

超高精度测光观测及数据处理分析方法*

石亚卿^{1,2,3}, 王炜^{1,3†}, 赵景昆¹

(1 中国科学院国家天文台 中国科学院光学天文重点实验室, 北京 100049; 2 中国科学院大学天文与空间科学学院, 北京 100101;

3 中国科学院国家天文台 中智南美天文中心, 北京 100101)

(2022 年 1 月 14 日收稿; 2022 年 4 月 7 日收修改稿)

Shi Y Q, Wang W, Zhao J K. Ultra-high precision photometry and data analysis[J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2023, 40(6): 761-770. DOI: 10.7523/j.ucas.2022.034.

摘要 太阳系外行星大气是系外行星领域迅速发展且最具挑战的课题之一, 它依赖于高精度的测光和光谱数据。以 WASP-103b 的近红外地基望远镜 CFHT 上 WIRCam 照相机观测的两次次食数据为例, 详细介绍高精度测光对观测的要求, 阐述所需的数据处理和分析方法。结果表明, 采用本文方法, 可以利用地面望远镜实现 10^{-4} 的超高精度较差测光。

关键词 太阳系外行星; 热木星; 地基观测; 误差分析; 高精度测光

中图分类号: P125.4; P113 文献标志码: A DOI: 10.7523/j.ucas.2022.034

Ultra-high precision photometry and data analysis

SHI Yaqing^{1,2,3}, WANG Wei^{1,3}, ZHAO Jingkun¹

(1 CAS Key Laboratory of Optical Astronomy, National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences,

Beijing 100101, China; 2 School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences,

Beijing 100049, China; 3 Chinese Academy of Sciences South America Center for Astronomy, National

Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract Detailed characterization of extrasolar planetary atmosphere is one of the hottest and most challenging research topics nowadays, which relies on high precision photometric or spectroscopic data. Using our secondary eclipse observation of the hot Jupiter WASP-103b by the WIRCam on the CFHT as example, we describe the demands on instruments, observation strategy and data analysis to achieve ultra-high precision. With our techniques, it is proved to be feasible to reach a precision down to $\sim 10^{-4}$ using ground-based telescopes.

Keywords exoplanet; hot Jupiter; ground-based observation; error analysis; high-precision photometry

自 Mayor 与 Queloz^[1] 于 1995 年通过视向速度法首次发现第一颗太阳系外行星飞马座 51b 以来, 天文学家已发现了 4 935 多颗系外行星(截至 2022 年 2 月 22 日, 数据来源于 [https://](https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/)

exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/)。飞马座 51b 是一颗典型的热木星, 即: 公转周期少于 10 d, 温度高于 1 000 K 的气体巨行星。随着样本数量的飞速增长, 系外行星及其大气的观测研究发展迅

* 国家自然科学基金(11988101, 42075123, 62127901, 11973048, 11890694)和国家重点研发计划(2019YFA0405100)资助

† 通信作者, E-mail: wangw@nao.cas.cn

猛,使得系外行星的形成和演化等理论也日趋成熟。

Charbonneau 等^[2]于 2002 年利用哈勃空间望远镜对热木星 HD 209458b 展开多次凌星观测,首次探测到太阳系外行星的大气,揭开了探测和研究行星大气的序幕。在随后的 20 年里,利用空间望远镜哈勃、斯皮泽及大型地面光学红外望远镜,对大量系外行星的大气开展了不同程度的研究。现已在系外行星大气中探测到约 20 种原子及分子^[3],如在 HD 189733b, HD 209458b 等系外行星大气中探测到水、一氧化碳及钠^[4-8];在 KELT-9b 上探测到大气中可能存在铁(Fe)及钛(Ti)或者钛离子^[9]。系外行星领域的研究重点已逐渐由搜寻探测转移到通过高精度测光和光谱观测来测定系外行星大气的性质和成分,并对行星性质进行限制。而这些高精度的观测为系外行星的化学组成、大气温度轮廓、云/霾分布、大气动力学及大气逃逸等理论提供了良好的限制,并极大促进了行星大气模型、行星大气光谱模型等研究的飞速发展^[10]。

系外行星大气信号非常微弱,且淹没在其主星的辐射中。对于热木星,行星大气的透射信号大约是恒星信号的 10^{-3} ,发射信号大约为其 10^{-4} ,对于更小更冷的行星,信号更弱。因此,要对系外行星大气进行有效的研究,需要观测数据的精度优于 10^{-4} 。本文定义精度优于 10^{-4} 的测光为超高精度测光。空间望远镜如哈勃^[11]、斯皮泽^[12]、开普勒^[13]、TESS^[14],因不受地球大气及观测时长影响,仪器设备条件相对稳定,测光及光谱精度较高,可接近或优于 10^{-4} 。例如对超热木星 WASP-12b,TESS 获得的测光精度达到 10^{-5} 量级^[15]。但空间望远镜时间宝贵,大部分系外行星大气的观测还是依赖于地面望远镜。

而地基望远镜因受地球大气抖动、天气变化、连续观测时长、望远镜指向等因素的影响,即使在测光条件良好的情况下,采用传统的观测模式和数据处理方法也很难达到或优于 10^{-3} 的绝对测光精度和优于 10^{-4} 的较差测光精度。

为通过超高精度测光方法探测和研究系外行星大气,地面望远镜——加拿大法国夏威夷望远镜(Canada-France-Hawaii telescope, CFHT)开发了“凝视”观测模式,通过 4 个子窗口实时高频监测视场中 4 颗参考星的位置,快速调整望远镜姿态,从而维持望远镜指向的高精度和稳定性^[16]。

CFHT 望远镜是一台口径为 3.6 m 的光学/红外望远镜,其配备的 WIRCam 红外照相机拥有 20' 的视场,由 4 块 HAWAII2-RG 探测器组成,是世界上最大的天文红外探测器之一,也是用于探测系外行星热辐射的重要地基望远镜之一。采用凝视观测模式之后,星像中心在探测器上位置移动很小,最多不超过 2 个像素。Croll 等^[17-18], Wang 等^[19], Martioli 等^[20]的工作都利用 CFHT 成功获得 10^{-4} 量级的测光精度,从而对热木星大气给出了重要的观测限制。其他大型望远镜,包括 Very Large Telescope (VLT),Hale 5 m 望远镜,也开展了类似的观测研究^[21-22]。然而,即使采用了“视观测模式”,并不代表一定能获得超高精度,还需要优化观测模式、较差测光算法、模拟并扣除红噪声,才能最终达到 10^{-4} 量级的测光精度。

高精度的时域测光不仅适用于行星凌星探测、行星大气研究,也可用于恒星活动性、星震、双星系统等多种研究。不同科学目标所要求的时间采样率、测光精度不同,但总体来说,精度越高,可获得的信息越丰富越准确。影响测光精度有多重因素,能够模拟它们并消除各种因素带来的影响,使得测光精度接近理论极限,对科学研究是极为重要和关键的。

本文首先以系外行星凌星观测为例,介绍超高精度测光的基本原理和方法;然后以从 CFHT 的宽视场红外相机 WIRCam 获得的超热木星 WASP-103b 在 J 与 Ks 波段的两次次食观测为例,讨论如何设计观测并通过后期的数据处理和分析,实现亚毫星等的测光精度。

1 测光误差及超高精度测光

1.1 时序测光误差分析

探测系外行星大气信号的主要方法是凌星法和次食法。当行星位于恒星面与望远镜之间,即凌星时,行星本身对恒星面的遮挡造成系统的总亮度下降,下降幅度正比于行星恒星半径平方比。行星大气也会对恒星光造成一定的吸收,其吸收深度取决于连续谱和谱线吸收深度,与行星大气的性质,包括温度密度轮廓、分子混合比等密切相关。测量行星凌星时不同波长处的吸收深度,即透射光谱,可定量研究行星大气的性质。

而当行星位于恒星背面,即发生次食时,行星被恒星遮挡,整个系统的总亮度有微弱的下降。这个下降的亮度即反映了行星的亮度,是行星本

身的热辐射及反射的恒星辐射被行星大气吸收和散射之后的亮度。因此,行星大气本身的发射光谱与行星的大气参数也密切相关,可用于研究行星大气性质。要获得这两种光谱,都需对凌星系统开展数小时或几十到上百次曝光的时域观测,通过对比整个系统在凌星/次食时的亮度与凌星之外的亮度,获得透射或发射光谱信号。

此类时序观测的测量值是某波长处凌星或次食的深度,其误差由多个观测数据点的弥散 σ 来衡量。 σ 由信号本身的内秉弥散和测量过程中其他原因导致的弥散,前者只与目标星的亮度以及望远镜系统参数有关,是单次测光的理论误差;而后者主要是因为天气变化、大气质量变化、探测器像素不均匀带来的误差,并不随机,因此一般称为相关噪声或者红噪声。即: $\sigma = \sqrt{\sigma_{\text{int}}^2 + \sigma_{\text{ext}}^2}$ 。

单次测光的理论误差一般由测光孔径内的信噪比决定,而信噪比 (signal-to-noise ratio, 简称 SNR) 有如下计算公式

$$\text{SNR} = \frac{S}{N} = \frac{N_p}{\sqrt{N_p + N_b}}, \quad (1)$$

其中: N_p 为总的由目标星光子转换成的电子的数目;而 N_b 是总的背景噪声电子数,包括了天光背景对应的电子数,探测器读出噪声和暗电流。

假设 $N_b = 0$, 要实现 $\text{SNR} = 10\,000$, 对应精度约为 10^{-4} , 需要总的星光电子数为 10^8 。对于 $K = 12.5$ 等的恒星,利用 3.5 m 口径、总系统效率为 0.3 的望远镜,需要积分时间 20 min 才能在探测器上收集到 10^8 个电子。而实际上 $N_b > 0$, 因此要实现超高精度,目前只能针对亮星,即 $K < 12.5$ 。也因此,在高精度测光中遇到的情况是光子噪声占主导地位,而光子噪声是随机噪声,或称白噪声,服从泊松分布,无法消除或减弱。天光背景、探测器读出电路和暗电流带来的噪声,也无法扣除,只会在积分时间增加、光子数增加的情况下,其相对影响逐渐变小。因此,要想获得接近于极限的测光精度,首先要尽量增加有效积分时间,其次是需要观测时尽量减少红噪声,在数据处理时通过各种算法削弱它们的影响。这是实现超高精度较差时序测光的关键。

1.2 观测策略和仪器设置

首先,从科学目标出发,选择合适的观测波段,提高一定观测时间内可累计的光子数以及行星信号的相对强度。例如,为了对系外行星

热辐射进行有效的观测,一般在近红外波段开展观测。因为系外行星在近红外波段热辐射相对较强,而恒星辐射在近红外波段相对较弱,选择近红外波段观测更有利于探测行星热辐射信号。也可针对与拟探测分子的光谱特征,选择特定的波段。比如,为探测水分子信号,一般选择中心波长为 1.6 μm 的 H 波段,为探测 CO 或者 CO₂, 中心波长为 2.21 μm 的 K 或者 Ks 波段为最佳的宽带波段。

其次,优化观测设备和观测策略。一般对系外行星大气的观测,要覆盖行星凌星或次食的全部时间,以及前后 1 h 以上的基线观测,因此需要连续观测 4~8 h,具体时间取决于凌星时长。长时间的时域观测过程中,台址天文条件包括视宁度会有波动,大气质量会有连续的变化。考虑到这些变化在视场内是近似同时同量的,可以通过与参考星的对比从而消除或减弱上述变化带来的测光误差。因此需要视场中有多颗亮度和颜色与目标星接近、且不存在短周期光变的恒星作为参考星。而实际上,天气的变化可能会是局部的,视场中不同位置的大气质量也存在微小的变化,多个探测器芯片拼接而成的相机中的各个芯片也存在读出电路和暗电流速率等因素的差别,最好选择位于同一个芯片且角距离较小的星作为参考星。

探测器芯片中各个像素对入射光的响应不同,像素内不同位置对于光子的响应也不同,即: intra-pixel sensitivity variation, 以下简称 IPSV^[23]。此外,探测器中往往有不少有缺陷的像素,包括失去感光性的死像素以及读数比本底高的热像素。由于望远镜指向存在一定的误差,恒星在视场中有小的移动,星像在探测器上也将移动。即使忽略大气变化等外部因素导致的影响,假设望远镜接受到的光子数不变,探测器通过光电效应转化而成的电子数也会发生变化,从而导致测量出来的恒星星等或亮度发生变化。传统的利用平场改正的方法,可以消除像素间的不均匀性,但精度难以优于 1%,而且此方法无法改正 IPSV。因此要实现高精度测光,望远镜的指向精度或者相机的稳像精度必须很高。除此之外,对于较亮的系外行星主星,利用米级望远镜 1 s 曝光都可使得感光像素进入非线性区甚至饱和,这种情况下的测光是不准确的。如果采取 1 s 或更短曝光时间,考虑大视场望远镜的探测器读出时间一般需要

20 s 以上,这样的观测效率无疑太低。举例来说,假设曝光时间 1 s,读出时间 20 s,则观测 5 h 实际对目标源的积分时间只有 14 min 左右,获得的总光子数远不足以实现 1‰ 的精度。因此,需要将星像或者点扩散函数 (PSF) 变大,将入射光子分布在多个像素,从而避免落入探测器的非线性区或饱和区。需要强调,光斑直径增大使得光斑覆盖的范围成平方增长,在同样的指向误差情况下,光斑覆盖像素变化率显著减小,因此能显著减少像素不均匀性和 IPSV 带来的误差。当然,实际测量中,测光过程中包括的像素越多,读出及背景噪声就越多,从而使 SNR 降低。不过,对于我们的亮星观测,因为是光子泊松噪声占据主导,背景噪声相对较弱,因此采用此方法可以显著提高观测精度。考虑到这些因素之后,利用大量的实时观测的参考星对系统噪声进行模拟并矫正,就可以获得亚毫星等 (10^{-4}) 级别的较差测光精度。

1.3 数据处理和分析方法

对于较差测光的数据处理,主要分以下 2 个步骤。首先要对获得的原始数据进行基本的图像处理,包括扣除本底,进行平场改正和暗电流改正。在此过程中,要对死像素进行标注。然后针对目标星和参考星分别进行一系列孔径值的孔径测光。孔径大小的设定要非常谨慎,既要保证孔径足够大以覆盖星像所有流强,又要使孔径尽可能地少吸收天光背景噪声或读出噪声,通常外孔径为内孔径的 1~2 倍。传统的测光是要通过对比不同孔径值时的测光结果确定最佳孔径,整个视场或者部分视场采用同样的孔径值。这样的方法忽略了不同的星有不同的最佳孔径,也没有考虑最佳孔径随时间的变化,因此精度无法满足要求。

经过测试,发现目标星和每一颗参考星应设置不同的孔径值以获得最佳的光变曲线。如果观测条件好,大气稳定,测光时星像大小稳定,可设定孔径大小为常量。如果星像大小不稳定,则需设定孔径大小随时间变化以达到更精确的测光。实际操作中,我们获得了目标星和参考星多个孔径值下在每一次曝光的星等,也就获得了多个孔径值下的光变曲线。然后利用 Everett 和 Howell^[24] 提出的方法,获得初步的较差光变曲线。寻找此光变曲线基线部分与观测时间、大气质量、星像中心位置、视宁度等参数的关系并扣除,可以减弱红噪声带来的影响。也可采用高斯

过程,用非参数化的方式估计红噪声的贡献并扣除。

参考星的初选主要由恒星的亮度来决定,一般选择与目标星亮度在 ± 2 等范围内的恒星。这样初选出来的参考星不一定都适合。因为颜色可能不同、或者离目标星比较远、或者其在探测器上所处的位置有大量异常像素。因此,有些参考星的原始光变曲线与目标星和其他参考星相差较大,或者趋势不同,可以逐步剔除出去,最终获得一个最优参考星组合。实际分析过程中,参考星组合与孔径值对测光的影响可能存在耦合,因此需要多次迭代,找到最佳的组合,使得基线数据的弥散最小。下面以实际的数据为例,具体描述如何实现超高精度测光。

2 观测设备和观测数据

2.1 观测设备和模式

使用的设备是 CFHT 上的宽视场近红外照相机设备 WIRCam,它是地基望远镜中具有探测系外行星次食信号能力的重要设备之一。此相机由 4 块 2 K×2 K 的近红外探测器拼接而成,相邻探测器的间隙为 45",总视场大小为 20.50'×20.50'。

为实现超高精度测光,CFHT 团队开发了凝视观测模式。在此模式下,可选择视场中的 4 颗星作为指向参考星,通过快速读出和快速的星像中心分析,计算视场偏移量,迅速调整望远镜姿势或者快摆镜位置,使得望远镜指向稳定,星像基本位于探测器视场固定的位置上。同时,对望远镜进行较大程度的散焦,以避免目标星或参考星所在的像素进入非线性区甚至饱和。Croll 通过 CFHT 上的 WIRCam 设备利用这一模式成功探测到 3 颗热木星以及 1 颗褐矮星的次食信号并达到 0.014%~0.040% 的测光精度。

2.2 目标星观测数据

目标星 WASP-103b 是一颗质量 $\sim 1.49M_{\text{Jup}} \pm 0.088$ 、半径 $\sim 1.528R_{\text{Jup}}^{+0.073}_{-0.047}$ 的气态巨行星。其主星是一颗 F 型主序星 (赤经 16:37:15.57,赤纬 +7:11:0.15),恒星表面温度为 $(6\,110 \pm 160)$ K,其重元素丰度类似于太阳^[25]。de Wit 和 Seager^[26] 通过透射光谱法估算的行星质量比利用动力学估计的质量小 1/5。随后大量研究探测到主星附近 ($\sim 0.242 \pm 0.016''$) 存在一颗较暗 ($\sim (2.59 \pm 0.35)$)

mag)且较冷($\sim 3\,377^{+743}_{-199}$ K)的恒星,但其主星是否存在物理上的联系尚未定论^[27]。Ngo 等^[28]通过高空间分辨率观测发现,此星与 WASP-103 在 J、H 及 Ks 波段星等差异为 $\Delta J = 2.427 \pm 0.030$, $\Delta H = 2.217 \pm 0.010$ 以及 $\Delta Ks = 1.965 \pm 0.019$,因此会对行星主食及次食深度在不同波段造成不同程度的污染。WASP-103b 的公转周期 ~ 22.2 h,轨道半长轴 $0.019\,85$ AU。由于此行星距离其主星很近,行星处于潮汐锁定状态,向阳面的温度较高,背阳面温度较低,其阳面的平衡温度 $T_{eq} \sim 2\,500$ K。因此,行星本身辐射较强,预测其次食食深较强,能够在地面开展有效观测。

利用 CFHT 的 WIRCam,在 2015 年对热木星 WASP-103b 进行 J 与 Ks 波段的总计 11 h 的次食观测。6 月 9 日在 J 波段进行持续 5.25 h 的凝视观测,望远镜散焦量为 1.8 mm。总共曝光 55 次,覆盖包括次食及其前后 1 h 左右的基线时间,大气质量在 $1.02 \sim 1.37$ 。每次曝光分为若干个积分时间为 15 s 的子曝光以提升读出效率,降低暗电流影响。首次曝光包含 9 次子曝光作为测试,其余的曝光调整为 12 次子曝光。目标星视星等为 12.1 mag, K 波段星等为 10.7 mag,选择该星场内约 100 颗星作为初选参考星,它们的视星等范围在 $8 \sim 14$ mag。

5 月 28 日进行的是 Ks 波段观测。然而,观测时天气并不理想,观测数据误差较大,无法开展科学研究。因此,重新处理了 Delrez. L 在 2014 年 5 月 20 日利用相同设备同一波段的数据。此次观测望远镜进行了 2 mm 的散焦,总共曝光 1 092 次,每次曝光积分时间 5 s。

3 数据处理与分析

3.1 主要步骤

较差测光是一种测量目标星相对于参考星亮度变化的数据分析方法。为达到 10^{-4} 的测光精度,在传统的较差测光步骤中加入了更多的误差分析和误差扣除,以提高数据精度。具体包括以下几个主要的关键步骤:

1) 图像预处理

利用 WIRCam 专用的数据预处理程序 I' iwi 2.1,进行初步数据处理,包括标记饱和像素点、非线性校正、参考像素扣除、暗场扣除、平场扣除、标记坏点及天光背景扣除。I' iwi 程序把标记为坏点的像素赋值为 0,如果坏点包括在测光孔径或

天光范围内,就会影响测光结果,因此,利用坏点周围的 4 个像素进行插值,用于估算坏点像素的计数。

2) 参考星初选

选择视场内星等及颜色接近目标星且无明显光变的恒星($\Delta m \sim \pm 2$ mag)作为候选参考星。在图像中查看这些参考星所在的位置,剔除距离探测器边缘 100 像素以内的,剔除星斑范围内包括较多坏点和热点较多的,尽量选择与目标星在同一个探测器芯片里的参考星。以 J 波段数据为例,通过上述过程,筛选出 10 颗参考星。

3) 孔径测光参数考虑及孔径测光

开展孔径测光需要设定目标星的中心位置、孔径值、天光背景环的内外半径等参数。其中,测光孔径的大小对测光精度有着重要影响。既要保证孔径足够大以覆盖全部星像,又要尽量减少天光背景噪声和探测器噪声,因此其数值不能太大,也不能太小。在数据处理过程中,以从图像中得到的星像的半高全宽乘以一个大于 1 的因子作为初始孔径值。并以其为中值, ± 5 像素范围内的一系列孔径值进行测光计算,相邻的孔径值相差 1 个像素。

因望远镜散焦,恒星星像呈多纳圈形状,难以准确确定星像中心位置。因此,将扣除天光背景后的图像与二维高斯函数卷积,还原成为中间高周围低的亮斑之后,再利用 IDL 程序 CENTORID 测定星像中心位置。天光背景参考区域是一个圆环,内、外孔径分别为 1.5 倍和 2.5 倍测光孔径。以此区域内像素的平均值作为天光背景。然后,利用 IDL 天文程序包 APER 测量目标星和参考星每次曝光的亮度值及测光误差,从而得到原始光变曲线。

4) 获得目标星光变曲线

对于获得的光变曲线,先通过目视剔除光变曲线弥散很大、变化趋势与大部分星不一致的参考星(参见图 1(a)不同颜色所代表的参考星光变曲线,黑点组成的光变曲线代表目标星)。这些星本身可能具有光变,或者与目标星的颜色相差较大,因此大气质量变化带来的趋势不同。对于目标星和剩下的参考星,针对每一条光变曲线,通过 Sigma-clipping 方法,迭代 3 次扣除超过中值 2 倍标准差的测光点,获得光变曲线的中值,然后将光变曲线归一化到中值。将目标星和所选用的参考星的归一化光变曲线以其标准差为权重取平

均,得到平均光变曲线(图 1(a)中黑色折线)。取平均的目的是要降低各个参考星的随机误差带来的对光变曲线的影响。目标星的光变曲线除以平均光变曲线再归一化,即得到扣除了大部分红噪声的较差光变曲线(参见图 1(b))。完成了这一步,光变曲线的弥散大概在 10^{-3} 量级。

5) 模拟并扣除红噪声

光变曲线中除无法扣除的随机噪声,还存在不可忽略的红噪声。它与时间等参数相关,且对地基观测的精度有很大影响。为了扣除红噪声,采用多参数的多项式拟合,包括目标星星像中心在 x 方向和 y 方向相对于第一次曝光时位置的偏移以及观测时刻等参数。同时,利用公开的 IDL 程序 EXOFAST^[29],对光变曲线进行拟合。

EXOFAST 采用马尔科夫蒙特卡洛采样法,结合 Mandel 和 Agol^[30] 给出的理论光变曲线(简称 MA 模型)对观测光变曲线开展后验分析,获得对行星和恒星相关参数的估计,包括次食深度、行星平衡温度等。此时得出的后验参数并不重要,重要的是拟合的残差。图 1(b)中玫红色空心三角形是第 4 步得到的较差光变曲线,蓝色实线是得到的红噪声,黑色圆点是扣除红噪声之后的光变曲线,红色实线是模型给出的次食光变曲线。图 1(c)中的黑色数据点及误差棒代表每 36 个数据点合并之后的平均值及误差,红色实线是对它们的最佳拟合。扣除红噪声之后,次食光变明显可见。

6) 确定最佳测光孔径及最佳参考星组合

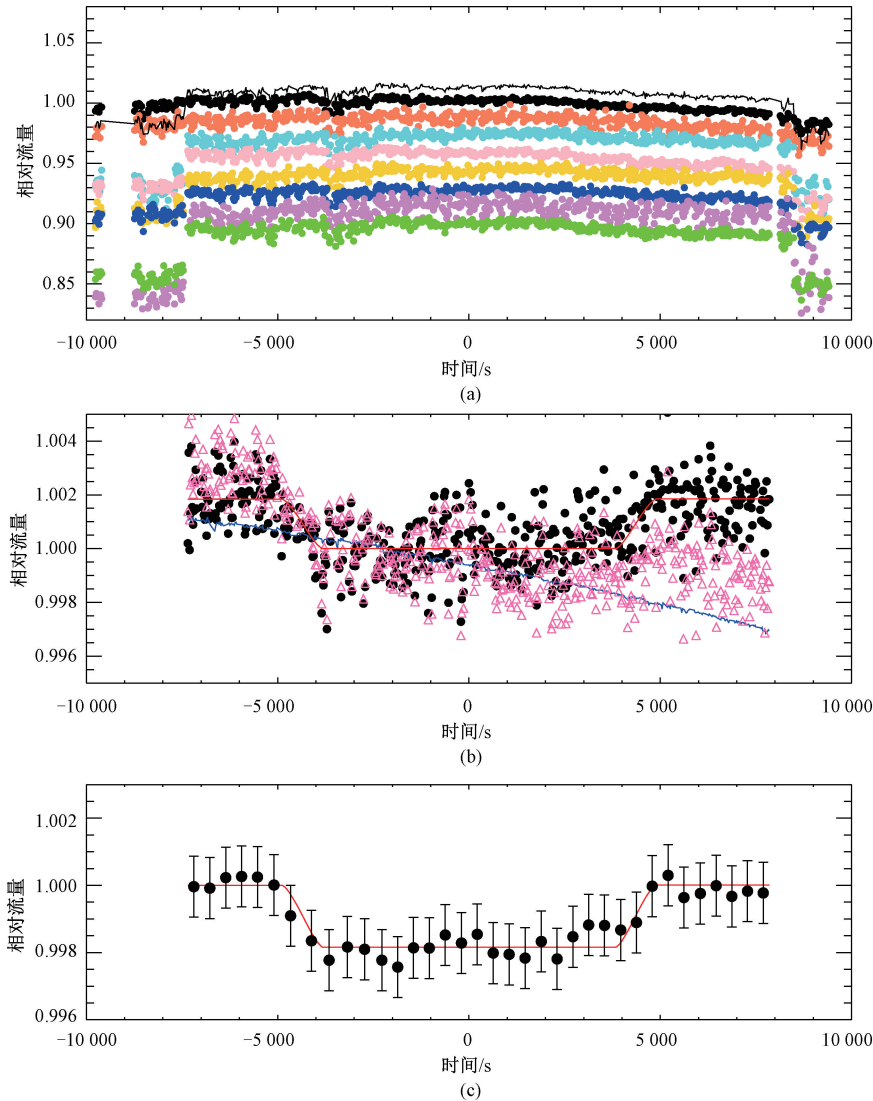


图 1 WASP-103b 的 J 波段次食光变曲线

Fig. 1 The J-band secondary eclipse light curve of WASP-103b

孔径值的选择对测光结果(包括星等或亮度及其误差)极为重要,而参考星的选择对较差光变曲线的数值及误差有重要影响。孔径和参考星选择的优劣主要由拟合光变曲线的残差的均方根(root mean square, RMS)的大小来衡量。此过程最为复杂,是实现 10^{-4} 精度的关键细节,详情见下节。

3.2 参考星及测光孔径值最优选择

经过步骤 1~3, 获得了目标星和参考星在不同测光孔径值时的较差光变曲线。取决于选择的孔径值数量和参考星数量, 光变曲线的数量一般超过 100。目标星的光变曲线要扣除平均光变曲线才能得到较差光变曲线, 而参考星的组合数目非常大。本小节主要以测量 WASP-103b 的次食深度为例, 描述如何找到最佳光变曲线, 以及最优的孔径值和参考星组合。

首先, 用 MA 模型去拟合或模拟上述得到的每一条光变曲线, 获得最优或最可几模型解, 从而得到行星次食深度等信息及观测-模型残差的均方根 RMS。很自然, 光变曲线的优劣由拟合残差均方根来决定, 残差越小, 光变曲线越好, 得到此光变曲线的孔径值和参考星组合就越优。当然, 因为光变曲线数目太多 (10^2), 其组合数目估计达到或超过 10^4 , 遍历所有组合是不现实的。举例来说, 只考虑单一孔径值, 10 颗观测参考星中挑出 1~10 颗作为参考星的排列组合的数目已超过 10^3 , 若考虑 10 个以上的孔径值, 组合数目远超 10^4 。

因此, 需对参考星的优劣进行排序。然后从最好的参考星开始, 按照优劣先后添加参考星。若排序靠后的参考星的加入导致拟合变差, 则此参考星及排序更靠后的参考星都将被剔除。在我们的数据里, 这一步排除了 2~4 颗参考星。我们参考 Croll 等, 排序采用的依据是 $RMS \times \beta^2$ 。其中 RMS 是目标星利用单独一颗参考星得到的光变曲线与其最可几模型的残差的均方根。校正因子 β 是一个量化红噪声的参数, 其值 ~ 1 代表残留的噪声几乎都是白噪声, 值越大代表红噪声越多^[31]。通过数据点合并, 每 N 个数据点合并为 1 个, 合并之后的数据数目为 M , 合并后的残差标准差 σ_N 。 σ_N 与 $\sigma_{wn,N}$ 的比值即为 β , 其中

$$\sigma_{wn,N} = \frac{\sigma_1}{\sqrt{N}} \sqrt{\frac{M}{M-1}}, \tag{2}$$

反映了在只有白噪声的情况下, N 个数据点取平均后的理论标准差。图 2 展示了 σ_N (虚线) 和 $\sigma_{wn,N}$ (实线), 可以看出一般情况下前者大于后者, 因此有 $\beta > 1$ 。在 N 较大的情况下, 采样点少, 可能存在过拟合的情况, 因此有少数 $\beta < 1$, 此时令 $\beta = 1$ 。

如前所述, 孔径值的设定应尽量减少背景噪声的影响并覆盖恒星尽可能多的光强。对于本文分析的 CFHT 数据, 总共选择 15 个孔径尺寸, 即 26~40 个像素。尽管最佳的测光孔径值可能随观测时刻有变化, 但其变化不大, 因此在实际分析过程中, 对于同一颗星, 在一次次食观测中采用同样的测光孔径。参照 Croll 等的方法, 改变测光孔径和参考星数目, 就可以得到 $RMS \times \beta^2$ 二维分布, 并根据其最小值得到最佳测光孔径和参考星数目。图 3 展示了 WASP-103b 的 J 波段光变曲线在不同的参考星数目和测光孔径值下得到的 $RMS \times \beta^2$ 的等高线, 可以明显看出参考星数目为 4、测光孔径值为 38 像素的组合为最佳组合。因为 $RMS \times \beta^2$ 数值小, 且变化小, 为便于展示和分析, 图中实际画的是 $5 + \lg(RMS \times \beta^2)$ 线。

在上述过程中, 目标星和参考星用的是同样的孔径值。而实际上, 因目标星和参考星亮度不同, 二者在探测器上的星像大小并不严格相同, 因此进一步研究了目标星和参考星的孔径值独立变化是否能够得到更好的拟合。首先, 对同一颗参考星在不同孔径值条件下计算 $RMS \times \beta^2$, 得到每颗参考星较小的 3 个 $RMS \times \beta^2$ 对应的孔径值。我们发现, 对于大部分参考星, 改变其孔径值能够得到更小的 $RMS \times \beta^2$, 因此每一颗参考星的孔径值也应该作为搜寻 $RMS \times \beta^2$ 最小值的因变量。然而, 这样的组合的数目是孔径数目 N_{aper} 的参考星

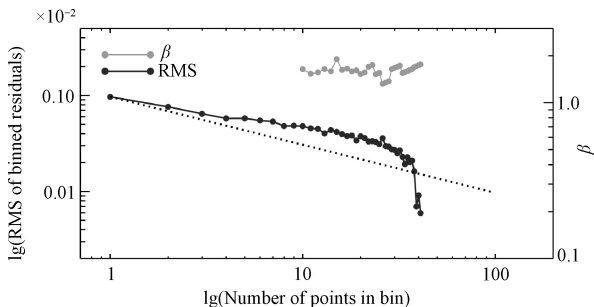


图 2 J 波段 WASP-103b 的数据的残差、噪声因子与最可几拟合模型

Fig. 2 RMS and noise factor β of our residuals to the best-fit model for the various data sets

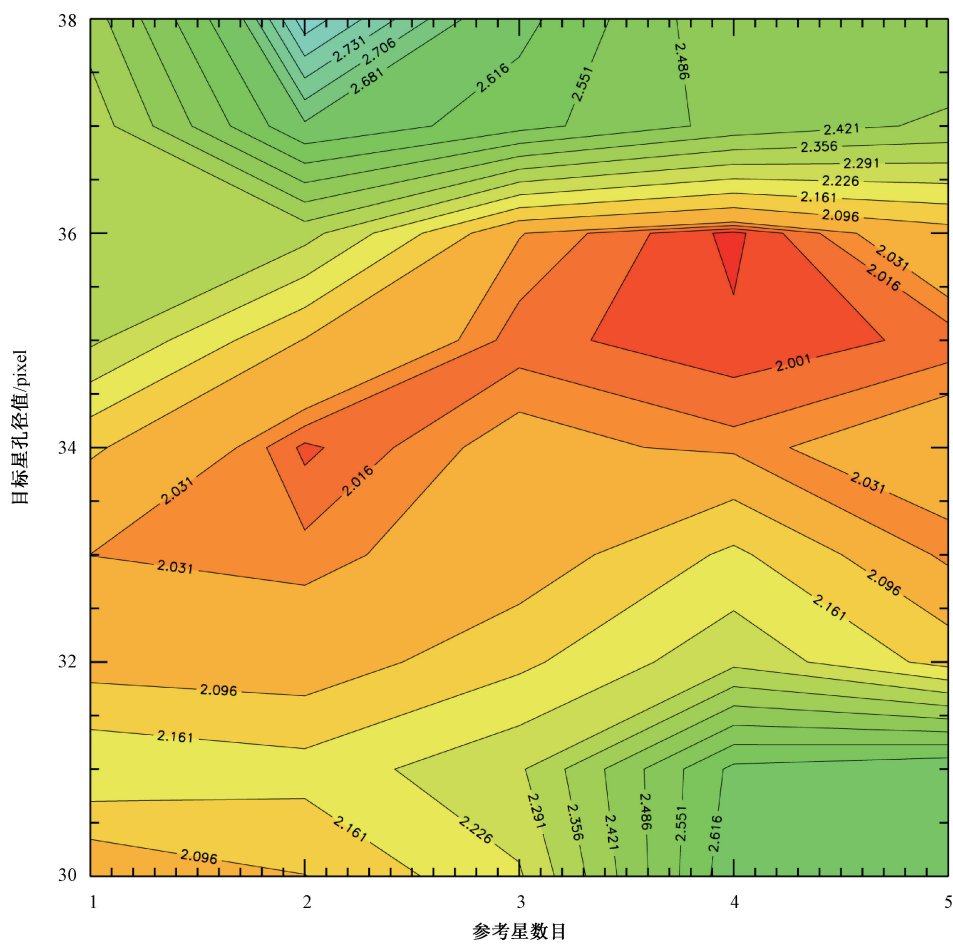


图 3 J 波段 WASP-103b 光变曲线的 $5+\lg(\text{RMS}\times\beta^2)$ 等高线图

Fig. 3 The contour map of the light curve of WASP-103b in J-band

数目 N_{ref} 次方。对我们的 J 波段数据来说,前者是 18,后者是 5,大约 189 万种组合。遍历所有的孔径组合并不现实。

因此,类似于前文对参考星优劣的排序,我们对每一颗参考星的孔径值也进行了排序。参照前文得到参考星排序的方法,固定目标星孔径(38 像素),固定参考星组合(4 颗),变化某一颗参考星的测光孔径,得到一系列 $\text{RMS}\times\beta^2$,根据 $\text{RMS}\times\beta^2$ 数值确定测光孔径的排序,并选择最小的 3 个 $\text{RMS}\times\beta^2$ 值所对应的孔径值作为局部最优孔径值。同样,固定参考星测光孔径,也可得到目标星的 3 个局部最优孔径值。把这些局部最优孔径值组合起来,用于寻找全局最优的参数组合。

参考星组合的确定需要基于统一孔径条件下的结果。先按照统一孔径得到的 $\text{RMS}\times\beta^2$ 值对参考星进行排序,依次进行个数由 2~6 颗参考星递增(5 种情况)的误差估算及模型拟合,11 个孔径大小进行 55 种组合(如图 2,得到参考星数目与

孔径大小组合的等高线图),从而确定最佳个数选择。最后,将选出的几颗参考星及它们对应的最佳 3 个孔径大小与目标星的 3 个孔径大小进行组合,确定全局最佳组合。

对于 J 波段的观测数据,最后只选定了 2 颗参考星,目标星测光孔径为 32,获得的最小 $\text{RMS}\times\beta^2$ 值为 0.000 98,次食食深为 $(1\,291\pm176)\times10^{-6}$ 。对于 Ks 波段的观测,选定 5 颗参考星,目标星测光孔径为 36,获得最小 $\text{RMS}\times\beta^2$ 值为 0.002 6,次食食深为 $(1\,410\pm230)\times10^{-6}$ 。2 个波段的测光结果基本达到 2‰ 的超高精度。

4 讨论和结论

系外行星大气的研究需要超高精度的观测数据。通过误差分析,以实际数据为基础,提出要获得超高精度的数据所要求。分析了利用 CFHT 获得的热木星 WASP-103b 的 J 和 Ks 波段的次食观测数据。每个观测点的测光误差 $\sim 1.5\times10^{-3}$,此误差是由测光程序给出的光子泊松误差。次食

深度测量,实际是测量基线和次食中的亮度差别,因此其误差主要由基线和次食亮度测量的精度共同决定。以 J 波段数据为例,基线部分有 220 个数据点,合并为一个数据点之后的误差大概是 $10^{-3}\sqrt{100}\sim8.7\times10^{-5}$,次食中大概有 285 个数据点,误差 $\sim7.9\times10^{-5}$ 。因此,根据误差传递理论,二者之商可达到的最高精度为 $\sim1.2\times10^{-4}$ 。以 Wang 等, Croll 等的方法为基础,进一步优化了较差测光和测量行星次食深度的方法,成功地得到 2×10^{-4} 的测光精度,仅仅是前面提到的最高精度 $\sim1.2\times10^{-4}$ 的 2 倍左右,说明较好地扣除了大部分红噪声。其他类似的行星科学,如果是要测量一段时间内的相对变化,而导致变化的物理原因已知且可模拟,都可以用此方法实现超高精度的测量。

为实现超高精度测光,观测设备方面最重要的是要有良好的指向精度和大幅延展的星像,后者主要通过散焦实现。然而,新的研究和测试表明,利用匀化器件(比如散光器 diffuser 等)能够实现更好的测光精度,对天气、望远镜指向等要求更低^[32]。观测方面,首先需要选择合适的波段,尽量多观测次食以外的基线部分。本文讨论的数据在观测开始及结束时误差较大,可能是由于大气扰动及观测设备不稳定。为避免引入额外的误差和拟合偏差,在拟合过程中剔除了这些误差较大的数据点,浪费了大概 20%~30% 的数据。基线数据对于扣除红噪声非常重要,因此建议尽可能增加基线观测的时间。

数据处理和分析方面,关键在于如何选择最佳的参考星和测光孔径,以及模拟并扣除红噪声。我们提出,把参考星和目标星的孔径值作为自由变量,相对于使用统一的孔径值,可以将测光精度提高 1 倍左右。需要指出的是,利用此方法,测量主食食深,也可获得类似精度,也可采用高斯过程等方法模拟并扣除主食光变曲线中的红噪声。

参考文献

[1] Mayor M, Queloz D. A Jupiter-mass companion to a solar-type star[J]. *Nature*, 1995, 378: 355-359. DOI:10.1038/378355a0.

[2] Charbonneau D, Brown T M, Noyes R W, et al. Detection of an extrasolar planet atmosphere [J]. The Astrophysical Journal Letters, 2002, 568 (1): 377-384. DOI: 10.1086/338770.

[3] Madhusudhan N. Exoplanetary Atmospheres: key insights, challenges, and prospects[J]. Annual Review of Astronomy and Astrophysics, 2019, 57: 617-663. DOI: 10.1146/annurev-astro-081817-051846.

[4] Deming D, Wilkins A, McCullough P, et al. Infrared transmission spectroscopy of the exoplanets HD 209458b and XO-1b using the wide field camera-3 on the Hubble Space Telescope[J]. The Astrophysical Journal Letters, 2013, 774 (2): 95. DOI:10.1088/0004-637X/774/2/95.

[5] Redfield S, Endl M, Cochran W D, et al. Sodium absorption from the exoplanetary atmosphere of HD 189733b detected in the optical transmission spectrum [J]. The Astrophysical Journal Letters, 2008, 673 (1): L87-L90. DOI: 10.1086/527475.

[6] Snellen I A G, de Kok R J, de Mooij E J W, et al. The orbital motion, absolute mass and high-altitude winds of exoplanet HD 209458b[J]. *Nature*, 2010, 465: 1049-1051. DOI:10.1038/nature09111.

[7] Rodler F, Kürster M, Barnes J R. Detection of CO absorption in the atmosphere of the hot Jupiter HD 189733b [J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2013, 432(3): 1980-1988. DOI:10.1093/mnras/stt462.

[8] Brogi M, Line M, Bean J, et al. A framework to combine low-and high-resolution spectroscopy for the atmospheres of transiting exoplanets[J]. The Astrophysical Journal Letters, 2017, 839(1): L2. DOI:10.3847/2041-8213/aa6933.

[9] Hoeijmakers H J, Ehrenreich D, Heng K, et al. Atomic iron and titanium in the atmosphere of the exoplanet KELT-9b[J]. *Nature*, 2018, 560: 453-455. DOI: 10.1038/s41586-018-0401-y.

[10] Seager S, Deming D. Exoplanet atmospheres [J]. Annual Review of Astronomy and Astrophysics, 2010, 48: 631-672. DOI:10.1146/annurev-astro-081309-130837.

[11] Sirianni M, Jee M J, Benítez N, et al. The photometric performance and calibration of the Hubble Space Telescope advanced camera for surveys [J]. The Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 2005, 117(836): 1049-1112. DOI:10.1086/444553.

[12] Werner M W, Roellig T L, Low F J, et al. The Spitzer Space Telescope mission [J]. The Astrophysical Journal Supplement Series, 2004, 154(1): 1-9. DOI:10.1086/422992.

[13] Borucki W J, Koch D, Basri G, et al. Kepler planet-detection mission: introduction and first results[J]. *Science*, 2010, 327 (5968): 977-980. DOI: 10.1126/science.1185402.

[14] Ricker G R, Winn J N, Vanderspek R, et al. The transiting exoplanet survey satellite [EB/OL]. arXiv: 1406.0151v3. (2014-02-28) [2022-03-22]. <https://arxiv.org/abs/1406.0151>.

[15] Owens N, de Mooij E J W, Watson C A, et al. Phase curve and variability analysis of WASP-12b using TESS photometry [J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters, 2021, 503 (1): L38-L46. DOI: 10.1093/mnrasl/

- slab014.
- [16] Puget P, Stadler E, Doyon R, et al. WIRCam: the infrared wide-field camera for the Canada-France-Hawaii Telescope [C]//SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation. Proc SPIE 5492, Ground-Based Instrumentation for Astronomy, Glasgow, United Kingdom. 2004, 5492: 978-987. DOI: 10.1117/12.551097.
 - [17] Croll B, Lafreniere D, Albert L, et al. Near-infrared thermal emission from WASP-12b: detections of the secondary eclipse in *Ks*, *H*, and *J*[J]. The Astronomical Journal, 2011, 141 (2): 30. DOI:10.1088/0004-6256/141/2/30.
 - [18] Croll B, Albert L, Jayawardhana R, et al. Near-infrared thermal emission detections of a number of hot Jupiters and the systematics of ground-based near-infrared photometry[J]. The Astrophysical Journal Letters, 2015, 802 (1): 28. DOI: 10.1088/0004-637x/802/1/28.
 - [19] Wang W, van Boekel R, Madhusudhan N, et al. Ground-based detections of thermal emission from the dense hot Jupiter WASP-43b in the *H* and *Ks* bands[J]. The Astrophysical Journal Letters, 2013, 770 (1): 70. DOI: 10.1088/0004-637x/770/1/70.
 - [20] Martioli E, Colón K D, Angerhausen D, et al. A survey of eight hot Jupiters in secondary eclipse using WIRCam at CFHT [J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2018, 474(3): 4264-4277. DOI:10.1093/mnras/stx3009.
 - [21] Beuzit J L, Vigan A, Mouillet D, et al. SPHERE: the exoplanet imager for the Very Large Telescope[J]. Astronomy & Astrophysics, 2019, 631, A155. DOI: 10.1051/0004-6361/201935251.
 - [22] Wilson J C, Eikenberry S S, Henderson C P, et al. Wide-field infrared camera for the Palomar 200-in. telescope[C]//Astronomical Telescopes and Instrumentation. Proc SPIE 4841, Instrument Design and Performance for Optical/Infrared Ground-Based Telescopes, Waikoloa, Hawaii, USA. 2003, 4841: 451-458. DOI:10.1117/12.460336.
 - [23] Toyozumi H, Ashley M C B. Intra-pixel sensitivity variation and charge transfer inefficiency-results of CCD scans [J]. Publications of the Astronomical Society of Australia, 2005, 22(3): 257-266. DOI:10.1071/as05013.
 - [24] Everett M E, Howell S B. A technique for ultrahigh-precision CCD photometry[J]. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 2001, 113 (789): 1428-1435. DOI: 10.1086/323387.
 - [25] Gillon M, Anderson D R, Collier-Cameron A, et al. WASP-103 b: a new planet at the edge of tidal disruption [J]. Astronomy & Astrophysics, 2014, 562; L3. DOI:10.1051/0004-6361/201323014.
 - [26] de Wit J, Seager S. Constraining exoplanet mass from transmission spectroscopy[J]. Science, 2013, 342 (6165): 1473-1477. DOI:10.1126/science.1245450.
 - [27] Southworth J, Evans D F. Contamination from a nearby star cannot explain the anomalous transmission spectrum of the ultrashort period giant planet WASP-103 b [J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2016, 463 (1): 37-44. DOI:10.1093/mnras/stw1943.
 - [28] Ngo H, Knutson H A, Hinkley S, et al. Friends of hot Jupiters. IV. Stellar companions beyond 50 AU might facilitate giant planet formation, but most are unlikely to cause Kozai-lidov migration[J]. The Astrophysical Journal Letters, 2016, 827(1): 8. DOI:10.3847/0004-637x/827/1/8.
 - [29] Eastman J, Gaudi B S, Agol E. EXOFAST: a fast exoplanetary fitting suite in IDL [J]. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 2013, 125 (923): 83-112. DOI:10.1086/669497.
 - [30] Mandel K, Agol E. Analytic light curves for planetary transit searches[J]. The Astrophysical Journal Letters, 2002, 580 (2): L171-L175. DOI:10.1086/345520.
 - [31] Winn J N, Holman M J, Torres G, et al. The transit light curve project. IX. Evidence for a smaller radius of the exoplanet XO-3b [J]. The Astrophysical Journal Letters, 2008, 683(2): 1076-1084. DOI:10.1086/589737.
 - [32] Stefansson G, Mahadevan S, Hebb L, et al. Toward space-like photometric precision from the ground with beam-shaping diffusers[J]. The Astrophysical Journal Letters, 2017, 848 (1): 9. DOI:10.3847/1538-4357/aa88aa.