

彗星轨道的统计

武 志 贤

(中国科学院紫金山天文台)

提 要

本文介绍了近年来彗星轨道统计研究的概况,以及它在彗星起源研究中的应用。其中,关于近日距、近日点的角矩的统计表是作者根据1982年由 Marsden 公布的彗星轨道表重新作出的。

一、概 况

到目前为止,已经公布了710个独立的彗星(Marsden 彗星星表,1982年)。事实上,彗星的数目远不止这一些。肉眼可见的彗星平均每两、三年就有一个;而天文工作者借助于望远镜,使用照相方法,平均每年至少可以见到六、七颗彗星,其中新发现的长周期彗星平均每年有三颗^[1]。曾经有人利用彗星近日点的密度估计过彗星的数目。近日点在海王星轨道内的彗星总数可达 1.7×10^6 个,而在距离 15 万天文单位内,就有一千亿颗彗星^[1]。如此说来,我们所观测到的这七、八百个彗星只是由彗星构成的汪洋大海中之一粟罢了!

一个多世纪以来,彗星轨道的统计研究随着彗星起源问题的探讨发展起来了。早在十九世纪中期,天文工作者就注意到彗星近日点分布的一些特殊图象。1860年, Hoek 分析了那时仅观测到的190个彗星后,提出天球上有些地方根本就不存在彗星的近日点^[1]。1913年, Eddington 利用 317 个彗星资料作出了相似的结论^[1]。从那以后,不少天文学家就开始讨论近日点在天球上分布的规律。近年来, Yale 大学天文台 Porter、捷克 Kresek、日本 Yabushita、苏联 Семеникин 等人都在彗星的统计方面做了不少的工作。就在 1982 年发表的 Marsden 彗星星表中,也列出了彗星轨道的低精度的统计表,为进行彗星统计的研究人员提供了方便。现在彗星的统计研究已经在太阳系起源和演化的研究中占据了重要的位置。

彗星轨道的研究工作可分为两类。一类是一般的统计,按其轨道性质可分为短周期彗星、长周期彗星、抛物线和近抛物线彗星、双曲线彗星;另一类是统计其轨道要素在天球上的分布。其实这两类统计方法经常互相渗透融合在一起。

二、轨道的统计

1. 短周期彗星

周期少于二百年的具有椭圆轨道的彗星形成了一种特殊的类型,叫短周期彗星,共有121

1984年5月14日收到。

1984年6月14日收到修改稿。

个。它们的周期从3.3年到187年不等, 其中只出现过一次的彗星有43个, 出现过不止一次的有78个。它们的偏心率的范围从0.375—0.993, 主要集中在0.5和0.7之间, 都小于长周期彗星的偏心率。其中施瓦斯曼-瓦赫曼彗星的轨道偏心率只有0.105, 它的轨道整个地处在木星轨道和土星轨道之间, 而且它的彗发的亮度和大小都不显眼, 如果它再稍微暗一些, 就可看作一颗小行星了。这一颗彗星, 也向我们显示了彗星和小行星两大家族之间的联系。又如奥特玛彗星, 其轨道偏心率只有0.144, 它的轨道整个地处于木星和火星轨道之间。

对于短周期彗星, 人们经常根据其远日点处于哪颗大行星的范围来区分, 如木星族彗星, 土星族彗星等等。木星族彗星有86颗, 土星族彗星有18颗, 天王星族彗星有3颗, 海王星族彗星有9颗。其实除了木星族彗星之外, 其他行星同自己家族中的彗星的联系并不十分明显。例如哈雷彗星, 它的远日点是35.3AU, 应是海王星族的, 可是由于轨道倾角为 162° , 它与海王星的距离不可能小于8AU, 因此海王星对它产生的摄动可以忽略不计, 而它同木星却可以靠得相当近。

研究彗星轨道升交点的离日距离表明, 它集中在5.2AU附近以及0.7—1.5AU之间。这一些均说明, 木星对短周期彗星的起源和形成起着主要作用。

2. 抛物线和近抛物线轨道

在1982年的Marsden彗星星表中, 公布了589颗具有抛物线和近抛物线轨道的彗星, 其中包括了169颗长周期椭圆轨道的彗星和104颗双曲线轨道的彗星(这两者都是指的吻切轨道)。其余的316颗彗星被视为近抛物线轨道的彗星, 这或者是因为不能测出对于抛物线轨道的确切的偏离, 或者是由于尚未进行适当的计算^[2]。

这些长周期椭圆轨道, 其周期都大于200年; 近日距的值从0.006AU到4.861AU; 它们都有大的偏心率, 其范围从0.963到接近于1(比1略小一点)。104颗双曲线轨道彗星的偏心率从1.001到1.057; 近日距从0.031AU到6.81AU。

这两类吻切轨道根数, 在Marsden彗星星表中均另以 $1/a$ 为引数列于表2A和2B中。

对于这一类彗星, 天文学家曾将它们分成若干群, 在同一群里的彗星有着相似的轨道。Öpik就曾将它们分成五、六十群, 每群有2—7个成员。但这种方法遭到不少学者反对, 他们认为这只不过是统计上的一种随机现象。只有科茹茨掠日彗星族是引人注目的, 因为它们的近日距都非常小(不超过0.01天文单位), 因此当它们过近日点时就会出现异常壮丽的景象。例如1680大彗星, 是天文学史上最亮的一颗, 过近日点时的亮度有负18等, 那时它离开太阳表面只有23万公里, 更奇怪的是它掠过太阳而没有被烧毁, 竟以每秒530公里的速度穿过了日冕。彗星1843 I也是如此, 它离开太阳表面最近时也只有13万公里, 竟也平安地从这个大火炉中“走”了出来。可是也有“丧身”于火海的掠日彗星, 1979年8月30日美国国防部P₇₈₋₁卫星上的日冕仪就记录到这样一颗掠日彗星。目前已测到的掠日彗星共有12颗。

三、轨道要素的分布

1. 倾角的分布

在周期彗星中, 顺行的比逆行的多, 这在短周期彗星中特别明显。在抛物线轨道中, 逆

行的轨道多于顺行的轨道。从倾角的分布中也可以看出,短周期彗星受到了太阳系内行星的长期摄动。见图 1 和图 2^[3]。

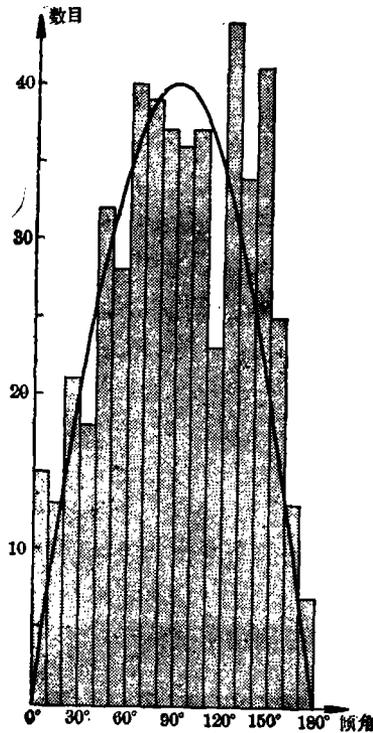


图 1 抛物线和近抛物线轨道的倾角分布(实线为在随机分布假定下的预期变化)

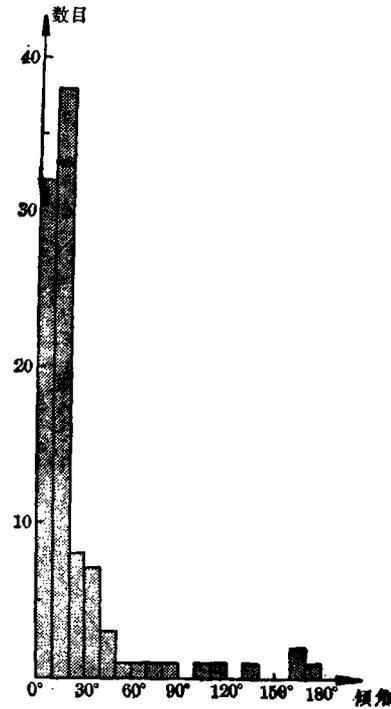


图 2 短周期彗星倾角的分布

2. 近日点

近日距 q : 无论是短周期彗星还是抛物线或近抛物线彗星, 它们的近日点 90% 集中在离开太阳 3AU 的距离内。

近日点与升交点间的角距 ω 的分布见表 1 和表 2。

表 1 121 颗短周期彗星 ω 的分布

| ω | 0°至 30° | 30°至 60° | 60°至 90° | 90°至 120° | 120°至 150° | 150°至 180° | 180°至 210° | 210°至 240° | 240°至 270° | 270°至 300° | 300°至 330° | 330°至 360° |
|----------|------------|-------------|-------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 星数 n | 16 | 11 | 4 | 5 | 9 | 18 | 22 | 6 | 7 | 1 | 4 | 18 |
| n /总数 | 0.132 | 0.091 | 0.033 | 0.041 | 0.074 | 0.149 | 0.182 | 0.050 | 0.058 | 0.008 | 0.033 | 0.149 |

表 2 589 颗抛物线近抛物线彗星 ω 的分布

| ω | 0°至 30° | 30°至 60° | 60°至 90° | 90°至 120° | 120°至 150° | 150°至 180° | 180°至 210° | 210°至 240° | 240°至 270° | 270°至 300° | 300°至 330° | 330°至 360° |
|----------|------------|-------------|-------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 星数 n | 52 | 54 | 72 | 66 | 51 | 48 | 45 | 33 | 40 | 33 | 41 | 54 |
| n /总数 | 0.088 | 0.092 | 0.122 | 0.112 | 0.087 | 0.081 | 0.076 | 0.056 | 0.068 | 0.056 | 0.070 | 0.092 |

由表 1、表 2 可以看到, 在短周期彗星中, ω 的值集中在 0° 或 180° 附近。也就是说, 交点中的一个总是在近日点附近, 而近日点总是在黄道附近。这一点在抛物线和近抛物线轨道中却是不十分明显的。

在短周期彗星中, 只有 9 个彗星近日点的黄纬 $|B| > 10^\circ$ (占 0.07%), 这一点也有力地证明短周期彗星受到太阳系内大行星的长期摄动。而在 169 颗长周期椭圆轨道的彗星中, 却有 80% 左右的彗星, 其 $|B| > 10^\circ$ (双曲线轨道的彗星及抛物线、近抛物线轨道的彗星也存在着这一比数)。这是短周期彗星与抛物线及近抛物线彗星的主要区别之一。

日本 Yabushita 于 1979 年、1981 年发表的两篇论文, 讨论了长周期彗星近日点的统计分布^{[4], [5]}。由于地球上北半球观测彗星的人数多于南半球, 这就造成了彗星近日点在北半球多于南半球。这就是观测的选择效应。他提出近日点在黄道南、北半球的分布应该单独计算, 看一看它们是否是均匀分布的, 结果如表 3 所示, 其中 N 是参加统计试验的彗星数, B 为彗星的黄纬, q 为近日距, 均取自 1982 年 Marsden 彗星表。

表 3

| | |
|------------------------------------|---------|
| $N=307$ ($B>0$ 的星表星) | 不是均匀分布的 |
| $N=196$ ($B<0$ 的星表星) | 不是均匀分布的 |
| $N=181$ ($q<1\text{AU}$, $B>0$) | 不确定 |
| $N=127$ ($q<1\text{AU}$, $B<0$) | 不确定 |
| $N=126$ ($q>1\text{AU}$, $B>0$) | 均匀分布的 |
| $N=69$ ($q>1\text{AU}$, $B<0$) | 不是均匀分布的 |

后来, 他又将长周期彗星按其亮度来区分, 考察它们近日点的分布规律。结论是, 对于暗彗星 ($H_0 \geq 7.0$), 它们的近日点或多或少地均匀分布于南北半球上, 而对于亮彗星 ($H_0 \leq 6.7$) 并非如此 (H_0 为绝对星等)。因此, 他得出结论, 对于均匀分布的偏离, 是由亮彗星引起的, 而不是来源于观测的选择效应。另外, 他还用统计方法研究了近日点分布的最优方向与太阳奔赴点方向之间的关系, 并且巧妙地消除了观测的选择效应。结论是, 对于相当亮的彗星, 近日点分布的最优方向与太阳奔赴点的方向一致。

Lago 和 Cazenave 在研究 Oort 云中彗星近日距的演变时提出了一种新的统计方法, 导出了近日距相对变化与最小碰撞距离 (彗星与偶然经过的摄动恒星间的距离) d 的经验关系:

$$\Delta q/q \propto d^{-\alpha}$$

他们还考虑了两种类型的事件: 远碰撞引起的近日点的缓慢进动及近碰撞导致的近日点的急剧变化。由此, 对于各种不同的情况, 他们计算了单位时间中新彗星进入行星区域的数目——在近日距 5AU 的范围内, 每年约有 23.5 颗彗星出现; 他们还计算了在太阳系的生存年代内, 由彗星云丢失的彗星的百分比为 16%—29%。

3. 升交点的黄经

在升交点黄经的分布图中, 升交点黄经的峰值出现在 70° — 100° 之间, 联系到木星升交点的黄经为 100° , 更进一步表明木星在彗星的起源和演化中所起的重要作用。

四、彗星的起源

正如 Yabushita 指出的, 彗星轨道要素的统计是彗星起源理论的重要基础。他谈到彗星的起源必然涉及到轨道的演化。Everhart 指出^[6], 用圆限制性三体问题以及雅可比积分的方法来研究彗星的起源和演化并不是有效的方法, 而统计的方法却是有用的。

1950年, Oort 首次提出了彗星原云的假说。该理论是建立在观测到的新彗星近日点分布基础之上的。他提出原始的彗星主要集中在离开太阳二千到十万天文单位的区域之中, 这一区域便称为彗星原云区。由于受到了走近原云的恒星的摄动, 原云的彗星中有极少数进入了行星的区域。Oort 还估计了彗星原云中大约有 2×10^{11} 颗彗星。由于恒星摄动的累积效应, 将提供了一个新彗星的连续的源^[6]。Weissman 利用了新的彗星观测资料, 重新给出原云中彗星的总数为 2×10^{12} 。尽管目前对原云的动力学特性还不十分清楚, 但是 Oort 的这一假说已经获得普遍的承认。

1980年, 苏联的 Радзиевский 提出要解决彗星的起源问题, 重要的问题是寻找新产生彗星概率的精确表式 $\omega(x)$, 其中 x 可以是彗星物理、力学参量中的任何一个引数, 如绝对星等、近日距 q 、周期等等, 找到的函数 $\omega(x_i)$ 越多, 彗星的起源问题就越容易解决。他并且以 q 作为引数进行了初步的讨论。如果彗星是由木星带抛射出来的, 那么所有的 q 应小于 5.2AU , 如果彗星来自于 Oort 云, 那么近日点就应均匀地分布于近太阳系的空间, 也就是相等的间隔 Δq 应当有相等的彗星数。研究的结果表明与 Oort 的假说是相矛盾的。

另外, 彗星轨道演化的研究也受到了科学家的重视。他们利用计算机对彗星进行过轨道根数的逆推, 一直推算到行星对彗星产生的摄动可以忽略不计的那个距离上。一个有趣的事实是, 改正摄动之后, 绝大多数彗星的原始轨道为椭圆形。由此, Porter 提出了一种看法: 所有的彗星都是太阳系的成员。双曲线轨道彗星是由大偏心率椭圆轨道的原始彗星受大行星摄动而形成的。彗星可以从太阳系中消失, 却不可以从星际空间进入太阳系。但是彗星轨道的演化问题是非常复杂的, 除了行星的摄动之外, 还有“非引力效应”、恒星摄动等等。因此, Everhart 等人在最近一、二十年内提出了用统计方法来研究彗星轨道的演化。他根据自己的计算机实验的统计结果提出: 1. 对于彗星的抛物线轨道, 行星摄动的结果是它们中的一些改变为双曲线轨道, 椭圆轨道存活的时间正比于 $N^{-1/2}$, 这里 N 是单个彗星经过近日点的次数。当初始轨道为圆的时候也同样地存在着 $N^{-1/2}$ 律。2. 短周期彗星不可能由于近抛物线彗星与木星的近距离碰撞而产生。3. 观测到的长周期彗星不可能发展成为观测到的短周期彗星。4. 没有观测到近日距在木星附近的长周期彗星发展成为观测到的短周期彗星。5. 只考虑行星的摄动, 长周期彗星不可能在太阳系的行星区域形成。6. 短周期彗星可以在海王星的轨道内形成。

还有不少学者认为彗星是恒星际起源的。例如 Napier 和 Staniucha(1982) 就重新提出了彗星的恒星际起源问题, Veltonen 也认为彗星是恒星际起源而为日-木系统俘获的, 但是太阳必须有一个看不见的伴星, 这种俘获才是最有效的, 并且在这种情况下, Oort 云的起源也是星际的。

但是，由于观测资料还不能证明任何一个彗星都来自太阳系以外的宇宙空间，这种俘获假说一般还不能为人们所接受。

另外还有人认为彗星可能是太阳系内某两个天体碰撞后残留的碎片。但是根据现有的关于彗核结构和组成的资料，彗核不可能是石质的整块碎片。因此现在支持这种观点的人很少。也有人认为彗星是由行星或其卫星上的火山爆发时抛射出的物质而形成的。美国宇宙站“旅行者 1 号”所拍摄到的木卫 1 上火山爆发的照片，对这一观点倒是一个有力的支持。诚然，这种方式还不足以形成太阳系的全部彗星。

其实，这些假说相互之间也并不排斥，多种多样的彗星可能有不止一种的起源方式。

参 考 文 献

- [1] Porter, J. G., The statistics of comet orbits, in *The Solar System IV*, ch. 16, (1963).
- [2] Marsden, Brian G., *Catalogue of Cometary Orbits*, (1982).
- [3] Brandt, John C. and Chapman, Robert D., *Introduction to Comets*, 59—75, (1981).
- [4] Yabushita, S., *MNRAS.*, **189** (1979), 45—56.
- [5] Yabushita, S., and Hasegawa, I., *MNRAS.*, **196** (1981), 353—356.
- [6] Lago, V. and Cazenave, A., *Icarus*, **53** (1983), 68—83.
- [7] Радзневский, В. В., *А. Ж.*, **58** (1981), 1288—1290.
- [8] Everhart, E., The evolution of comet orbits, in *The Study of Comets*, part 1, 445—464, (1974)
- [9] Napier, W. M. and Staniucha, M., *MNRAS.*, **198** (1982), 723—735.
- [10] Weissman, P., *Nature*, **188** (1980), 242—243.
- [11] Valtonen, M. J., *Observatory*, **103** (1983), No.1052, p.i—4.
- [12] 徐登里编著，彗星漫谈，科学出版社，1978年。

The Statistics of Comet Orbits

Wu Zhixian

(Purple Mountain Observatory, Academia Sinica)

Abstract

This paper briefly introduces the recent situation in the statistics of comet orbits research as well as its use in the study of comet origin. The author of this paper has worked out the statistics of perihelion and argument of perihelion based on the 1982 data of Marsden.