

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2016.03.06

系外行星系统 HAT-P-36 的 测光观测研究

潘 旭^{1,2,3}

(1. 中国科学院 云南天文台, 昆明 650011; 2. 中国科学院 天体结构与演化重点实验室, 昆明 650011; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 在 2012 至 2014 年期间, 用云南天文台 1 m 望远镜对 HAT-P-36 系外行星系统的 3 次凌食事件进行了测光观测。用 IRAF 软件包对 CCD 测光图像进行处理, 用 coarse de-correlation 和 SYSREM 方法对数据中的系统误差进行改正, 最后用 MCMC 方法求解 HAT-P-36 行星系统的物理参数。新得到的行星质量比 Mancini 等人 and Bakos 等人的计算结果略微偏大。基于 20 组凌食事件的中心时刻数据, 用最小二乘法对其进行拟合, 得到更加精确的行星轨道周期 $(1.327\ 347\ 04 \pm 0.000\ 000\ 27)$ d, 从 O-C 图中可以看出线性关系并不能很好地拟合数据点, 但是功率谱分析没有发现明显的周期性信号, 在此假设 HAT-P-36b 的轨道外存在一颗微扰行星并限定它的一些物理参数。

关 键 词: 系外行星; HAT-P-36b; 凌食事件

1 引 言

对于观测者而言, 当行星经过恒星盘面时, 恒星光度会因行星的遮挡而变暗, 此现象被称为凌食事件。对发生凌食事件的行星系统进行测光观测, 可以得到恒星的光度变化曲线, 它反映恒星与行星的相对大小 $\Delta F = \left(\frac{R_p}{R_*}\right)^2$ 、行星轨道周期倾角 i 和恒星的临边昏暗系数; 结合视向速度数据, 可以测得行星的质量和半径, 这是理解行星结构、形成及演化的重要参数^[1, 2]。随着各大空间和地面测光巡天计划的开展, 如 HATNet^[3, 4]、SuperWASP^[5, 6]、CoRoT^[7] 和 Kepler^[8] 等。越来越多的凌食系外行星相继被发现。目前利用凌食法发现的系外行星数量是已发现系外行星总数的 62.2%^①。对已发现的行星进行长期的跟进观测可以使行星系统的物

收稿日期: 2016-05-04; 修回日期: 2016-05-26

资助项目: 国家自然科学基金委员会天文联合基金 (u1531121)

通讯作者: 潘旭, xupan@ynao.ac.cn

^①<http://www.exoplanet.eu>

理参数测量更加精确,还可以根据凌食中心时刻的变化 TTV (Transit timing variation) 和凌食持续时间变化 TDV (Transit Duration Variation) 探测系统中尚未被发现的其他天体,再通过天体力学模拟限定其物理参数^[9, 10]。

凌食系外行星系统 HAT-P-36 于 2012 年由 HATNet (Hungarian Automated Telescope Network) 系外行星巡天计划发现^[11],主星 GSC 3020-02221 是一颗 G5 V 类太阳型恒星,视星等为 $V = 12.262$ mag。行星 HAT-P-36b 的质量为 $M_p = (1.832 \pm 0.099) M_J$,行星半径为 $R_p = (1.264 \pm 0.071) R_J$,行星公转轨道周期为 $P = (1.327\ 347 \pm 0.000\ 003)$ d,行星密度为 $\rho_p = (1.12 \pm 0.19) \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。2013 年 Maciejewski 等人对 HAT-P-36b 的凌食中心时刻进行了研究:先用 0.6m Toru 望远镜对 HAT-P-36 的凌食事件进行了观测,然后用 JKTEBOP 程序拟合了凌食光变曲线,接着用 TAP 程序计算凌食中心时刻,最后对凌食中心时刻进行 O-C 分析,由于数据点过少并没有发现 TTV 信号^[12]。2015 年 Mancini 等人观测研究了凌食行星系统 HAT-P-36 的 Rossiter-McLaughlin 效应,用 Cassini 1.52m、CA 1.23m 望远镜对目标源的凌食事件进行了测光观测,并发现由于行星在凌食过程中遮挡了主星表面的黑子,光变曲线出现小部分凸起。作者利用黑子导致的恒星光度周期性变化,得到恒星自转周期 $P_{\text{rot}} = (15.3 \pm 0.4)$ d, HAT-P-36b 轨道与恒星自转轴的夹角在天平面的投影 $\lambda = -14^\circ \pm 18^\circ$,真实夹角 $\phi = 25_{-25}^{+38}$ degree^[13]。此外, Püsküllü 等人也对 HAT-P-36 行星系统进行了跟进测光观测^[14]。

我们对用云南天文台 1 m 望远镜观测到的系外行星系统 HAT-P-36 的 3 次凌食事件进行分析研究。第 2 章,介绍观测情况和数据处理方法;第 3 章,用 MCMC (Markov Chain Monte Carlo) 方法求解凌食行星系统 HAT-P-36 的物理参数;最后,讨论分析新得到的物理参数,以及对本次工作进行总结。

2 测光观测和数据处理

2.1 测光观测

我们分别在 2012 年和 2014 年用云南天文台 1 m 望远镜对凌食系统 HAT-P-36 的三次凌食事件进行了观测。云南天文台 1 m 望远镜配备 2048×2048 的 Andor DW436 型 CCD,视场为 $7.3' \times 7.3'$ 。在观测中均使用 R 波段滤光片,为了得到适合的 CCD 光子计数,我们根据目标星的高度和天气情况调整曝光时间。在 2012 年 3 月 12 日的观测中由月光带来的误差较大,遗憾的是在 2014 年 3 月 8 日的观测中天气并不是太好,有云而且大气视宁度也不太好,所以数据质量不是很理想,误差较大(详见表 1)。

表 1 HAT-P-36 的观测日志

日期	设备	滤光片	曝光时间/s	RMS/mag
2012.03.12	YO-1m	R	150~180	0.003 6
2012.03.16	YO-1m	R	180~240	0.004 5
2014.03.08	YO-1m	R	150~180	0.005 9

2.2 图像处理

在得到观测图像后,要进行测光分析,需要剔除其中的干扰因素,如 CCD 在工作过程中本身产生的热电子噪声,CCD 像元之间响应差异,宇宙空间的各种高能粒子形成的宇宙射线带来的噪声等。我们用 IRAF 软件包对 CCD 图像进行处理,首先裁剪掉 CCD 中没有响应的像元,接着对预先拍摄的本底和平场图像进行合并,用合并后的图像来扣除本底、改正平场,最后剔除宇宙射线带来的影响,至此得到可以用于测光的图像。我们用 apphot 命令对图像进行孔径测光,得到目标星以及参考星的仪器星等,为了使目标星光变曲线数据弥散最小,我们尝试多个不同大小的孔径值,最后从经验中发现两倍的半高全宽是最佳选择。

2.3 系统误差改正

系外行星凌食事件产生的光变信号很微弱,对于木星尺度的行星,凌食类太阳恒星时所产生的光变大约为 0.01 mag,而在地面上观测的时候不可避免地受地球大气、月光相位以及星像在 CCD 上的位置偏移的影响,所以改正这些系统误差以提高凌食信号的信噪比是必不可少的。在此,我们用 coarse de-correlation^[15] 方法计算每颗星的加权平均星等和每幅图像的零点偏移量并加以改正,用 SYREM^[16] 对数据中大气消光和月光相位带来的误差进行改正。

3 物理参数求解和分析

2006 年 Holman 等人发现,用 MCMC 方法对凌食光变曲线进行拟合特别适合求解凌食行星系统的物理参数^[17],所以我们运用 Collier Cameron 等人的 MCMC 程序^[18, 19] 求解凌食行星系统 HAT-P-36 的物理参数。用视向速度的半振幅 K_1 、行星轨道偏心率 e 、近星点参数 ω 、质心速度 γ 来描绘恒星视向速度轨道模型;用凌食中心时刻 T_0 、行星轨道周期 P 、凌食深度 ΔF 、凌食持续时间 t_T 、碰撞参数 b 来刻画凌食模型;另加上恒星质量 M_* ,组成参数空间 $X = \{T_0, P, \Delta F, t_T, b, M_*, K_1, e, \omega\}$ 。在 MCMC 算法中每个参数的下一个状态值由上一个状态随机产生:

$$X_i = X_{i-1} + \sigma_X G(0, 1) f \quad (1)$$

其中, $G(0, 1)$ 是平均值为 0, 标准差为 1 的高斯分布; f 是初值为 0.5 的步长因子,可在计算中做出调整以确保各物理参数的接受率维持在 25% 左右。采用 Metropolis-Hastings 算法判断是否接受新产生的值。

3.1 初步分析

首先,我们用上述 MCMC 程序同时对我们观测到的 3 组凌食数据和 Bakos 等人的视向速度数据^[11] 进行联合求解,得到全局最优解。在计算中, R 波段的 4 系数临边昏暗系数,用恒星有效温度 T_{eff} 、表面重力常数 g , 金属丰度 $[\text{Fe}/\text{H}]$ 和微观湍流速度 ξ 从 Claret 给出的临边昏暗系数表格插值得到^[20]。采用 Mancini 等人的计算结果作为各物理参数的输入初值,马可夫链的步长根据新物理参数值的接受率做出调整;然后选取 1.5×10^4 长度的马可夫链,并输入不同的初值计算 10 条这样长度的马可夫链;最后计算得到各链之间各个物理参数大部分有着相似的后验概率分布。由上述方法还推出行星轨道周期 $P = 1.327\ 345\ 96\ \text{d}$,接着将新

得到的行星轨道周期作为固定值,再分别用 MCMC 程序对单组凌食数据进行计算,得到各凌食事件的凌食中心时刻。

3.2 轨道周期分析和凌食中心时刻变化

对于单行星凌食系统,在引力相互作用下行星的凌食现象会周期性出现,凌食中心时刻会严格遵守线性历元公式 $T = T_0 + P \times E$, 其中 T_0 为参考零点, E 为轨道周数。对于多行星凌食系统或存在卫星的单行星系统,其他天体对主星和凌食行星的引力作用使得凌食行星的凌食中心时刻不再遵循线性历元公式。因此,可用凌食中心时刻是否严格遵循线性历元公式作为判断凌食行星系统中是否存在其他天体的依据。我们用新观测到的凌食数据更新 HAT-P-36b 的凌食中心时刻历元公式,收集了文献中 Bakos 等人 3 组数据^[11], Mancini 等人 3 组数据^[13] 和 ETD^① 网站上选取的 11 组数据(见表 2)。在选取过程中,尽可能地选取凌食光变曲线完整、数据弥散小、对称性高、数据质量指数 ≤ 2 的数据。用最小二乘法拟合新的凌食中心时刻线性历元公式:

$$T = 2\,455\,555.889\,938(\pm 0.000\,202) + E \times 1.327\,347\,04(\pm 0.000\,000\,27) \quad (2)$$

表 2 HAT-P-36 凌食中心时刻数据

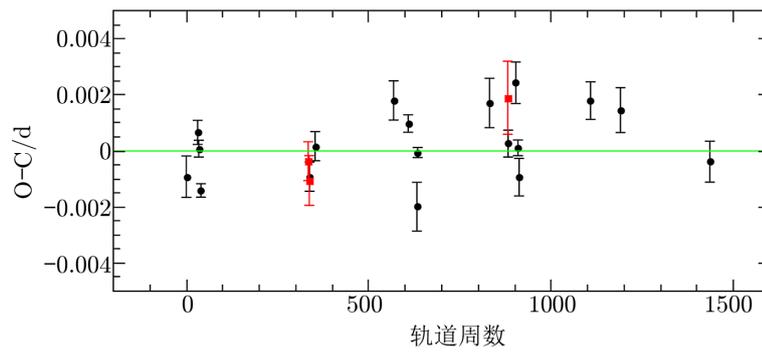
凌食中心时刻	误差	轨道周数	(O-C) 值/d	观测数据来源
5 999.223 485 6	0.000 691 4	334	-0.000 364 8	本工作
6 003.204 836 5	0.000 886 0	337	-0.001 055 0	本工作
6 725.284 577 1	0.001 303 8	881	0.001 895 3	本工作
5 555.890 600 0	0.000 430 0	0	0.000 661 3	[11]
5 601.018 820 0	0.000 740 0	34	-0.000 918 1	[11]
5 608.983 900 0	0.000 300 0	40	0.000 079 7	[11]
6 397.428 940 0	0.000 310 0	634	0.000 977 3	[13]
6 762.448 340 0	0.000 180 0	909	-0.000 059 0	[13]
6 766.430 550 0	0.000 280 0	912	0.000 109 9	[13]
7 460.632 005 0	0.000 670 0	1 435	-0.000 937 5	ETD
7 135.432 534 0	0.000 730 0	1 190	-0.000 383 5	ETD
7 026.591 914 0	0.000 800 0	1 108	0.001 453 9	ETD
6 754.486 109 0	0.000 670 0	903	0.001 792 3	ETD
6 726.612 459 0	0.000 740 0	882	0.002 430 1	ETD
6 658.915 591 0	0.000 480 0	831	0.000 261 2	ETD
6 394.774 978 0	0.000 880 0	632	0.001 709 4	ETD
6 309.821 069 0	0.000 870 0	568	-0.001 989 0	ETD
6 024.445 246 0	0.000 700 0	353	0.001 801 8	ETD
6 004.533 406 0	0.000 520 0	338	0.000 167 4	ETD
6 362.915 530 0	0.000 240 0	608	-0.001 409 6	ETD

^①<http://var2.astro.cz/ETD/>

约化的 $\chi^2 = 5.11$ 说明线性公式并不能很好地拟合凌食中心时刻数据, 有可能存在 TTV 信号, 但是功率谱分析显示并没有明显的周期性信号。用收集到的凌食中心时刻数据减去上述公式计算得到的凌食中心时刻数据, 画出 O-C 图 (见图 1), 从图中也可以看出, 线性关系并不能很好地拟合数据点。所以, 我们假设在凌食行星 HAT-P-36b 轨道之外存在一颗微扰行星, 用 Holman 和 Murray 给出的公式^[21] 限定它的一些物理参数 (适用于非轨道共振):

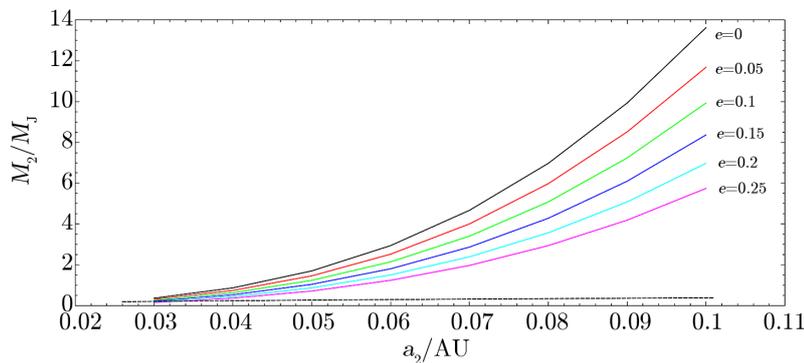
$$M_2 = \frac{16}{45\pi} M_* \frac{\Delta t}{P_1} \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^2 (1 - e_2)^3, \quad (3)$$

其中, M_2 是微扰行星的质量, Δt 是 TTV 信号的振幅, P_1 和 P_2 分别是 HAT-P-36b 和微扰行星的轨道周期, e_2 是微扰行星的轨道偏心率。在计算时 $\Delta t = 0.002$ d, 偏心率分别是 0.0, 0.05, 0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 微扰行星的轨道半长轴从 0.03 AU 到 0.35 AU, 步长为 0.01 AU。图 2 给出微扰行星质量小于 $13 M_J$, 轨道半长轴小于 0.1 AU 的部分。



注: 正方形代表本工作的凌食中心时刻数据。2014 年 3 月 8 日的观测数据因天气不好, 导致求解的凌食中心时刻误差较大。

图 1 HAT-P-36 凌食中心时刻的 O-C 图



注: 不同的颜色代表不同的轨道偏心率, 虚线代表圆轨道微扰行星引起的视向速度扰动为 33.6 m/s 的条件下, 微扰行星的质量上限, 虚线以上的情况被排除。

图 2 微扰行星轨道半长轴和质量关系

同时我们也考虑如果外轨道微扰行星与凌食行星之间存在一阶轨道动力学共振的情况 $j + 1/j$, 用 Agol 等人 2005 年提出的公式^[22] 讨论微扰行星所处的轨道和质量:

$$\Delta t = \frac{P_1}{4.5j} \frac{M_2}{M_2 + M_1}, \quad (4)$$

其中, j 是轨道之间的链接数, 同样计算时 $\Delta t = 0.002$ d。计算结果显示, 如果轨道一阶轨道动力学共振为 2 : 1、3 : 2、4 : 3、5 : 4、6 : 5, 微扰行星的质量分别是 4.2、8.4、12.7、17.1、21.5 M_{\oplus} 。这里只讨论了部分一阶轨道动力学共振的情况, 其他轨道动力学共振的情况并未讨论。

以上仅从凌食中心时刻变化加以讨论, 并没有加入视向速度的限制。根据 Bakos 等人的视向速度数据分析显示^[11], 如果存在微扰行星, 微扰行星产生的视向速度扰动必须小于视向速度的扰动 33.6 m/s。根据公式^[23]:

$$M_p \sin i = 4.919 \times 10^{-3} P^{1/3} (1 - e^2)^{1/2} K_* \left(\frac{M_* + M_p}{M_{\odot}} \right)^{2/3}, \quad (5)$$

其中, $M_p (M_J)$ 是行星质量, i 是轨道倾角 (假设微扰行星与凌食行星共面), P (d) 是行星轨道周期, K_* (m/s) 是视向速度的振幅, M_* (M_{\odot}) 是恒星质量。由式 (5) 计算出微扰行星的质量范围, 见图 2 中虚线以下的部分。结合视向速度的限制排除了微扰行星大部分非轨道共振的情况, 上述对轨道动力学共振的讨论满足视向速度的限制, 所以假设的微扰行星很有可能与凌食行星处于轨道共振的状态。

3.3 行星系统 HAT-P-36 的物理参数

上述研究是得到精确行星轨道周期的最好方法^[24, 25], 所以我们将新得到的轨道周期作为固定值。用 MCMC 程序再次对我们观测到的 3 组凌食数据进行分析, 求解 HAT-P-36b 行星系统的物理参数。同样, 用不同的初值计算 10 条 1.5×10^4 长度的马可夫链, 得到参数的后验概率分布, 选取他们的中值作为行星系统的物理参数的最优解, 参数后验分布的 1σ 极限作为它们的误差 (见表 3); 并得到凌食光变曲线拟合结果 (见图 3)。

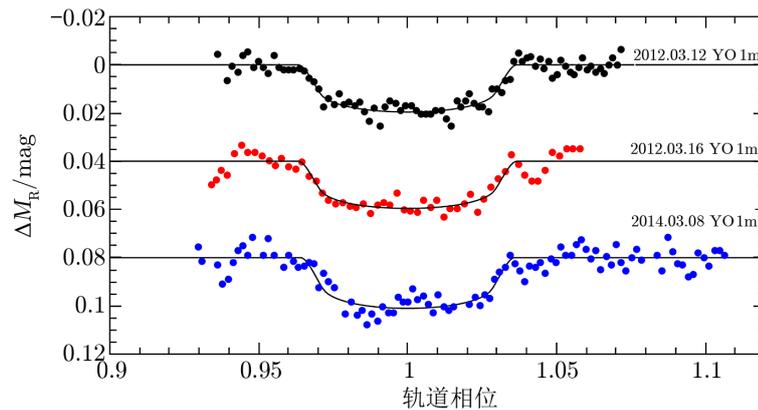
4 讨论与总结

基于新观测的 3 组凌食测光数据和文献中视向速度的数据, 我们用 MCMC 程序重新求解了 HAT-P-36 行星系统的物理参数。新求解的行星质量 $M_p = 1.928 M_J$, 比 Mancini 等人^[13] 的 $M_p = 1.852 M_J$ 和 Bakos 等人^[11] 的 $M_p = 1.832 M_J$ 略微偏大 (在误差范围内与他们一致); 行星半径 $R_p = 1.309 R_J$, 与 Mancini 等人的 $R_p = 1.304 R_J$ 一致, 略大于 Bakos 等人的 $R_p = 1.264 R_J$ 。Mancini 等人利用光谱分析发现, HAT-P-36 有很强的恒星活动, 活动指数为 $\lg R'_{\text{HK}} = (-4.636 \pm 0.066)$ dex, 不同的观测对应不同的恒星活动情况, 可能导致测得的 HAT-P-36 行星系统的物理参数有些许差异。此外, 我们计算的行星质量和半径的误差比前人偏大是因为: (1) Bakos 等人测光观测使用的望远镜是 FLWO 1.2m, Mancini 等人

表 3 凌食行星系统 HAT-P-36 的物理参数

参数	符号	我们所得值	Mancini 等人所得值	Bakos 等人所得值	单位
轨道周期	P	$1.327\ 347\ 04 \pm 0.000\ 000\ 27$	$1.327\ 346\ 83 \pm 0.000\ 000\ 48$	$1.327\ 347 \pm 0.000\ 003$	d
行星/恒星面积比	$(R_p/R_*)^2$	$0.014\ 84 \pm 0.000\ 59$		$0.014\ 07 \pm 0.002\ 40$	
凌食持续时间	t_T	$0.092\ 769 \pm 0.000\ 042$		$0.092\ 3 \pm 0.000\ 7$	d
碰撞参数	b	$0.185\ 5^{+0.239\ 6}_{-0.123\ 4}$		$0.312^{+0.078}_{-0.105}$	R_*
视向速度振幅	K_1	0.34 ± 0.2	0.32 ± 0.39	0.33 ± 0.15	$\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$
质心速度	γ	$-0.87^{+0.64}_{-0.62}$	-16.327 ± 0.006	-16.29 ± 0.10	$\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$
轨道偏心率	e	$0.061^{+0.030}_{-0.028}$		0.063 ± 0.032	
近星点参数	ω	$54.45^{+45.31}_{-58.15}$		95 ± 63	($^\circ$)
轨道斜率	i	$87.643^{+1.568}_{-3.410}$	85.86 ± 0.21	86.0 ± 1.3	($^\circ$)
恒星密度	ρ_*	$0.762^{+0.125}_{-0.141}$		0.913 ± 0.027	ρ_\odot
恒星质量	M_*	1.038 ± 0.027	1.030 ± 0.030	1.022 ± 0.049	M_\odot
恒星半径	R_*	1.107 ± 0.071	1.041 ± 0.013	1.096 ± 0.056	R_\odot
轨道半长轴	a	$0.023\ 93^{+0.000\ 21}_{-0.000\ 20}$	$0.023\ 88 \pm 0.000\ 22$	$0.023\ 8 \pm 0.000\ 4$	AU
行星半径	R_p	1.309 ± 0.099	1.304 ± 0.021	1.264 ± 0.071	R_J
行星质量	M_p	$1.928^{+0.101}_{-0.094}$	1.852 ± 0.088	1.832 ± 0.099	M_J
行星密度	ρ_p	$0.856^{+0.174}_{-0.203}$	0.737 ± 0.095	0.84 ± 0.14	ρ_J
行星等效温度	T_{eq}	$1\ 845.92^{+76.21}_{-56.78}$	$1\ 788 \pm 15$	$1\ 823 \pm 55$	K

注: 表中的其他参数由参数空间的参数推导得到。其中我们计算的“质心速度”并不是真正的质心速度, 而是拟合视向速度数据时随机选取的参考值。



注：圆点代表观测数据，实线代表拟合模型。为了方便查看，2012年3月16日和2014年3月8日的光变曲线分别向下平移了0.04 mag和0.08 mag。

图3 HAT-P-36 凌食光变曲线拟合图

使用的是 Cassini 1.52m、CA 1.23m 和 FLWO 1.2m。口径比 YO 1m 大，测光精度高；视场也比 YO 1m 大，视场中可用的比较星更多，误差改正效果更好。(2) 2014年3月8日的观测中，由于天气的原因导致数据弥散较大，误差较大，计算的系统物理参数误差较大。在已发现的行星中有5颗在10%的范围内与 HAT-P-36b 有类似的质量、半径和轨道周期，分别是 TrES-3b^[26]、WASP-77Ab^[27]、WASP-46b^[28]、HAT-P-23b^[29] 和 WASP-135b^[30]。

根据收集到的凌食中心时刻数据，用最小二乘法拟合得到的轨道周期 $P = (1.32734704 \pm 0.00000027) \text{ d}$ ，比 Mancini 等人 and Bakos 等人的精度要高，因为 Bakos 等人只有一条完整的凌食光变曲线，Mancini 等人虽然观测到3条完整的凌食光变曲线，但是收集的凌食中心数据只有9组，而我们收集到的凌食中心时刻的数据有20组。根据凌食中心时刻的变化和视向速度扰动的讨论，微扰行星很有可能处在能与凌食行星产生轨道共振的轨道上。

参考文献：

- [1] Baraffe I, Chabrier G, Barman T. *A&A*, 2008, 482: 315
- [2] Fortney J J, Marley M S, Barnes J W, *ApJ*, 2007, 659: 1661
- [3] Bakos G A, Lazar J, Papp I, et al. *PASP*, 2002, 114: 974
- [4] Bakos G A, Noyes R W, Kovacs G, et al. *Transiting Planets*. Cambridge: Cambridge University Press, 2009: 21
- [5] Christian D J, Pollacco D L, Skillen I, et al. *MNRAS*, 2006, 372: 1117
- [6] Pollacco D L, Skillen I, Cameron A C, et al. *PASP*, 2006, 118: 1407
- [7] Fridlund C V M, Team CoRoT. *Physica Scripta*, 2008, T130: 014009
- [8] Borucki W J, Koch D, Basri G, et al. *Science*, 2010, 327: 977
- [9] Fulton B J, Shporer A, Winn J N, et al. *AJ*, 2011, 142: 84
- [10] Kipping D M. *MNRAS*, 2009, 392: 181
- [11] Bakos G Á, Hartman J D, Torres G, et al. *AJ*, 2012, 144: 19

- [12] Maciejewski G, Puchalski D, Saral G, et al. Information Bulletin on Variable Stars, 2013, 6082: 1
- [13] Mancini L, Esposito M, Covino E, et al. A&A, 2015, 579: A136
- [14] Püsküllü Ç, Soyduğan F, Erdem A, et al. ASPC, 2015, 496: 356
- [15] Collier C A, Pollacco D, Street R A, et al. MNRAS, 2006, 373: 799
- [16] Tamuz O, Mazeh T, Zucker S, MNRAS, 2005, 356: 1466
- [17] Holman M J, Winn J N, Latham D W, et al. ApJ, 2006, 652: 1715
- [18] Collier C A, Wilson D M, West R G, et al. MNRAS, 2007, 380: 1230
- [19] Pollacco D, Skillen I, Collier C A, et al. MNRAS, 2008, 385: 1576
- [20] Claret A. A&A, 2000, 363: 1081
- [21] Holman M J, Murray N M. Science, 2005, 307: 1288
- [22] Agol E, Steffen J, Sari R, et al. MNRAS, 2005, 359: 567
- [23] Torres G, Winn J N, Holman M J, ApJ, 2008, 677: 1324
- [24] Sun L L, Gu S H, Wang X B, et al. RAA, 2015, 15: 117
- [25] Wang X B, Gu S H, Collier C A., et al. RAA, 2013, 13: 593
- [26] O'Donovan F T, Charbonneau D, Bakos G Á, et al. ApJL, 2007, 663: L37
- [27] Maxted P F L, Anderson D R, Collier C A, et al. PASP, 2013, 125: 48
- [28] Anderson D R, Collier C A, Gillon M, et al. MNRAS, 2012, 422: 1988
- [29] Bakos G Á, Hartman J, Torres G, et al. ApJ, 2011, 742: 116
- [30] Spake J J, Brown D J A, Doyle A P, et al. PASP, 2016, 128: 024401

Photometric Observations and Study for the Transiting Exoplanetary System HAT-P-36

PAN Xu^{1,2,3}

(1. Yunnan Observatories, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650011, China; 2. Key Laboratory for the Structure and Evolution of Celestial Objects, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650011, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: We use the 1-meter telescope of Yunnan Observatories and observed three transit events of HAT-P-36 from 2012 to 2014. We correct the data for systematic errors based on coarse de-correlation and SYSREM algorithms. Three new transit light curves are analyzed by means of the Markov chain Monte Carlo technique. The value of planet mass acquired in this paper is slightly larger than the results of Mancini and Bakos. Through the analysis of all available mid-transit times of symmetric and complete light curves, I refine the ephemeris of HAT-P-36b, which is better than former ones. Via the O–C analysis, I find that this system exists significant transit timing variations. But the Lomb-Scargle periodogram generated for timing residuals show no significant signal. Therefore, I speculate that there is an external perturbing planet and hence this paper also gives some physical parameters' range of this perturbing planet.

Key words: exoplanet; HAT-P-36; transit event