

文章编号: 1000-8349(2011)04-371-16

系外行星系统掩星周期变化研究进展

董 瑶^{1,2}, 季江徽¹, 孙 昭^{1,2}

(1. 中国科学院 紫金山天文台, 南京 210008; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049)

摘要: 在掩星法发现的系外行星系统中, 如果存在其他未知的伴星绕同一颗恒星运动, 掩星行星由于受到伴星引力的影响, 运动轨道将发生变化, 轨道周期不再是常数, 而是变化的。利用这种变化探测掩星系统中的其他行星, 已成为一种新的方法。主要介绍了未知行星与掩星行星之间的引力作用引起的掩星周期变化效应, 以及掩星周期变化法探测系外行星的理论和研究进展状况, 最后简要讨论了几种影响掩星周期变化的其他因素: 共轨行星、卫星、潮汐效应、相对论效应及恒星的引力四极矩等。

关键词: 系外行星系统; 掩星周期变化(TTV); 数值模拟

中图分类号: P185

文献标识码: A

1 引言

目前, 已发现了 500 多颗系外行星, 其中, 掩星法发现的系外行星有 120 多颗^[1]。当行星运动轨道的半长轴较小, 行星的轨道倾角接近于 90° (Edge-on), 且行星运行到观测者与恒星之间时, 行星遮住一部分光, 恒星的光度会发生变化, 通过观测恒星光度的周期性变化来探测系外行星的方法即为掩星法。通过掩星法发现的系外行星非常重要, 结合恒星的光度测量与视向速度 (radial-velocity, 简称 RV) 观测数据, 可以分析行星的物理性质, 如行星半径、质量及密度, 进而研究行星的内部结构^[2, 3]。现在只有 2 个已确认的全部由掩星法发现的多行星系统, 即 Kepler-9^[4] 和 Kepler-11^[5]。Kepler-10 系统中包含一颗掩星行星和一颗候选体, 其中, Kepler-10b 的质量为 $4.56 M_{\oplus}$, 半径为 $1.416 R_{\oplus}$, 密度为 8.8 g/cm^3 , 是 Kepler 计划发现的第一颗岩石性的行星, 具有 Fe 核, 与地球有很多类似的参数^[6]。Kepler 计划还发现了 5 个候选的多行星系统, 等待后续观测的进一步确认^[7]。

随着空间探测精度的提高, 越来越多质量较小的多行星系统将被发现。根据行星形成理论, 类地行星在系外行星系统中可能是普遍存在的; 行星形成的数值模拟结果^[8-14] 表明,

收稿日期: 2011-05-09; 修回日期: 2011-07-05

资助项目: 国家自然科学基金 (10573040, 10673006, 10833001, 10203005); 江苏省自然科学基金和紫金山天文台小行星基金会资助课题

平均一个行星系统中可以形成2~4颗类地行星。Anglada等人^[15]的研究结果表明:超级地球(将质量上限为 $10 M_{\oplus}$ 的类地行星称为超级地球^[16, 17])或者类土星质量的行星系统中可能存在类地质量的行星。从太阳系中有多颗行星可以推测,系外多行星系统是普遍存在的。但是,目前掩星法发现的系统大多数是单行星系统,随着将来地面和空间探测精度的提高,在这些系统中可能会发现多颗伴星(本文将与掩星行星(transit planet)环绕同一颗恒星运动的行星称为伴星(companion))。由于伴星的引力干扰,掩星的周期将发生变化,使用这种变化探测系外行星的方法称为掩星周期变化法,即TTV(transit timing variation)方法。TTV直接依赖于观测数据,反之,研究TTV可以为将来的观测提供有价值的参考。同时,对系外多行星系统的探测,对于理解行星系统的起源与演化及行星的迁移理论等都有重要的意义,对于研究太阳系的起源也具有重要的借鉴意义。

行星之间的相互作用非常复杂,但对于轨道周期较短,处于轨道共振(或接近轨道共振)的多行星系统而言,使用TTV法研究系统中是否存在未知的伴星是可行的;而对于轨道周期长的掩星系统进行TTV分析具有很大的困难,因为掩星观测需要经过数年的时间,这受限于掩星探测的寿命,尤其对于精度非常高的空间探测计划,如CoRoT和Kepler,它们的探测寿命只有几年的时间。TTV方法研究伴星效应具有独特的优势^[18, 19]:对于轨道通约位置上伴星的探测灵敏度高,能够探测到系统中的类地行星,甚至比地球质量更小的系外行星。TTV法已被用于研究掩星系统中的伴星,成为探测系外行星系统的一种新方法。自从Homan等人^[18]和Agol等人^[19]研究了使用TTV研究系外行星系统中的伴星(尤其是类地行星)以来,使用这种方法研究的系统有:WASP-3^[20]、WASP-10^[21]、OGLE-TR-111^[22]、OGLE-TR-113^[23]、OGLE-TR-132^[24]、GJ 436^[25-27]、TrES-1^[28, 29]、TrES-2^[29]、TrES-3^[30]、HAT-P-3^[31]、HD 209458^[32, 33]、CoRoT-1^[34, 35]、HD 189733^[36, 37]等。目前为止,除了Kepler-9和Kepler-11两个系统存在比较明显的、已被确认存在伴星的TTV外,其他系统的掩星周期虽然也显示出一定的异常变化,但是还没有找到它们产生明显TTV的证据。研究结果可给出系统中某些共振位置上存在伴星的质量上限,随着探测精度的不断提高,在这些共振位置上,小于质量上限的伴星有可能被发现。

掩星周期变化依赖于掩星观测,所有影响掩星行星轨道的因素,都可能产生TTV。因此,TTV不仅可以探测掩星系统中能发生掩星的和不发生掩星的伴星,还可以探测系统中的卫星^[38-41]以及共轨行星(如特洛伊小行星)^[42]。但是,这种方法探测不能发生掩星的伴星有困难,而这些伴星能够被其他方法(如视向速度法)探测到^[43]。掩星周期变化的其他影响因素还有潮汐效应、相对论效应、恒星的引力四极矩等^[44-49]。

2 TTV研究进展

2.1 简介

TTV有两种常用的定义。第一种定义是Holman等人^[18]给出的,即为连续两次掩星中心时间的间隔之变化(即观测周期的变化)。其中观测周期为连续两次掩星中心时间的间

隔, $t_{c2} - t_{c1}, t_{c3} - t_{c2}, \dots, t_c$ 为掩星中心时间, 小标数字分别为第1、2、3次掩星。第二种定义是Agol等人^[19]使用的, TTV为“ $O - C$ ”的值, “ O ”代表掩星行星的观测周期(随观测不同而不同), “ C ”表示由观测周期给出的最好的拟合周期。“ C ”值有时也指第一次观测的周期, 后来的观测者将此观测值作为标准值参考。第二种定义, 不依赖于观测上是否有连续的掩星。Veras等人^[50]利用第二种定义指出, TTV信号幅度取决于观测到的掩星的数目和采样率。不管是哪种定义, TTV的大小都将反映出掩星行星的轨道运动受到其他摄动效应的影响, 本文主要讨论伴星产生的TTV。

在掩星系统中, 如果忽略其他可以导致行星轨道进动的效应(如潮汐效应、相对论效应等), 当只有一颗掩星行星在中心恒星的引力作用下做开普勒运动时, 掩星时间为 $t_i = t_0 + iP_s + \delta t_i$, 其中 t_0 为初始时刻, i 为掩星次数, P_s 为掩星的周期, δt_i 为由测量误差引起的掩星时间变化, 掩星的周期应该是严格周期性的(在一定测量误差内)。如果掩星行星受到其他因素(其他天体和各种效应)的影响, 它的轨道半长轴和偏心率将发生短周期的振动, 掩星的周期也发生了改变, 从而产生了远大于测量误差的TTV。

2.2 理论研究

迄今, TTV探测系外行星系统的理论研究已经取得了很大的进展^[18, 19, 39-42, 49]。Holman等人^[18]和Agol等人^[19]在这方面做了开创性的工作, 他们最早研究了TTV探测掩星系统中存在的伴星效应, 为后续的TTV研究掩星系统提供了理论依据。

Holman等人^[18]的研究可以确定有TTV的系统中是否存在未知的伴星, 而目前的探测精度为 $0.1 \sim 100 \text{ min}$ 。他们用数值模拟法研究了HD 209458 b的TTV(如图1)。他们考虑了伴星效应和中心恒星的相对论效应, 忽略了行星之间的相对论效应、恒星的扁率、恒星对行星的潮汐效应以及光程差效应(由于恒星绕质心运动, 恒星与观测者之间的距离变化)。从图1可以看到, TTV随着伴星的偏心率和周期变化而有变化。他们还使用数值模拟研究了类木行星(本文将类似木星质量的气体巨行星定义为类木行星)系统中存在类木星质量($10^{-3} M_\odot$)和类地行星质量($10^{-6} M_\odot$)伴星时的TTV, 给出了TTV随伴星与已知掩星行星的周期比及伴星的偏心率变化关系(见图2), 结果表明, TTV与伴星的质量成正比。从图2可以看出, 在非轨道通约的情况下, 两者的TTV大小基本相同, 但在轨道共振位置上, 数值模拟给出了非常尖锐的峰值, 这说明TTV对探测行星轨道共振位置上的伴星效应尤为敏感。对于短周期的掩星系统, 能否探测到伴星, 取决于TTV的幅度值。通过积分行星运动的拉格朗日方程, 给出了伴星轨道在已知掩星行星外部时的TTV表达式^[18]:

$$\Delta t \simeq \frac{45\pi}{16} \left(\frac{M_2}{M_*} \right) P_1 \alpha_e^3 (1 - \sqrt{2}\alpha_e^{3/2})^{-2}, \quad (1)$$

如果伴星的周期比掩星行星的周期大很多, 公式(1)中最后一个因子可以忽略, 整理后得到估算伴星质量上限的表达式(假设给定伴星的偏心率 e_2)^[18]:

$$M_2 \simeq \frac{16}{45\pi} M_* \left(\frac{\Delta t_{\max}}{P_1} \right) \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^2 (1 - e_2)^3, \quad (2)$$

其中, $\alpha_e = \{(a_1)/[a_2(1 - e_2)]\}$, e_2 为伴星的偏心率, a_1 和 P_1 为掩星行星的半长轴和轨道周

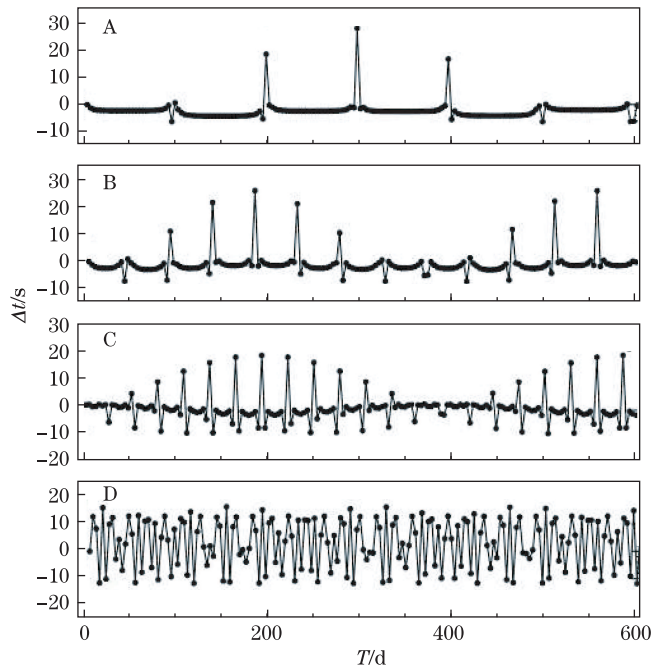


图1 HD 209458系统的TTV随时间的变化

A, B, C, D图分别对应伴星的周期(天)及偏心率为: 99.8, 0.7; 46.4, 0.5; 28, 0.3; 19.2, 0.1。掩星行星的周期(天)、偏心率及质量(M_{\odot})为1, 0.01, 10^{-3} , 伴星的质量 M_2 为 $10^{-3} M_{\odot}$, 中心恒星质量为 $1 M_{\odot}$ [18]。

期, a_2 ($a_2 > a_1$), P_2 和 M_2 为伴星的半长轴、周期和质量, M_* 为中心恒星的质量, Δt_{\max} 为系统中最大的TTV值。如果伴星的偏心率不变, TTV将随着伴星的周期(半长轴)增大而减小; 如果伴星的周期不变, TTV将随着伴星的偏心率增大而增大; 公式(2)表明: 当掩星行星与伴星的周期之比不变时, TTV随着掩星行星的周期变大而增大, 因此, 在观测精度不变的情况下, 探测距离恒星较远的掩星系统中的伴星比较容易; 而且, 如果伴星质量不变, 中心恒星质量比较小的掩星系统的TTV大。

下面再介绍Agoi等人 [19] 对TTV的研究。他们进行TTV研究的假设前提是: 两颗行星拱线同侧且共面, 轨道倾角为 90° , 行星与恒星都为球形的。设掩星周期的变化为 δt , 行星质量与恒星质量之比为 μ , a 和 P 为行星轨道的半长轴和轨道周期, 下标“in”和“out”表示靠近和远离恒星。他们研究了以下几种情况下的TTV。

(1) 伴星在掩星行星的轨道内部, 且伴星的轨道周期很短。如果掩星行星的近日点远远大于内部伴星的远日点, 可以忽略两颗行星之间的扰动, 系统摄动效应来自内部伴星引起的恒星摆动(wobble), $\delta t \approx \mu_{\text{in}}(a_{\text{in}}/a_{\text{out}})P_{\text{out}}$ (文献[19]中公式(16))。

(2) 大偏心率的伴星在掩星行星的(圆形)轨道外部, 且轨道周期很长。考虑两颗行星之间的相互扰动(这种情况, 轨道共振不重要), 外部的伴星将改变内部掩星行星的周期, $\delta t \approx \mu_{\text{out}}e_{\text{out}}(a_{\text{out}}/a_{\text{in}})^3P_{\text{out}}$ (文献[19]中公式(26))。

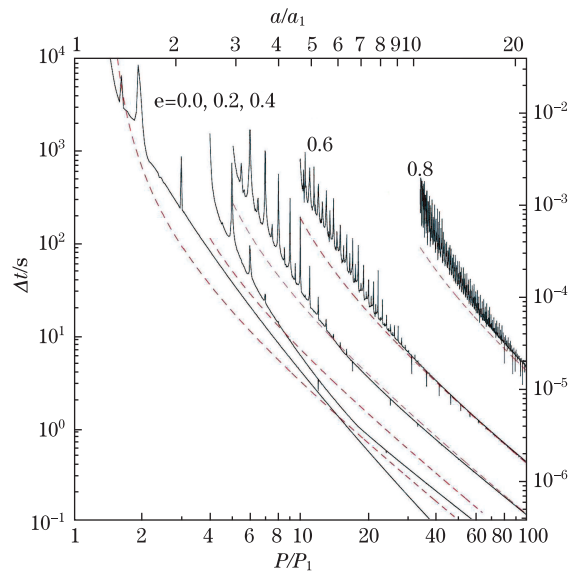


图2 公式(1) (虚线)和数值模拟(实线)给出的TTV与周期之比(P 和 P_1 分别为未知伴星和掩星行星的周期)和伴星偏心率的关系图^[18]。

(3) 掩星行星和伴星都位于近圆轨道上,且它们的周期比为任意值,但非轨道共振。两颗行星(共面的近圆轨道)接近 $j:(j+1)$ (j 为整数)共振时,定义一个表征共振强度的参数共振比值因子, $\epsilon = |1 - (1 + j^{-1})P_2/P_1|$, 当 $\epsilon = 0$ 时,行星轨道共振。伴星的干扰作用对掩星行星的偏心率有影响,当两颗行星越接近共振状态,掩星行星的轨道变圆的周期越长。当 $\epsilon = j - 2$ 时, $\delta t \approx \mu_{\text{out}} a_{\text{in}}^2 / (a_{\text{in}} - a_{\text{out}})^2 P_{\text{in}}$ 。

(4) 掩星行星和伴星初始为圆轨道且轨道共振。这种情况TTV最大,只要伴星的质量远大于掩星行星的质量(目前观测到的掩星行星可能是系统中质量较大的,质量较小的伴星还没有发现),TTV可达掩星行星的轨道周期量级,而与伴星质量无关;对于质量较小的伴星,TTV小于掩星行星的轨道周期,并且与两颗行星的质量比值有关。对于 $j:(j+1)$ 轨道共振的情况,TTV最大值的最佳拟合为:

$$\delta t_{\text{max}} \approx \frac{P}{4.5j} \frac{m_{\text{pert}}}{m_{\text{pert}} + m_{\text{trans}}}, \quad (3)$$

其中, m_{pert} 和 m_{trans} 分别为伴星和掩星行星的质量, P 为掩星行星的轨道周期。Agol等人^[19]用数值模拟法研究了Gliese 876和HD 209458系统的TTV。Gliese 876系统中有两颗接近2:1轨道共振的类木行星,它们的偏心率接近零。Gliese 876 b的TTV周期约为600 d (Gliese 876 b的20个轨道运动),而拱线进动周期为3200 d (Gliese 876 b的110个轨道运动)。在研究TTV与伴星各参数的关系时经常使用等轮廓图。HD 209458系统的TTV与伴星偏心率及周期比值的关系如图3所示(参考文献[19]中图5为彩图)。在4:3共振位置附近,掩星周期的变化杂乱无序;而在2:1共振位置附近,TTV明显变大。在周期比值任意情况下,TTV都随着伴星的偏心率变大而变大。这种图用鲜明的颜色表示出TTV的大小,非常清晰地表现

了TTV与哪些参数有密切的关系。他们还以HD 209458 系统为例, 比较了探测系外类地行星三种方法的探测能力(参考文献[19]中图7), 假设天体测量法、视向速度法和TTV法的探测精度分别为 $(1.0 \times 10^{-6})''$ 、 0.5 m/s 和 10 s 。给出结论为: 在伴星和HD 209458b的半长轴之比小于2的情况下, TTV法比天体测量方法灵敏度高。当伴星不在共振位置时, 视向速度法是最合适的探测方法, 而当伴星在共振位置时, TTV对较小质量的伴星更敏感, 能够探测到类地行星。

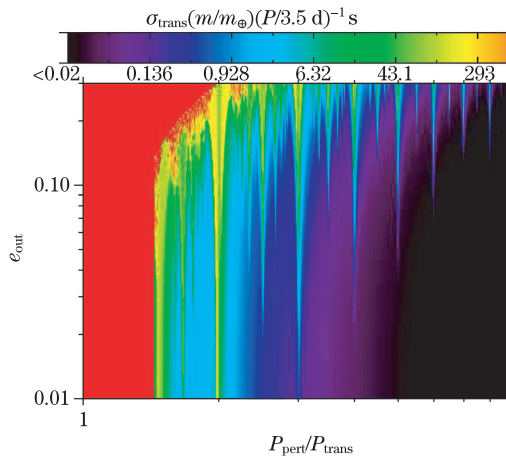


图3 HD 209458系统TTV随伴星偏心率及行星周期比值的关系
灰度表示周期为3.5天的掩星行星系统, 质量为 $1 M_{\oplus}$ 的伴星产生的TTV大小^[19]。

Agol等人将TTV用于研究类木行星系统中的类地行星, 给出了以下几个决定参数: 掩星行星的轨道周期, 掩星行星与伴星接近轨道共振的程度, 伴星偏心率。类地行星能否被探测到还决定于探测精度、恒星光度变化产生的误差及已经探测到掩星的次数。忽略这些因素, 根据公式(3)估算出类木行星系统中类地行星的TTV^[19]:

$$\delta t \propto 3 \left(\frac{m_{\text{pert}}}{m_{\text{trans}}} \right) \min, \quad (4)$$

从上式可以看出, 周期为3 d的掩星行星的轨道外侧2:1共振位置上, 如果存在地球质量的伴星, 则产生的TTV约为3 min。这一结果很容易被地面望远镜探测到。

基于以上对TTV的研究, Agol等人^[19]给天文观测者提出了如下建议: 选择轨道周期长的掩星行星进行观测; 增加地面望远镜的测光信噪比, 更精确地测量掩星时间; 重新核对显示有伴星存在的掩星数据。

2.3 伴星研究

目前发现的掩星系统大多数是单行星系统, 在这些系统中是否存在伴星, 尤其是类地行星, 是TTV研究的主要动机。通过分析观测的 $O-C$ 值, 如果发现掩星的周期有变化, 要确定这些变化是否由伴星的引力影响产生的, 需要结合数值模拟法研究。选择掩星行星被发现时的参数为初始条件, 假设系统中存在一颗共面的伴星, 其一些参数(如质量、偏心率、

半长轴等) 在给定的范围内以一定的步长变化, 分别对应每种初始条件值, 对假设的系统进行数值模拟, 计算出连续的掩星中心时刻, 从而给出系统的掩星周期变化。如果模拟与观测的TTV曲线一致, 表明系统中可能会存在已假设的伴星; 反之, 给出在目前的探测精度下, 系统中可能存在伴星的质量上限。目前已经排除共振位置上存在伴星的掩星系统列于表1中。在这些系统中没有发现伴星产生的TTV, 在某些共振位置1:2, 2:3, 3:2, 2:1上, 分别给出了系统中发现的最大 $O-C$, 及其对应的伴星质量上限。这表明, 如果这些共振位置上存在伴星, 它的质量应小于这些质量上限。在现有的观测精度下, 还无法探测到小于这些上限的伴星。这些质量上限多数为地球质量的量级, 甚至比地球质量小一个量级, 如HD 209458系统的 $0.3 M_{\oplus}$ 。但是, 这些TTV的研究是非常有必要的, 能够给观测者为以后的观测提供指导, 随着观测精度的提高, 可能会发现这些系统中的伴星。

下面介绍含有2颗以上掩星行星的多行星系统的TTV研究。Kepler是用掩星法探测类太阳的恒星可居住区内类地行星的空间计划^[51]。目前为止, Kepler已经发现了1 235颗掩星行星候选体^[52]。但这些候选体是否是行星, 还需要经过后续的观测来确认。Kepler-9和Kepler-11是已经被确认的2个含有2颗以上掩星行星的系统。Kepler-9系统中有一对类土星质量的行星Kepler-9b和Kepler-9c位于2:1共振轨道上。Holman等人^[4]给出了Kepler-9系统中第一个观测上有明显TTV的证据, 该系统中一对掩行星的中心时间变化超过1 h。Kepler-11系统中有6颗掩星行星, 由内至外分别为Kepler-11b、Kepler-11c、Kepler-11d、Kepler-11e、Kepler-11f、Kepler-11g, 其中, 内部的5颗非常靠近, 轨道周期范围约为10.3~46.7 d, 质量范围为 $2.3 \sim 13.5 M_{\oplus}$; 而最外的1颗距离它们较远, 周期约为118.4 d, 质量 $< 300 M_{\oplus}$ 。Kepler-11系统中的行星是岩石和气体的混合物, 可能会含有水, 这是1个非常重要的系统, 依据现有的参数可以进一步研究其形成与演化。Kepler-11内部5颗掩星行星非常靠近, 引力效应较大, 因此, 这两个系统应该有明显的TTV。对以上两系统, 分别研究每颗掩星行星的TTV曲线, 结合数值模拟, 可以进一步确认多行星系统, 还可给出伴星的质量或者质量上限。在Kepler-11e的引力作用下, Kepler-11d和Kepler-11f产生的TTV非常明显; Kepler-11b和Kepler-11c接近5:4共振, 在掩星周期变化的频谱图上存在理论预期的峰值。以上特征都证实了它们是围绕同一颗恒星运动的行星。

下面简单介绍OGLE-TR-132、WASP-3/WASP-10和Kepler-9系统的研究情况。

(1) OGLE-TR-132系统

自2006年以来, Adams等人对3个掩星系统(OGLE-TR-111^[22]、OGLE-TR-113^[23]和OGLE-TR-132^[24])进行了TTV研究。我们将以OGLE-TR-132^[24]系统为例简单介绍研究结果。

OGLE-TR-132是一颗比太阳大而温度较高的恒星。OGLE-TR-132b是2003年用掩星法发现, 2004年被证实是一颗行星。由于其轨道周期小(1.69 d), 该系统有相对多的观测掩星的机会。自2008年4月至2009年5月, 共观测到7次完整的掩星事件, 分析这7次观测以及2002年至2008年发现的3次掩星共10次的观测数据, Adams等人^[24]没有找到轨道倾角及掩星周期发生明显变化的证据。在OGLE-TR-132b的2:1或3:2共振位置上放置一颗(共面的)质量为 $5 \sim 10 M_{\oplus}$ 的小偏心率伴星, 数值模拟结果没有发现大于 (108 ± 49) s的TTV,

表 1 掩星周期变化给出的最大允许的伴星质量

| 系外行星系统 | 最大 $O - C$ (s) | 1 : 2 (M_{\oplus}) | 2 : 3 (M_{\oplus}) | 3 : 2 (M_{\oplus}) | 2 : 1 (M_{\oplus}) | 参考文献 |
|-------------|----------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|--------------|
| TrES-1 | 107 ± 17 | 1 | 2 | 2 | 1 | [28] [29] |
| TrES-2 | 257 ± 27 | 2 | 15 | | 1 | [29] |
| TrES-3 | 70 ± 30 | 3 ~ 4 | | | 10 ~ 15 | [30] |
| OGLE-TR-111 | 65 ± 43 | 1 | 5 | 5 | 1 | [22] |
| OGLE-TR-113 | 140 ± 71 | 1 ~ 2 | | | | [23] |
| OGLE-TR-132 | 108 ± 49 | 5 | 5 | | 5 | [24] |
| HAT-P-3 | < 60 | 0.7 ~ 1.0 | | | 30 ~ 40 | [31] |
| HD 189733 | < 45 | 4 | 1 | 8 | 20 | [36] |
| | 79 ± 36 | 4 | 2 | 8 | 20 | [37] |
| HD 209458 | 70 ± 50 | 0.3 | | 0.3 | 0.3 | [32] [33] |
| GJ 436 | < 60 | | | | | [26] |
| | < 120 | 10 | 2 | 2 | 20 | [27] |
| WASP-3 | 178 | | | | 15 | [20] |
| WASP-10 | 86.4 | | | | | [21] |
| CoRoT-1 | < 100 | | | 1 | | [35] |

但是给出了系统中可能存在的伴星质量上限(参考文献[24]中图5)。如果在掩星行星轨道的1:2, 2:1, 2:3和3:2共振位置上存在 $5 \sim 10 M_{\oplus}$ 的伴星, 目前的探测精度应该能够发现。这是一种给出TTV法研究系统中伴星质量上限的典型图形表示, 它与前面的图2和图3是相同的原理给出的类似的曲线。质量限制曲线与伴星的偏心率和伴星的位置有关。因此, 在这类图中, 横轴可以是与伴星的轨道周期有关的其他参量, 如伴星半长轴, 两颗行星的轨道周期之比、半长轴之比等。

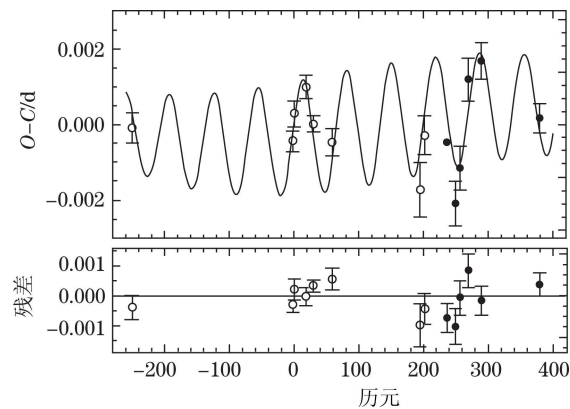


图 4 WASP 3b (初始圆轨道, 半长轴为0.050 7 AU) 2:1共振位置上假设存在 $15 M_{\oplus}$ 的伴星, 数值模拟给出的 $O - C$ 模型, 与观测上的 $O - C$ 作对比^[20]。

(2) WASP-3/WASP-10系统

WASP-3b 是掩星法发现的绕主序星WASP-3运动的系外行星, 它是一颗红外辐射极强的气体巨行星, 质量和半径分别为 $1.76 M_J$ (M_J 为木星质量) 和 $1.31 R_J$ (R_J 为木星半径), 绕恒星的周期约为 44 h。Maciejewski 等人^[20] 通过分析 WASP-3b 系统在 2009 至 2010 年间的 6 次掩星观测数据, 发现掩星时间的周期性变化, 并用 $O-C$ 模型给以解释。他们对观测的 TTV 进行了傅里叶变换, 发现在频率为 $0.0145 P^{-1}$ (P 为 WASP 3b 的轨道周期) 处出现一个频谱峰值, 当用 TTV 的周期为 $69 P$ 的信号拟合观测上的 $O-C$ 值时, 拟合误差较小。通过数值模拟, 在模拟结果中找到了与 TTV 周期及形状吻合较好的情况, 从而给出 WASP-3b 的伴星参数。他们分别考虑伴星在掩星内部和外部的情况, 假设初始伴星为圆轨道, 以 0.0001 AU 为步长改变伴星的半长轴, 以 $5 M_{\oplus}$ 为步长改变伴星的质量, 用 Mercury 程序包^[53] 3 体系统的动力学演化进行了模拟, 最后没有发现与观测上 TTV 的周期相吻合的结果, 表明 WASP-3b 的内部不存在伴星。用同样的方法, 对 WASP-3b 轨道外部的 2:1、3:1、3:2 和 5:3 的共振位置附近, 分别进行了模拟。在大量的数值模拟结果中, 有两组模型与观测上发现的掩星时间变化的周期吻合, 分别为 WASP-3b 轨道 2:1 和 5:3 共振位置上有一颗伴星。最后, 给出了一个非常有可能的模型, 在接近 2:1 (周期比为 2.02) 的轨道共振位置上有一颗 $15 M_{\oplus}$ 的伴星。图 4 (上) 曲线为数值模拟给出的 $O-C$ 的拟合模型, 两种圆圈 (涂黑和不涂黑) 给出观测得到的 $O-C$ 值, 它们在一定误差内吻合较好。图 4 (下) 为残差, 即图 4 (上) 给出的拟合值与观测值之差。

Maciejewski 等人^[21] 还分析了这种模型存在的普通性及其起源问题。WASP-3 中 2:1 共振位置上存在着伴星, 应该与其他已发现的 2:1 共振的多行星系统类似; 但是, 如果这样的 WASP-3c 存在, WASP-3 系统就是目前已知掩星共振位置上存在的离恒星距离最近而质量较小的系统。研究这类行星系统的起源对理解行星的迁移理论非常重要。超级地球在原行星盘中被类木质量的 (气体) 巨行星开出的缝隙边缘上被俘获, 阻止了其他的行星迁移到巨行星的 2:1 共振位置上。随着超级地球核吸积的进行, 其质量不断增加, 最终可以摆脱俘获, 与巨行星形成共振系统。WASP-3c 可能就是这样形成的。现在已发现的行星具有岩石性的残余核, 由此推测出行星在过去可能是质量较大的热木星 (本文指公转轨道极为接近其恒星的类木行星, 这类行星在系外行星系统中经常可见)。它们的大小可以比木星大, 而轨道可比水星近, 可达 0.05 AU 。后来由于距离恒星太近, 使包围内核的气体被完全蒸发掉^[54]。

WASP-10b 是研究 TTV 信号比较好的系统之一。观测上显示该系统中可能存在小质量的伴星, 而且该伴星可能在 WASP-10b 的 1:2 共振位置上绕恒星运动^[15]。Maciejewski 等人^[21] 使用上述方法, 研究了 WASP-10b 系统的 TTV。他们分析了 2009 年观测到的 8 次掩星事件的 9 个光变曲线 (其中有一次掩星由两个不同观测者同时观测到), 发现掩星时间是周期性变化的。数值模拟给出的最后结论是: 在 WASP-10b 外轨道的 5:3 共振位置上可能有一颗质量约为 $0.1 M_J$ 、轨道周期约 5.23 d 的伴星 (如果存在将命名为 WASP-10c), 而在其轨道内部 1:2、1:3 和 2:3 共振位置上不可能存在伴星。如果 WASP-10c 也是掩星行星, 假设 WASP-10c 的半径与 HAT-P-11b^[55] 或者 Kepler-4b^[56] 类似, 约为 $0.4 R_J$, 通量下降 0.3% 甚至更大 (如果系统年龄更年轻), 它仍能被地面的大型望远镜探测到。

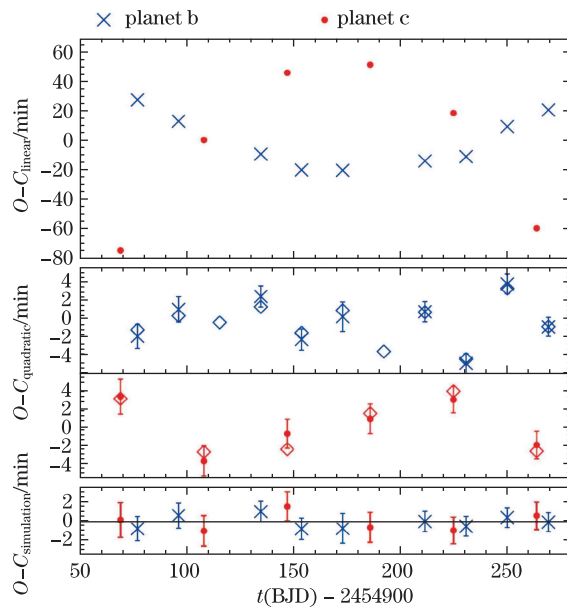


图 5 Kepler-9b (符号 \times)和Kpler-9c (圆点)的掩星周期变化(观测)
符号 \circ 为动力学模拟给出的TTV,只有该值与掩星的观测无关^[4]。

(3) Kepler-9系统

Holman等人^[4]分析了Kepler-9系统7个月观测的TTV,对多颗行星进行了确认。Kepler-9是一颗类太阳的G型恒星,其质量为 $1 M_{\odot}$,半径为 $1.1 R_{\odot}$ 。在其近2:1轨道共振的位置上有2个土星质量大小的掩星行星,Kepler-9b和Kepler-9c,轨道周期分别为19.24 d和38.91 d,目前它们分别以每次轨道周期内4 min和39 min的速率增加和减少。Kepler-9b掩星时间出现了小幅度的交替性变化。这些信息显示出2:1轨道共振的2颗行星的引力相互作用的特征。除去Kepler-9b和Kepler-9c的影响后,在光变曲线中还发现了存在第3颗超级地球大小的行星候选体的特征,与已发现的2颗行星共面,轨道周期为1.5925 d,半径为 $1.5 R_{\oplus}$ 。在它被确定之前称为KOI-377.03行星。它们对Kepler 9的4体系统(包含KOI-377.03)进行了数值模拟,结果表明在积分时间内,此系统能够稳定存在。目前的Kepler计划还探测不到KOI-377.03作为一颗行星所产生的TTV(几十秒)^[18],以及它对Kepler-9b或Kepler-9c的影响。但是,视向速度法可能会探测到类似的小质量行星。他们分别模拟了Kepler-9b和Kepler-9c的TTV,结果表明观测得到的TTV远大于测量掩星时间产生的不确定度80 s。图5给出了Kepler-9系统的 $O-C$,上、中、下3个图掩星周期的计算值分别由线性拟合、二次拟合以及数值模拟得到。从图中可以看到,Kepler-9b和Kepler-9c的TTV是相互交错变化的(当内部行星的TTV变大(变小)时,外部行星的TTV变小(变大))。这种相互交错的信号正是由于Kepler-9b受到伴星Kepler-9c的引力作用而产生的,进一步确认了它们是围绕同一颗恒星运动的两颗行星。

3 其他方面研究

3.1 研究共轨行星和卫星

TTV除了用来探测掩星行星的伴星, 还可以用来探测掩星行星的共轨行星(特洛伊行星)^[42]和卫星^[38-41]。理论研究预言了特洛伊行星是行星形成和演化的副产物。Ford和Holman^[42]的研究结果表明, 利用地面观测的数据, 可以使用TTV法探测类地质量的特洛伊行星。他们考虑了一个三体系统, 恒星(m_*)、行星(m_p)和特洛伊行星(m_T) (定义在拉格朗日点L4/L5附近振动的天体为特洛伊行星), 并给出了系统中有特洛伊行星扰动时的掩星行星的TTV模型^[42]:

$$\delta t_i = K_{tt} \sin \left[\frac{2\pi(t - t_0)}{P_{TTV}} + \phi \right], \quad (5)$$

其中, K_{tt} 和 P_{TTV} 分别是掩星周期变化的幅度和周期, 如果已知 P_{TTV} , 其他参数可以通过拟合获得。掩星周期变化的幅度为^[42]:

$$K_{tt} \simeq 60 \text{ s} \left(\frac{P}{4 \text{ days}} \right) \left(\frac{m_T}{m_\oplus} \right) \left(\frac{0.5 M_J}{m_p + m_T} \right) \left(\frac{k\Delta M}{10^\circ} \right), \quad (6)$$

式中 $k\Delta M$ 是特洛伊行星偏离拉格朗日点的角位移, 对于绕太阳-木星系统附近的拉格朗日点运动的特洛伊行星而言, 振动幅度一般为 $5^\circ \sim 25^\circ$ 。探测短周期的掩星系统中是否存在特洛伊小行星, 将对一些热木星形成的机制提出新的挑战, 说明这些系统是由于行星在气体消散盘中迁移形成的, 而不是受到中心恒星的潮汐作用而形成的。因此, 探测系外行星系统中的特洛伊小行星, 能够检测行星的形成理论。

随着越来越多的系外行星被发现, 对于这些系外行星系统中是否存在卫星, 已经成为研究者关心的问题。Sartoretti和Schneider^[57]首次提出系外卫星使其中心的掩星行星的掩星周期发生变化, 后来Kipping等人^[38-40]进一步研究了系外卫星的探测理论。根据他们的研究结果, 系外卫星对掩星的影响主要为TTV和TDV (transit duration variation)两种效应。其中TTV的幅度 $\propto M_S a_S$, M_S 和 a_S 分别为系外卫星的质量和轨道半长轴; 而TDV的幅度 $\propto M_S a_S^{-\frac{1}{2}}$ 。为了区分系外行星(未知伴星)和系外卫星, 要同时研究这两种效应。系外卫星产生的TTV和TDV相位相差 $\pi/2$, 因此探测信号是独特的。Simon等人^[41]研究了掩星行星存在卫星的摄动而产生的TTV, 标记为TTV_p, 它依赖于卫星和行星的密度比值、质量比值及大小比值。他们使用数值积分分析了行星-卫星系统掩中心恒星的情况。假设行星和卫星的密度相等, 估算给出卫星的大小和质量分别为 $0.274 R_\oplus$, $0.020 M_\oplus$; 如果考虑密度比约为0.6, 估计值则分别为 $0.253 R_\oplus$, $0.010 M_\oplus$, 这些参量与地-月系统的情况相比较在20%以内是吻合的。

3.2 研究有倾角的系统

前面所述TTV探测掩星系统中的伴星, 主要是轨道顺行(prograde)、共面的情况。目前已经观测到了轨道倾角较大, 甚至轨道逆行(retrograde)的系外行星, 如HAT-P-7b和WASP-17b^[58]。因此, 需要研究高倾角、轨道逆行系统中的TTV, 才能更好地给出系统中未知伴星的参数限制。虽然Nesvorný等人^[43]使用新算法, 研究了伴星偏心率较大及轨道有夹角的

情况,但也只是研究了相对轨道夹角小于 90° 的情况。Payne等人^[58]研究了热木星(质量为 $1 M_J$, 偏心率为0, 半长轴为0.05 AU)在类地行星(非掩星行星)引力摄动下的系统,使用数值模拟研究了它们有相对夹角、轨道逆行的情况。研究发现,对于低阶共振(如2:1)的系统, $0 < i < 170^\circ$ 时, TTV幅度近似相等,只有在 $i > 170^\circ$ 时, TTV幅度会减小;对于高阶共振(如5:1)的系统, TTV幅度随着相对夹角增加(至 45°)而增加,在 $45^\circ < i < 135^\circ$ 时近似为常数,而在 $i > 135^\circ$ 时减小;对于非轨道共振的系统, TTV随着相对夹角增加而减小。对于轨道夹角较高的系统($135^\circ < i < 180^\circ$),在整个参数空间中,只有在伴星的偏心率较高或非常接近轨道共振的情况下才会探测到TTV。研究这些有相对夹角系统的TTV,对于研究目前已经发现的轨道逆行的多行星系统非常有意义。使用TTV法探测掩星系统中未知的伴星,如果没有发现伴星产生的TTV,并不意味着系统中不存在伴星,系统中可能存在着轨道相对夹角较高的伴星。Veras等人^[50]用数值模拟法研究系统中由伴星引力作用产生的TTV与各种参数的关系,如连续观测掩星周期的个数 N ,两颗行星的轨道夹角,掩星行星的质量和偏心率,伴星的质量和偏心率及不同轨道通约等情况下的TTV。

3.3 逆问题

掩星周期变化法探测系外行星,不可避免地要解决TTV的“逆问题”,即根据观测数据获得系统的TTV,由此反推伴星的参数(如质量及轨道根数)具有很大困难。目前大多数研究都是假设伴星与掩星行星共面,只改变伴星的偏心率和半长轴,通过大量的数值模拟得到不同的TTV,与观测的TTV比较,给出最好吻合情况下的伴星参数。即使得到相似的曲线,也难以找出产生TTV的真实原因。Ford和Holman^[42]给出了掩星行星在不同天体或不同参数影响下产生的TTV曲线。这些TTV曲线的周期很相近,形状也大致相似。这说明仅仅依赖TTV解释其自身产生的真实原因是不够的,还要结合动力学分析及其他的方法。Nesvorný和Morbidelli^[59]以摄动理论为基础提出一种解决“逆问题”的PT算法(perturbation theory method),使用这种方法比 N 体模拟法可提高速度 10^4 倍,而且适用于椭圆轨道的掩星行星和有相对轨道夹角的掩星系统。最后,他们对观测提出了几点建议,以解决TTV的“逆问题”,如:掩星观测次数要大于20次;需要观测次级掩星(secondary transits);提高观测精度,以给出较小质量的伴星参数等。Nesvorný和Beaugé^[43, 60]将PT算法应用到研究有偏心率的掩星行星及有相对轨道夹角的系统(伴星为非掩星行星)。他们在大量的行星系统中使用该算法,给出该算法对TTV观测精度的依赖性。随着该算法的不断完善,系外行星的参数(包括相对轨道夹角)可以直接从TTV数据中获得,该算法将会有广泛的应用。

3.4 影响因素

TTV除了受到伴星、共轨行星、卫星影响以外,还受到恒星的伴星、恒星的光程差、恒星的引力四极矩,以及系统中的潮汐效应和相对论效应的影响^[18, 19, 39-42, 49]。目前发现的掩星行星距离恒星都非常近,多数位于0.05 AU以内,行星的轨道受到恒星的影响比较大,这些影响包括潮汐效应、相对论效应以及引力四极矩等^[44-48]。这些效应能够引起行星的轨道进动,使掩星时间发生变化。系统中的潮汐耗散还能改变行星的轨道倾角^[46]。但是这些缓慢效应只能通过几年时间的积累探测到。Pál和Kocsis^[61]给出了椭圆轨道的掩星行星的近星点进动与TTV和TDV的关系,研究结果指出,如果CoRoT和Kepler空间计划中发现有偏心率的系

外行星, 在这些计划的有限寿命之内, 如 3~4 a, TDV 可测得 $10^{-2} \sim 10^{-3}$ s, 能够探测到相对论效应产生的近星点进动; 而 TTV 需要更长时间的观测, 如 20 a, 精度达到 $10^{-7} \sim 10^{-8}$ s 时, 才能够探测到相对论效应引起的近星点进动。这种使用 TDV 或 TTV 探测的方法, 不仅可以探测系统中未知伴星的存在, 还可以检测相对论理论。

Ragozzine 和 Wolf^[48] 使用光变曲线研究了热木星系统的内部特征, 考虑恒星和行星都具有一定的结构, 即可以用一些参数 (如半径、Love 数) 表述其内部特征, 研究各种效应产生的拱线进动的速率, 按照大小从主到次的顺序给出了各效应产生的行星近星点距变化率的总和^[48]:

$$\dot{\omega}_{\text{tot}} = \dot{\omega}_{\text{tid,p}} + \dot{\omega}_{\text{GR}} + \dot{\omega}_{\text{rot,p}} + \dot{\omega}_{\text{rot,*}} + \dot{\omega}_{\text{tid,*}}, \quad (7)$$

其中, 各项依次为行星的潮汐效应、恒星的广义相对论效应、行星的旋转效应、恒星的旋转效应和恒星的潮汐效应对轨道产生的进动速率。此结果表明, 对于距离恒星非常近的热木星系统, 行星的潮汐效应是最主要的因素, 广义相对论效应仅次之, 比行星潮汐效应小了 1 个量级。他们还分析了行星的潮汐与恒星的潮汐效应之比值, 前者是后者的 100 倍。

由 TTV 理论知道, 在平运动共振位置上, 大质量甚至较小质量的行星将产生很强的 TTV 信号, 这很容易与潮汐作用产生的长周期的反常信号相区分, 而且伴星产生的进动率是它本身的质量和半长轴的函数。由于热木星内部结构产生的进动每年为几十度, 这样的进动率, 相当于 0.1 AU 以内木星质量的伴星或 1 AU 内太阳质量的恒星产生的进动率。这些进动较明显, 甚至小 1 个量级质量的伴星产生的信号用视向速度法或高精度 TTV 法可以探测。但是当掩星发现的行星, $a \geq 0.05$ AU, 其拱线进动降低到可以与一个低质量的伴星比较时, 混淆可能会发生^[48]。

Rodríguez 等人^[62] 在含有 2 颗行星的多行星系统中添加了相对论效应和恒星的潮汐效应, 以 CoRoT-7 和假设的类木行星系统为例, 主要研究了潮汐对行星演化的影响。按照经典的潮汐理论, 考虑行星和恒星的潮汐效应使轨道的偏心率和半长轴减小, 从而影响了轨道运动, 产生 TTV。Penev 等人^[63] 在研究恒星的潮汐耗散因子时, 计算了由于潮汐轨道衰减而产生的 TTV, 对于目前已观测到的掩星行星来说, $\text{TTV} \leq 1$ ms/a, 远小于目前的地面观测精度; 但是, 后续的 Kepler 空间观测计划, 将极短周期的巨行星纳入观测目标, TTV 可能会测量到。Miralda^[45] 和 Heyl 等人^[49] 研究了影响掩星行星轨道进动的 3 种因素, 按照由大到小的次序分别为: 伴星、相对论效应和恒星的引力四极矩。多种因素引起的轨道进动会影响轨道周期, 产生 TTV。

4 结论和展望

由于掩星使恒星产生的光度变化同行星与恒星的半径比相关, 行星与恒星的半径比越小, 光度变化越小, 因而探测难度越大, 对探测精度的要求越高。因此, 现阶段由掩星法所发现的类地行星基本上都由空间天文卫星探测到。随着空间和地面探测精度的提高, 掩星法将发现越来越多的系外行星。研究掩星的周期变化, 能够探测系统中是否存在伴星。TTV 对

于探测共振位置上较小质量的伴星非常敏感,能够探测到类地质量或者比地球质量还小的伴星。本文回顾了TTV的研究进展,包括理论研究、伴星研究现状和其他方面的研究状况。根据理论研究,TTV决定于掩星行星的周期、伴星的质量、伴星的偏心率以及它们的周期之比等因素。在TTV探测多行星系统方面,在已研究的掩星系统中还没有发现伴星存在的证据。结合目前的观测数据和数值模拟,给出了掩星系统中一些共振位置上可能存在伴星的质量上限。这意味着目前的观测精度在这些系统中无法探测到伴星,随着探测精度的不断提高,将来在这些位置上可能会探测到比质量上限小的伴星。因此,研究掩星系统的TTV,能够给观测提供有价值的参考。目前只有Kepler-9和Kepler-11全部是掩星法发现的多行星系统,在这两个系统中存在明显的伴星的TTV,进一步证实了行星系统中伴星的存在。TTV来源于掩星的观测,反过来,研究掩星系统中TTV的产生原因,能够指导进一步的观测。对有明显TTV的掩星系统,需要做较长时间的掩星观测,积累较多的观测数据。同时,对已有的掩星观测数据,重新进行仔细的处理,尽力排除与观测仪器或观测过程相关的因素,证实TTV来源于系统中的伴星。影响TTV的因素除了包括系统中的伴星、共轨行星、卫星以外,还有恒星的光度变化、恒星的伴星、恒星的引力四极矩以及系统中的潮汐效应和相对论效应等。在以后的工作中,我们将进一步深入研究这些因素对TTV的影响,给出探测精度提高至多大时必须考虑这些效应的影响。

利用TTV方法探测掩星系统中的伴星,我们期待更完善的理论出现,例如:考虑掩星过程和掩星深度的非共面系统,解决TTV的逆问题,提高观测精度等。Kepler计划将发现更多的掩星系统,为TTV研究者提供更多的观测数据,从而给出更多未知伴星的参数限制。

参考文献:

- [1] <http://exoplanet.eu/>, 2011
- [2] Charbonneau D, Brown T M, Burrows A, et al. *Protostars and Planets V*. Tucson: Univ. of Arizona Press, 2007: 701
- [3] Winn J N. *IAUS*, Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2009, 253: 99.
- [4] Holman M J, Fabrycky D C, Ragozzine D, et al. *Science*, 2010, 51: 330
- [5] Lissauer Jack J, Fabrycky D C, Ford Eric B, et al. *Nature*, 2011, 470: 53
- [6] Batalha N M, Borucki W J, Bryson S T, et al. *ApJ*, 2011, 729: 27
- [7] Steffen J H, Batalha N M, Borucki W J, et al. *ApJ*, 2010, 725: 1226
- [8] Raymond S N, Quinn T, Iunine J I. *Icarus*, 2004, 168: 1
- [9] Raymond S N, Quinn T, Iunine J I. *ApJ*, 2005, 632: 670
- [10] Raymond S N, Quinn T, Iunine J I. *Icarus*, 2006, 183: 265
- [11] Chambers J E. *Icarus*, 2001, 152: 205.
- [12] Zhang N, Ji J H. *Science in China Series G*, 2009, 52(5): 794
- [13] Ji J H, Jin S, Tinney C G. *ApJ*, 2011, 727: L5
- [14] Zhang N, Ji J H, Sun Z. *MNRAS*, 2010, 405: 2016
- [15] Anglada-Escudé G, López-Morales, Chambers J E. *ApJ*, 2010, 709: 168
- [16] Fortney J J, Marley M S, Barnes J W. *ApJ*, 2007, 656: 545
- [17] Valencia D, Sasselov D D, O'Connell R J. *ApJ*, 2007, 656: 545

-
- [18] Holman M J, Murray N W. *Science*, 2005, 307: 1288
- [19] Agol E, Steffen J, Sari R, et al. *MNRAS*, 2005, 359: 567
- [20] Maciejewski G, Dimitrov D, Neuhäuser R, et al. *MNRAS*, 2010, 407: 2625
- [21] Maciejewski G, Dimitrov D, Neuhäuser R, et al. *MNRAS*, 2010, 411: 1204
- [22] Adams E R, López-Morales M, Elliot J L, et al. *ApJ*, 2010, 714: 13
- [23] Adams E R, López-Morales M, Elliot J L, et al. *ApJ*, 2010, 721: 1829
- [24] Adams E R, López-Morales M, Elliot J L, et al. *ApJ*, 2011, 728: 125
- [25] Coughlin J L, Stringfellow G S, Becker A C, et al. *ApJ*, 2008, 689: 149
- [26] Bean J L, Seifahrt A. *A&A*, 2008, 487: 25.
- [27] Ballard S, Christiansen J L, Charbonneau D, et al. *ApJ*, 2010, 716: 1047
- [28] Steffen J, Agol E. *MNRAS*, 2005, 364: 96
- [29] Rabus M, Deeg H J, Alonso R. *A&A*, 2009, 508: 1011
- [30] Gibson N P, Pollacco D L, Barros S, et al. *ApJ*, 2009, 700: 1078
- [31] Gibson N P, Pollacco D L, Barros S, et al. *MNRAS*, 2010, 401: 1917
- [32] Miller-Ricci Eliza, Rowe Jason F, Sasselov Dimitar. *ApJ*, 2008, 682: 586
- [33] Agol E, Steffen J H. *MNRAS*, 2007, 374: 941
- [34] Bean J L. *A&A*, 2009, 506: 369
- [35] Csizmadia Sz, Renner S, Barge P, et al. *A&A*, 2010, 510: A94
- [36] Miller-Ricci Eliza, Rowe Jason F, Sasselov Dimitar. *ApJ*, 2008, 682: 593
- [37] Hrudková M, Skillen I, Benn C R, et al. *MNRAS*, 2010, 403: 2111
- [38] Kipping D M. *MNRAS*, 2009, 392: 181
- [39] Kipping D M. *MNRAS*, 2009, 396: 1797
- [40] Kipping D M, Fossey S J, Campanella G. *MNRAS*, 2009, 400: 398
- [41] Simon A, Szatmáry K, Szabó Gy M. *A&A*, 2007, 470: 727
- [42] Ford E B, Holman M J. *ApJ*, 2007, 664: 51
- [43] Nesvorný D. *ApJ*, 2009, 701: 1116
- [44] Mardling R A, Lin D N C. *ApJ*, 2002, 573: 829
- [45] Miralda-Escudé J. *ApJ*, 2002, 564: 1019
- [46] Sasselov D D. *ApJ*, 2003, 596: 1327
- [47] Mardling R A. *MNRAS*, 2007, 382: 1768
- [48] Ragozzine D, Wolf A S. *ApJ*, 2009, 698: 1778
- [49] Heyl J S, Gladman B J. *MNRAS*, 2007, 377: 1511
- [50] Veras D, Ford E B, Payne M J. *ApJ*, 2011, 727: 74
- [51] Koch D G, Borucki W J, Basri G, et al. *ApJ*, 2010, 713: L79
- [52] <http://kepler.nasa.gov/>, 2011
- [53] Chambers J E. *MNRAS*, 1999, 304:793
- [54] Jackson B, Barnes R, Raymond S N, et al. *BAAS*, 2010, 41: 444
- [55] Bakos G á, Torres G, Pál A, et al. *ApJ*, 2010, 710: 1724
- [56] Borucki W J, Koch D G, Brown T M, et al. *ApJ*, 2010, 713: 126
- [57] Sartoretti P, Schneider J. *A&A*, 1999, 14: 550
- [58] Payne M J, Ford E B, Veras D. *ApJ*, 2010, L712: 86
- [59] Nesvorný D, Morbidelli A. *ApJ*, 2008, 688: 636
- [60] Nesvorný D and Beaugé C. *ApJ*, 2010, 709: L44
- [61] Pál A and Kocsis B. *MNRAS*, 2008, 389: 191
- [62] Rodríguez A, Ferraz-Mello S, Michtchenko T A, et al. *MNRAS*, 2011, 415: 2349
- [63] Penev K, Sasselov D. *ApJ*, 2011, 731: 67

Research Progress on the Transit Timing Variations in Extrasolar Planets

DONG Yao^{1,2}, JI Jiang-hui¹, SUN Zhao^{1,2}

(1. Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: To date, more than 120 transit planets have been discovered, but only two multiple systems in which all the planets found by transit timing, Kepler-9 and Kepler-11. Transit of a single planet on a Keplerian orbit around its star must be strictly periodic. In contrast, the gravitational interactions among planets in a multiple planet system cause planets to speed up and slow down by small amounts, leading to deviations from exact periodicity of transits called transit timing variation (TTV), which has become one important method to detect additional planets recently. TTV is largest when planetary orbital periods are commensurate or nearly so, which is widely used to detect terrestrial planets on resonant orbit. More than 13 transit systems have been analyzed using TTV, however, they don't show clear TTV of additional planets, only give the upper-limited mass of the hidden companion on some common resonant orbits. TTV caused by companions in the system of Kepler-9/Kepler-11 is obviously found, and then confirms the multiple systems further.

Theoretical investigations of TTV combining observations with numerical simulations give what TTV depends on. Not only companions but also co-orbital planets and extramoons cause TTV. Stellar oblateness, general relativity and tidal effects cause periastron precession, then change the transit timing of the transit planet.

TTV is dependent on observations, so the research of TTV will be helpful to observers to detect the expected companions. With the development of space missions such as Kepler and CoRoT, more multiple-planet systems will be discovered. Research on these multiple systems will be valuable to understand the formation and evolution of planet systems.

Key words: extrasolar planet system; transit timing variation (TTV); numerical simulation