

陨石、流星体与小行星及彗星的演化关系

胡中为

宣家余

(南京大学天文系)

(中国科学院云南天文台)

一、引言

小行星、彗星和流星体 (meteoroid) 都是绕太阳公转的小天体。它们只是在轨道特性和物理-化学性质方面有所不同。流星体泛指在行星际空间运行的、质量从 10^{-16} 克微流星体或微尘到 10^8 克的所有小天体, 当它们闯入地球大气时与大气剧烈碰撞而产生发光的流星 (meteor) 现象, 落到地面的流星体残余则称为陨石或陨星 (meteorite)。

小天体研究是近来最活跃的科学领域之一, 不仅对于宇宙航行, 而且对于太阳系起源和演化都具有重要意义^[1-8]。一方面, 地球等大行星在形成以来的漫长历史中已发生了显著地质变化, 很难了解它们的形成和早期演化情况, 然而, 小天体的地质演变却很少, 保留着较多的早期信息; 另一方面, 大行星的轨道是较稳定的, 而小天体轨道往往在短时期内就有显著变化, 伴随有碎裂演化。在某种意义上说, 小天体代表着原始星云演化为行星的中间阶段, 为研究大行星的起源和早期演化提供线索。许多观测和实验资料表明, 流星体和陨石大多不是在太阳系早期就单独存在的, 而是在后来演化中从某种母体瓦解出来的。然而, 关于流星体和陨石的母体问题, 至今仍未定论。本文试从太阳系形成演化的总过程^[9,10]、结合流星体和陨石资料, 来探讨一下流星体、陨石与小行星及彗星的演化关系。

二、小行星和彗星的起源

为便于后面的论述, 先概述我们对于小行星和彗星起源研究得出的一些结论。我们认为, 小天体的形成演化是太阳系形成演化总过程的必然结果, 仅仅是由于它们所处的具体环境条件才导致它们的特殊性质。

通过定量计算分析, 我们论证了小行星是星子聚集形成行星的“半成品”^[11]。星云盘的温度分布等条件决定了小行星区到木星区是冰物质从不凝聚到凝聚的过渡区。在小行星区, 只有土物质凝聚, 而木星区还有冰物质依次凝聚。这些凝聚为固态的可吸积物质成为形成星子的主要原料。由于木星区多了固态冰物质, 最初就形成较大星子, 而且它们生长快。当木星区大星子生长到相当大时, 彼此摄动和相遇而改变轨道, 使一部分大星子轨道变为穿过小行星区。计算得出, 当木星区内侧大星子生长到 10^{25} — 10^{26} 克时, 就会有部分这样的大星子轨道变为穿过小行星区, 而当时小行星区最大星子生长不到 10^{24} 克。因此,

小行星区的可吸积物质(以至星子)可以被来自木星区的大星子吸积,并带到木星区,最终聚集到木星上。于是,由于小行星区的可吸积物质减少,那里星子生长便停顿于“半成品”状态,而不会长成大行星。事实上,最大的一号小行星(谷神星)质量只有 $(1.17 \pm 0.06) \times 10^{24}$ 克,仅略大于上述计算值(10^{24} 克),说明我们的论点是正确的。从木星区过来的大星子也摄动小行星区的残存星子,使它们的随机相对速度增大(今天观测值为 5 公里·秒⁻¹),这样的星子更容易发生碰撞并导致碎裂,造成现在小行星的质量谱和轨道多样化。^[12,13]

彗星主要在太阳系外部低温区、由土物质和冰物质聚集形成,因而,它们的基本性质相似。

小行星和彗星的形成环境条件不同,导致它们的物理-化学性质、轨道特性及演化情况的不同。^[14]小行星由土物质组成,在轨道演化中伴随着碰撞碎裂,而彗星则由土物质和冰物质两种物质组成,当它们走近太阳时蒸发出气体并带出尘粒,出现彗发和彗尾,不断地把物质散失掉,以至最后全部瓦解。

三、陨石与小行星及彗星的演化关系

关于陨石的起源或来源,已提出多种看法^[3,15,16],主要有:(1)起源于地球,例如,猛烈火山喷出物抛到空间,形成陨石后又落下来;(2)起源于月球、其他大行星或卫星;(3)起源于小行星;(4)起源于彗星。前两类看法被许多证据否定了,后两类看法证据较多,但仍有一些问题须深入探讨。

陨石的宇宙线暴露年龄一般为 10^6 — 10^8 年,而形成年龄都在 45.7 亿年左右^[5],这表明陨石是由母体经受一次或多次碎裂事件而分离出来的。由陨石的气体保留年龄及冷却率等资料分析得出,陨石母体的半径为 10—500 公里^[5],这与小行星的大小相当,而大于彗核(一般小于几公里^[4])。从化学组成类型来说,小行星有七个类型:C类(碳质)、S类(石质或硅酸盐类)、M类(金属)、E类(无金属,顽辉石)、O类(普通球粒陨石类)、T类(Trozan 类,Trojan 未证认组成)和U类(未分类的),前两类数目最多^[4],这与陨石的类型群有较好的对应,而彗星则比C群(碳质)陨石还富含挥发组分^[4]。从化学组成、氧同位素丰度和吸积温度等资料得出各群陨石母体形成部位(日心距)如下^[4]:E群, ≤ 0.7 AU; IAB群, ≤ 1 AU; O群(H. L. LL. 群), 2—4 AU; C群, > 5 AU。小行星的轨道分布有S/C数目比随日心距增加而减少的特征,而且 Apollo 型(轨道近日距 $q < 1$ AU)和 Amor 型($q < 1.5$ AU)小行星几乎都是S或O类的。这些事实表明,陨石与小行星有更密切的演化关系。

应当指出,在研究陨石与小行星的演化关系时,往往把现在观测到的小行星作为陨石母体,这是不大妥当的,因为:(1)相应类型的小行星光谱和陨石光谱还存在百分之几的差异^[4];(2)缺乏轨道演化的充分证据。陨石落地前在太阳系空间轨道的资料很少,至今只有三个陨石由天文观测定出了准确的空间轨道,几十个陨石有估算的空间轨道,而且没有找到很好方法来逆推出它们母体的轨道,因而未找到陨石与小行星在轨道演化方面的直接联系。陨石空间轨道与 Apollo-Amor 型小行星轨道有些相似,但也有少数短周期彗

星具有类似轨道,彗星和小行星的轨道都有可能演化到陨石轨道^[17-20],因此,从轨道演化方面来说,尚不能对陨石母体究竟是小行星还是彗星的问题作出肯定结论。

按照上节对小行星起源的论述,我们认为,陨石母体就是小行星之类的残存星子,由于木星区过来的大星子的摄动和相遇作用,这些残存星子的相对速度变为很大,轨道变为多样化,它们更容易发生碰撞碎裂;同时,还伴随有碎屑被较大物体吸积的演化过程。小行星表面可能被碎屑覆盖或吸积一些星云物质,而从母体分裂出来的陨石,由于质量小,不能有效地吸积,而且在通过地球大气过程中其表面层已烧蚀掉了,这样就可以解释小行星与陨石的光谱差异。此外,我们也不完全排除少数陨石(尤其碳质陨石)起源于彗星的可能性。1908年西伯利亚的“通固斯陨石”事件可归结为小彗星穿过地球大气时的爆裂。有些人认为^[4,4],彗星多次走近太阳,大量物质蒸发散失后,其残核成为小行星。但是,按照对彗星起源的论述,大多数彗星形成于土星到海王星这一空间范围,它们必然相当均一地含有大量冰物质,在多次走近太阳后,将会全部瓦解掉,而不会留下较大残核。我们认为,木星区以内的星子含土物质更多,这种星子被抛到太阳系外部,并在那里聚集更多冰物质而演化为彗星,这类彗星返回到太阳系内部受热蒸发后,会留下较大残核,可以演化为小行星或陨石。

陨石的宇宙线暴露年龄分布集中在某些年龄值附近^[5],一般地说,各类群陨石的暴露年龄有如下特征: C 群, $< 1.5 \times 10^6$ 年; 球粒陨石, $< 1 \times 10^7$ 年; 无球粒陨石, $> 1 \times 10^7$ 年, 石铁陨石和铁陨石, $> 2 \times 10^8$ 年。这些特征反映了陨石母体的碎裂事件,表明各类群陨石可能分别来自数目不多的母体,按照上节关于小行星起源的论述,可以对陨石母体-陨石的演化过程作如下说明。由于星云盘的温度分布是向外降低的,地球区到小行星区形成土物质组成的星子,属 S (石质或硅酸盐) 类,而木星区附近形成土物质加一些冰物质组成的星子,属 C (碳质) 类。随着星子的生长,它们之间的摄动和相遇使轨道改变,尤其木星过来的大星子对它们轨道有更大影响,先是改变小行星外侧的星子的轨道,以后逐渐改变小行星区内侧以至火星区星子的轨道,增加这些星子的相对速度和碰撞几率,它们高速碰撞导致碎裂,碎块不仅数量多,而且轨道更多样化,进一步增加碰撞和碎裂几率,依此延续下去。少数残存星子成为陨石母体,其碎裂的部分碎块在一定的轨道演化条件下,走近地球,落到地面成为陨石。同一母体碎裂出来的一些大致有相同的速度碎块,在绕太阳公转一圈(若不遇到其他碰撞)后,又会在母体碎裂处附近再次碰撞(图 1),这就可以说明陨石的暴露年龄分布集中特征以及同类型陨石来自少数母体。不同类群陨石的暴露年龄差异可用不同类型母体的性质差别来说明。例如,碳质类母体比石质类母体更易碰碎,因而碳质类母体碎裂过程可延续时期更长,这导致表征最后碎裂事件的暴露年龄较短(距今更近);某些较大的母体在生长中吸积了较多物质(尤其是小星子),可有较大的引力势能转化为热能,使母体发生热变质甚至部分熔融,形成金属铁镍核或幔,碰撞时从外层碎裂出来的碎块,后来演化为无球粒陨石或石铁陨石,而金属核演化为铁陨石或 M 类小行星。不同岩石型陨石可用它们来自不同母体或母体的不同层次来说明。

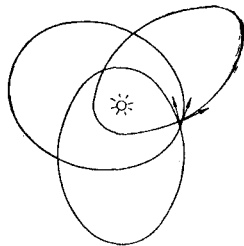


图 1

四、流星体研究的一些结果

近年来,用多种手段来进行流星体研究,图 2 给出了几种主要手段及其所研究的流星体质量范围。下面概述流星体研究的一些结果,并作一些演化关系讨论。

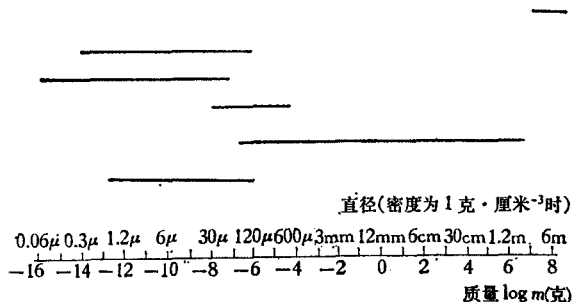


图 2

流星现象的地面观测是研究流星体的一种重要方法。从五十年代末以来,有三个火流星 (fireball) 照相观测站网先后投入经常性光学观测^[6]。即美国的 Prairie 站网、欧洲的捷克-德国站网和加拿大西部的 MOPP 站网。此外,还有一些天文台站作流星的光学观测和雷达观测。观测的主要项目之一是测定流星体的准确轨道,包括

准确地定出陨石的三个空间位置。流星观测也得到流星体的一些性质。从资料统计上,可把质量为 10^{-3} — 10^{+6} 克的流星体划分成不同结构和组成的几类^[4](表 1)。它们的轨道半长径 a 、偏心率 e 和倾角 i 的情况是:除了 D 类($a \geq 3.0\text{AU}$, $e \approx 0.7$) C_2 类($a \approx \infty$, $e \approx 0.99$, i 随机)外,其他类的 a 为 1.0 — 3.0AU 、 e 为 0.6 — 0.9 、 $i < 25^\circ$, 且有大致自上而下次序增加趋势。

综合高空飞机、气球、火箭、人造卫星,以及月球土壤岩石、月震和月坑研究,得到以下结果^[7,8]。

表 1

类	密度(克·厘米 ⁻³)	组 成
“小行星类”或 I.	3.7	普通球粒陨石
A 或 II	2.1	碳质球粒陨石
B	1.0	致密彗核
C_1 或 IIIA	0.6	正常彗星物质
C_2 或 IIIAi	0.6	正常彗星物质
D 或 IIIB	0.2	软的彗星物质 (天龙座流星雨)

1. 质量分布(或质量谱) 质量大于 m 的流星体数目 N 可用幂律关系描述: $N \propto m^{-s}$, $s = 0.5 - 1.4$; 在质量范围 10^{-6} — 1 克内, s 值随 m 减小而减小, 而月岩样品分析显示 s 值向更小质量 (10^{-10} 或 10^{-11} 克) 方向增加。另外,“先锋 10 号”得到日心距 1.5AU 处,对 1 克量级的流星体, s 值较低。

2. 流星体的总质量 Willman 得出, 地球附近 10^{-12} — 10^3 克范围的总质量为 6.8×10^{-13} 克·米⁻²·秒⁻¹ (2π 弧度)⁻¹; Whipple 及 Anders 早先也得到近似结果。各质量范围内的百分比列于表 2。可见,质量主要集中于 10^{-5} 克左右的尘粒。此外,小尘粒的空间密度从 1AU 至 3AU 约增加 2 倍,这可归因于 1.5 — 4AU 区, $m > 10^{-6}$ 克尘粒数目多。

表 2

$\log m(\text{克})$	-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

3. 流星体(本身)的平均密度 见表 3.

表 3

质量范围 $\log m(\text{克})$	-1—+1	-4—-2	-14—-8	< -14
密度(克·厘米 ⁻³)	0.3	0.8	3	> 4?

4. 尘粒的结构和化学组成 收集到的宇宙尘一般都已失去原来结构, 有一种尘粒是绒毛状的(fluffy), 0.1—0.001 微米的微单元构成大到 10—20 微米的整个尘粒, 也有一些微米到亚微米的较密致尘粒; 另一方面, 月岩上的微陨坑形状表明碰撞尘粒一般较圆. 流星光谱分析表明^[4,6,8], 观测为亮流星的流星体(质量 > 1 克), 其元素丰度与一般球粒陨石相似. 某些轻元素可能象碳质陨石一样富集, 而暗流星(1 克左右的流星体)有 1—2% 是纯铁镍型光谱, 有 2% 为贫铁的, 富镁钙光谱. 从收集的宇宙尘等分析表明, 其化学组成更象碳质陨石的组成, 甚至更象富挥发元素的彗星组成.

上述的轨道和物理-化学资料表明, 大多数流星体与彗星有更密切的演化关系, 一般地说, 大多数流星体是彗星瓦解的产物. 事实上, 已观测到几个彗星分裂形成流星雨现象, 例如, 1846 年比拉彗星分裂为二, 彗星消失以后, 当地球穿过比拉彗星原来轨道时, 就出现大流星雨. 至今已确证有十多个流星(体)群的轨道与相应彗星轨道符合, 表明它们有演化关系. 偶发流星与流星雨的流星在平均的物理-化学参数和轨道参数上没有系统差别, 这表明它们都来自彗星.

彗星更富集挥发组分, 彗星的轨道演变更大, 当它们走到太阳系内部, 受太阳辐射和太阳风作用, 蒸发出气体并带出固态物质, 伴随着非引力效应^[21]改变轨道. 彗星的蒸发散失物质以及它们穿过小行星区受到小行星碰撞, 这两种因素导致彗星瓦解, 分出大量流星体散布在行星际空间. 质量很小(< 10^{-14} 克以下)的流星体(宇宙尘), 被太阳辐射斥力及太阳风驱走; 而大些的流星体(质量 10^{-14} — 10^6 克)因坡印廷-罗伯逊效应螺旋式逐渐落向太阳^[9], 形成黄道面附近的尘云, 它散射太阳辐射而作为黄道光被我们看到. 由于彗星是由土物质的尘粒和冰物质颗粒或幔组成, 密度小, 结构较松散, 当冰物质蒸发后, 散失的彗星尘就呈现为多孔和绒毛状的结构. 同时, 也不能排除流星体的其它来源. 一种来源是小行星区残余星子的碰撞碎块, 如上节已述的, 一些这样碎块演化为陨石; 另一种来源是太阳系演化中晚期从恒星际来的宇宙尘^[22], 但不会是太阳系初期残留下的宇宙尘, 因为宇宙尘的大小为 10^{-5} 厘米量级, 由于坡印廷-罗伯逊效应, 这样小尘粒在较短时间就已落到太阳上了.

五、简短的结语

综上所述, 从整个太阳系演化来说, 小行星和彗星都是从原始星云演化到行星的“半

成品”，它们作为残存星子被保留下来，仅仅是因为它们的形成部位和环境条件的不同，导致它们的轨道特性及物理-化学性质不同以及演化情况不同。富含挥发成分的彗星走进太阳系内部，更易瓦解，分出大量流星体；小行星区残余星子也会碰撞碎裂，只是由于它们主要由土物质组成，较之彗星的瓦解程度要小些，这些碰撞碎块和碎屑成为较小的小行星或流星体，实际上很小的小行星与较大的流星体之间并没有严格界限。一些小行星区星子的碎块经轨道演化后，作为陨石落到地球上，而一些彗星瓦解出来的流星体在轨道演化后，与地球相遇，表现为流星现象而烧蚀掉。恒星际的宇宙尘也经常进入太阳系，是流星体的一种次要来源。

参 考 文 献

- [1] Gehrels, T. (ed.), *Physical Studies of Minor Planets*. NASA, 1971.
- [2] Elvius, A. (ed.), *From Plasma to Planets*. Almqvist & Wihzell, 1972.
- [3] Middlehurst, B. M. and Kuiper, G. P. (ed.), *The Moon, Meteorites and Comets. The Solar System V. 5*, Univ. Chicago Press, 1963.
- [4] Delsemme, A. H. (ed.), *Comets, Asteroids, Meteorites*. Univ. Teledo, 1977.
- [5] Dermoft, S. F. (ed.), *The Origin of the Solar System*. John Wiley & Sons, 1978.
- [6] Hemenway, C. L., Millman, P. M. and Cook, A. F. (ed.), *Evolutionary and Physical Properties of Meteoroids*. NASA, 1973.
- [7] Elsasser, H. and Fechtig, H. (ed.), *Interplanetary Dust and Zodiacal Light*, Springer-Verlag, 1976.
- [8] Field, F. G. and Cameron, A. G. W. (ed.), *The Dusty Universe*, Neale Watson Academic Publications, Inc. New York, 1975.
- [9] 戴文赛, 太阳系演化学(上册), 上海科技出版社, 1979.
- [10] 戴文赛, 胡中为, 中国科学, **3**, 254, 1980.
- [11] 戴文赛, 胡中为, 天文学报, **20**, 33, 1979.
- [12] Whipple, F. L. *IAU Symp.*, **45**, 201, 1972.
- [13] 戴文赛, 胡中为, 科学通报, **5**, 215, 1979.
- [14] Safronov, U. S., *IAV Symp.*, **45**, 329, 1972.
- [15] Wasson, J. T., *Meteorites*, Springer-Verlag, 1974.
- [16] McCall, G. J., *Meteorites and their Origin*, Wiley & Sons, 1973.
- [17] Opik, E. J., *Interplanetary Encounters*. Amsterdam Elsevier Scie, pub co. 1976.
- [18] Anders, E., *Space Sci. Rev.*, **3**, 583, 1964.
- [19] Arnold, J. R., *Ap. J.*, **56**, 9, 1965.
- [20] 欧阳自远, 王道德, 谢先德, 吉林陨石雨论文集, 科学出版社, 295, 1979.
- [21] Donn, B. et al. (ed.), *Proc. IAU Colloquium*, No. 25 NASA, 1976.
- [22] Martin, P. G., *Cosmic Dust*, Clarendon Press, Oxford, 1978.

EVOLUTIONARY RELATION BETWEEN METEORITES, METEORIDS AND ASTEROIDS OR COMETS

Hu Zhong-wei

(Department of Astronomy, Nanking University)

Xuan Jia-yu

(Yunnan Observatory, Academia Sinica)

Abstract

In this paper, the evolutionary relation between meteorites, meteoroids and asteroids or comets is discussed in our viewpoint on the origin of asteroids and comets. Both asteroids and comets are the 'half-finished product' of the planets evolved from the primitive nebula, i.e. surviving planetesimals. They show differences in their evolutions, in their orbital characters and their physics-chemical properties only because they form in different places, under different environmental conditions. When volatile-rich comets moved into inner portion of the solar system, they could easily disintegrate into a great number of meteoroids. The surviving planetesimals in the asteroid region could be broken into fragments by collision. Those fragments and crumbs could turn into smaller asteroids or meteoroids. In fact, there is no strict limits between smaller asteroids and bigger meteoroids. Some fragments of planetesimals in the asteroid region would evolve into meteoroids and enter into the atmosphere of the earth, they could then ablaze out as meteors. Cosmic dust, which fell into the solar system from interstellar space, could also become meteoroids.