

行星迁移述评

陈 丰¹, 李雄耀², 王世杰²

中国科学院 地球化学研究所 矿床地球化学国家重点实验室, 环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550002

摘 要: 轨道靠近恒星的太阳系外大行星的发现导致对星盘与行星相互作用和行星迁移形式的广泛研究。行星迁移发生在行星与气体或星子的星盘之间进行潮汐相互作用时, 这造成行星轨道参数, 特别是半主轴的变更。早期研究建立了 I 型和 II 型行星迁移方式, 分别对应于小质量行星和形成能隙的大质量行星。另外, 讨论了新的能够快速迁移的 III 型迁移方式, 它可以使大质量星盘中的行星直接向内或向外迁移。

关 键 词: 行星; 迁移; 热木星; 半主轴; Kuiper 带

中图分类号: P691 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2802(2010)03-0299-05

Planetary Migration—A Review

CHEN Feng¹, LI Xiong-yao², WANG Shi-jie²

*State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, and State Key Laboratory of Environment of Geochemistry,
Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Science, Guiyang 550002, China*

Abstract: The discovery of extrasolar giant planets with orbit closing to stars led to extensive studies regarding disk-planet interactions and planetary migration forms. When the planetary migration occurs under the tidally interaction of a planet and a disk of gas or a planetesimal, the orbital parameters, especially, semi-major axis, of this planet will be altered. Previous studies have established type I and type II migration types for low mass planets and high mass gap forming planets, respectively. In addition, a new migration type of fast migrating, type III, was discussed. This migration type is believed to cause planets in a massive disk migrate directly inwards or outwards.

Key words: planet; migration; hot Jupiter; semi-major axis; Kuiper Belt

行星迁移理论是 20 世纪星云和星子假说最重要的发展^[1]。行星迁移指的是行星或其他小星体与气体或星子组成的星盘或行星相互作用, 变更行星的轨道参数, 特别是半主轴参数, 会导致行星向内或向外迁移。

行星迁移理论基于两方面的事实。首先是太阳系外行星探测发现了许多十分靠近恒星的短周期气体大行星——“热木星”(hot Jupiter)^[2], 它们具有木星或比木星更大的质量, 但公转周期只有几天, 半主轴 $a < 0.1$ AU。在传统的星子假说中, 离宿主恒星太近的距离不能形成热木星, 因为太小的轨道半径不能得到足够的质量, 而且对于形成岩石质或冰

星子而言温度又都太高。因此, 热木星的出现, 只能是行星形成于远离恒星区域, 然后向内迁移的结果。其次是 Kuiper 带星体的发现及其轨道特征的研究。1951 年 Kuiper 提出海王星轨道外的太阳星云模型, 预言海王星外有一个由大量小天体构成的盘状区域, 即今天所称的 Kuiper 带, 它可能是短周期轨道彗星(指公转周期小于 200 a 的彗星)的来源^[3]。1992 年发现了第一个 Kuiper 带(Kuiper Belt Object, KBO)小星体 1992QB1^[4], 随后陆续发现了大量 Kuiper 带小星体, 目前已经超过 1200 个。其中包括比冥王星[原称冥王星, 2006 年第 26 届国际天文联合会中通过第五号决议, 将其划为矮行星(dwarf

收稿日期: 2009-09-25 收到

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40803019, 40873055, 40673053); 中国科学院知识创新导向项目(KZCX2-YW-110); 国家 863 项目(2008AA 12A 213)

第一作者简介: 陈丰(1933—), 男, 研究员, 研究方向: 矿物学、天体化学。

planet),改称冥神星]更大的星体——阋神星(Eris)^[5]。

更重要的是,发现了 Kuiper 带星体的许多轨道特征,特别是轨道共振现象。轨道共振是两个星体运行轨道的公转周期成简单整数比,它们之间互相受到周期性引力的影响。这会使它们的轨道在引力摄动中保持稳定。例如冥神星与其他一些类似冥神星的冥族小星体(Plutino)轨道与海王星轨道成 3:2 的共振。木星的特洛伊小行星(Trojan asteroid)的轨道与木星的轨道呈 1:1 的共振。轨道共振除了使星体轨道在引力摄动中保持稳定外,也会使星体轨道出现不稳定。例如在地球与火星之间的小行星带中有一系列被称为 Kirkwood 空隙的地区,这些地区的轨道与木星的轨道成共振而不稳定,因此这里的小行星很早就已经被排空。

Kuiper 带小星体中有与海王星轨道成 3:2 共振的包括冥神星在内的冥族小星体(Classical KBOs),它们约占 25%;还有与海王星的轨道成 5:4,4:3,5:3,7:4,2:1 和 1:1(特洛伊小星体)共振的少量小星体(Resonant KBOs);而 Kuiper 带的散射星体(Scattered KBOs)在海王星外扁长的椭圆轨道上运行,这种椭圆轨道可能是由海王星的引力散射作用所形成,它们的轨道特征除了近日点距离较大外,与短周期彗星类似,可能是短周期彗星的主要来源;另外,还有 Kuiper 带的半人马(Centaur)小星体的彗星类(冰)的小星体的轨道与类木行星相交,处于动力学不稳定状态,可能是 Kuiper 带小星体转变成短周期木星族彗星的中间星体^[5]。这些轨道共振的研究极大地推动了行星迁移理论的发展。

根据星云假说,天王星和海王星处于“不合理的错误位置”。它们理当形成于木星和土星之后,在太阳风把星盘物质大部分吹走之后才形成,这导致这两个行星上聚集的氢和氦很少,各自不超过 1 个地球质量。天王星和海王星的主要问题是它们的形成时间尺度。在目前的位置上,它们从成核到增生行星可能需要数亿年的时间,这显然是不对的。很明显,天王星和海王星更可能是在靠近太阳的地方——接近甚至介于木星和土星之间形成的,后来才向外迁移^[6~8]。

基于上述事实,发展了行星迁移理论。行星迁移作用是在星子形成后的行星形成过程和行星形成后进行的,至少有下列三种不同的机制导致明显的轨道演化:行星与气体原行星星盘之间的相互作用,这些行星包括从准地球到大质量行星,它通过潮汐相互作用与周围气体星盘交换角动量,使行星向内

迁移,这个机制常用来解释热木星的存在^[9,10];行星与星子星盘之间的相互作用,即大质量行星由于与周围星子相互作用把许多星子向内或向外抛射到新轨道,一般认为这会造成外部太阳系的冰质大行星向内迁移^[11];行星与已形成的行星系统之间的相互作用,这是一个在行星形成完成之前就开始了的过程,发生在气体星盘消散之后,形成的行星系统可能处于动力学不稳定状态,它与行星的相互作用导致轨道元素的明显变化,甚至喷射小质量行星,从而为观察到的太阳系外行星的高偏心率提供解释^[12]。

Goldreich^[13]和 Tremaine^[14]首次指出通过内部/外部 Lindblad 谐振和正转(corotation)谐振机制可以使行星与星盘交换角动量。在 Lindblad 谐振时,行星-星盘相互作用激发了密度波,使行星以谐振方式造成角动量重新分布。Lindblad 谐振的潮汐转矩导致行星向内或向外迁移。早期的标准行星迁移理论常常只考虑 Lindblad 谐振,并且假定气体平滑了星盘内的初始密度剖面和在正转半径上只有小的密度梯度,而正转谐振时行星不能激发密度波,从而可以忽略正转谐振对角动量的影响。

然而,近年发现正转谐振能改善 1 型迁移模式^[15,16],并导出一个新的和非常快的模式(3 型或急剧迁移),它强烈依赖于行星附近的气体流,并不具预定的向内或向外迁移方向^[17,18]。

行星谐振迁移理论发展了土星环理论^[13]。这种迁移设想由 Malhotra^[19,20]予以发展。其中关键概念是:谐振捕获(resonant capture)即在趋同的(converging)轨道上的两个行星通过潮汐相互作用能够彼此捕获,进入平均运动谐振,如果这迁移足够慢(粗略地说,穿越谐振宽度的时间超过谐振中的共振时间),一旦在谐振中捕获,对于 $j:j+1$ 谐振,捕获物体的偏心率增加:

$$e^2 = e_0^2 + \frac{1}{j+1} \ln \left[\frac{a_{final}}{a_{initial}} \right].$$

式中, e 和 e_0 分别为谐振后偏心率和初始偏心率, j 为简单正整数, a_{final} , $a_{initial}$ 分别为最终半主轴和初始半主轴。谐振捕获的例子是海王星谐振捕获冥族小星体,使其轨道与海王星轨道成 3:2 的共振时,海王星向内迁移。

轨道演化机制表现为通过各种物理机制改变星体轨道的半主轴 a , 和/或偏心率 e , 以及倾角 i 。例如,共振效应;物理碰撞(如 Kuiper 带和小行星带);潮汐(如热木星);Yarkovsky 效应(如小物体)等。

轨道演化的例子可以用一个星子散射来说明,考虑一个质量 M_p 的行星散射一个质量 m 的单个星

子,在半主轴 a 上的改变:

$$\frac{\delta a}{a} \approx \frac{\delta m}{M_p}$$

一般说来,行星散射星子向内迁移时 δa 是正的;行星散射星子向外迁移时 δa 是负的。

在星子星盘内单个的行星向内/向外散射的效应改变了星盘的初始有序状态。现在我们来考虑一个星子散射的具体演化例证。对于太阳系结构而言,如果初始条件是星子星盘在海王星之外,海王星能散射一个星子向内到海王星与天王星之间,而海王星向外运动;之后,天王星又散射使星子进一步向内运动,而天王星向外运动;再后,土星再散射使星子进一步向内,土星向外运动(但较小,因为土星有较大质量);最后,该星子与木星相互作用,木星质量大,足以把这物体向外喷射到海王星之外,而木星为了保持能量平衡向内运动。

对于任何有意义的轨道演化,粗略要求: $\sum m_p \geq M_p$,即星子星盘总质量应远大于行星质量。例如,海王星运动需要在海王星以远残留物质星盘内有 30~50 个地球质量。

行星迁移中涉及偏心率演化,造成行星偏心率增大^[21]。但在偏心率演化的问题上还有很多疑问。例如,太阳系外行星偏心率的成因?行星一行星的散射作用?模拟趋向于产生太多的高 e 的行星。

行星迁移研究主要通过模拟来进行。模拟分为层状原恒星星盘内和扰动(turbulent)星盘内两种。层状原恒星星盘内的原行星迁移包括:小质量行星——1型迁移,大质量行星——2型迁移,正转转矩(torques)迁移——3型迁移。扰动星盘内原行星迁移涉及死带、小质量行星、星子和大质量行星等。

1型迁移的特点是:在气体或星子的星盘内在 Lindblad 谐振时行星驱动螺旋密度波,行星与螺旋波直接相互作用导致角动量的交换,在行星轨道的内部和外部与螺旋密度波的相互作用强度出现不平衡,造成向内或向外迁移。这种向内或向外的演化统称为1型迁移。在大多数情况下,行星上的外部角动量转矩稍大于内部角动量转矩,导致行星角动量减少,行星向内迁移。迁移时间尺度短于星盘寿命。其证据有:最近发现的短周期低质量行星,例如,13个行星具有 $m_{\text{mini}} < 40 M_{\text{地球}}$ (即 HD69830-3 行星^[22]),以及所有星盘模式符合 $T > 1500 \text{ K}$ 在 0.1 AU 之内。这些证据都要求行星必须进一步出现1型迁移,但可能比理论预测的要慢一些。

当行星质量大于 10 个地球质量,1型迁移停

止。此外,1型迁移的停止或变慢也可以由下列原因造成:MHD(磁流体力学)扰动;行星与行星之间散射;正转转矩能使行星迁移变慢/停止;强磁场;在密度和温度上急剧转换造成光学不透明性变化;偏心率高星盘;由于从“死带”到“活带”的转变,行星进入空腔(cavity)——行星陷阱(trap)等。

大质量行星可以形成2型迁移。2型迁移出现在下列情况:当行星增长到近于木星质量时,会展开星盘的间隙(gaps),并清理星盘的间隙;如果星盘是活跃地增生到这个行星上,这个行星和它的间隙将被拖曳向太阳,即向内迁移出现;向内迁移出现时间尺度约为 $n \times 10^5 \text{ a}$;木星质量行星维持在近于圆形轨道;由于较重的行星惯性较大迁移较慢;在迁移时间约为 $n \times 10^5 \text{ a}$ 的情况下,A1型星的 $M_{\text{木星}}$ 行星增生附加 2~3 $M_{\text{木星}}$ 。

2型迁移的证据是短周期大行星的存在(热木星)和谐振多行星系统:GJ876-2:1(即 GJ876b 和 GJ876c 两行星,成 2:1 轨道共振)等。

3型迁移的特点是行星与旅经这轨道的星盘物质直接进行能量交换,能量交换时的共轨道正转转矩起源于 Hill 球半径内部气体流与外部气体流之间的马蹄形(horseshoe)区域,或者称 Roche 瓣(lobe,圆凸)区域,迁移速度强烈依赖于 Hill 球内部的气体动力学,事实上,对围绕行星星盘的高宽比灵敏。大质量^[22]和中等质量行星^[23]会遭受3型迁移。正转转矩也能减慢1型迁移^[15]。

在扰动星盘内的行星会出现下列情况:磁旋转(Magnetorotational)的不稳定,造成星盘内剧烈的扰动^[24~25];必须的情况是:弱磁场, $d\Omega/dR < 0$,足够的离子化 $X(e) \sim 10^{-12}$, $Re_m > 100$ ^[26~28]。

行星迁移理论可以解释热木星的存在,也能解释具有类地行星质量的行星,如果它形成时还有气体星盘,就将使其向内快速迁移;这影响到大质量行星的成核(约 10 个地球质量)进程。

对于星子散射导致的迁移而言,大行星增生导致星子和大质量星体胚胎的引力散射,从而有明显的角动量与能量的交换;这使土星、天王星和海王星抛射大多数星体向内,而木星从太阳系向外有一个净喷射;这样,土星、天王星和海王星向外运动,而木星向内运动。同时,海王星向外迁移也解释了冥王星奇特的轨道特征。

考虑到行星轨道长期变化的不确定性,行星轨道实际上是混沌的。例如,海王星-冥王星系统处于 3:2 的轨道共振。尽管轨道共振是稳定的,预测冥王星未来 $(1\sim 2) \times 10 \text{ Ma}$ (Lyapunov 时间,即动力学

混沌的时间长度)的位置却无法取得足够的精度^[29]。这说明行星轨道在半主轴 a / 偏心率 e 中混沌是被限定的。

曾经有人通过轨道演化研究,提出水星在数亿年之后将与金星相撞。最近研究表明,水星与金星相撞的几率非常小^[30];在行星轨道方面近期有许多论文,例如,KBO的分布,热木星,太阳系外行星的大偏心率等。其中值得注意的是 Nice 模式的提出^[31]。它的关键思路是:演化时木星与土星进入 2:1 谐振,谐振激发和提高了太阳系外侧星体的偏心率,导致外侧星子带由于散射而突然损耗,这引起了月球的晚期重轰击。

行星迁移增加了行星、卫星和小行星运行轨道的变化。如 Murray^[32]揭示了天王星两个新卫星和两个新环轨道,并表明它们是一个动力学的演化的和可能不稳定的系统。

行星迁移至今仍有许多问题不清楚。由于天王星和海王星是小质量行星,太阳系动力学以星子散射方式占优势,但在太阳系外行星系统尚未观察到这一情况;预期今后会看到“更多的类似太阳系”系统的行星群。

参考文献 (References):

- [1] 陈丰,李雄耀,王世杰. 太阳系行星系统的形成和演化[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2010, 29(1): 67-73.
Chen Feng, Li Xiongyao, Wang Shijie. Formation and Evolution of the solar planetary system[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2010, 29(1): 67-73. (in Chinese with English abstract)
- [2] 陈丰,李雄耀,王世杰. 太阳系外行星研究进展[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2009, 28(4): 390-393.
Chen Feng, Li Xiongyao, Wang Shijie. Advanced of the Extrasolar planets[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2009, 28(4): 390-393. (in Chinese with English abstract)
- [3] Kuiper G P. On the origin of the solar system[A]. Astrophysics, Hynek J A. McGraw-Hill[M]. New York, 1951: 357-424.
- [4] Jewitt D, Luu J. Discovery of the candidate Kuiper belt object 1992 QB1[J]. Nature, 1993, 362: 730-732.
- [5] 黎健,周礼勇,孙义燧. 柯伊伯带结构形成动力学[J]. 天文学进展, 2009, 27(2): 99-115.
li Jian, Zhou Liyong, Sun Yisui. Dynamics of the formation of the Kuiper belt[J]. Progress in Astronomy, 2009, 27(2): 99-115.
- [6] Thommes E W, Duncan M J, Levison H F. the formation of uranus and neptune among Jupiter and Saturn[J]. Astron. J., 2002, 123: 2862-2883.
- [7] Gomes R, Levison H F, Tsiganis K, Morbidelli A. Origin of the cataclysmic Late Heavy Bombardment period of the terrestrial planets[J]. Nature, 2005, 435: 466-469.
- [8] Levison H F, Morbidelli A, Van Laerhoven C, Gomes R, Tsiganis K. origin of the structure of the kuiper belt during a dynamical instability in the orbits of uranus and neptune[J]. Icarus, 2007, 196: 258-273.
- [9] Lin D N C, Bodenheimer P, Richardson D C. Orbital migration of the planetary companion of 51 pegasii to its present location[J]. Nature, 1996, 380, 606-607.
- [10] Trilling D E, Benz W, Guillot T, Lunine J I, Hubbard W B, Burrows A. Orbital evolution and migration of giant planets [J]. Astrophys. J., 1998, 500: 428-439.
- [11] Levison H F, Morbidelli A, Gomes R, Backman D. Planet Migration in Planetesimal Disks[A]. Protostars and Planets [M]. Reipurth B, Jewitt D, Keil K. Tucson: University of Arizona Press, 2007: 669-684.
- [12] Lin D N C, Ida S. On the origin of massive eccentric planets [J], Astrophys. J., 1997: 477: 781-791.
- [13] Goldreich P, Tremaine S. The excitation of density waves at the Lindblad and corotation resonances by an external potential[J]. Astrophys. J., 1979, 233: 857-871.
- [14] Goldreich P, Tremaine S. Disk-Satellite Interactions[J]. Astrophys. J., 1980, 241: 425-441.
- [15] Masset F S, D'Angelo G, Kley W. On the migration of protogiant solid cores [J]. Astrophys. J., 2006, 652: 730-745.
- [16] Paardekooper S J, Mellema G. Halting type I planet migration in non-isothermal disks[J]. Astron. Astrophys., 2006, 459: L17-L20.
- [17] Masset F, Papaloizou J C B. Runaway migration and the formation of hot Jupiters[J]. Astrophys. J., 2003, 588: 494-508.
- [18] Papaloizou J C B. Disk planet interactions and early evolution in young planetary systems [J]. Celest. Mech. Dyn. Astron., 2005, 91: 33-57.
- [19] Malhotra R. The origin of Pluto's peculiar orbit[J]. Nature, 1993, 365: 819-821.
- [20] Malhotra R. The origin of Pluto's orbit: implications for the Solar system beyond Neptune [J]. Astrophys. J., 1995, 110: 420-429.
- [21] Kley W, Dirksen G. Disk eccentricity and embedded planets [J]. Astron. Astrophys., 2006, 447: 369-377.
- [22] Lovis C, Mayor M, Pepe F, Alibert Y, Benz W, Bouchy F, Correia A C M, Laskar J, Mordasini C, Queloz D, Santos N C, Udry S, Bertaux J L, Sivan J P. An extrasolar planetary system with three Neptune-mass planets[J]. Nature, 2006, 441: 305-309.
- [23] Peplinski A, Artymowicz P G, Mellema G. Numerical simulations of type III planetary migration-I. Discmodel and convergence tests[J]. Mon. Not. R. Astron. Soc., 2008, 386: 164-178.
- [24] Balbus S A, Hawley J F. A powerful local shear instability in Weakly Magnetized Disks[J]. Astrophys. J., 1991, 376:

- 214—233.
- [25] Hawley J F, Gammie C F, Balbus S A. Local three-dimensional simulations of an accretion disk hydromagnetic dynamo [J]. *Astrophys. J.*, 1996, 464: 690—703.
- [26] Ilgner M, Nelson R P. on the ionisation fraction in protoplanetary disks I: comparing different reaction networks[J]. *Astron. Astrophys.*, 2005, 445: 205—222.
- [27] Ilgner M, Nelson R P. On the ionisation fraction in Protoplanetary Disks II: The Effect of Turbulent Mixing on Gas-phase Chemistry[J]. *Astron. Astrophys.*, 2005, 445: 223—232.
- [28] Ilgner M, Nelson R P. On the ionisation fraction in protoplanetary disks III. The effect of X-ray flares on gas-phase chemistry[J]. *Astron. Astrophys.*, 2006, 455: 731—740.
- [29] Sussman G J, Wisdom J. Numerical evidence that the motion of Pluto is chaotic[J]. *Science*, 1988, 241: 433—437.
- [30] Batygin K, Laughlin G. On the Dynamical Stability of the Solar System[J]. *Astrophys. J.*, 2008, 683: 1207—1216.
- [31] Tsiganis K, Gomes R, Morbidelli A, Levison H F. Origin of the orbital architecture of the giant planets of the Solar System[J]. *Nature*, 2005, 435: 459—461.
- [32] Murray C D. Ringing the changes[J]. *Science*, 2006, 311: 961—962.

· 学会之声 ·

我会召开第七届理事会第三次会议暨第二次常务理事会议

李世杰同志接任秘书长向理事会汇报 2009 年的工作
拟设地质微生物专业委员会

2010 年 6 月 6 日我会在北京召开了第七届理事会第三次会议暨第二次常务理事会议。近 70 名常务理事、京区理事及京外部分理事出席了会议，部分专业委员会主任和副秘书长列席了会议。

会议由刘丛强理事长主持。会议首先通报了学会 2009—26 号文“关于请予审议变更我会秘书长人选的通知”的理事会(通讯)审议结果:同意胡瑞忠同志不再担任学会秘书长,由学会挂靠单位现任党委书记李世杰同志接任秘书长的动议;会议审议并通过了这一议案,责成秘书处办理相关的变更手续。

随后,李世杰同志作了 2009 年度秘书处工作报告。报告回顾了学会自 2009 年换届以来的主要工作,指出了学会工作中存在的问题,提出了今后的工作思路和具体设想。会议审议并原则通过了这一报告。

与会理事一致认为,学会 2009 年的工作取得了长足的进展,尤其是几次大型学术会议发挥出了学会作为学术交流重要平台的作用;积极开展科普活动,对提高全民科学素质发挥出了积极的作用。今后学会的工作要始终围绕“三主一家”这一核心来开展,要在学术活动和科技科普活动、学术期刊出版等方面办出精品,打出品牌;要重视学科的交叉,加强自身能力建设,增强学会的凝聚力。会议还着重讨论了地球化学学科建设方面的事宜,指出学会应积极组织和促进有关矿物学、岩石学与地球化学学科发展史的研究,适时组织专门人员开展工作。我会在这方面已有一些积累,先后组织出版了上世纪 70 年代、80 年代、90 年代和世纪之交的有关学科发展十年回顾的著作,期望这项工作能持续下去。

会议还讨论了拟定于 2011 年召开的第 13 届学术年会的筹备事宜。徐义刚副理事长就第 13 届学术年会的筹备情况向会议作了详细说明:会议由中国科学院广州地球化学研究所承办,时间拟定于 2011 年 5 月下旬至 6 月上旬,地点:广州。年会的主题、组织形式、专题设置经讨论,待后整理成具体方案再提交理事会审议。

最后,会议审议了新设立专业委员会的申请。遵照 2009 年 8 月 17 日理事会(通讯)的决定,所有申请在我会设立专业委员会的单位都派出专业人员在会上作了详细陈述。经过讨论和无记名投票,通过了设立“地质微生物专业委员会”的申请。此外,会上还听取了中山大学和西南科技大学关于在我会设立“海洋地质专业委员会”和“固体废物处置专业委员会”的申请,这两项申请拟于今后适当的时候再行审议。

会议完成了全部的议程,达到了预期目的。