

文章编号: 1000-8349(2009)02-0099-17



柯伊伯带结构形成动力学

黎 健, 周礼勇, 孙义燧

(南京大学 天文学系, 南京 210093)

摘要: 柯伊伯带是指位于海王星轨道外的小天体构成的盘状区域。一般认为柯伊伯带小天体是早期太阳系物质凝聚成各大行星后的残留物, 因此这些小天体能够为研究外太阳系的形成与演化提供很多重要的线索。该文首先介绍了柯伊伯带的发现历史及它的主要观测特征, 然后回顾了近年来提出的形成这些特征的机制, 最后讨论了柯伊伯带中有待解释的主要问题。

关键词: 小行星; 柯伊伯带; 太阳系动力学; 太阳系形成; 数值模拟

中图分类号: P185.7 **文献标识码:** A

1 引 言

太阳系小天体一直是天体力学的重要研究对象, 如近地小行星、主带小行星和彗星等。自 1992 年观测到了海王星轨道以外存在小天体 (柯伊伯带小天体) 以来, 人们对外太阳系的认识有了进一步的深入。柯伊伯带小天体的发现, 也给天体力学的研究工作带来了崭新而富有挑战性的课题, 对柯伊伯带小天体动力学的研究成为天体力学中新的前沿课题。

研究柯伊伯带小天体动力学的主要意义在于: (1) 柯伊伯带小天体当前的空间分布和轨道特征与类木行星的引力摄动直接相关; (2) 一般认为, 柯伊伯带小天体是早期太阳系物质凝聚成各大行星后的遗留物, 对它们的研究有利于揭示太阳系的起源和早期动力学演化; (3) 柯伊伯带小天体被认为是短周期彗星的来源; (4) 柯伊伯带小天体的分布与太阳系外边界等问题相关; (5) 结合最近发现的太阳系外行星系统, 研究柯伊伯带小天体有助于揭示行星系统的一般结构和动力学演化过程。鉴于柯伊伯带小天体的重要性, 该领域吸引了国际上相当多的天文工作者, 十几年来在国际重要刊物《自然》和《科学》上几乎每年都有数篇有关柯伊伯带的文章。

收稿日期: 2008-06-08 ; **修回日期:** 2008-10-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (10403004, 10833001) ; 国家 973 项目 (2007CB814800)

2 柯伊伯带历史的简要回顾

在 1930 年冥王星被发现后, 美国天文学家 Leonard^[1] 对其轨道进行了分析并提出猜想: 既然太阳系是由一系列连续的区域构成: 类地行星区 (水星、金星、地球和火星), 主带小行星区 (处于火星与木星之间, 距太阳约为 2~4 AU) 和类木行星区 (木星、土星、天王星和海王星), 而且太阳的引力作用范围远远超出冥王星轨道, 那么在海王星的轨道外应该还存在其他的行星围绕太阳运行。在此之后, 爱尔兰天文学家 Edgeworth 提出^[2,3]: 在海王星的轨道外有大量的 小天体或者小天体群存在, 其中有些小天体由于偶然性的碰撞进入内太阳系形成了彗星。1950 年, 土耳其天文学家 Oort 又提出^[4], 在 10^5 AU 以外有一个由大量小天体构成的巨型球体云团包围着太阳系, 它是所有彗星的起源地, 现在称之为奥尔特云 (Oort Cloud)。

1951 年, 美国天文学家 Kuiper^[5] 在叶凯士天文台 (Yerkes Observatory) 50 周年研讨会上作了有关太阳系起源的报告。Kuiper 认为在年轻的太阳周围有一个由气体和尘埃构成的盘状星云, 星云物质通过凝聚、吸积从而形成了行星。他估算了在距离太阳不同位置处太阳星云的初始物质分布, 发现此分布在类木行星附近出现峰值, 而在海王星轨道之外开始减少。在保证有足够的物质形成类木行星的基础上, 他建立了海王星轨道外的太阳星云模型, 并通过计算得出结论: 在此区域内的星云会凝聚成数以十亿计的小星子, 其组成和彗星相似。据此, Kuiper 预言在海王星的轨道之外有一个由大量小天体构成的盘状区域, 即今天所称的柯伊伯带 (Kuiper Belt), 它是短周期彗星 (指公转周期小于 200 a 的彗星) 的来源。

但是, 柯伊伯带的猜想被人们忽视了几十年, 直到 20 世纪 70 年代。Joss^[6] 在 1973 年指出, 观测到的短周期彗星数量不能用奥尔特云来解释, 因而另有来源。1980 年, Fernández^[7] 在对短周期彗星起源的研究中论证了海王星轨道外小行星带的存在, 并讨论了它的形成和演化。他认为在 35~50 AU 之间的初始太阳星云含有超过 10 个地球质量的固体物质, 由于引力不稳定性, 形成了约为 10^{11} 个质量不超过 10^{18} g 的星子^[8], 这些星子通过吸积形成了较大的小天体 (质量约为 10^{23} ~ 10^{26} g)。之后, 由于小天体之间的近距离相互作用, 部分小天体的轨道扩散到海王星附近并被它向内散射形成短周期彗星。此外, Fernández 还对这些小天体的可观测性作了分析: 它们在距离太阳 40~50 AU 的地方形成, 质量约为 10^{24} g, 假定其反照率为 0.5 (如冥王星), 那么它们的视星等为 17~18 mag, 因此应该可以被观测到。1988 年, Duncan^[9] 对顺行低倾角短周期轨道彗星的数量进行了分析, 发现它们不是来自一个各向同性的球壳状的起源地 (即奥尔特云), 而应来自于海王星轨道之外的彗星带。

随着 CCD 的广泛应用, 1992 年 8 月, Jewitt 和 Lun^[10] 在夏威夷的玛纳基亚山天文台 (Mauna Kea Observatory) 发现了第一个柯伊伯带小天体 (Kuiper Belt Object, KBO) 1992 QB1。1993 年 3 月, Williams 等人又先后发现了第二和第三个柯伊伯带小天体 1993 SB 和 1993 SC^[11,12]。之后, 越来越多的柯伊伯带小天体被观测到, 图 1 显示的是柯伊伯带在太阳系中的位置。

在柯伊伯带小天体 1992 QB1 被发现的同时, Levison 和 Duncan^[13] 利用数值方法模拟了在太阳和 4 个类木行星的引力作用下, 海王星轨道外小偏心率、低倾角的小天体 (零质量试验体) 轨道的稳定性情况 (演化至 10^9 a)。结果显示, 如 1992 QB1 般的具有小偏心率、低倾角轨道的小天体是稳定的。

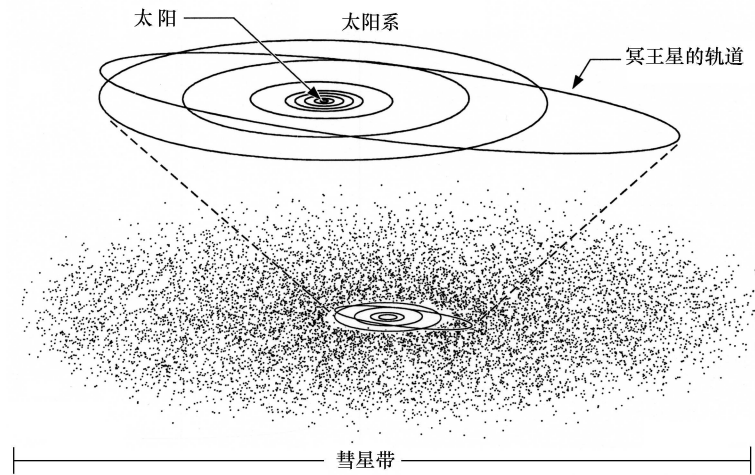


图 1 柯伊伯带在太阳系中的位置示意图

此图片截取自 <http://imgsrc.hubblesite.org/lu/db/images/hs-1995-26-b-pdf.pdf>

3 柯伊伯带简介

柯伊伯带是指位于海王星轨道外的小天体构成的盘状区域, 一般认为柯伊伯带小天体是早期太阳系物质凝聚成各大行星后的残留物。柯伊伯带的发现开辟了对太阳系研究的新纪元, 探索柯伊伯带结构和起源的意义不仅在于它是太阳系新发现的成员, 而且它能够研究外太阳系早期的形成与演化提供极其重要的线索。

截止到 2008 年 1 月, 观测到的柯伊伯带小天体已经超过了 1 200 个, 它们的直径基本都大于 100 km。图 2 显示的是柯伊伯带小天体的空间分布(数据取自 <http://cfa-www.harvard.edu/iau/mpc.html>), 为了清楚起见, 将轨道半长径 $a > 100$ AU 的 17 个小天体统统放在 100 AU 处。可

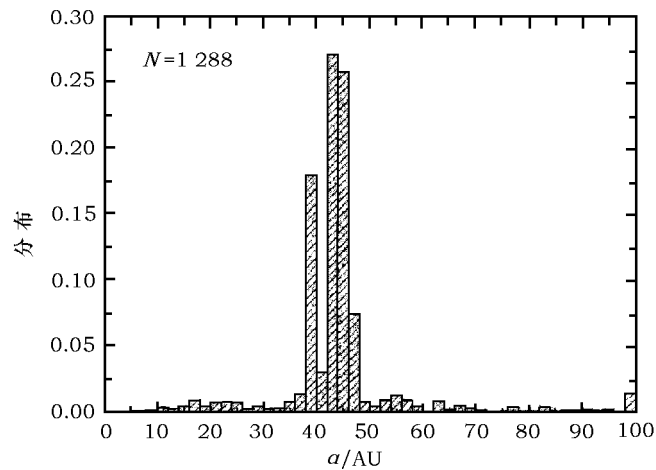


图 2 柯伊伯带小天体的空间分布

以发现, 柯伊伯带小天体的空间分布很广, 而在 39 AU 附近和 42~48 AU 之间有着明显的聚集, 下文将予以详细的说明。

根据观测到的柯伊伯带小天体轨道的动力学特征, 大致可以将它们分为如下 4 类^[14-17]:

(1) 经典柯伊伯带天体 (Classical KBOs), 大约占 2/3, 它们基本位于 42~48 AU 之间, 有着较小的轨道偏心率和较低的轨道倾角 (见图 3), 如 1992 QB1 ($a = 43.872$ AU, $e = 0.069$, $i = 2.2^\circ$)。但近来的观测表明, 此区域内还存在着相当一部分所谓动力学“热”的小天体, 它们有着较大的轨道倾角 (最大超过 30°)^[18]。

(2) 与海王星发生平运动轨道共振的天体 (Resonant KBOs)¹ 约占 25%, 它们有较大的轨道偏心率 (基本在 0.05~0.3 之间)。特别地, 共振小天体主要集中在与海王星发生 3:2 共振处 ($a \approx 39.4$ AU), 而冥王星也位于这里, 因此 3:2 共振处的小天体也叫做冥族小天体 (Plutino)^[19~21]。在海王星的 5:4, 4:3, 5:3, 7:4, 2:1 等平运动轨道共振处也有少量的柯伊伯带小天体聚集 (见图 3)。

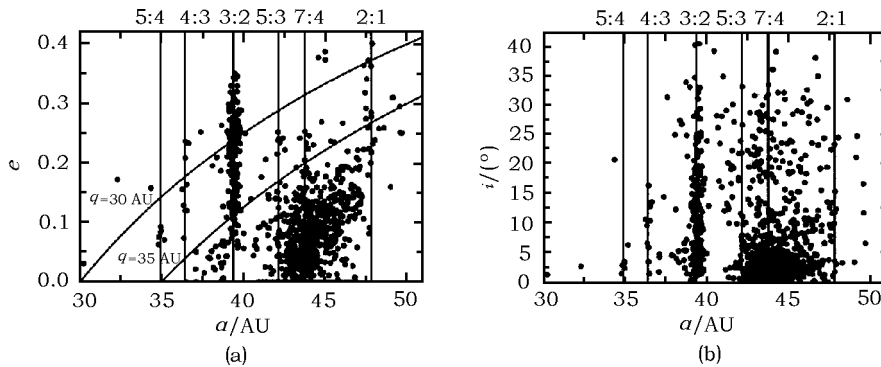


图 3 柯伊伯带小天体的轨道根数分布

(a) 轨道半长径 a 和偏心率 e 分布; (b) 轨道半长径 a 和倾角 i 分布

(3) 散射天体 (Scattered KBOs), 它们在海王星外扁长的椭圆轨道上运行, 轨道偏心率 e 在 0.2~0.85 之间, 倾角 $i < 40^\circ$ (见图 4), 如 1996 TL66 ($a = 82.902$ AU, $e = 0.578$, $i = 24^\circ$)^[22]。散射天体的近日点距离 q 约为 35~40 AU, 相信它们是由于海王星的引力散射作用而导致目前的扁长轨道, 因而 $q < 40$ AU。散射天体受到海王星微弱的引力扰动, 它们的轨道会在 1.0×10^9 a 的时标内发生改变。除了近日点距离较大外, 散射天体的轨道特征和短周期彗星相类似, 因此它们可能是短周期彗星的主要来源^[23~26]。散射天体约占观测数据的 8%, 但是考虑到观测的选择性效应, 其实际比例应该比较大。

(4) 分离的天体 (Detached KBOs), 它们的轨道半长径 $a > 50$ AU, 近日点距离比散射天体大 ($q > 40$ AU) (见图 4), 如 2000 CR105 ($a = 219$ AU, $q = 44.16$ AU, $i = 22.8^\circ$) 和赛德娜 (Sedna: $a = 485$ AU, $q = 76.21$ AU, $i = 11.9^\circ$)。由于这些小天体远离太阳, 因而受到类木行星

¹ 指小天体和海王星的轨道周期成简单整数比 $|p/q|$, 且共振角 ϕ 的振幅小于 180° 。 $\phi = p\lambda + q\lambda_N + m\tilde{\omega} + n\tilde{\omega}_N + r\Omega + s\Omega_N$, 其中 λ , $\tilde{\omega}$ 和 Ω 分别表示天体的平经度、近日点经度和升交点经度, 下标 N 表示海王星的相应量; p, q, m, n, r, s 是整数, 且 $p + q + m + n + r + s \equiv 0$ 。

引力作用非常弱, 在太阳系年龄内, 它们不会与海王星发生密近交会 [27,28]。

另外, 还有一种被称为半人马小行星 (Centaur) 的彗星类 (冰) 小天体, 它们分布于 5~30 AU 之间 (见图 4), 直径可达到数百 km (如喀戎 (Chiron): $a = 13.706$ AU, $e = 0.381$, $i = 6.9^\circ$) [29]。截至目前, 已经发现了超过 100 颗半人马小行星。半人马小行星的轨道和类木行星相交, 因此处于动力学不稳定的状态, 一般认为, 它们可能是从柯伊伯带小天体转变成短周期木星族彗星的中间天体 [30,31]。

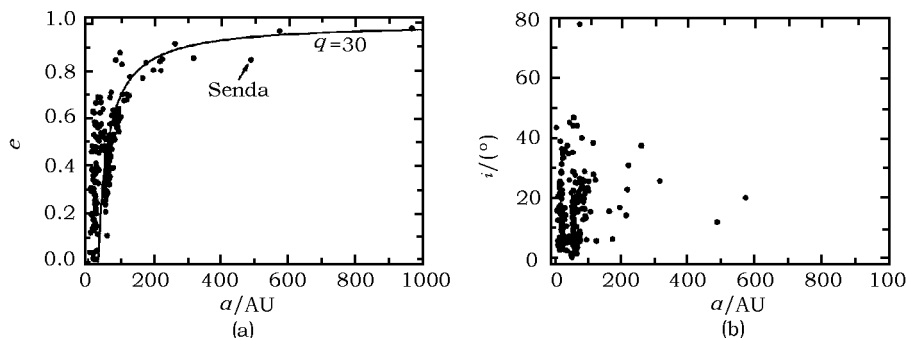


图 4 散射天体、分离的天体和半人马小行星的轨道根数分布

(a) 轨道半长径 a 和偏心率 e 分布; (b) 轨道半长径 a 和倾角 i 分布

表 1 列出的是一些较大的柯伊伯带小天体 (直径为 1 000 km 量级)。

表 1 直径为 1 000 km 量级的柯伊伯带小天体

名 称	绝对星等 /mag	反照率	直径 /km	类 型
阋神星 (Eris)	-1.2	0.86 ± 0.07	$2\,400 \pm 100$	散射小天体
冥王星 (Pluto)	-1.0	0.6	2 320	3:2 共振小天体
Orcus	2.2	0.04/0.12	$\approx 1\,500$	3:2 共振小天体
赛德娜 (Sedna)	1.6	0.2?	$< 1\,500$	分离的小天体
冥卫一 (Charon)	1	0.4	1 270	3:2 共振小天体
2005 FY9	0.3	0.6?	1 250?	散射小天体
2003 EL61	0.4	0.6?	1 200?	经典小天体
创神星 (Quaoar)	2.6	0.12	$1\,200 \pm 200$	经典小天体
Ixion	3.2	0.09	$1\,065 \pm 165$	3:2 共振小天体
伐罗那 (Varuna)	3.7	0.07 ± 0.02	900 ± 140	经典小天体
2002 AW197	3.2	0.1	890 ± 120	散射小天体

冥王星奇异轨道的起源一直是个有趣的问题: 八个行星的轨道面和黄道面都基本重合, 唯独冥王星有约为 17° 的轨道倾角; 另外, 冥王星的轨道还具有较大的偏心率 ($e \approx 0.25$), 有一段 (近日点附近) 轨道甚至在海王星的轨道以内, 但是有三个共振机制保证了其运动的长期稳定性 [32]: (1) 冥王星与海王星处于 3:2 平运动轨道共振, 因此它们之间的距离始终大于 18 AU, 不会发生密近交会 [33]; (2) 冥王星的近日点角距 ω 在 90° 附近振动 (此为古在 (Kozai) 共振 [34,35]), 因此冥王星在近日点时远离其他行星运动的轨道面; (3) 冥王星与海王星的升交点经度之差 $\Omega - \Omega_N$ 的进动周期和冥王星的近日点角距 ω 的振动周期发生

耦合, 即 1:1 超级共振^[36]: 当 $\Omega - \Omega_N = 0^\circ$, $\omega = 90^\circ$ 时, 冥王星的轨道偏心率达到最小, 轨道倾角达到最大; 当 $\Omega - \Omega_N = 180^\circ$, ω 仍为 90° , 冥王星的轨道偏心率达到最大, 轨道倾角达到最小, 因此减小了海王星对冥王星的摄动^[37]。

1978 年, Christy 和 Harrington^[38] 发现了冥王星的卫星冥卫一, 它的直径约为 1 200 km, 质量约为冥王星的 1/8^[39]。最近的观测显示^[40], 除了冥卫一之外, 冥王星还有另外两个较小的卫星: 冥卫二 (Nix) 和冥卫三 (Hydra), 这个四星系统可能起源于两个天体的碰撞^[41~43]。

如今已发现柯伊伯带小天体中最大的并不是冥王星, 而是阋神星^[44], 它的直径大约为 2 400 km, 稍大于冥王星的 2 300 km。正是由于阋神星的发现, 引起了科学界关于行星定义的争论, 是否应将其和冥王星一样列入太阳系行星的行列? 在 2006 年 8 月于布拉格召开的国际天文学联合会 (IAU) 第 26 届大会上, 来自各国天文学界的代表投票通过决议: 冥王星将不再位于“行星”之列, 而被降级为矮行星 (dwarf planet)。

4 柯伊伯带结构的形成机制

从图 3 和图 4 中我们可以看到, 柯伊伯带小天体的轨道表现出比较明显的激发状态, 近年来提出的可能的形成机制主要有以下 5 种。

(1) 大星子散射: Morbidelli 和 Valsecchi 提出^[45], 曾经有若干 1~5 倍于地球质量的大星子被海王星散射到原始的柯伊伯带中, 它们激发了柯伊伯带小天体的轨道偏心率和倾角, 并且将大量的小天体散射出去, 使原始的柯伊伯带损失了大部分的质量。Petit 等人^[46] 建立了更加精细的模型, 也得到了与上述类似的结论。但是该模型不能形成柯伊伯带中小天体在海王星的 3:2 共振附近的聚集, 相反地, 该模型预言了较空的 3:2 共振位置。另外, 大星子曾经的存在与否也没有直接的证据。

(2) 天王星和海王星“空降”: 在原始木星和土星的固体核达到约为 15 倍地球质量后, 它们开始从太阳星云里大量吸积气体, 质量快速增大形成巨行星。理论分析指出^[47], 在木星 - 土星区域 (4~10 AU) 中可能还有另外 2~3 个约为 15 倍地球质量的行星核, 它们没能吸积到气体使质量增大, 而是被木星或者土星散射出去, 有两个最终形成了天王星和海王星。就是这两个被散射出来的行星核激发了柯伊伯带小天体的轨道^[48]。

(3) 恒星交会: 恒星大多成群成团产生, 因此双星或多星系统是普遍的现象。在太阳系形成的早期, 如果有另一颗恒星从附近经过, 将会扰动并激发太阳系内天体的轨道。Ida 等人^[49] 证明, 若一个具太阳质量的恒星从距离太阳大约 100~200 AU 的地方经过, 则有可能充分激发 42 AU 外经典柯伊伯带小天体的轨道, 且不影响海王星 3:2 共振处的小天体, 这一模型还部分解决了柯伊伯带的质量缺失和边界问题。

(4) 长期共振迁移: 长期共振是指当星子的近日点或升交点进动的固有频率与太阳系某一特征频率相当, 前者 (近日点) 的共振能够激发星子的轨道偏心率, 而后者 (升交点) 的共振会激发星子的轨道倾角。在存在星云气体的早期太阳系中, 随着星云气体的耗散, 气体引力势改变, 长期共振的位置就会发生迁移, 导致柯伊伯带小天体的偏心率和轨道倾角受到激发^[50]。然而, 长期共振迁移无法解释海王星的 3:2 共振处小天体的聚集; 另外, 由于长期共振对星子轨道倾角的激发非常有效, 经典柯伊伯带中将不会有如 1992 QB1 般的低倾角小天体存在。

(5) 类木行星的轨道迁移: Fernández 和 Ip 通过数值模拟发现^[51], 类木行星形成晚期与残留的星子盘相互传递角动量, 海王星、天王星、土星获得角动量向外迁移, 而木星则失去角动量向内迁移。Malhotra 在此基础上发展了共振俘获机制^[52,53]: 随着海王星向外迁移, 与其发生平运动轨道共振的位置扫过原星子盘, 最终这些共振 (特别是 3:2 和 2:1 共振) 俘获了大量的天体, 并有效地激发了它们的轨道偏心率。

虽然科学家们为柯伊伯带的形成过程描绘了许多不同的图景, 但是到目前为止, 还没有任何一种机制可以单独地重现柯伊伯带所有的观测结构。其中, 类木行星的轨道迁移和共振俘获模型是当前最流行的理论, 可以比较好地解释柯伊伯带结构的形成。

5 柯伊伯带的特征及主要问题

柯伊伯带当前的特征和外太阳系早期的演化是密不可分的, 因此研究柯伊伯带小天体的动力学可以了解外太阳系形成的整个过程提供大量有价值的线索。另外, 相比于研究类木行星自身而言, 柯伊伯带可以“告诉”人们更多的有关类木行星从形成到轨道演化方面的信息。下面, 将从动力学方面, 论述外太阳系早期的演化理论所必须要解释的柯伊伯带的特征及主要问题。

5.1 海王星平运动共振处的小天体

现有的观测资料显示, 有相当一部分的柯伊伯带小天体处于与海王星发生平运动轨道共振的位置 (见图 3), 特别是 3:2 共振处 (39.4 AU), 另外在 5:4 (34.9 AU)、4:3 (36.4 AU)、5:3 (42.3 AU)、7:4 (43.7 AU) 和 2:1 (47.7 AU) 等共振处也有一定数量的小天体聚集。Malhotra^[54] 利用平面圆形限制性三体模型, 给出了柯伊伯带中海王星平运动共振的位置和宽度。而 35 AU 内的区域由于共振重叠导致混沌, 几乎没有小天体存在。

对于柯伊伯带这种共振结构的形成, 类木行星的轨道迁移和共振俘获模型给出了比较好的解释。在太阳系形成早期, 类木行星基本获得和现在相当的质量之后, 通过与残留的星子盘相互作用发生角动量交换, 土星、天王星和海王星获得角动量向外迁移 (轨道半长径变大), 而木星则失去角动量向内迁移 (轨道半长径减小)^[51]。Malhotra^[52,53,55] 在此基础上发展了共振俘获机制, 她引入了一个假想的力作用于类木行星上, 迫使它们的半长径发生光滑的变化, 模拟行星迁移的过程。根据绝热演化理论^[56], 随着海王星缓慢地向外迁移, 与其发生平运动轨道共振的位置扫过原星子盘并俘获了大量初始位于小偏心率、低倾角轨道上的小天体 (特别是 3:2 和 2:1 共振小天体)。

理论表明, 上述机制能够激发被共振俘获的星子的轨道偏心率, 因此可以通过冥王星和冥族小天体 (3:2 共振小天体) 当前的轨道偏心率分布来估计海王星轨道迁移的距离尺度^[55]:

$$\Delta e^2 = \frac{k}{j+k} \ln \frac{a}{a_i} = \frac{k}{j+k} \ln \frac{a_N}{a_{N,i}}, \quad (1)$$

这里 Δe 是小天体轨道偏心率的改变量, a_i 和 a 是小天体初始和当前的轨道半长径, $a_{N,i}$ 是在小天体被共振俘获时海王星的轨道半长径, a_N 是海王星现在的轨道半长径。 j 和 k 是两个整数, 表示 $j+k:j$ 平运动轨道共振。假定 3:2 共振小天体初始位于近圆轨道上 ($e \approx 0$), 根据它们现在最大的偏心率 ($e_{\max} \approx 0.35$), 可以估算出海王星的轨道至少向外扩

张了 9 AU。另外, Malhotra [57] 发现在此迁移过程中, 由于长期共振的作用, 冥王星的轨道倾角也会受到激发。

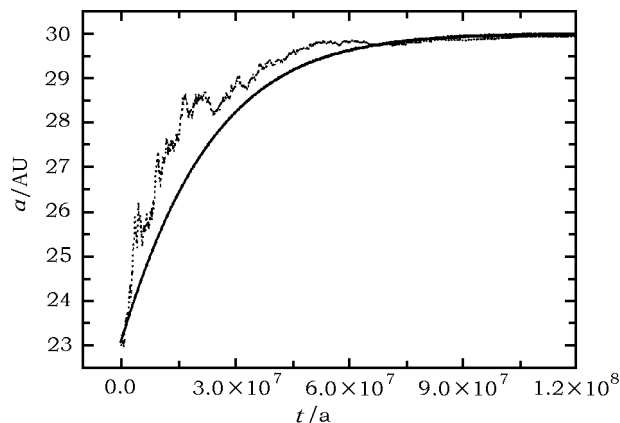


图 5 海王星的轨道半长径演化

实线表示光滑迁移, 虚线表示有随机性的迁移, 迁移时标为 2×10^7 a

Malhotra 提出的模型 [52,53,55] 解释了小天体在与海王星发生 3:2 共振处聚集等一些柯伊伯带结构的重要特征, 但其预测的小天体在 2:1 共振处大量聚集则与观测事实不符。实际上, 类木行星的轨道迁移并不是光滑的, 由于行星每次散射星子而发生轨道改变的事件都是独立和随机的, 因此其轨道迁移过程应该有一定的随机性, 但是有总体的迁移方向: 向内或者向外 [51,58]。Zhou 等人 [59] 和 Li 等人 [60] 在类木行星轨道迁移的过程中引入随机效应 (图 5), 成功地解释了海王星的 2:1 共振处的柯伊伯带小天体的缺失, 得到了与观测较为接近的分布 (图 6), 但此模型中小天体的轨道倾角并没有被充分激发。在柯伊伯带小天体被海王星平运动共振俘获的过程中, Li 等人 [60] 和 Gomes [61] 对轨道倾角的激发机制作了仔细的研究, 发现虽然有一部分共振小天体可以获得较大的轨道倾角, 但是和观测数据比较, 其数量和受激发的程度都相对较小。那么, 在类木行星轨道迁移和共振俘获过程之前或者之后, 是否有其他的机制 (如恒星交会、长期共振迁移等) 激发了柯伊伯带小天体的轨道呢?

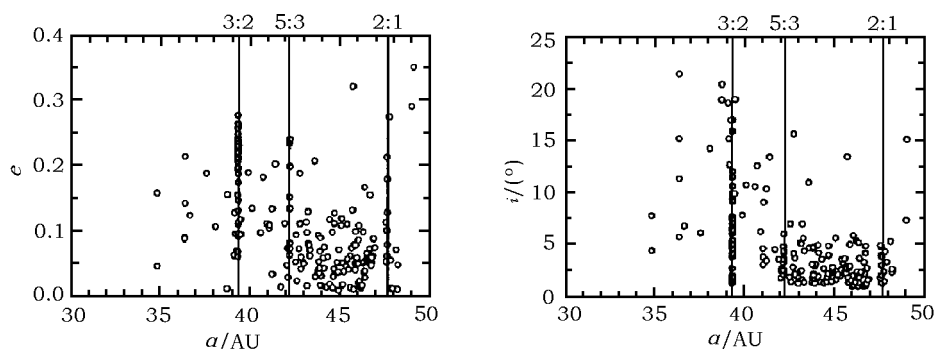


图 6 在类木行星轨道迁移的过程中引入随机效应后, 初始位于 28~48 AU 之间的试验体的最终轨道根数分布 [60]

Nesvorný 和 Roig 发现^[20,62], 共振小天体的轨道稳定性敏感于其共振角振幅的大小。若它们的共振角振幅比较小, 则可在太阳系年龄内保持稳定; 而那些共振角振幅相对较大的小天体随着时间 (约为 10^9 a 量级) 的演化离开了共振区, 它们由于失去了共振保护而与海王星发生密近交会, 有的就形成了短周期彗星。Kotoulas 和 Voyatzis^[63] 利用平面圆形限制性三体模型, 对海王星的 5:4 平运动共振区作了详细的研究, 找到了其中的稳定轨道, 并指出柯伊伯带小天体 2003 FC128 确实处于与海王星发生 5:4 共振的位置。Kotoulas 和 Hadjidemetriou^[64] 建立了一种基于平均哈密顿系统的辛映射模型, 他们用此模型研究了海王星 4:3 共振区里的小天体在平面及三维空间中的演化。在平面模型中 (即小天体的倾角 $i = 0$), 受到 4:3 共振保护的小天体可以在大偏心率 ($e \approx 0.44$) 椭圆轨道上稳定地运行而不与海王星发生密近交会; 随着这些共振小天体轨道倾角的增大, 4:3 共振的稳定区域越来越小, 当 $i > 10^\circ$ 时, 共振区变得完全混沌, 这解释了为什么在实际观测中 4:3 共振区内几乎没有倾角超过 10° 的小天体存在 (图 3(b))。Lykawka 和 Mukai^[65,66] 通过数值模拟研究了处于经典柯伊伯带中的 7:4 共振, 他们发现在 $(4\sim 5) \times 10^9$ a 的时间尺度内, 7:4 共振可以缓慢地激发共振区内及其周围小天体的偏心率和轨道倾角 (图 3)。对于倾角 $i < 5^\circ$ 的 7:4 共振小天体而言, 其稳定区域为 $0.25 < e < 0.3$, 而倾角 $i > 10^\circ$ 的小天体则处于极不稳定的轨道上, 这和上述对 4:3 共振的研究结果相类似。

在柯伊伯带中还存在着一类特殊的共振小天体 —— 海王星的特洛伊小行星 (Trojan asteroid)。所谓特洛伊小行星指的是与其主行星有着相似的轨道半长径, 在行星前后 60° 的拉格朗日点 (L4 和 L5) 附近, 和行星一起围绕太阳运动的小行星。特洛伊小行星与其主行星具有几乎相同的轨道周期, 因此一般说它们是处于行星的 1:1 平运动轨道共振中。观测显示, 当前海王星共有 6 个特洛伊小行星 (见表 2, 数据取自 [http://cfa-www.harvard.edu/iau/lists/Neptune Trojans.html](http://cfa-www.harvard.edu/iau/lists/Neptune_Trojans.html)), 其中 4 个都在近圆、低倾角的轨道上运行; 而另外两个特洛伊小行星 (2005 TN53^[67] 和 2007 VL305) 却有很高的轨道倾角 ($i > 25^\circ$)。目前对于海王星特洛伊小行星起源的研究, 大多是建立在解释木星特洛伊小行星的形成机制的基础上, 如太阳星云气体的阻滞作用^[68]、星子的撞击生长^[69]、类木行星的轨道迁移^[70,71]、共振重叠^[72,73]、行星质量增长^[74,75] 等。但是在上述机制中, 只能形成低轨道倾角的特洛伊小行星。Li 等人^[76] 提出, 在上述的类木行星轨道迁移发生之前, 海王星可能一度处于高偏心率的轨道上^[48,77], 由于周围星子盘的动力学摩擦作用, 它的偏心率很快衰减到约为 0, 同时快速向内迁移 (演化时标为 10^5 a)。在此快速迁移过程中, 海王星将一些初始高倾角的星子俘获进其特洛伊轨道。当海王星达到近圆轨道之后, 特洛伊小行星随着海王星的 1:1 共振向外迁移到达现在

表 2 海王星的特洛伊小行星

名称	位置	a/AU	e	$i/(\circ)$
2001 QR322	L4	30.262	0.031	1.3
2004 UP10	L4	30.171	0.027	1.4
2005 TO74	L4	30.151	0.052	5.3
2006 RJ103	L4	30.036	0.027	8.2
2005 TN53	L4	30.143	0.064	25.0
2007 VL305	L4	30.007	0.062	28.1

的位置,形成类似于2005 TN53和2007 VL305这样的高倾角特洛伊小行星。实际上,此机制的关键在于海王星轨道迁移的速度,只要海王星迁移得足够快,其1:1共振就可以俘获到星子,而与它的偏心率大小无关。但是如果海王星初始位于近圆轨道上,它与残余星子盘的相互作用会导致其缓慢地向外迁移,迁移时标约为 10^7 a量级^[58,60],在如此缓慢的迁移中,海王星是无法俘获到特洛伊小行星的^[78]。

5.2 经典柯伊伯带小天体倾角的双峰分布

人们一度认为,处于42~48 AU之间的小天体与共振小天体及散射小天体不同,它们的轨道几乎不受海王星引力作用的影响,还保持着太阳系形成初期“冷”的状态,即在小偏心率、低倾角的轨道上运行,这也是称之为“经典”柯伊伯带小天体的原因。但是观测表明,在经典柯伊伯带中有相当数目的所谓动力学“热”的小天体,它们有较大的轨道倾角(最大超过 30°),这些高倾角小天体的起源,是柯伊伯带研究工作中的难点之一。

为了考察柯伊伯带小天体轨道倾角的真实分布, Brown^[18]提出了一种新的方法,只需要知道小天体被发现时的轨道倾角和日心黄道纬度,即可确定其轨道倾角的无偏分布(unbiased distribution)。这个方法其实很简单,考虑到不同倾角的小天体在黄道附近运行的时间长度不同,只考察那些被发现时黄纬在 0.5° 以内的小天体,并将每个小天体的个数乘以权重 $\sin(i)$,这样就可以除去观测时由纬度因素而产生的选择性效应,得到无偏的轨道倾角分布。根据此方法,可以发现经典柯伊伯带小天体明显分为低倾角和高倾角两个部分(见文献^[18]中的图10)。

Levison和Stern^[79]对经典柯伊伯带小天体的分析发现,它们由两个明显不同的部分组成:动力学“热”的和动力学“冷”的。前者有较大的轨道倾角(最大超过 30°)和较大的尺寸(最大半径 $r > 330$ km);而后者的轨道倾角 $i < 5^\circ$,尺寸也比较小($r < 170$ km)。Tegler和Romanishin^[80], Trujillo和Brown^[81]以及Tegler等人^[82]的研究结果显示,经典柯伊伯带小天体的色指数($B - R$ color)和它们的轨道倾角有明显的关系,高倾角小天体的颜色偏蓝,低倾角的小天体颜色偏红,然而冥族小天体(3:2共振小天体)却无此“颜色 - 倾角”对应关系。一般认为天体的颜色(表面组成)和天体生成时所处的环境以及经历的演化过程有关。因此人们就认为经典柯伊伯带中动力学“热”(高倾角)和动力学“冷”(低倾角)的这两类小天体应该经历了不同的演化,有不同的起源。

Gomes^[83]用数值方法模拟了包含太阳和4个类木行星以及10 000个原始的星子(有质量,但忽略星子之间的摄动)的系统的演化。在内盘星子($a < 28$ AU)的作用下,类木行星发生轨道迁移,大量星子穿越海王星的轨道并被其向外散射。这些星子随即可能经历长期共振、古在共振或者平运动轨道共振,这些共振能够暂时降低星子的轨道偏心率,使它们的轨道不再和海王星轨道相交。随着海王星向外迁移,这些星子又从共振位置中“漏”出来,成为现在观测到的偏心率较小或中等却具有较大轨道倾角的动力学“热”的经典柯伊伯带小天体。另外,也有较少的一些外盘星子($28 \text{ AU} < a < 50 \text{ AU}$),它们距离类木行星较远,因此未经历轨道穿越;虽然被迁移中的平运动共振扫过,它们仍保持较小的轨道倾角,形成动力学“冷”的经典柯伊伯带小天体。但是此模型的最大问题在于,这些“冷”的小天体无法在合理的时间内在当地长成。另外还有一个问题,虽然有些“热”的小天体的轨道偏心率在长期共振、古在共振和平运动共振的作用下减小,但是其减小的程度有限,难以形成观测到的偏心率 $e < 0.1$ 的高倾角小天体。

Nagasawa 等人指出^[50], 太阳星云气体的耗散可以引起长期共振迁移, 导致柯伊伯带小天体轨道倾角的激发。但是, 柯伊伯带小天体倾角的受激发程度又十分敏感于星云气体中面和太阳系不变平面的夹角 δ ^[84]。黎健等人^[85]研究了在太阳系紧致构形(4 个类木行星发生轨道迁移之前, 轨道彼此相距较小的状态)中, 长期共振迁移对于经典柯伊伯带小天体轨道倾角的激发作用, 发现: (1) 当星云气体中面与太阳系不变平面重合, 即 $\delta=0$ 时, 长期共振迁移不能有效地激发经典柯伊伯带小天体的轨道倾角, 即使增大行星相对于不变平面的倾角, 小天体轨道倾角的变化依然很小; (2) 当星云气体中面与黄道面重合, 即与不变平面有大约 $\delta = 1.6^\circ$ 的夹角, 小天体的轨道倾角可以被长期共振激发到 30° 以上(见图 7)。要达到这种效果, 须在类木行星和原始柯伊伯带小天体形成之后, 满足条件: 残留的星云气体密度约为最小质量太阳星云气体的 0.1%, 耗散时标约为 1.7×10^7 a(这与观测到的金牛座 T 型星的星云气体的耗散时标 $3 \times 10^6 \sim 10^7$ a 相符合^[86])。另外, 小天体的轨道偏心率没有受到激发, 仍保持较小的值 ($e < 0.01$), 与观测到的高倾角小偏心率的经典柯伊伯带小天体很类似。

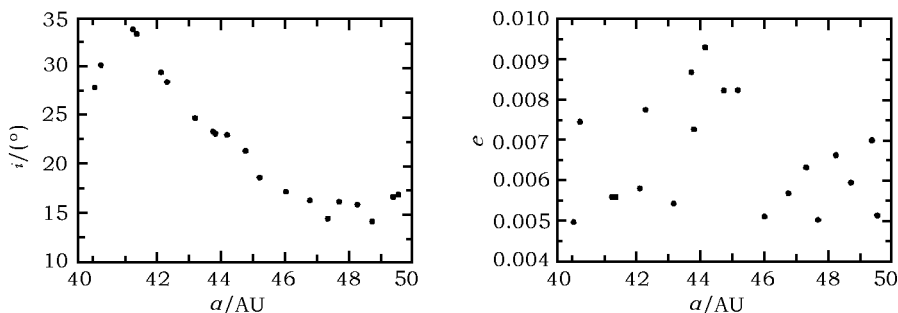


图 7 长期共振迁移对经典柯伊伯带小天体轨道的激发

5.3 质量缺失问题

当前柯伊伯带的总质量只约为地球质量的 $1/10$ ^[87-89], 但是根据吸积模型^[90-93], 要在合理的时间内 ($10^7 \sim 10^8$ a) 形成直径为 100 km 量级的小天体, 初始柯伊伯带至少应含有数十个地球质量的固体物质。那么, 这些物质是如何消失的? 这也是困扰着人们的一个难题。

对于柯伊伯带质量的缺失, 现在一般有两种解释机制^[94]。

(1) 曾经有若干 $1 \sim 5$ 倍于地球质量的大星子被海王星散射到原始的柯伊伯带, 它们激发了柯伊伯带小天体的轨道偏心率。在内柯伊伯带 ($a < 42$ AU), 大多数的小天体被海王星散射到不稳定的轨道上, 从而离开了柯伊伯带; 在外柯伊伯带 ($a > 42$ AU), 被激发了偏心率的小天体相互撞击而被磨碎, 导致了大部分质量的消失^[45,46]。但是该机制同时也清空了海王星 3:2 共振处的小天体, 与观测相矛盾; 另外, 也没有直接的证据显示大星子的曾经存在。

(2) 柯伊伯带小天体一度有着较大的偏心率和轨道倾角, 经历了相互之间猛烈撞击的过程, 导致了绝大多数直径小于 100 km 的小天体被磨碎成为尘埃, 之后, 太阳辐射压和 Poynting-Robertson 效应将这些尘埃物质吹散^[95,96]。但是此机制也存在若干问题: 它要求绝大部分柯伊伯带小天体的直径都小于 100 km, 而直径大于 100 km 的小天体个数则和现在大致相等; 另外, 柯伊伯带中存在一些相距较远的双星(如 1998 WW31, 2001 QW322), 在如此强烈的撞击环境中它们将很难存在至今^[97]。

柯伊伯带小天体的质量是通过假定它们的反照率 (albedo) 都为 0.04(如同木星族彗星核) 估计得到的, 但是近来对尺寸较大的柯伊伯带小天体的观测表明, 它们的反照率要比木星族彗星核高 3 倍左右。由于小天体的质量与其反照率的 $2/3$ 次方成反比, 那么约为 0.1 个地球质量只是柯伊伯带的质量上限, 其实际质量可能只有约 0.02 个地球质量^[28]。

5.4 经典柯伊伯带的外边界

从图 3 中可以看到, 经典柯伊伯带在约为 48 AU 处有明显的外边界 (即海王星的 2:1 共振位置附近)。Trujillo 和 Brown^[88] 在消除了观测的选择性效应之后, 研究了柯伊伯带小天体的径向分布, 证实了此外边界的存在。经典柯伊伯带的外边界也许是它最吸引人的性质, 柯伊伯带为何在此突然中断? 科学家们做了大量的工作, 并提出了多种机制来解释它的成因:

(1) 太阳系形成时的磁转动不稳定性 (magnetorotational instability, MRI) 激发了原星子盘中的湍流, 阻止了星子盘外部区域 (48 AU 以外) 星子的生长^[98]。

(2) 当太阳星云中的固体和气体的面密度之比 η 超过某一临界值时, 星云中面附近的毫米量级的固体颗粒可以通过引力不稳定性形成千米量级的星子。但是由于气体阻力的存在, 固体颗粒发生向内的漂移, 导致固体物质的径向面密度随着日心距离的增大而递减且梯度越来越大, 在某位置及其之外处的 η 值降到此临界值以下, 因此无法形成星子, 从而产生了星子盘的外边界^[99,100]。

(3) 在太阳系形成早期, 临近的大质量恒星的紫外辐射加热了太阳星云气体的外部区域, 被加热的气体夹带着固体尘埃蒸发到星际空间 (即光蒸发效应, photoevaporation), 从而形成了经典柯伊伯带的外边界^[101,102]。

(4) 在柯伊伯带形成之后, 有另外一颗恒星从太阳系附近经过, 其强大的潮汐引力作用使得柯伊伯带在 48 AU 附近被截断^[49,103]。

(5) 在原始柯伊伯带中有一个火星大小的小行星 ($a \approx 60$ AU, $e \approx 0.15 \sim 0.2$), 它将 50~70 AU 范围内绝大多数的小天体散射到和海王星相交的轨道上, 形成了 50 AU 附近的外边界^[104]。此理论的主要问题在于: 是什么机制使得这颗小行星离开了太阳系? 否则它不可能逃出人们的视野^[105]。

但是, 以上的机制有个共同的缺点: 虽然可以形成经典柯伊伯带的外边界, 却无法解释为何此外边界正好处于海王星的 2:1 平运动共振附近。Levison 和 Morbidelli 提出^[106], 所有的柯伊伯带小天体都在 35 AU 以内的区域形成, 然后它们被海王星的 2:1 共振推到现在的位置。在此过程中海王星的“带随机性的迁移” (迁移有着向内和向外的随机性, 但总的方向是向外) 一路上漏下了相当数量的“冷”的小天体, 形成低倾角的经典柯伊伯带小天体, 而 2:1 共振中的长期共振则解释了这些小天体轨道的低偏心率。此图景为经典柯伊伯带外边界的位置提供了一个自然合理的解释。另外, 由于 35 AU 内的星子只有一小部分被 2:1 共振俘获并带到柯伊伯带, 因此现在的柯伊伯带只有很小的质量。但是此模型能否解释共振小天体及“热”的和“冷”的经典小天体的数量比、小天体的实际轨道根数分布等柯伊伯带的全局结构, 还有待更加精细模型的检验。Gomes 等人^[94] 和 Morbidelli^[107] 进一步指出, 由于海王星的轨道迁移会持续至星子盘的外边界才停止, 因此初始星子盘的外边界很可能就在 30 AU 附近 (现在海王星的位置)。

5.5 延展的柯伊伯带

Gladman 等人发现^[27], 柯伊伯带中还有一类新的成员, 如 2000 CR105 ($a = 219 \text{ AU}$, $q = 44.16 \text{ AU}$) 和 1995 TL8 ($a = 52.388 \text{ AU}$, $q = 39.983 \text{ AU}$), 它们的近日点距离 $q \geq 40 \text{ AU}$, 处于散射小天体的轨道之外, 被称之为“延展的散射小天体”。Emel'yanenko 等人指出^[108], 还有若干散射小天体也应归入这新的一类。由于这些小天体远离太阳, 受到类木行星的引力作用非常弱, 因此现在又称它们为“分离的小天体”。一般认为, 分离的小天体是原行星盘中残留下“活化石”, 它们是如何形成并到达当前的位置, 是太阳系早期历史研究中的另一个关键性问题。

分离的小天体中最有名的要数赛德娜 ($a = 485 \text{ AU}$, $q = 76.211 \text{ AU}$), 它是位于柯伊伯带和奥尔特云之间的一颗小行星, 发现时距离太阳约为 90 AU , 是当时人们已知的太阳系中距离太阳最远的天体^[109]。另外, 赛德娜的直径 (约为 1700 km) 只比冥王星 (约为 2300 km) 略小, 一度还被认为是太阳系的第十颗大行星。

对于分离的小天体 2000 CR105 和赛德娜等特异轨道的起源, Morbidelli 和 Levison 提出了 5 种可能的机制^[110]: (1) 高偏心率 ($0.1 < e < 0.4$) 海王星的扰动; (2) 在柯伊伯带或者散射盘中, 曾经有过大质量行星胚胎的存在; (3) 原始大质量的柯伊伯带对高倾角散射小天体的扰动; (4) 早期柯伊伯带小天体受到附近恒星的扰动; (5) 当小质量恒星或者褐矮星从太阳系附近经过时, 太阳俘获了它们周围的星子盘中的星子。而其中最有可能的则是恒星交会对于远离太阳的小天体的扰动^[110,111]。

Gomes 等人发现^[112], 如果在远离太阳系的地方有一个海王星大小 ($a \approx 2000 \text{ AU}$) 或者木星大小 ($a \approx 5000 \text{ AU}$) 的天体存在, 它的引力扰动可以使得某些散射小天体的近日点距离增大, 逃脱海王星的引力束缚, 到达类似分离的小天体 2000 CR105 和赛德娜的轨道。

5.6 双星和多星系统

继 1978 年发现了冥王星的卫星冥卫一之后, 1998 年又找到了第二个柯伊伯带双星系统 1998 WW31^[113,114]。截止到目前, 已经发现 28 个柯伊伯带小天体有卫星, 其中有 2 个三星系统和 1 个四星系统 (冥王星、冥卫一、冥卫二和冥卫三) (见 <http://www.boulder.swri.edu/ekonews/objects/binaries.html>)。柯伊伯带中的双星系统具有显著的特点: 2 个天体大小相当, 在高偏心率的轨道上相互绕转, 两者相距数百至数千倍直径距离, 系统角动量较大^[115]。Kern 和 Elliot 的估计显示^[116], 柯伊伯带中的紧密双星要比远距双星多得多。

关于柯伊伯带中双星的起源至今没有完善的解释。像冥王星和冥卫一这样在近圆的相互轨道上运行的紧密双星, 两体碰撞是最可能的起源: 两个尺寸相当且相对速度很小的天体发生斜碰撞 (oblique impact), 碰撞后产生了主星及其周围由破碎天体物质形成的盘, 盘中的物质通过积聚形成了卫星^[41]。而 Stern 指出^[117], 通过两体碰撞形成双星的概率很低, 还不足以解释柯伊伯带中双星的数量。Goldreich 等人提出^[118], 当两个较大的柯伊伯带小天体穿越彼此的 Hill 半径 (两体相互作用大于太阳的引力影响) 时, 形成暂时的双星系统, 依靠周围小星子的动力学摩擦或者通过散射第三个大星子, 此双星系统耗散了能量而稳定了其结构, 此机制可以导致更多紧密双星的形成。

而柯伊伯带中的远距双星有着不同于紧密双星的起源。Weidenschilling 提出^[119], 如果两个小天体在第三体的引力作用范围内发生碰撞和吸积, 形成了一个新的小天体, 那么由于

此过程中耗散了足够多的能量, 这个新形成的小天体能够被第三体俘获形成双星。Funato 等人指出^[120], 上述模型中只能产生在近圆轨道上相互绕转的双星, 无法解释观测到的那些处于高偏心率轨道上的双星, 他们提出了另外一种机制: 大质量的主星 a 和小质量的卫星 b 构成的双星系统, 与和 a 质量相当的第三个星子 c 相互作用后, b 被散射出去, 而 c 则取代了 b 的位置, 运行在距离 a 较远且相对偏心率较大的轨道上。

在现有的双星系统形成模型中, 都假设早期柯伊伯带的密度比现在大得多 (100~1 000 倍)。如果此条件成立, 那么就可以认为双星的形成和瓦解都发生在星子刚刚形成, 活动比较剧烈的早期, 而现存的双星仅仅是从那时以来的幸存者^[28]。

6 结 束 语

当前, 对柯伊伯带的探索已经成为天文学家的一项重大研究课题。但是, 柯伊伯带小天体距离地球非常遥远, 虽然观测手段不断进步, 但是科学界至今仍然对它们知之甚少。为此, 美国国家航空航天局 (NASA) 从 20 世纪末就开始准备进行冥王星和柯伊伯带天体的探测, 科学家们希望通过对这片遥远区域的探索可以揭开太阳系起源和演化之谜。

2006 年 1 月 19 日, 冥王星探测器新视野号飞船 (New Horizons spacecraft) 在美国佛罗里达州卡纳维拉尔角的肯尼迪航天中心发射升空。新视野号飞船于 2007 年 2 月经过了木星并借助其巨大的引力提速, 加速飞向太阳系的边缘, 预计 2015 年 7 月抵达冥王星。在与冥王星“亲密接触”之后它将继续前进, 于 2016 年至 2020 年间探索柯伊伯带小天体。新视野号飞船将探测冥王星和柯伊伯带小天体的表面性质、地质构造、内部结构和大气层等物理性质, 为揭示太阳系的起源和演化提供更多的线索。

参考文献:

- [1] Leonard C. Leaflet *Astron. Soc. Pacific*, 1930, 30: 121
- [2] Edgeworth K E. *JBAA*, 1943, 53: 181
- [3] Edgeworth K E. *MNRAS*, 1949, 109: 600
- [4] Oort J H. *Bulletin of the Astronomical Institute of the Netherlands*, 1950, 11: 91
- [5] Kuiper G P. On the origin of the Solar System, In: Hynek J A ed. *Astrophysics*, McGraw-Hill, New York, 1951: 357
- [6] Joss P C. *A&A*, 1973, 25: 271
- [7] Fernández J A. *MNRAS*, 1980, 192: 481
- [8] Kuiper G P. *Celest. Mech.*, 1974, 9: 321
- [9] Duncan M, Quinn T, Tremaine S. *ApJ*, 1988, 328: L69
- [10] Jewitt D C, Luu J X. *Nature*, 1993, 362: 730
- [11] Williams I P, Fitzsimmons A, O'Ceallaigh D. *IAU Circ.*, Edited by Marsden B G, 1993, 5869: 1
- [12] Fitzsimmons A, O'Ceallaigh D P, Williams I P. *IEEEES*, 1994, 1: 24
- [13] Levison H F, Duncan M J. *ApJ*, 1993, 406: L35
- [14] Luu J X, Jewitt D C. *ARA&A*, 2002, 40: 63
- [15] Schulz R. *A&A Rev.*, 2002, 11: 1
- [16] Elliot J L, Kern S D, Clancy K B *et al.* *AJ*, 2005, 129: 1117
- [17] Lykawka P S, Mukai T. *Icarus*, 2007, 189: 213

- [18] Brown M. A. J., 2001, 121: 2804
- [19] Yu Q, Tremaine S. A. J., 1999, 118: 1873
- [20] Nesvorný D, Roig F. *Icarus*, 2000, 148: 282
- [21] Holmes E K, Dermott S F, Gustafson B S *et al.* *ApJ*, 2003, 597: 1211
- [22] Luu J X, Marsden B G, Jewitt D C *et al.* *Nature*, 1997, 387: 573
- [23] Ip W-H, Fernández J A. *A&A*, 1997, 324: 778
- [24] Levison H F, Duncan M J. *Icarus*, 1997, 127: 13
- [25] Morbidelli A. *Icarus*, 1997, 127: 1
- [26] Wan X-S, Huang T-Y. *A&A*, 2001, 368: 700
- [27] Gladman B, Holman M, Grav T *et al.* *Icarus*, 2002, 157: 269
- [28] Delsanti A, Jewitt D. The Solar System beyond the planets, In: Blondel P, Mason J, eds. *Solar System Update*, Springer: Berlin, 2006: 267
- [29] Kowal C T. Chiron, In: Gehrels T ed. *Asteroids*, Tucson: Univ. of Arizona Press, 1979: 436
- [30] Hahn G, Bailey M E. *Nature*, 1990, 348: 132
- [31] Asher D J, Steele D I. *MNRAS*, 1993, 263: 179
- [32] Wan X-S, Huang T-Y, Innanen K A. *AJ*, 2001, 121: 1155
- [33] Cohen C J, Hubbard E C. *AJ*, 1965, 70: 10
- [34] Kozai Y. *AJ*, 1962, 67: 591
- [35] Williams J G, Benson G S. *AJ*, 1971, 76: 167
- [36] Milani A, Nobili A, Carpino M. *Icarus*, 1989, 82: 200
- [37] Kinoshita H, Nakai H. *Earth, Moon and Planets*, 1996, 72: 165
- [38] Christy J W, Harrington R S. *AJ*, 1978, 83: 1005
- [39] Sicardy B, Bellucci A, Gendron E, *et al.* *Nature*, 2006, 439: 52
- [40] Weaver H A, Stern S A, Mutchler M J *et al.* *Nature*, 2006, 439: 943
- [41] Canup R M. *Science*, 2005, 307: 546
- [42] Stern S A, Weaver H A, Steffl A J *et al.* *Nature*, 2006, 439: 946
- [43] Steffl A J, Stern S A. *AJ*, 2007, 133: 1485
- [44] Brown M E, Trujillo C A, Rabinowitz D L. *ApJ*, 2005, 635: L97
- [45] Morbidelli A, Valsecchi G B. *Icarus*, 1997, 128: 464
- [46] Petit J-M, Morbidelli A, Valsecchi G B. *Icarus*, 1999, 141: 367
- [47] Kokubo E, Ida S. *Icarus*, 1998, 131: 171
- [48] Thommes E W, Duncan M J, Levison H F. *Nature*, 1999, 402: 635
- [49] Ida S, Larwood J, Burkert A. *ApJ*, 2000, 528: 351
- [50] Nagasawa M, Ida S. *AJ*, 2000, 120: 3311
- [51] Fernández J A, Ip W-H. *Icarus*, 1984, 58: 109
- [52] Malhotra R. *Nature*, 1993, 365: 819
- [53] Malhotra R. *AJ*, 1995, 110: 420
- [54] Malhotra R. *AJ*, 1996, 111: 504
- [55] Malhotra R, Duncan M J, Levison H F. Dynamics of the Kuiper Belt, In: Mannings V, Boss A P, Russell S S eds. *Protostars and Planets IV*, Tucson: Univ of Arizona Press, 2000: 1231
- [56] Henrard J. *Celest. Mech.*, 1982, 27: 3
- [57] Malhotra R. *Lunar and Planetary Science XXIX*, 1998: 1476
- [58] Hahn J M, Malhotra R. *AJ*, 1999, 117: 3041
- [59] Zhou L-Y, Sun Y-S, Zhou J-L *et al.* *MNRAS*, 2002, 336: 520
- [60] Li J, Zhou L-Y, Sun Y-S. *ChJAA*, 2006, 6: 588
- [61] Gomes R S. *AJ*, 2000, 120: 2695
- [62] Nesvorný D, Roig F. *Icarus*, 2001, 150: 104
- [63] Kotoulas T, Voyatzis G. *AIP Conference Proceedings*, 2006, 848: 627

- [64] Kotoulas T A, Hadjidemetriou J D. *Earth, Moon and Planets*, 2003, 93: 203
- [65] Lykawka P S, Mukai T. *Planetary and Space Science*, 2005, 53: 1175
- [66] Lykawka P S, Mukai T. *Planetary and Space Science*, 2006, 54: 87
- [67] Sheppard S S, Trujillo C A. *Science*, 2006, 313: 511
- [68] Peale S. *Icarus*, 1993, 106: 308
- [69] Chiang E I, Lithwich Y. *ApJ*, 2005, 628: 520
- [70] Gomes R S. *AJ*, 1998, 116: 2590
- [71] Kortenkamp S J, Malhotra R, Michtchenko T. *Icarus*, 2004, 167: 347
- [72] Marzari F, Scholl H. *Icarus*, 2000, 146: 232
- [73] Morbidelli A, Levison H, Tsiganis K *et al.* *Nature*, 2005, 435: 462
- [74] Marzari F, Scholl H. *Icarus*, 1998, 131: 41
- [75] Fleming H, Hamilton D. *Icarus*, 2000, 148: 479
- [76] Li J, Zhou L-Y, Sun Y-S. *A&A*, 2007, 464: 775
- [77] Tsiganis K, Gomes R, Morbidelli A *et al.* *Nature*, 2005, 435: 459
- [78] Chiang E I, Jordan A B, Millis R L *et al.* *AJ*, 2003, 126: 430
- [79] Levison H F, Stern S A. *AJ*, 2001, 121: 1730
- [80] Tegler S C, Romanishin W. *Nature*, 1998, 392: 49
- [81] Trujillo C A, Brown M E. *ApJ*, 2002, 566: L125
- [82] Tegler S C, Romanishin W, Consolmagno S J. *ApJ*, 2003, 599: L49
- [83] Gomes R S. *Icarus*, 2003, 161: 404
- [84] Hahn J M, Ward W R. *Lunar and Planetary Science XXXIII*, 2002: 1930
- [85] Li J, Zhou L-Y, Sun Y-S, ChA&A, 2008, 32: 409
- [86] Carpenter J M, Wolf S, Schreyer K *et al.* *AJ*, 2005, 129: 1049
- [87] Chiang E I, Brown M E. *AJ*, 1999, 118: 1411
- [88] Trujillo C A, Jewitt D C, Luu J X. *AJ*, 2001, 122: 457
- [89] Gladman B, Kavelaars J J, Petit J-M *et al.* *AJ*, 2001, 122: 1051
- [90] Stern S A. *AJ*, 1996, 112: 1203
- [91] Stern S A, Colwell J E. *AJ*, 1997, 114: 841
- [92] Kenyon S J, Luu J X. *AJ*, 1998, 115: 2136
- [93] Kenyon S J, Luu J X. *AJ*, 1999, 118: 1101
- [94] Gomes R S, Morbidelli A, Levison H F. *Icarus*, 2004, 170: 492
- [95] Stern S A, Colwell J E. *ApJ*, 1997, 490: 879
- [96] Davis D R, Farinella P F. *Icarus*, 1997, 125: 50
- [97] Petit J-M, Mousis O. *Icarus*, 2004, 168: 409
- [98] Stone J M, Gammie C F, Balbus S A *et al.* *Transport processes in Protostellar disks*, In: Mannings V, Boss A P, Russell S S eds. *Protostars and Planets IV*, 2000: 589
- [99] Youding A N, Shu F H. *ApJ*, 2002, 580: 494
- [100] Weidenschilling S J. *Icarus*, 2003, 165: 438
- [101] Hollenbach D J, Yorke H W, Johnstone D. *Disk Dispersal around Young Stars*, In: Mannings V, Boss A P, Russell S S eds. *Protostars and Planets IV*, 2000: 401
- [102] Hollenbach D, Adams F C. *Dispersal of disks around young stars: constraints on Kuiper Belt formation*, In: Caroff L, Moon L J, Backman D *et al.* eds. *Debris Disks and the Formation of Planets*, San Francisco: ASP, 2004, 324: 168
- [103] Kobayashi H, Ida S, Tanaka H. *Icarus*, 2005, 177: 246
- [104] Brunini A, Melita M D. *Icarus*, 2002, 160: 32
- [105] Trujillo C A, Brown M E. *Earth, Moon, and Planets*, 2003, 92: 99
- [106] Levison H F, Morbidelli A. *Nature*, 2003, 426: 419
- [107] Morbidelli A. *Science*, 2004, 306: 1302

- [108] Emel'yanenko V V, Asher D J, Bailey M E. MNRAS, 2003, 338: 443
- [109] Brown M E, Trujillo C, Rabinowitz D. ApJ, 2004, 617: 645
- [110] Morbidelli A, Levison H F. AJ, 2004, 128: 2564
- [111] Kenyon S J, Bromley B C. Nature, 2004, 432: 598
- [112] Gomes R S, Matese J J, Lissauer J J. Icarus, 2006, 184: 589
- [113] Millis R L, Buie M W, Wagner R M *et al.* Minor Planet Electronic Circ., 1999: 1999-B24
- [114] Veillet C, Parker J W, Griffin I *et al.* Nature, 2002, 416: 711
- [115] Burns J A. Nature, 2004, 427: 494
- [116] Kern S D, Elliot J L. ApJ, 2006, 643: L57
- [117] Stern S A. AJ, 2002, 124: 2300
- [118] Goldreich P, Lithwick Y, Sari R. Nature, 2002, 420: 643
- [119] Weidenschilling S J. Icarus, 2002, 160: 212
- [120] Funato Y, Makino J, Hut P *et al.* Nature, 2004, 427: 518

Dynamics of the Formation of the Kuiper Belt

LI Jian, ZHOU Li-yong, SUN Yi-sui

(*Department of Astronomy, Nanjing University, Nanjing 210093, China*)

Abstract: As early as the middle of 20th century, Edgeworth and Kuiper independently conjectured the existence of a disk of small objects that orbit the Sun beyond Neptune—the presently called Kuiper Belt. With the discovery of the first member of the Kuiper Belt Objects (KBOs hereafter) 1992 QB1 by Jewitt and Luu in 1992, the Kuiper Belt was transformed from the theoretical conjecture to a bona fide component of our Solar system. By now, more than 1200 KBOs have been observed. Since these objects are thought to be the remnants after the planets had accreted most of their masses, they may provide us with many clues to the formation and primordial evolution of the outer Solar system.

Here, the paper aims to give an overview of the recent progress in the study of the Kuiper Belt. In section 2, the history of the Kuiper Belt is briefly introduced. In section 3, the main observed properties of the Kuiper Belt are presented. In section 4, the mechanisms that have been proposed so far on the origin of the belt is reviewed. In section 5, some outstanding problems that need to be explained in detail are discussed.

Key words: asteroids; Kuiper Belt; Solar system dynamics; Solar system formation; numerical simulation