

类水星系外行星偏振特性研究*

孙 杰^{1,2†} 屈中权¹ 闫晓理¹

(1 中国科学院云南天文台 昆明 650011)

(2 中国科学院研究生院 北京 100049)

摘要 通过对不可分辨水星偏振相位曲线的研究了解类水星不可分辨系外行星的偏振特性, 为用偏振探测手段寻找类水星系外行星提供有力的依据. 通过贝叶斯非线性拟合得到水星测光相位曲线和偏振相位曲线, 进而得到不可分辨水星的偏振相位曲线. 从该曲线中得出以下结果: (1) 水星在不可分辨情况下在可见光波段其偏振度的量级为 10^{-12} ; (2) 垂直于散射平面和平行于散射平面的最大偏振度相当, 且它们所对应的相位角相对于可分辨情况下发生了明显的改变; (3) 在相位角大于 158° 时不可分辨水星的偏振度几乎为零.

关键词 行星与卫星: 个别: 水星, 方法: 数据分析

中图分类号: P 185; **文献标识码:** A

1 引言

水星是太阳系中轨道在地球轨道之内的地内行星, 因此可以得到较大范围相位角的测光数据及偏振数据, 为研究水星的亮度及偏振随相位角的变化特征提供了有利的条件, 也为研究小相位角及大相位角时水星的反射特性提供了必要的前提. 水星的测光研究不仅有地面望远镜的测量还有空间卫星的探测^[1-7]. 从测光数据中获得水星表面特性的模型主要是 Hapke^[8-9] 的双向反射模型, 从该模型中可以获得水星表面的粗糙度、冲效应宽度、粒子的单次反射反照率等. Warell^[10] 运用该模型对水星和月球的测光数据进行了分析, 得出水星的表面特性与月球较暗区域相似. 应用该模型对水星测光数据进行分析的还有 Mallama 等^[7]、Veverka 等^[11] 以及 Domingue 等^[12]. Domingue 等^[12] 通过对空间探测器 MESSENGER 所获得的水星多波段测光数据进行分析得出水星风化层的特性不仅与月球风化层特性相似还与小行星风化层的特性相似.

水星的偏振观测, 最早是 Lyot 在 1922 ~ 1924 年在默东天文台夜间进行的观测, 1930 年他还在白天对其进行了偏振观测, 得到相位角在 $5^\circ \sim 22^\circ$ 的偏振数据^[13]. 对水星进行偏振观测的还有 Dollfus 等^[13]、Gehrels 等^[14] 以及 Lupishko 等^[15] 等. Dollfus 在 1950 年应用 Lyot 类型的偏振测量仪获得有效波长为 $5\,200\text{ \AA}$ 及 $6\,300\text{ \AA}$ 的偏振数据, 而在 1966 ~ 1972 年他们应用光电偏振测量仪获得水星盘面 5 个波段的偏振数据, 该偏振

2012-03-01 收到原稿, 2012-05-16 收到修改稿

* 国家自然科学基金项目 (10903027, 11078005, 10943002) 资助

† sunjie@ynao.ac.cn

数据的相位区间为 $4^\circ \sim 130^\circ$, 通过综合 Lyot 所测的偏振数据, 分析发现水星偏振随相位角的变化与月球相似, 因此他们认为水星表面物质与月球表面物质相似. Gehrels 等^[14] 在 1964 ~ 1970 年对水星进行的偏振观测则获得了相位区间为 $53^\circ \sim 130^\circ$ 、波长范围为 $3000 \text{ \AA} \sim 10000 \text{ \AA}$ 的 7 个波段偏振数据, 通过该偏振数据他们发现, 水星偏振的变化不仅与水星经度有关, 且在相同相位角时, 偏振随波长的变化在小范围内与波长的倒数成正比. Lupishko 等^[15] 应用单通道光电偏振测量仪器在 2000 ~ 2002 年对水星进行了偏振测量, 获得相位区间为 $39.1^\circ \sim 135.5^\circ$ 的偏振数据, 通过该数据分析, 他们同样发现水星偏振的变化与水星经度有关, 且偏振随经度变化的振幅可达 1%. Ingersoll^[16] 通过在行星表面反照率及行星大气光学厚度都较小条件下, 假设行星大气和行星表面可以分开处理, 即在计算大气散射光时不考虑表面反射光对大气散射光的影响, 同样在计算行星表面反射光时不考虑大气散射光的影响, 并假设一阶散射光直接从太阳辐射光束中射出以及行星大气消光可以忽略. 从上述假设中他们获得含有 3 个自由参数的偏振模型, 并通过该模型对水星偏振数据分析得出水星上并无大气存在.

自 Seager 等^[17] 首次应用模拟方法分析了短周期巨型系外行星偏振特性后, 应用偏振探测来研究系外行星的物理特征越来越受到天文学家的关注. Stam 等^[18] 应用数值模拟对类木行星的测光流量和偏振特性进行分析给出: 不仅可以用偏振来研究系外行星的表面特征, 还可以运用偏振探测寻找系外行星. 文献 [19-20] 则分析了椭圆轨道系外行星偏振特性. Sengupta 等^[19] 主要研究了水和硅酸盐粒子单次散射产生的偏振, 而 Fluri 等^[20] 则主要讨论了由行星大气瑞利散射所产生的偏振. Bailey^[21]、McCullough^[22] 研究了有水存在的系外行星偏振特性. Bailey 则主要讨论了行星大气中存在液滴时所产生的彩虹效应, 而 McCullough 则研究了有海洋和大气存在的类地行星的偏振特征, 给出可用偏振探测来诊断系外行星是否有海洋的存在. 首次成功获得系外行星偏振数据的是 Berdyugina 等^[23] 在 2006 ~ 2007 年间对 HD189733 系统在 B 波段进行的偏振测量, 测得该行星系统由于系外行星 HD189733b 的大气散射所产生的偏振度约 10^{-4} , 该偏振数据的获得充分说明我们可以应用偏振探测来研究系外行星. 尽管如此, 由于目前偏振仪器精度的限制, 对系外行星偏振的测量还具有很大的困难, 因此绝大多数系外行星偏振特性的获得是通过数值模拟进行的. 数值模拟实际是对行星系统理想化的计算, 与实际的行星状况有一定的差异, 所以从数值模拟中获得的行星的偏振特性与实际观测到的偏振特性会有一定的差异. 目前对于利用所熟知的太阳系内行星的偏振来获得同类型的不可分辨系外行星的偏振特性的方法还未见报道, 因此本文利用已获得的水星的偏振数据和测光数据, 期望得到类水星系外行星在不可分辨情况下的偏振特性.

2 水星的测光数据和偏振数据

2.1 水星的测光数据

水星距离太阳较近, 特别是较小相位角时水星被太阳所遮挡, 以及大相位角时水星月牙的急剧变小, 因此在地球上对其观测比较困难. 前人在地球上观测的最小相位角为 Danjon^[2] 所给的 3° , 最大相位角为 Mallama 等^[7] 所给的 137.2° . 而本文应用的数据为

Mallama 等^[7] 所给的消除距离影响的 V 星等值, 应用该数据的原因在于, 该数据不仅给出了地面观测数据还给出了相位角最低为 2.2° 、最高达 169.5° 的卫星数据, 有利于获得水星较为完整的测光相位曲线.

2.2 水星的偏振数据

本文所应用的测光数据为 3 色测光中的 V 星等值, 为了获得不可分辨行星的偏振相位曲线, 所应用的偏振数据的有效波长也应为 $5\,500\text{ \AA}$, 然而对于该波段的偏振数据仅有 Lupishko 等^[15] 给出的相位角在 $113.2^\circ \sim 135.5^\circ$ 之间的 6 个数据, 不可能得到偏振相位曲线. 因此本文应用 Ingersoll^[16] 和 Gehrels 等^[14] 所得的水星偏振与波长倒数在小范围内成正比这一结果, 用 Dollfus 等^[13] 所给的有效波长为 $5\,300\text{ \AA}$ 和 $6\,300\text{ \AA}$ 、在相同相位角的偏振数据, 计算得到有效波长为 $5\,500\text{ \AA}$ 的偏振数据. 我们将该数据所得的偏振相位曲线与 Dollfus 等^[13] 的图 5 所给的多波段偏振相位曲线进行了对比, 我们所得的偏振相位曲线其变化趋势, 与他们所给的有效波长为 $5\,200\text{ \AA}$ 及 $5\,800\text{ \AA}$ 的偏振随相位角变化的趋势一致, 且偏振的数值介于二者之间, 由此说明用该方法得到的数据是有效的, 能够反映水星偏振在有效波长 $5\,500\text{ \AA}$ 时偏振随相位角变化的特征.

3 模型和分析方法

3.1 不可分辨水星偏振相位曲线模型

水星的偏振主要是由于水星表面反射太阳光而产生的. 在固定的太阳相位角时, 水星偏振度的大小只与相位角有关, 与观测距离无关. 因此我们可以假设观测点位于很远的位置上, 并首先考虑其可以与太阳分辨开来的情形. 在这一条件下其偏振相位曲线应与在地球上观测的偏振相位曲线一致. 即有

$$p'(\alpha) = p(\alpha), \quad (1)$$

其中 α 为相位角, $p'(\alpha)$ 为在远大于太阳系尺度的位置上观测到的水星的偏振度, $p(\alpha)$ 为地球上所观测到的偏振度. 现在考虑在很远的位置上观测时, 水星成为其不可分辨的行星, 即水星反射的太阳光与太阳辐射的光不可分开. 由偏振度的定义

$$p(\alpha) = \frac{I_p(\alpha)}{I_{\text{tot}}(\alpha)}, \quad (2)$$

其中 $I_p(\alpha)$ 为偏振光强度, $I_{\text{tot}}(\alpha)$ 为总辐射强度. 由 (2) 式可得水星在不可分辨情况下其偏振度为

$$p_u(\alpha) = \frac{I_p(\alpha)p'(\alpha)}{I_p(\alpha) + I_\odot}, \quad (3)$$

其中 $I_\odot$ 为太阳的辐射强度.

3.2 水星测光相位曲线模型

对于水星的测光数据分析, 本文采用 1984 年 Hapke^[9] 给出的双向反射模型. 模型中的单次反射相位函数 $P'(\alpha)$ 为两个参数的 Henyey-Greenstein 函数, $B(\alpha)$ 为 1986 年

Hapke^[8] 所给的后向散射函数. 由于本文分析的测光数据为 Mallama 等^[7] 所给的星等数据, 反照率与星等之间的转换关系采用的是 Simonelli 等^[24] 所给的转换关系. 此关系式中所用到的星等值为归一化的星等值, 因此对于 Mallama 等^[7] 所给的归算星等与 Hapke 模型的关系式为

$$m_1(\alpha) = -2.5 \lg(13.3\varphi), \quad (4)$$

$$\varphi = \left[1 + \frac{r_0(C(\omega, \bar{\theta}) - 1)(1 + \frac{r_0}{3})}{2p(\omega, 0)} \right] \left\{ \frac{\omega}{8} [(1 + B(\alpha))P'(\alpha) - 1] + \frac{r_0}{2}(1 - r_0) \right\} \left\{ 1 - \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) \ln\left(\cot\left(\frac{\alpha}{4}\right)\right) \right\} + \frac{2r_0^2}{3\pi} [\sin(\alpha) + (\pi - \alpha) \cos(\alpha)] K(\alpha, \bar{\theta}),$$

其中 ω 为单次反射反照率, $\bar{\theta}$ 为行星表面平均地形坡度角, $C(\omega, \bar{\theta})$ 及 $K(\alpha, \bar{\theta})$ 为粗糙表面改正函数, r_0 为 ω 的函数, 见 Hapke^[9].

3.3 水星偏振相位曲线模型

水星的偏振相位曲线我们采用 Lumme 和 Muinonen 于 1993 年所给的经验模型^[25]:

$$p(\alpha) = p_0 \sin^{c_1}(\alpha) \cos^{c_2}\left(\frac{\alpha}{2}\right) \sin(\alpha - g_0), \quad (5)$$

其中 p_0 是与偏振幅度相关的物理量, c_1 和 c_2 是与偏振相位曲线形状有关的量, g_0 为反相角. 采用该模型的原因在于该模型不仅能够描述偏振随相位角在 $[0^\circ, 180^\circ]$ 的变化, 且在恰当的参数范围内其取值范围为 $[-1, 1]$, 确保了该模型具有物理上的合理性^[25]. 尽管该模型主要应用于小行星和彗星偏振数据分析, 但是由于水星距离太阳较近, 无大气成分的存在, 其偏振光的来源与小行星和彗星的偏振光的来源相似, 都是由表面反射太阳的光所产生的, 因此我们采用该模型来描述水星的偏振随相位角的变化.

3.4 模型的贝叶斯拟合

采用贝叶斯模型拟合时, 需要给出每个参数的初始分布、参数的寻找范围以及给定每个观测数据的可能性. 由于初始分布对参数的后验分布并不起决定性作用, 只对计算过程的收敛快慢产生影响, 因此对于 Hapke 模型拟合时, 参数初始分布均采用统一分布. 表 1 为 Hapke 模型拟合时参数的初始分布及取值范围, 其中 b 和 c 为 Henyey-Greenstein 函数的两个参数, h 为冲效应宽度, B_0 是后向散射函数的系数. 表 2 为偏振模型参数的初始分布和取值范围, 其中除了参数 c_1 采用 Jeffreys 分布外, 其余参数均为统一分布. 对于模型的估计值和观测数据之间的关系可以表示为

$$d_i = f_i + e_i, \quad (6)$$

其中 d_i 为观测的数据点, f_i 为模型给定的数据值, e_i 为观测值与模型值之间的偏差, 我们考虑其满足正态分布, 由此可知观测时获得的每个观测数据的可能性也满足正态分布, 因此获得 N 个数据的可能性可表示为

$$P(D | \theta_i) = (2\pi)^{-\frac{N}{2}} \prod_{i=1}^N \sigma_i^{-1} \exp \left[-\frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \frac{(d_i - f_i)^2}{\sigma_i^2} \right], \quad (7)$$

其中 D 表示观测数据, θ_i 指获得第 i 个数据的条件, N 指获得数据的个数, σ_i 指获得第 i 个数据时的误差. 对于贝叶斯模型拟合, 我们应用的程序是 Gregory^[26] 所给的平行回火马尔科夫蒙特卡洛算法. 在应用 Hapke 模型进行拟合时, 对星等的测量误差值均取为 0.01 mag. 对于偏振模型拟合时, 其偏振测量误差值均取为 0.001. 采用贝叶斯理论对 Mallama 的数据进行分析的原因是前人调查发现 Hapke 模型中的 6 个参数之间并非完全独立, 不可能给出唯一的解^[27]. 但是每一个参数的取值是在一定的区间范围之内, 且满足一定的分布, 贝叶斯算法能够给出每个参数的分布, 并且该分布的中值即为 Hapke 模型的最佳解, 还可以从分布中了解各个参数的取值情况. 对于 Mallama 的数据, Mallama 等^[7] 及 Veverka 等^[11] 分别在 2002 年、1988 年应用最小二乘法进行了分析, 但从他们的分析中发现: 应用最小二乘法来拟合 Hapke 模型必须对每个参数的取值有所了解, 并在拟合的过程中逐个调节进行拟合, 对于 Mallama 所给的宽范围拟合, 也只是取参数的几个可能取值进行拟合, 这样不利于准确寻找参数的合理取值.

表 1 Hapke 模型参数初始分布及各参数上下限

Table 1 Parameters' prior distributions in the Hapke model and the parameters' upper and lower limits

Parameter	Prior distribution	Lower bound	Upper bound
ω	—	0.1	0.5
$\bar{\theta}$	—	0.1	0.6
b	Uniform	0.01	0.3
c	—	-0.4	0.2
h	—	0.01	0.15
B_0	—	1.0	4.0

表 2 偏振模型参数初始分布及各参数上下限

Table 2 Parameters' prior distributions in the polarization model and the parameters' upper and lower limits

Parameter	Prior distribution	Lower bound	Upper bound
p_0	Uniform	0.01	0.7
c_1	Jeffreys	0.1	0.9
c_2	Uniform	-0.3	0.8
g_0	Uniform	0.1	0.9

4 贝叶斯分析结果

图 1 给出了 Hapke 模型参数的概率分布图, 图中的横轴为参数值, 纵轴为参数值的概率分布 (PDF), 从该图可以看出, 尽管所用参数初始分布均为统一分布, 但是对于后验分布并不起决定作用. 表 3 为 Hapke 模型参数列表, 表中给出了每个参数的中值及 68% 置信区间的上下限. 从该置信区间可以看出 Hapke 模型参数的最大与最小值差异并不是太大, 由此选定该置信区间的任何一个值都可以作为 Hapke 模型的解. 由于贝叶斯理论的最佳解为中值解, 因此我们选用得到的中值作为 Hapke 模型的解. 通过该解与 Mallama

等^[7]、Veverka 等^[11]以及 Domingue 等^[28]所得结果比较,除单次散射相位函数参数 b 和 c 有较大差异外,其余参数基本一致,特别是更接近 Mallama 等^[7]所得的结果.对于 b 和 c 并非仅有我们所得的结果与其他作者所得结果有较大差异,如 Veverka 等^[11]给出的一组解中的 b 和 c 分别为 0.18 和 0.15,而 Domingue 等^[28]所得的一组解中的 b 和 c 却都为 0.4.对于 Hapke 模型,不同作者对相同数据却得到不同的解,其原因在于 Hapke 模型中的 6 个参数之间并非完全独立,不可能给出唯一的解^[27],还可能与所用的拟合方法有关,由此说明我们所得的结果是合理的.并且我们的解没有人为限制各个参数的取值,这有利于反映 Hapke 模型参数的取值情况.图 2 为贝叶斯所拟合的测光相位曲线,图中 $m_1(\alpha)$ 为行星轨道半径与行星到观测者的距离都为 1 AU 时的 V 星等值,实线为拟合曲线,点为观测数据,拟合的标准偏差为 0.099 mag.

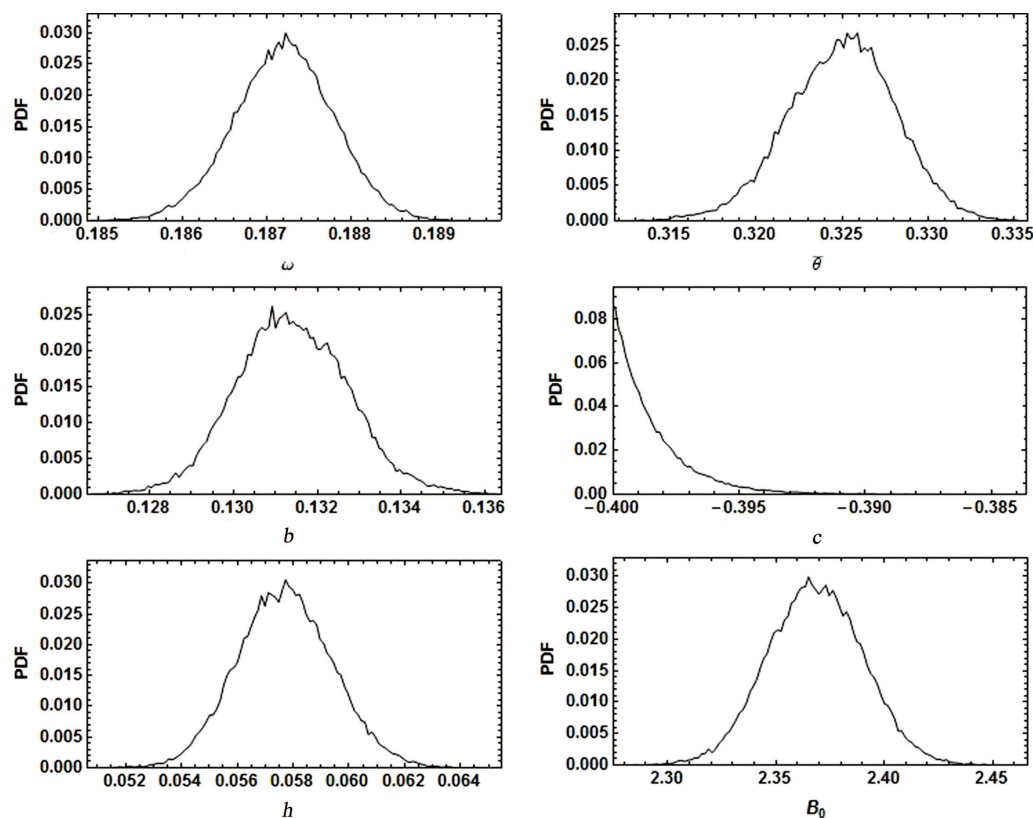


图 1 Hapke 模型参数概率分布

Fig. 1 The probability distributions of the parameters in the Hapke model

表 3 Hapke 模型参数列表

Table 3 List of the parameters in the Hapke model

Parameter	68% Confidence interval		Median	68% Confidence interval	
	Lower limit(16%)			Upper limit(84%)	
ω	0.1866		0.1872	0.1878	
$\bar{\theta}$	0.3218		0.3250	0.3280	
b	0.1302		0.1314	0.1328	
c	−0.4000		−0.3989	−0.3981	
h	0.0559		0.0577	0.0594	
B_0	2.3472		2.3684	2.3893	

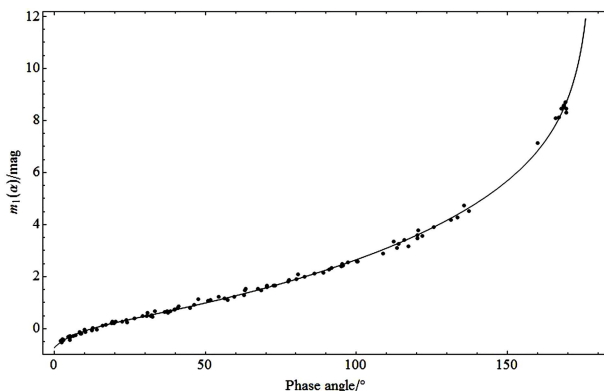


图 2 水星的测光相位曲线

Fig.2 The photometric phase curve of Mercury

图 3 给出了偏振模型参数的概率分布, 横轴为参数的取值, 纵轴为相应参数各个取值出现的概率, 从图中可以看出每个参数的后验分布近似为正态分布. 表 4 为偏振模型参数列表, 表中给出了每个参数的中值及 68% 置信区间的上下限. 尽管拟合的偏振数据只有 14 个, 但从图 4 拟合的结果和 Dollfus 等^[13] 的图 5 所绘的 Ingersoll 在波长为 5 800Å 的数据比较来看, 我们拟合所给的偏振度最小值时的相位角为 8.4°, 而 Ingersoll 所给的偏振度最小值时的相位角约为 9°, 结果相差约 0.6°, 且拟合的标准偏差为 0.001 2°, 由此可见应用贝叶斯拟合的结果相当准确. 并且从图 4 还可以看出, 水星在可分辨情况下垂直和平行于散射平面偏振的最大值分别为 7.7% 和 -0.98%, 其相应的相位角分别为 104.4° 和 8.4°, 反相角为 25.4°. 相位角小于 25.4° 时, 偏振为负值, 即偏振主要是平行于散射平面; 大于 25.4° 时偏振为正值, 即偏振主要是垂直于散射平面.

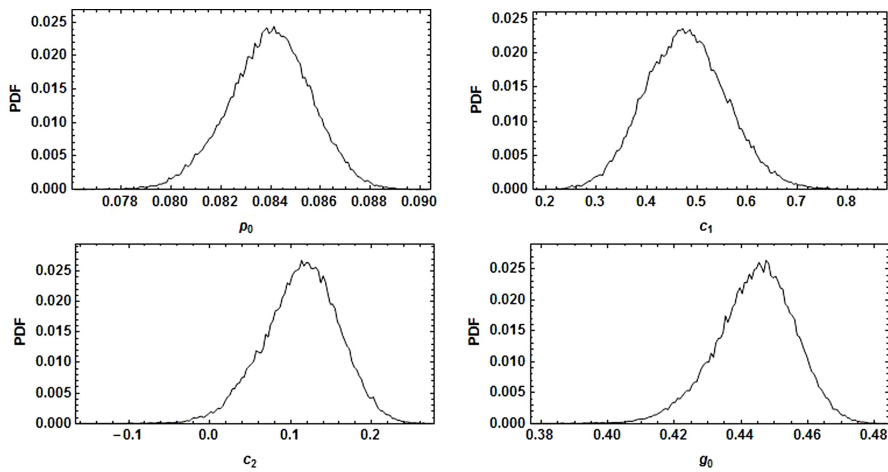


图 3 偏振模型参数概率分布

Fig. 3 The probability distributions of the parameters in the polarization model

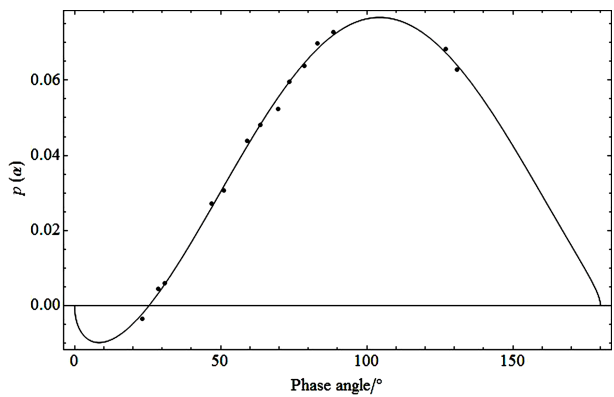


图 4 可分辨水星偏振相位曲线

Fig. 4 The polarization phase curve of resolved Mercury

表 4 偏振模型参数列表

Table 4 List of the parameters in the polarization model

Parameter	68% Confidence interval	Median	68% Confidence interval
	Lower limit(16%)		Upper limit(84%)
p_0	0.0824	0.0840	0.0856
c_1	0.3968	0.4782	0.5599
c_2	0.0686	0.1140	0.1605
g_0	0.4340	0.4447	0.4563

5 不可分辨水星的偏振相位曲线

5.1 偏振相位曲线的星等表示

由于 Hapke 模型表示的是星等值, 为了得到不可分辨情况下水星的偏振相位曲线, 我们把 (3) 式作简单的数学变换, 转换成星等表示的偏振相位曲线模型:

$$p_u(\alpha) = p'(\alpha)10^{-0.4M_p(\alpha)+0.4M_S}, \quad (8)$$

式中 $M_p(\alpha)$ 为任意观测距离上的星等值, 其表达式如下所示:

$$M_p(\alpha) = m_1(\alpha) - 5 \lg \left(\frac{1}{d_{ps}(d_{ps} \cos(\alpha) - \sqrt{d_{os}^2 - d_{ps}^2 \sin^2(\alpha)})} \right), \quad (9)$$

在上式推导中, 假设了水星绕太阳做圆轨道运动, d_{ps} 为行星到宿主恒星的距离, 即轨道半径, d_{os} 为观测者到宿主恒星之间的距离, 单位为 AU. 任意距离上太阳星等值的转换表达式为

$$M_S = M_{\odot} - 5 \lg \left(\frac{d_{es}}{d_{os}} \right), \quad (10)$$

式中 $M_{\odot}$ 为在地球上观测的太阳星等值, d_{es} 为地球到太阳的距离.

5.2 偏振相位曲线

图 5(a) 给出了以水星轨道半长轴为半径、以系外行星系统 HD189733 到地球的距离 19.3 pc 为观测距离 d_{os} 、太阳星等为 -26.75 mag 时的不可分辨偏振相位曲线, 从图中我们可以得出: (1) 在不可分辨情况下在可见光波段水星的偏振度为 10^{-12} 的量级, 相对于可分辨时偏振的量级减小 10^{10} ; (2) 在不可分辨情况下平行和垂直于散射平面的最大偏振度分别为 -1.64×10^{-12} 和 1.82×10^{-12} , 可以看出二者相差不大, 为同一个数量级. 然而对于可分辨情况下平行和垂直于散射平面的最大偏振度却有较大的差异, 相差近一个量级; (3) 不可分辨情况下平行和垂直于散射平面偏振度的最大值所对应的相位角分别为 4.7° 和 62.2° , 相对于可分辨情况时其所对应的相位角 8.4° 和 104.4° 都明显减小, 分别减小 3.7° 和 42.2° ; (4) 相位角大于 158° 时, 水星的偏振几乎为零, 与可分辨情况下偏振度随相位角的逐渐变大而减小有明显的差异. 图 5(b) 给出不可分辨水星在不同太阳星等时偏振相位曲线. 从图中可以看出尽管各曲线偏振的最大值有所差异, 但是曲线的变化特征没有发生改变, 如垂直和平行于散射平面偏振的最大值所对应的相位角仍为 62.2° 和 4.7° , 且反相角保持为 25.4° .

6 总结

本文运用 Mallama 等^[7]所给的水星的测光数据和 Dollfus 等^[13]所给的水星的偏振数据,应用贝叶斯方法,得到 Hapke 模型参数及偏振模型参数,从而得到不可分辨水星的偏振相位曲线.从该曲线中我们发现,在不可分辨情况下在可见光波段水星的偏振度为 10^{-12} 的量级,相对于可分辨水星偏振度量级减小 10^{10} ;垂直于散射平面和平行于散射平面的最大偏振度相当且在相位角大于 158° 时,其偏振度几乎为零,与可分辨偏振相位曲线存在明显的区别.由于偏振是相对量,它不随距离的变化而发生改变,因此在不考虑星际介质等影响情况下,其偏振相位曲线应与我们在地球上得到的偏振相位曲线相同,即类水星系外行星的偏振相位曲线,应与我们得到的不可分辨水星的偏振相位曲线相似.由此我们可以得出,对于类水星不可分辨系外行星,由于在可见光波段其偏振度的量级相当小,因此想要测到该波段的偏振数据以及应用偏振探测手段来发现该类行星,有待偏振探测仪器测量精度的极大提高.通过分析不同太阳星等值对偏振相位曲线的影响可以看出:在观测距离以及行星的自身特性一定的情况下,尽管偏振的大小受宿主恒星星等值影响,但偏振随相位角的变化特征不发生任何改变,由此可以通过偏振探测来研究不可分辨系外行星.

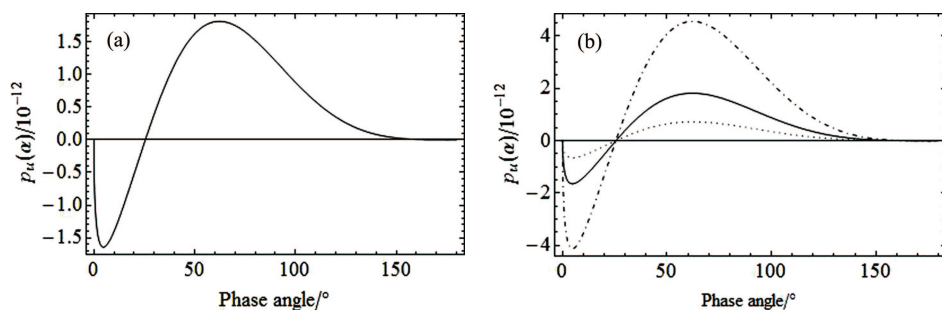


图 5 不可分辨水星偏振相位曲线. (a) 太阳星等为 -26.75 mag 时偏振相位曲线; (b) 不同太阳星等值偏振相位曲线. 点划线、实线、点线所对应的太阳星等分别为 -25.75 mag、 -26.75 mag、 -27.75 mag.

Fig. 5 The polarization phase curve of unresolved Mercury. (a) The polarization phase curve with solar magnitude of -26.75 mag; (b) The polarization phase curves with different solar magnitudes of -25.75 mag, -26.75 mag and -27.75 mag, corresponding the dot-dashed, solid and dotted lines, respectively.

尽管现在寻找系外行星的方法很多,诸如:凌日法、视向速度法、微引力透镜法、天体测量法等,但是这些方法大多都只适用于寻找系外行星以及给出行星质量、轨道周期及行星半径等,而对于行星表面特征的获得则需通过光谱分析.然而来自系外行星反射的光比较微弱,并且经过地球时还受地球大气消光等影响,因此用光谱分析研究系外行星表面特性具有较高的难度.对于偏振,由于其是相对量,在多数情况下可以不用考虑地球大气消光的影响,还可以进行宽波段测量,因此在地球上应用偏振探测研究系外行星的表面特征相对于光谱研究更为有效,特别是有助于类地系外行星的研究.对于类地系外行星在不可分辨条件下的偏振特性,将是我们下一步研究的主要内容.

致谢 作者衷心感谢王晓彬老师和 Hapke B. 教授为本项研究工作所给予的指导和建议, 感谢审稿人提出的宝贵意见和建议.

参 考 文 献

- [1] Muller G. PoPot, 1893, 8: 197
- [2] Danjon A. AstBu, 1949, 14: 315
- [3] Danjon A. AstBu, 1953, 17: 3363
- [4] Irvine W M, Simon T, Menzel D H, et al. AJ, 1968, 73: 807
- [5] Schmude R W. JRASC, 1993, 87: 133
- [6] Schmude R W. IAPPP Comm, 1995, 61: 45
- [7] Mallama A, Wang D, Howard R A. Icar, 2002, 155: 253
- [8] Hapke B. Icar, 1986, 67: 264
- [9] Hapke B. Icar, 1984, 59: 41
- [10] Warell J. Icar, 2004, 167: 271
- [11] Veverka J P, Helfenstein P, Hapke B, et al. IN: Mercury (A89-43751 19-91). Tucson: University of Arizona Press, 1988: 37-58
- [12] Domingue D L, Murchie S L, Nancy L C, et al. P&SS, 2011, 59: 1853
- [13] Dollfus A, Auriere M. Icar, 1974, 23: 465
- [14] Gehrels T, Landau R, Coyne G V. Icar, 1987, 71: 386
- [15] Lupishko D, Kiselev N. SoSyR, 2004, 38: 85
- [16] Ingersoll A P. ApJ, 1971, 163: 121
- [17] Seager S, Whitney B A, Sasselov D D. AJ, 2000, 540: 504
- [18] Stam D M, Hovenier J W, Waters L B F M. A&A, 2004, 428: 663
- [19] Sengupta S, Maiti M. AJ, 2006, 639: 1147
- [20] Fluri D M, Berdyugina S V. A&A, 2010, 512: 59
- [21] Bailey J. IJAsB, 2007, 7: 320
- [22] McCullough P R. arXiv: astro-ph/0610518
- [23] Berdyugina S V, Berdyugin A V, Fluri D M, et al. AJ, 2008, 673: 83
- [24] Simonelli D P, Veverka J. Icar, 1986, 66: 428
- [25] Penttilä A, Lumme K, Hadamcik E, et al. A&A, 2005, 432: 1081
- [26] Gregory P C. Bayesian Logical Data Analysis for the Physical Sciences. Cambridge: Cambridge University Press, 2005
- [27] Helfenstein P, Veverka J. Icar, 1987, 72: 342
- [28] Domingue D L, Sprague Ann L, Hunten D M. Icar, 1997, 128: 75

The Polarization Characteristics of Mercury-like Exoplanets

SUN Jie^{1,2} QU Zhong-quan¹ YAN Xiao-li¹

(1 *Yunnan Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650011*)

(2 *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049*)

ABSTRACT This paper aims at studying the polarization characteristics of Mercury-like exoplanets via the polarization phase curve of the unresolved Mercury. We utilize the Bayesian non-linear fitting method to get the photometric phase curve and the polarization phase curve of Mercury. From these two kinds of curves, we obtain the polarization

phase curve of the unresolved Mercury. The results from the unresolved polarization phase curve are as follows: first, in the visible light band the magnitude order of the polarization degree is 10^{-12} ; second, its maximum value in the case parallel to the scattering plane is comparable to that in the case vertical to the scattering plane, and their corresponding phase angles are changed evidently in comparison with the resolved Mercury case; third, the polarization amplitudes decrease to zero when the phase angle becomes larger than 158° .

Key words planets and satellites: individual: Mercury, methods: data analysis