。中国科学院紫金山天文台 921 项目宇宙尘研究小组已对十几颗来自 NASA Johnson Space Center 的行星际尘埃粒子进行过元素和同位素丰度以及 Raman 谱、宇宙尘模型等多项分析研究, 首次发现行星际尘埃中有锂和硼及其同位素^[19]。由于锂的特殊形成条件, 它的同位素丰度与时间有关, 由此许胤林等研究了太阳星云的形成年代^[20]。

虽然对宇宙尘的研究已有几十年的历史，特别是近 20 年中微束分析技术的发展，取得了许多成果，如分析元素和同位素丰度，用电子探针和扫描电镜分析矿物成分和内部结构，研究其化学成分、成因和年龄等等。但是这些宇宙尘样品主要来自沉积物和 40km 以下的平流层，这些尘埃物质都是原始宇宙尘（微陨星）经地球大气加热熔融后的产物，是经过大气的所谓“选择”，属消融型宇宙尘，它们没有保存宇宙尘的原始形态、结构构造、化学成分等特征，也不能反映宇宙尘的原始通量、原始太阳星云的化学组成和演化过程。

清除环境对样品的污染也是宇宙尘采样研究工作中最困难的问题之一。处理污染问题的方法是先用肥皂水、清洁液清洗，再用过滤水或蒸馏水冲洗或用酒精、氟利昂等清洗，但效果都不理想。最好是尽可能采集不沾或少沾污染的样品。

4 最新进展

现在宇宙尘研究的关键问题是如何采集到较原始的受污染程度尽可能轻的尘埃粒子。按照这种思路，我们设计并研制的宇宙尘和空间碎片捕集器^[21]，使尘埃粒子进入捕集器后通过的路径大大加长，且用于接收粒子的物质的密度较低，能使粒子缓慢减速，克服了尘埃粒子撞击在探测器上速度骤减的缺点，这样，在捕集过程中粒子经受的温度较低，挥发成分失去较少，能较好地保留尘埃的原有物质，并把它们收集下来，这种方法被称之为软捕获法。它还能给出所捕获粒子的积分通量和它们在空间的运动轨道，这将为研究宇宙尘起源提供珍贵的天体样品。

随着航天活动的频繁，近年来多次发生过空间飞行体被碎片撞击事件。我们的捕集器能自然收集到碎片，并得出这些碎片的积分通量和轨道，利用国外已有的研究成果，就可建立碎片的空间模型，从而为航天器的安全飞行提供依据。

我们研制的捕集器的另一优点是捕获的粒子受到的污染很少，物质蒸发也较少，没有接触过硅油（来自 NASA 的宇宙尘粒子是粘在硅油中），这样，我们就可探测宇宙尘中的有机分子被打破后的大分子碎片。

此捕集器定于 1998 年在美国航天飞机上搭载上天。

致谢 本工作得到许胤林老师的帮助和指导，特致谢意。

参 考 文 献

- 1 欧阳自远. 天体化学, 北京: 科学出版社, 1988. 273
- 2 Dohnanyi J S. In: McDonnell J A M ed. Cosmic Dust. New York: John Wiley & Sons, 1980, 527
- 3 Wilkening T L. Comets, Arizona: University of Arizona Press, 1982
- 4 Swamy K S K. Physics of Comets, Singapore: World Scientific Publishing Co. Ptz. Ltd. 1986
- 5 Mendis D A et al. Fundam. Cosmic Phys., 1985, 10: 1
- 6 胡中为, 徐伟彪. 紫金山天文台台刊, 1989, 8: 109
- 7 胡中为, 宜家余. 空间科学学报, 1984, 2: 111
- 8 Kissel J et al. Nature, 1986, 321: 336
- 9 Grun E. 紫金山天文台台刊, 1996, 15(3): 180
- 10 Humes D H. J. Geophys. Res., 1985, 85: 5841

- 11 Zolensky M E *et al.* In: Zolensky M E, Rietmeijer F J M, Flynn G J eds. AIP Conference Proceedings 310, Analysis of Interplanetary Dust, NASA/LPI Workshop, Houston, TX, 1993, New York: American Institute of Physics, 1994: 291
- 12 Hodge P W *et al.* A.J., 1958, 63: 307
- 13 Brownlee D E *et al.* NASA, 1974, Sp-319: 291
- 14 Maurette M *et al.* Science, 1986, 233: 869
- 15 Wang E K, Wan Q Y *et al.* Chinese Science Bulletin, 1993, 38: 1652
- 16 Mann I, Wilck M, Grun E. In: Gustafson B A S, Hanner M S eds. ASP Conference Series 104, Physics, Chemistry, and Dynamics of Interplanetary Dust, Gainesvill, Florida, 1995, San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, 1996: 19
- 17 Kessler D, Icarus, 1981, 48: 39
- 18 Grun E, Staubach P. In: Gustafson B A S, Hanner M S eds. ASP Conference Series 104, Physics, Chemistry, and Dynamics of Interplanetary Dust, Gainesvill, Florida, 1995, San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, 1996: 3
- 19 许胤林, 谢 萍, 范章云, 曹永明. 中国科学, A 辑, 1990, 6: 643
- 20 Xu Yinlin, Song Linggen, Zhang Yongxia *et al.* In: Zolensky M E, Rietmeijer F J M, Flynn G J eds. AIP Conference Proceedings 310, Analysis of Interplanetary Dust, NASA/LPI Workshop, Houston, TX, 1993, New York: American Institute of Physics, 1994: 211
- 21 Xu Yinlin, Zhang Heqi, Zhang Nan *et al.* In: Gustafson B A S, Hanner M S eds. ASP Conference Series 104, Physics, Chemistry, and Dynamics of Interplanetary Dust, Gainesvill, Florida, 1995, San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, 1996: 243

Progress in Studies on Interplanetary Dusts

Ma Yuehua

(Purple Mountain Observatory, The Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008)

Abstract

Cosmic dusts are the most primitive archaeological samples in the solar system. They have more characters of original matters of the solar system than meteorites have. Their whole compositions can reflect the primitive abundances and isotopic characters of the solar nebula. In this paper we summarize the exploration, collection and investigation of cosmic dusts at present time, and describe our new studying progress.

Key words cosmic dust: interplanetary dust—instrumentation: detectors—methods: data analysis