第 47 卷 第 4 期 天 文 学 报 Vol.47 No.4
2006 年 10 月 ACTA ASTRONOMICA SINICA Oct., 2006

GJ 876 行星系统中潜在类地行星研究*

季江徽 [1,3] 刘 林 [2,3]

(1 中国科学院紫金山天文台 南京 210008)
(2 南京大学天文系 南京 210093)
(3 中国科学院国家天文台 北京 100012)

摘要 用数值积分方法模拟探讨了 GJ 876 行星系统中存在潜在类地行星的可能性. 结果表明分别产生于内外两颗巨行星的长期共振 ν_1 和 ν_2 可激发类地行星 (其轨道半长轴分布在 $0.21\,\mathrm{AU} \leq a < 0.50\,\mathrm{AU}$ 之间) 的偏心率, 并使它们在极短时间内被抛射出系统. 然而, 从动力学角度而言, 类地行星潜在存在区域可分布在 $0.50\,\mathrm{AU} \leq a \leq 1.00\,\mathrm{AU}$ 之间, 其能在系统中 10^5 年时间尺度上稳定地存在.

关键词 **天体力学: 平运动共振, 长期共振, 类地行星, 行星系统** (GJ 876, 47 UMa)
中图分类号: P 135; **文献标识码:** A

1 引言

10 年前在太阳型恒星 51 Peg 附近发现了第一颗具有木星质量的行星 [1]. 这个历史性的科学发现不仅揭开了搜索太阳系外行星及地外文明的序幕, 同时也证实了行星能够在其恒星附近的盘中 (如 HD 141569 and β Pictoris) 普遍形成. 这些遮掩着年轻恒星的扁平盘被认为是恒星演化和行星系统形成所具有的共同特征. 原生行星盘 (Primordial protoplanetary disks) 蕴涵了气体和尘埃且提供了新行星系统形成所需的原始成分. 迄今, 人们通过多普勒视向速度等方法, 发现了 145 个太阳系外行星系统, 其中包括 152 颗行星 **. 其中有 18 个多行星系统, 包括 14 个双行星系统 (HD 82943, GJ 876, HD 168443, 47 UMa, HD 38529, HD 12661, HD 128311 等) 以及 3 个三星系统 (Upsilon And, HD 160691, HD 37124) 和一个四星系统 (55 Cnc)[2−5]. 因此, 对这些行星系统进行动力学和形成研究将有助于了解两颗及多颗行星在系统中是如何起源和演化.

在表 1 中, 我们列出了 4 个多行星系统的部分轨道特征 (如行星质量, 轨道周期, 半长径和偏心率). 值得指出上述行星都具有木星般质量. 由于地面观测所受到的局限性, 目前更小质量的行星 (如类地行星) 还不能被探测到. 因此, 一个直接的问题是: 在太阳系外行星系统中是否像我们太阳系一样也存在其他类地行星或小天体. 在本文中, 我们的主要目的是研究 GJ 876 行星系统中的潜在类地行星. 主序星 GJ 876 是目前拥有行星系统质量最小的 M 矮星, 其质量约为 $0.32M_\odot$, 系统中两颗类木行星分别具有最小质量为

2005-11-28 收到原稿, 2005-12-08 收到修改稿
* 国家自然科学基金 (编号 10573040, 10203005, 10233020) 和紫金山天文台小行星基金会资助
** http://vo.obspm.fr/exoplanetes/encyclo/index.php, 截止 2005 年 10 月 18 日

1.89 $M_{\rm Jup}$ 和 0.56 $M_{\rm Jup}$[6−7]. 此外，两颗行星的轨道周期之比接近 2:1, 意味着存在平运动通约. 然而，行星形成理论认为低质量行星 (如类地行星) 甚至能够在星系中最丰富的 M 矮星附近形成 [8], 这些恒星通常具有的质量范围是 0.08—0.8$M_{\odot}$, 其比例占到星系中恒星总数的 75%[9]. 例如，最近在 M 矮星 GJ 436 附近发现了一颗海王星质量大小的行星 (约为 18 个地球质量)[10]. 另外，国际上的一些空间计划 (如 SIM 和 TPF) 的科学目标主要任务也将致力于搜索类地行星，另一方面由于地面观测的精度得到极大的提高或者观测方法的不断改进也将可能发现这些行星. 在这里，我们将对多行星系统的这些天体进行研究.

表 1　4 个多行星系统的轨道特征 [2,4,6]

Table 1　Properties of 4 multi-planet systems

Planet	$M_{\rm star}(M_{\odot})$	$M{\rm sin}i(M_{\rm Jup})$	Period P(days)	a(AU)	ecc.
GJ 876 b	0.32	3.39	62.09	0.211	0.05
GJ 876 c	0.32	1.06	30.00	0.129	0.31
HD 128311 b	0.84	2.18	458.6	1.099	0.25
HD 128311 c	0.84	3.21	928.3	1.76	0.17
47 UMa b	1.03	2.86	1079.2	2.077	0.05
47 UMa c	1.03	1.09	2845.0	3.968	0.00
HD 82943 b	1.05	1.63	444.6	1.159	0.41
HD 82943 c	1.05	0.88	221.6	0.728	0.54

在最近的工作中 [11], 我们从数值角度系统地对 47 UMa 双行星系统中类地行星存在的可能性 (其中 0.05 AU $\leq a \leq$ 2.0 AU) 进行了研究. 发现类地行星能够长期存在于与内行星发生平运动共振的区域 (如 3:2 共振), 相应的时间尺度为 10^7 年. 研究结果还表明类地行星的动力可栖息性 (dynamical habitability) 与给定系统中平运动共振和长期共振密切相关. 下面，我们来看在 GJ 876 行星系统中的具体情况.

2　潜在类地行星研究

在这里，我们采用 N 体数值模拟程序进行研究 (见文 [12]), 数值积分是 RKF 积分器和辛算法 [13]. 恒星和两颗行星的质量均取自表 1. 所采用的积分步长约为最内行星轨道周期的 1%—2.5%. 此外，数值误差在积分过程中得到有效地控制.

在本文中，我们详细地探索了具有共面构型的两颗巨行星和一颗类地行星的演化情形. 就数值条件准备而言，假想类地行星的质量范围分布在 0.1$M_{\odot}$ 到 10$M_{\odot}$ 之间. 所采用的初始轨道根数为：数值探索主要在 $[a, e]$ 轨道参数空间进行，低质量天体的半长轴 a 在区间 [0.21 AU, 1.0 AU] 以每 0.01 AU 等间隔分布，偏心率 e 以每 0.01 格点均匀分布在区间 [0, 0.1], 轨道倾角范围是 $0^{\circ} < I < 5^{\circ}$, 其他角度随机分布在 0° 和 360° 之间. 就数值积分而言，典型的演化时标为 10^5 年 (大约是 10^6 个内巨行星轨道周期).

图 1 中给出了相应的数值结果，其中水平和竖直轴分别是类地行星的初始半长轴 a 和偏心率 e, 在图 1a 和 1b 中分别给出了这些天体的最终演化偏心率和存在时间 (即行星在 10^5 年研究时标上在系统中能够保持稳定存在) 的等轮廓图. 类地行星的动力演化

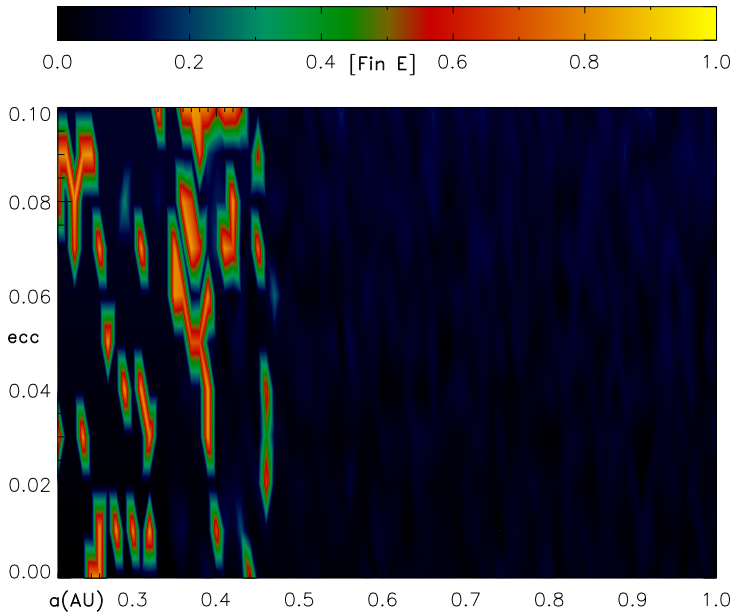

图 1a GJ 876 行星系统中类地行星演化最终偏心率等轮廓图，横坐标和竖坐标分别表示这些天体初始半长轴 a 和偏心率 e.

Fig. 1a Contour of the final eccentricities for Earth-like planets in GJ 876 planetary system. Horizontal and vertical axes are the initial a and e.

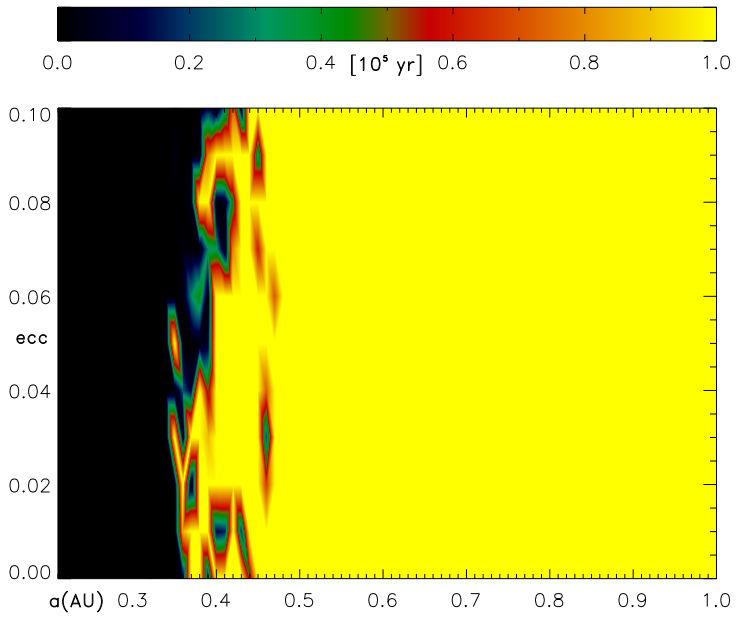

图 1b GJ 876 行星系统中类地行星演化存在时间，横坐标和竖坐标同图 1a.

Fig. 1b Surviving time for Earth-like planets in GJ 876 planetary system. Horizontal and vertical axes are the same as Fig.1a.

结果在图 1a 给出，当 0.21 AU$\leq a <$ 0.50 AU 时，我们注意到由于动力不稳定性偏心率能够被激发到较大值 (甚至接近 1) 或者这些天体被直接抛出系统. 这就意味着在这个区域类地行星处于非常混沌的状态，从而不能够长时间维持在系统中. 特别地，从图 1b 中可以看出，当 0.21 AU $\leq a <$ 0.30 AU 时，类地行星的动力演化时间更加短而很快结束其演化历程，意味着这些天体的轨道非常不稳定. 这里，我们指出类地行星在 0.21 AU $\leq a <$ 0.50 AU 区间的混沌行为在某种程度上和下列因素有关： (1) 两个长期共振 (ν_1 和 ν_2) 的作用； (2) 3 倍 Hill 半径和 ν_1 的叠加作用 [14]. 下面给出具体的分析.

如上所述，两个长期共振 ν_1 和 ν_2 分别产生于内外两颗巨行星，它们对类地行星的混沌运动行为负责. 为了便于理解长期共振的重要作用，我们还作了一些计算. 例如，如果一个类地行星的质量为 $1M_{\odot}$, 那么发生 ν_2 长期共振的区域约在 0.4550 AU 附近，此时类地行星和外巨行星的特征频率可由 Laplace-Lagrange 长期摄动理论给出 [15], 分别为 1°.83/ 年和 1°.90/ 年. 这同时也与数值结果相吻合，如图 1a 给出了类地行星偏心率在 0.45 AU 附近被激发的情况. 另外，发生 ν_1 长期共振的相应区域约在 0.2930 AU 附近，在这种情况下，类地天体与内巨行星几乎拥有相同的特征频率，分别为 21°.30/ 年及 20°.94/ 年. 相对 Hill 半径可表示为： $R_H = [(M_1 + M_2)/(3M_s)]^{1/3}(a_1 + a_2)/2$, 这里 M_s 和 M_i 分别为恒星和巨行星的质量 (下标 $i = 1, 2$ 依次为内外两颗巨行星), a_1 和 a_2 为轨道半长轴. 由表 1 中的数据可得 $3R_H = 0.084$ AU, 对应于 $a_2 = 0.211$ AU, 这样我们得到外部影响边界约为 0.295 AU, 它几乎接近于发生 ν_1 的区域. 因而，对轨道分布在 0.30 AU 附近的类地行星受到 ν_1 的影响较大，这亦证实了我们的数值结果. 另一方面，在 $[a_1, a_2]$ 之间存在许多平运动共振区域，它们亦与 Hill 半径相重叠，于是蕴含在其中的天体则迅速结束其动力学寿命.

从动力学意义上来说，该系统中类地行星潜在存在区域分布于 0.50 AU $\leq a \leq$ 1.00 之间 *, 这些小偏心率行星的轨道可以稳定地存在至 10^5 年 (见图 1a 和 1b). 这是因为它们的初始轨道远离两个长期共振作用，从而不受长期摄动影响. 此外，在 0.50 AU 区域之外的动力稳定性还意味着在该系统中可能存在由未曾吸积星子组成的外行星带.

3　结论

在本文中，我们主要用数值积分方法探讨了 GJ 876 行星系统中存在潜在类地行星的可能性. 研究表明 ν_1 和 ν_2 两个长期共振可以激发类地行星 (0.21 AU $\leq a <$ 0.50 AU) 的偏心率，并使它们在极短时间内被抛射出系统. 然而，从动力学角度而言，轨道分布在 0.50,AU $\leq a \leq$ 1.00 AU 的类地行星可以在系统中 10^5 年时间尺度上稳定地存在，进而能够成为适合于生物演化的环境. Lee 等 [17] 和 Kley 等 [18] 近来建立 GJ 876 系统中两颗巨行星的形成机制的模型，认为它们可能在原恒星盘中通过收敛的轨道迁徙而被俘获到目前 2:1 共振状态. 从这个意义上讲，类地行星 (或盘中星子) 的运动可能会受到两个大行星轨道迁徙的影响，即其可能被直接清除出系统或者被俘获到与两个大行星相共振的

* 本文完稿后， Rivera 等 [16] 在 GJ 876 恒星附近又发现了一颗质量为 7.5 个地球质量的行星，轨道周期为 1.938 天，他们亦指出如果有更多的观测数据不排除在该系统中发现其它行星.

状态. 这些将在今后的工作中进行深入研究. 另外, 还可以开展比较研究, 如探讨其他双行星系统中类地行星是否可以存在, 确定在一般多星系统中它们存在的稳定区域.

参 考 文 献

1 Mayor M, Queloz D. Nature, 1995, 378: 355
2 Fischer D, et al. ApJ, 2003, 586: 1394
3 Marcy G W, et al. Prog of Theor Phy Suppl, 2005, 158: 24
4 Vogt S S, et al. ApJ, 2005, 632: 638
5 McArthur B E, et al. ApJ, 2004, 614: L81
6 Laughlin G, Chambers J. ApJ, 2001, 551: L109
7 Marcy G W, et al. ApJ, 2001, 556: 296
8 Lissauer J. ARA&A, 1993, 31: 129
9 Segura A, et al. Astrobiology, 2005, 5(6): 706
10 Butler R P, et al. ApJ, 2004, 617: 580
11 Ji J H, et al. ApJ, 2005, 631: 1191
12 Ji J H, Li G Y, Liu L. ApJ, 2002, 572: 1041
13 Wisdom J, Holman M. AJ, 1991, 102: 1528
14 Gladman B. Icarus, 1993, 106: 247
15 Murray C D, Dermott S F. Solar System Dynamics. New York: Cambridge Univ Press, 1999
16 Rivera E, et al. ApJ, 2005, 634: 625
17 Lee M H, Peale S J. ApJ, 2002, 567: 596
18 Kley W, et al. A&A, 2005, 437: 727

The Study of the Earth-like Planets in the GJ 876 Planetary System

JI Jiang-hui[1,3] LIU Lin[2,3]

(1 *Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing* 210008)

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

(3 *National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100012)

Abstract The numerical simulations to investigate the Earth-like planets in the GJ 876 planetary system is performed. It shows that the secular resonances ν_1 and ν_2 (respectively, resulting from the inner and outer giant planets) can excite the eccentricities of the Earth-like planets with orbits $0.21\,\mathrm{AU} \leq a < 0.50\,\mathrm{AU}$ and render them eject out from the system in short time. However, in a dynamical sense, the potential zones for the existence of Earth-like planets are in the region $0.50\,\mathrm{AU} \leq a \leq 1.00\,\mathrm{AU}$, and there exist all stable orbits last up to 10^5 yr with low eccentricities.

Key words celestial mechanics: mean motion resonance, secular resonance, Earth-like planets, planetary systems (GJ 876, 47 UMa)