

# 彗星动力学研究综述

卢仙文

(中国科学院上海天文台 上海 200030)

## 摘 要

彗星是太阳系中天文学的重要研究对象。它涉及到天体物理、化学、天体力学等多种领域。近年的研究表明,彗星可能是揭开太阳系起源和演化之谜的突破口,还可能与生命的起源有关。本文旨在对彗星动力学的发展情况作一简单的回顾和评述。

**关键词** 彗星:一般 — 彗星:奥尔特云 — 彗星:运动学与动力学

**分类号**: P185.81

## 1 引 言

半个世纪以来,天体物理学取得了巨大的发展。相对而言,彗星研究则不为多数天文学家所注意。但八十年代以来,特别是1985—1986年哈雷彗星的回归,激发了人们对彗星的兴趣,使更多的科学家开始关注彗星这一独特的天体。到目前为止,人们已发现并确认了878颗彗星。其中长周期( $P > 200$  yr)彗星694颗,短周期彗星184颗<sup>[1]</sup>。而短周期彗星又可进一步分为哈雷型( $20 \text{ yr} < P < 200 \text{ yr}$ ,共23颗)和木族型( $P < 20 \text{ yr}$ ,共161颗)彗星两种。另一种分类方法则应用蒂塞朗准则。彗星相对木星的蒂塞朗常数为:

$$T = A_j/a + 2\sqrt{a(1-e^2)/A_j \cos i}$$

其中 $a$ 、 $e$ 、 $i$ 分别为彗星轨道的半长径、偏心率、和倾角, $A_j$ 为木星轨道的半长径。几乎所有的木族彗星 $2 < T < 3$ ,而长周期和哈雷型彗星 $T < 2$ 。这说明木族彗星与长周期和哈雷型彗星有绝然不同的动力学特征,它包含着重要的意义,任何关于彗星的起源和演化的理论都必须能解释这些彗星的特征。

近十年的研究表明,彗星可能是唯一幸存的包含了有关太阳系早期信息的天体,是研究解决太阳系形成机制的关键所在,并可能与地球生命的起源有着密切的关系。对彗星的全面研究需要多方面的知识,如不同物理环境下恒星、行星的形成,引力作用下天体的动力学演化等。人们通过观测得到有关彗星的轨道特征和物理、化学成份等方面的资料,用以研究彗星的结构、起源和演化,并试图以此为契机,揭开太阳系早期形成机制乃至生命起源之谜。由于计算机技术的发展,使得大规模的数值计算成为可能,彗星动力学成为彗星天文学研究的活跃领域之一。本文的主要目的是对彗星动力学的研究作一简单回顾和评述,其中短周期

彗星的动力学研究将另拟文论述。而有关彗星的结构、起源和演化的物理化学方面的研究综述可见 Festou et al<sup>[2]</sup> 的有关论文。

## 2 奥尔特彗星云动力学

奥尔特提出在太阳系边缘(距太阳  $10^4$ — $10^5$  AU) 存在着一个巨大彗星云(约包括  $10^{11}$ — $10^{13}$  颗彗星体)的假设,成功地解释了已观测到的长周期彗星的轨道统计特征,这个彗星云被称为奥尔特云。奥尔特云的动力学特征研究成为彗星研究的基本课题之一。近十年,关于奥尔特云的图象的描述已有很大的改变,天文学家发现,有三种外来摄动对奥尔特云产生影响,它们分别来自过往恒星、银盘潮汐力、巨分子云。

### 2.1 外来摄动对奥尔特云的作用

#### 2.1.1 过往恒星 (passing stars) 的摄动

恒星是可能对彗星轨道有影响的太阳系外天体。早在本世纪三十年代, Opik、Russel 就分析了恒星对彗星轨道的摄动情况。奥尔特正式提出彗星云假说的同时,也计算了恒星对它的影响,他估计,在太阳系漫长的历史上,彗星云中约有 5%—9% 的彗星因过往恒星的摄动而被抛射,这些被抛射的彗星中约有 13% 进入太阳系行星区。随后 Sekania<sup>[3]</sup>、Yabusbita<sup>[4]</sup>、Rickman<sup>[5]</sup>、Weissman<sup>[6]</sup>、Fernandez 和 Ipv<sup>[7]</sup> 等人也进行了研究。这些研究者使用相似的分析方法考察了过往恒星对奥尔特云的摄动影响。典型的方法是把过往恒星的摄动当作一个作用于奥尔特云的速度冲量,当任一恒星经过太阳系时,奥尔特云彗星相对于太阳的速度改变为:

$$\Delta V = 2GM(R_c/R_c^2 - R_s/R_s^2)/V \quad (1)$$

这里  $R_s$  和  $R_c$  分别为太阳—恒星、彗星—恒星间的距离矢量,  $G$  为引力常数,  $M$  为恒星的质量,  $V$  为恒星相对太阳系的运动速度。而奥尔特云与恒星的相遇频率为:

$$N = \pi R^2 \rho VT \quad (2)$$

这里  $N$  为相遇次数,  $R$  为太阳系及其附近一定范围的空间半径,  $\rho$  为此范围内的恒星密度,  $V$  为太阳相对恒星的速度,  $T$  为时间。太阳系形成以来,所有过往恒星对奥尔特云中单个彗星的摄动累积约为  $110$ — $150\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 与太阳系逃逸速度比较,估计奥尔特云的半径最大约为  $10^5$  AU, 更远距离的彗星因过往恒星的摄动而逃逸。而当恒星穿越奥尔特云时其影响大得多,会引发彗星雨,其发生频率约  $10^6\text{yr}$  一次<sup>[8]</sup>。以上只是对奥尔特云的状态做一简单估计,更为精致的办法是利用计算机对其进行数值模拟。如 Schrer、Weissman、Fernandez<sup>[9]</sup>、Remy 和 Mignard<sup>[10]</sup>、郑家庆<sup>[11]</sup> 等。这些早期的研究者所用彗星的样本个数在  $200$ — $20000$  之间,比起整个奥尔特云的彗星数量显得太少,并且仅考虑了过往恒星的摄动。所以,他们的模拟结果只能粗略反映奥尔特云彗星在恒星摄动下的状况,远非真实的奥尔特云动力学图象。

#### 2.1.2 银盘潮汐力 (galactic disk tidal force) 摄动

早在六十年代中期,前苏联天文学家 Chebotarev 就讨论过银盘潮汐力对奥尔特彗星云的可能影响<sup>[12]</sup>,但一直不为人所重视。1983年,Byl 又发表专文讨论银河潮汐力对彗星轨道的影响。在1985年的AAS会议上,银盘潮汐力对奥尔特彗星云的作用终于成为讨论的焦点,这是受了 Rmpino<sup>[13]</sup>、Whitmire<sup>[14]</sup> 等人对来源于奥尔特云的周期性彗星雨的研究的影

响。随后 Heisler 和 Tremaine<sup>[15]</sup>, Morris 和 Muller<sup>[16]</sup>, Mates 和 Whitman<sup>[17]</sup>, Yabusbita 和 Tsujii<sup>[18]</sup> 等人发表了有关银盘潮汐力对奥尔特云摄动作用的系列论文。研究表明, 因为银盘潮汐力对奥尔特云彗星的半长径摄动有正有负, 差不多相互抵消, 所以对彗星的半长径摄动的总体效应很小。但是, 银盘潮汐力对奥尔特云彗星的动量矩或近日点距的影响显著。由于奥尔特云彗星近日点距的变小, 使彗星受大行星摄动而进入行星区域, 从而被人们观测到。因此, 虽然银盘潮汐力摄动对奥尔特云彗星的半长径改变甚微, 但在使它们进入行星区而被人们观测到的摄动效果上明显大于过往恒星。据推算, 银盘潮汐力的摄动效果是恒星的 1.5 至 2 倍<sup>[15]</sup>。

假设奥尔特云中彗星轨道的半长径为  $a$ , 远日点银纬为  $\phi$ , 则在彗星轨道周期  $P$  内银盘潮汐力使彗星横向速度的改变为:

$$\Delta V = 3\pi G\rho a P \cos\alpha \sin 2\phi \quad (3)$$

这里,  $\alpha$  为彗星轨道平面与银盘平面法线的夹角,  $\rho$  为银盘在太阳系附近的质量密度。由方程 (3) 可知, 银盘潮汐力对奥尔特云彗星的影响依赖于银纬  $\phi$ , 当  $\phi = 45^\circ$  时达到最大,  $\phi = 0^\circ$  或  $90^\circ$  时最小。这种理论预言与目前已观测到的长周期彗星远日点分布集中在中纬度区域的结果一致<sup>[19]</sup>。这说明银盘潮汐力对奥尔特云的摄动作用确实大于过往恒星。

1992 年, Matese 和 Whitman<sup>[20]</sup> 提出了银河潮汐力与奥尔特彗星作用的新模型, 其理论预言与观测结果基本一致。但还存在一个不容忽视的问题, 即已观测到的首次进入行星区的长周期彗星的轨道分布相对于银纬  $45^\circ$  平面存在着强烈的不对称性, 这是现有的银河潮汐作用理论难以解释的现象。他们沿用传统的方法, 以观测的“选择效应”来解释, 并指出有进一步研究的必要。最近 Dybczynski 和 Pretka 对他们的结果进行了研究并准备重新计算<sup>[21]</sup>。也有学者认为这种不对称性不是由观测的“选择效应”造成, 而是太阳系本身运动的结果<sup>[22]</sup>。

### 2.1.3 巨分子云 (Giant molecular cloud) 的摄动

星际分子云发现后不久, Bierman 就研究了它对彗星云的摄动影响, 随后 Napier<sup>[23]</sup>, Clube<sup>[24]</sup>, Baily<sup>[25]</sup>, Hut 和 Tremaine<sup>[26]</sup> 等人相继发表了有关论文。假设半径为  $R_c$ 、质量为  $M_c$  的分子云与太阳系相遇, 它使距太阳为  $r$  的彗星的速度改变为:

$$\Delta V = \frac{2GM_c}{V_c} \frac{r}{b^2} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{b^2}{R_c^2} \right)^{3/2} \right] \sin \eta \quad (4)$$

这里  $V_c$  约为  $20\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ , 是典型的太阳系 - 恒星相遇速度,  $b$  为碰撞参量,  $\eta$  为  $r$  与  $V_c$  之间的夹角。粗略估计, 太阳系曾约有十次与巨分子云相遇, 这些巨分子云对奥尔特云彗星的累积摄动效应为  $\sim 0.53\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ , 远大于太阳系  $4 \times 10^4\text{AU}$  处的逃逸速度。所以, 由于巨分子云的作用使得奥尔特云的半径不会超过  $10^3\text{AU}$ 。太阳系与中级分子云相遇更为频繁 (约有  $10^7\text{yr}$  一次), 但它对奥尔特云的影响却很小。

### 2.1.4 三种外力的综合影响和彗星雨

三种外来摄动力中, 正常状态下过往恒星对奥尔特云的影响最小, 只能使半径大于  $7 \times 10^4\text{AU}$  的奥尔特云彗星逃逸或进入行星区; 更大且持续的影响来自银盘潮汐力, 它的摄动范围主要在  $(2-5) \times 10^4\text{AU}$  之间; 巨分子云的作用范围虽然可达  $1 \times 10^3\text{AU}$ , 但发生的频率相当小, 在整个太阳系历史上不到十次。因此, 奥尔特云的稳定边界估计为  $1 \times 10^4\text{AU}$  左右, 甚至更小。

外来摄动对奥尔特云彗星的速度改变是随机的。但那些因摄动而移向太阳的彗星,将被行星摄动而迅速散开,结果出现一个称之为损失锥的区域。外来摄动使得奥尔特云中的彗星不断进入损失锥。银盘潮汐力和正常过往恒星对奥尔特云的摄动相对稳定,可产生进入行星区的稳定的彗星流。而当太阳系遇到分子云时,奥尔特云彗星受到强烈摄动使得进入行星区的彗星突然增多,一般称之为彗星雨。由于中级分子云作用而形成的彗星雨(约  $10^7$  yr 发生一次),其强度可达稳定彗星流的 10—100 倍;由巨分子云作用而形成的彗星雨,其强度可达稳定彗星流的 100—1000 倍<sup>[27]</sup>。

目前的观测技术不可能直接观测到奥尔特云,要想对它的结构和动力学演化进行更加具体的研究,只有采用数值模拟的方法。1987年, Duncan 等人<sup>[28]</sup>假设奥尔特云形成于太阳系行星区外,只考虑过往恒星、银盘潮汐力和行星的影响,模拟了奥尔特云的动力学演化状况,其基本结论至今为多数彗星天文学家所接受。同年, Heisler 等人进行了类似的模拟,只不过所用彗星样本比 Duncan 等人的大了 100 倍<sup>[29]</sup>。1990年,他用同样方法模拟奥尔特云彗星的动力学演化状况,而把样本的数量增加到了惊人的程度。他模拟处于  $(1-4) \times 10^4$  AU 间的  $4 \times 10^7$  颗奥尔特云彗星在外力摄动下(不考虑巨分子云的作用)  $2.5 \times 10^6$  yr 中的演化状况,同时模拟了  $1.5 \times 10^6$  颗奥尔特云彗星在 45 亿年间的演化状况,得到了非常精致的结果<sup>[30]</sup>,是迄今为止对奥尔特云彗星实施的规模最大的动力学演化模拟。结果表明,我们现在可能正处于微弱的彗星雨之中。当然,这一结论的正确与否有待于进一步的研究。

## 2.2 奥尔特云的稳定性:是内核补充还是星际捕获?

理论和观测结果告诉我们,多数进入行星区的彗星主要是银盘潮汐力摄动的结果。而银盘潮汐力的主要作用范围在于  $(2-5) \times 10^4$  AU 之间,明显大于奥尔特云的稳定边界  $1 \times 10^4$  AU。这些源源不断进入行星区域的彗星从何而来就成了一个大问题,理论上还有大量的奥尔特云彗星进入恒星际空间,而目前没有任何证据表明长周期彗星的数目在减少。那么,必然存在一种机制使奥尔特云彗星的数目得以保持稳定。

对于多数持奥尔特云起源于太阳系的天文学家,尤其是对那些认为奥尔特云形成于外行星区域的学者来说,他们很自然就想到一个解决办法:奥尔特云有一个密度更高半径更小的内核(经典奥尔特云无内核)。关于这种内核的具体构成和进入经典奥尔特云的机制有多种不同的模式。按其所处区域的不同,大体上可分为两种:一种称为压缩模型。其半径在 50—200 AU 之间,由于大行星的摄动而使部分彗星进入经典奥尔特云<sup>[31]</sup>。另一种称为延伸模型。其半径为  $10^3-10^4$  AU,由于巨分子云和近距恒星的摄动而使部分彗星进入经典奥尔特云区域<sup>[32]</sup>。内核补充假说的困难在于,在漫长的太阳系历史上要维持经典奥尔特云彗星的数目稳定,内核中至少应有  $10^{14}$  颗彗星,以平均每颗彗星质量  $10^{14}$  kg 计,所有彗星的总质量达  $10^3 M_{\oplus}$ ,这使得彗星成为太阳系中除太阳外最重要的天体,这意味着必须重新考虑太阳系起源的过程,也许内核纯属乌有,或即使存在,其质量也要减少两个数量级。

对于少数持奥尔特云起源于恒星际空间的天文学家来说,很自然地把对它的补充归之于恒星际捕获(即使原始奥尔特云起源于太阳系,也可假设它的补充来源是恒星际捕获)。彗星的恒星际起源说由于 Laplace 的提倡,曾风靡于十九世纪。但自奥尔特提出彗星云假说后,恒星际起源说已为多数天文学家摒弃。然而,恒星际起源说并没有绝迹。Yabushita<sup>[33]</sup>认为,近双曲线轨道长周期彗星的存在证明彗星来源于恒星际空间,并且在行星摄动下彗星由双曲线轨道演变为椭圆轨道是可能的。当然,彗星的太阳系起源说者决不会认同这种观点,他们都赞成 Marsden<sup>[34]</sup>的解释,观测到的长周期彗星的双曲线轨道是彗星的非引力效应的结果,不

存在首次进入行星区的双曲线轨道彗星(如果彗星起源于恒星际空间,则首次进入行星区的必有双曲线轨道彗星)。1992年,Kresak<sup>[35]</sup>再次驳斥了彗星的恒星际起源说,认为到目前为止,没有观测到任何单个的来源于恒星际空间的彗星。而 Clube 和 Napier<sup>[24]</sup>、Valtonen 和 Innanen<sup>[36]</sup>、郑家庆<sup>[37]</sup>等人则坚信,既然太阳系能形成彗星云并有彗星被抛向恒星际空间,那么没有理由认为别的恒星不会如此。所以,恒星际介质中必然包含有大量彗星,当它们与太阳系相遇时就可能被太阳系捕获。但要捕获足够多的彗星所要求的恒星际彗星的高密度和相遇时的低速度超出常理之外,只要这两个关键问题得不到圆满解决,彗星的星际捕获说就不会为人们所接受。

### 3 长周期彗星的轨道演化和木族彗星的起源

#### 3.1 长周期彗星的轨道演化

因外力作用进入行星区的奥尔特云彗星,主要受行星尤其是大行星的摄动而改变原有的轨道,有的被抛射到恒星际空间,有的重新回到奥尔特云,有的则被捕获而变成短周期彗星,往返于行星区。Everhart 曾给出了这种演化的一般框架,并具体计算了各行星摄动引起长周期彗星半长径的变化量<sup>[38]</sup>。

彗星动力学家最关心的是这些进入行星区域的长周期彗星被捕获的可能性究竟有多大和理论上被捕获而产生的短周期彗星数量是否与实际观测相当。Everhart 分析得出  $i < 90^\circ$ ,  $4\text{AU} < a < 6\text{AU}$  的长周期彗星的平均捕获概率  $P = 0.006 \times 0.007$ , 根据这个结果,结合彗星的亮度、物理寿命等性质进行综合考察得出,稳定的短周期彗星的数量级为 0.1 颗,比实际观测到的短周期彗星的数目小三个数量级,即使对各种因素进行调整,最后的理论结果也远远达不到实际观测数目。此后,这种推算的精确性得到了大的改善。一般把长周期彗星的捕获概率作为近日点距  $q$  的函数,与 Everhart 的主要不同在于,后来的计算在更大的倾角范围 ( $0-180^\circ$ ) 内进行,得到两个结论:一是捕获概率依赖于彗星轨道倾角  $i$ ,但这种依赖性的强度不足以垄断被捕获彗星的最后的轨道分布特征;二是平均捕获概率  $P = 0.001$ ,远大于 Everhart 的结果,但仍比实际观测到的短周期彗星的数目小一个数量级。最后的结论是,不可能所有的短周期彗星都是捕获长周期彗星所得,短周期彗星可能另有源头<sup>[39]</sup>,最近 Fernandez 和 Gallard<sup>[40]</sup>对 2000 个长周期彗星的轨道演化过程进行了数值模拟,他们把长周期彗星的半长径限制在 0.1—2 与 4—5.2AU 的范围(倾角仍为  $0-180^\circ$ ),得到了比较精确的结果。最后的结论是,捕获理论可以成功地解释已观测到的哈雷型彗星的数目和轨道特征,所以哈雷型彗星是长周期彗星的演化结果;但木族彗星的数目远小于捕获理论所得,其轨道特征也是捕获理论无法解释的,显然,木族彗星不是长周期彗星的演化结果,可能另有所源。再次证明了前面的结论,这种观点为大多数人所接受。

但对持彗星的恒星际起源说者而言,短周期彗星的产生除了长周期彗星外别无它途。因为他们眼中的奥尔特云不存在内核(内核可作为短周期彗星的来源,见下节)。所以,他们想方设法证明短周期彗星是捕获长周期彗星的结果。有意思的是,这些天文学家同样对长周期彗星的轨道演化进行数值模拟,其结果却能很好地解释短周期彗星的轨道分布特征,但仍无法解决短周期彗星的数目短缺问题<sup>[41,42]</sup>, Yabushitar<sup>[43]</sup>认为可通过延长短周期彗星的物理寿命来解决因捕获概率小而导致的短周期彗星数量不足问题。但现在坚持认为所有的短周期

彗星都是由捕获长周期彗星而产生的天文学家屈指可数。

### 3.2 木族彗星的起源

木族彗星的基本轨道特征是远日点集中在木星轨道周围, 周期  $P < 20$  yr, 倾角大多小于  $35^\circ$ 。任何关于它的起源的假设都必须能解释这些基本特征。前面已说过, 由于实际观测到的木族彗星数量远大于捕获理论所预言的数量, 这就排除了全部木族彗星源于长周期彗星捕获的可能性。为了从理论上增加木族彗星的数量, 人们作了种种设想。

首先, 联想到彗星雨的存在, 有学者设想行星区内的短周期彗星数量与长周期彗星数量一样, 并不总处在稳定状态, 而与时间有关。假定在  $10^6$  yr 前发生了彗星雨, 使得进入行星区的长周期彗星数量大幅度增加, 在捕获概率不变的前提下, 被捕获而产生的短周期彗星数量也就随之增加, 通过计算可知, 理论上捕获产生的短周期彗星数量与观测相当。这种假设的主要困难在于, 随着短周期彗星数量的增加, 当达到木族彗星所要求的数量时, 理论上的哈雷型彗星的数量已大大高于实际观测。所以, 虽然解决了木族彗星数量太少的困难, 但同时带来了哈雷型彗星数量太多的新矛盾。

解决短周期彗星数量问题的另一种设想是受了掠日 (Kreutz-Sungrazers) 彗星群的启发。Marsden<sup>[44,45]</sup> 曾证明 Kreutz-Sungrazers 彗星群源于公元 1000 年的大彗星分裂。于是, 有的彗星天文学家设想木族彗星也是大彗星分裂的结果。对缓慢运动天体如 1992AD 的长期轨道积分表明, 不能排除这种可能性<sup>[46]</sup>。而 Pittich 和 Rickman<sup>[47]</sup> 则对这种可能性进行了数值模拟。他们选择具有典型木族彗星轨道特征的大彗星作为母体, 假设母体分裂成随机的碎片, 对这些碎片的长期 ( $10^4$  yr) 轨道演化进行数值模拟, 发现其轨道分布特征与我们已观测到的木族彗星相符。加之 1993 年发现 P/Shoemaker-Levy 9 彗星的分裂, 于是得出木族彗星源于大彗星分裂的结论。但这种假说太过离奇, 得不到多数人的认同。而 Cluber<sup>[48]</sup>, Rampino<sup>[49]</sup> 等人则走得更远, 他们认为地球上的气候变化、物种灭绝等存在着某种周期性, 这种周期性跟彗星有关, 尤其与穿越地球轨道的短周期大彗星有关, 它们可能在地球历史上扮演了重要角色。

也可假定短周期彗星的数量处于稳定状态, 哈雷型彗星是捕获长周期彗星的结果, 而木族彗星则可能源于前面说到的奥尔特云内核。在解释彗星的起源和动力学演化上, 两种内核模型各有千秋: 延伸模型的优点是, 它与太阳系形成的星子原理所预言的结构相符合, 作为经典奥尔特云的物质损失的补充是必须的, 因而可提供长周期和短周期彗星起源的完整图象; 缺点是它的高倾角不可避免地带来捕获机制上的困难。压缩模型的优点在于, 它与理论上预言的在海王星外存在原始行星盘遗迹的构想一致, 轨道倾角低且顺行, 近日点靠近海王星轨道, 从而使得被捕获的几率大大增加; 主要的困难在于缺少观测证据, 因为, 如果确实存在这样一个彗星带的话, 以目前的观测水平应该能观测到。所以, 著名天文学家 Bailey 认为, 从宇宙背景 (主要指太阳系形成) 上看, 压缩模型的存在是可以理解的, 但从彗星的起源上看却不是必须的<sup>[50]</sup>。似乎倾向于以延伸模型来解释木族彗星的起源。

但现在的情况已有所改观, 就在 Bailey 的论文发表后半年, Jewitt 和 Jun 发现了一个缓慢移动的天体 1992QB1。其后, 相应的发现逐年增加, 到 1995 年初已观测到 18 个类似天体<sup>[51]</sup>。它们的近日距在 30—50AU 之间, 正好处于被称之为柯伊伯带的理论上的压缩模型区域 (由 Edgeworth、Kuiper 在研究太阳系形成机制时最早预言它的存在, 但直到八十年代初才为彗星天文学家所重视), 很可能就是柯伊伯带内的天体, 这就从观测上证明了压缩模型所预言的彗星带的存在。由于已发现的类似天体太少, 无法对其做统计分析, 粗略估计柯伊

伯带内所有天体的总质量在  $0.02-1M_{\oplus}$  之间。彗星天文学家最为关心的是柯伊伯带彗星的结构和进入内行星区的机制。事实上, 柯伊伯带内的彗星一旦进入海王星轨道附近, 就很容易为类木大行星控制而成为木族彗星。因此, 最为关键的是柯伊伯带彗星进入海王星轨道附近的机制问题。Fernandez<sup>[52]</sup> 曾设想柯伊伯带中存在与月球一样大小的天体, 由于它们的摄动使得其中的彗星进入海王星轨道附近, Stern 亦作过类似的假设<sup>[53]</sup>。但到目前为止并没有观测到如此大的柯伊伯带天体, 并且从理论上说, 如果太阳系形成的早期存在这样大的物体的话, 除冥王星外都已跑光了。也许这个问题已为 Torbett<sup>[54]</sup>、Gladman 和 Duncan<sup>[55]</sup> 解决。Torbet 证明, 轨道半径小于 50AU 的彗星在  $10^8$  yr 进入混沌状态, 并很快因摄动穿越海王星轨道。Gladman 和 Duncan 认为在 34AU 范围内的小天体约经  $2 \times 10^7$  yr 而成为海王星轨道的穿越者。当然, 他们的观点并没有成为定论。Holman 和 Wisdom<sup>[56]</sup>、Levison 和 Duncan<sup>[57]</sup> 采用有效的对称积分技术, 对柯伊伯带在  $10^9$  yr 中的动力学稳定性和向行星区内抛射彗星的机制进行了数值模拟, 得到了更为详细的结果。最新的研究表明, 从动力学角度看, 柯伊伯带是稳定的, 并且最有可能是木族彗星之源<sup>[58]</sup>(柯伊伯带内的天体是彗星或小行星到目前为止还无定论, 是彗星的可能性更大)。柯伊伯带的观测和理论研究目前已成为彗星研究的热点之一。

## 4 结 束 语

综上所述, 八十年代以来彗星动力学的研究取得了很大进展, 人们已经能正确认识过往恒星、银盘潮汐力和巨分子云对奥尔特云的不同摄动影响, 并对奥尔特云的动力学演化进行了大规模的数值模拟; 在长周期彗星的动力学演化和木族彗星的起源上也有了新的认识和发现。同时, 在观测和理论分析上仍有许多问题没有解决。如奥尔特云的来源, 不同的研究者从相同的样本出发却得出了不同的结论, 虽然目前太阳系起源说占上风, 但恒星际起源说亦有其合理性; 又如长周期彗星的捕获概率和木族彗星的起源问题等等。所有这些都还有待人们去做更深入的研究工作。当然, 这些问题单靠彗星动力学是解决不了的, 必须要与彗星的物理、化学性质研究相结合。近年来对彗星的地面、空间观测和实验室的模拟合成研究成为彗星天文学的热点决非偶然, 人们期待着通过彗星揭开太阳系的起源之谜。

## 参 考 文 献

- 1 Marsden B G, Williams G V. Catalogue of cometary orbits, 10th ed. Cambridge, Massachusetts: Minor Planet Center, Smithsonian Astrophysical Observatory., 1995
- 2 Festou M C, Rickman H, West R M. Astron. Astrophys. Rev., 1993, 5: 37
- 3 Sekania Z. Bull. Astron. Inst. Czech., 1968, 19: 223
- 4 Yabushita S. Astron. Astrophys., 1972, 16: 395
- 5 Rickman H. Bull. Astron. Inst. Czech., 1976, 27: 92
- 6 Weissman P R. Nature., 1980, 228: 242
- 7 Fernandez J A, Ip W H, Icarus, 1987, 71: 46
- 8 Weissman P R. Earth, Moon, Planets, 1996, 72: 25
- 9 Weissman P R. In: Wilkening L L ed. Comets, Tucson, Arizona: Arizona Univ. Press, 1982: 637
- 10 Remy F, Mignard F. In: Carusi A, Valsecchi G B eds. Dynamics of Comets: Their Origin and Evolution, Proc. of IAU Colloq. No.83, Rome, Italy, 1984, Dordrecht: Reidel, 1985: 97
- 11 郑家庆. 天文学报, 1989, 30: 126

- 12 Chebotarev. *Sov. Astron.*, 1965, 8: 787
- 13 Rampio M R, Stochers R B. *Nature*, 1984, 308: 709
- 14 Whitmire D P, Jackson A A. *Nature*, 1984, 308: 713
- 15 Heisler J, Tremaine S. *Icarus*, 1986, 65: 13
- 16 Morris D E, Muller R A. *Icarus*, 1986, 65: 1
- 17 Mates J J, Whitinan P G. *Icarus*, 1989, 82: 389
- 18 Yabushita S, Tsujii T. *M.N.R.A.S.*, 1991, 248: 34
- 19 Delesemme A H. *Astron. Astrophys.*, 1987, 187: 913
- 20 Matese J, Whitinan G. *Celest. Mech. Dyn. Astron.*, 1992, 54: 13
- 21 Dybczynski P A, Pretka H. *Earth, Moon, Planets*, 1996, 72: 13
- 22 Brunini A. *Astron. Astrophys.*, 1993, 273: 684
- 23 Napier W M, Staniucha M. *M.N.R.A.S.*, 1982, 198: 455
- 24 Clube S V M, Napier W M. *M.N.R.A.S.*, 1984, 208: 575
- 25 Bailey M B. *M.N.R.A.S.*, 1983, 202: 603
- 26 Hut P, Tremaine S. A. J., 1985, 90: 1548
- 27 Fernandez J A. In: Ferraz-Mello S ed. *Chaos Resonance and Collective Dynamical Phenomena in Solar System*, Proc. of IAU Symp. No.152. Angra Dos Reis, Brazil, 1991, Dordrecht: Kluwer, 1992: 239
- 28 Duncan M, Quinu T, Tremaine S. A. J., 1987, 94: 1330
- 29 Heisler J, Tremaine S, Alcock S. *Icarus*, 1987, 70: 269
- 30 Heisler J. *Icarus*, 1990, 88: 104
- 31 Quinu T, Tremaine S, Duncan M. *Ap. J.*, 1990, 355: 667
- 32 Fernandez J A, Ip W H. *Icarus*, 1983, 71: 46
- 33 Yabushita S. *M.N.R.A.S.*, 1991, 250: 481
- 34 Marsden B G, Sekania Z, Everhart E. A. J., 1978, 83: 64
- 35 Kresak L. *Astron. Astrophys.*, 1992, 259: 682
- 36 Valtonen M J, Innannen K A. *Ap. J.*, 1982, 255: 207
- 37 Zheng Jiaqing. *Celest. Mech. Dyn. Astron.*, 1990, 49: 265
- 38 Everhart E, Raghavan N A. A. J., 1970, 75: 258
- 39 Stagg C R, Bailey M E. *M.N.R.A.S.*, 1989, 241: 507
- 40 Fernandez J A, Galard T C. *Astron. Astrophys.*, 1994, 281: 911
- 41 Valtonen M J, Zheng J Q, Mikkola S. *Celest. Mech. Dyn. Astron.*, 1992, 54: 37
- 42 Zheng Jiaqing. *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, 1994, 108: 253
- 43 Yabushita S. *Celest. Mech. Dyn. Astron.*, 1992, 54: 161
- 44 Marsden B G. A. J., 1967, 72: 1170
- 45 Marsden B G. A. J., 1989, 98: 2306
- 46 Hahn G, Bailey M E. *Nature*, 1990, 348: 132
- 47 Pittich E M, Rickman H. *Astron. Astrophys.*, 1994, 281: 579
- 48 Clube S V M. *Celest. Mech. Dyn. Astron.*, 1992, 54: 179
- 49 Rampino M R, Cadera K. *Celest. Mech. Dyn. Astron.*, 1992, 54, 143
- 50 Bailey M E. *Celest. Mech. Dyn. Astron.*, 1992, 54: 49
- 51 Jewitt D, Luu J X. A. J., 1995, 109: 1867
- 52 Fernandez J A. *M.N.R.A.S.*, 1980, 192: 481
- 53 Stern S A. *Icarus*, 1991, 90: 271
- 54 Torbett M V. A. J., 1989, 98: 1477
- 55 Gladman B, Duncan M. A. J., 1990, 100: 1680
- 56 Holman M J, Wisdom J. A. J., 1993, 105: 1987
- 57 Levison H, Duncan M J. *Ap. J.*, 1993, 406: L35
- 58 Duncan M J, Levison H. A. J., 1995, 110: 3073

## On Studies of the Dynamics of Comets

Lu Xianwen

(Shanghai Astronomical Observatory, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030)

### Abstract

Cometary science is a basic and important branch of solar system astronomy, which is closely linked with many aspects of astrophysics, astrochemistry and celestial mechanics. Recent studies indicate that comets are the keys to some of the most basic problems in solar system astronomy and may be linked with the origin of life. In this paper, a brief review on studies of the dynamics of comets is presented.

**Key words** comets:—general—comets: Oort's cloud—comets: kinematics and dynamics