

YING Jiajun, JI Jianghui, JIANG Haoxuan, TAN Dongjie, HU Shoucun, BAO Gang. Rotational Characteristics and Surface Thermal Environment of Asteroid (469219) Kamo'oalewa: Target of the Tianwen-2 Mission (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2025, **45**(3): 736–748. CSTR:32142.14.cjss.2025-yg04. DOI:10.11728/cjss.2025.03.2025-yg04

天问二号任务目标小行星 (469219) Kamo'oalewa 的自转特征与表面热环境*

应佳峻^{1,2} 季江徽^{1,2,3} 姜浩轩⁴
谭东杰^{1,2} 胡寿村^{1,2,3} 包纲^{1,2,3}

1(中国科学院紫金山天文台 南京 210023)

2(中国科学技术大学天文与空间科学学院 合肥 230026)

3(中国科学院比较行星学卓越创新中心 合肥 230026)

4(滁州学院机械与电气工程学院 滁州 239099)

摘要 详细分析了近地小行星 Kamo'oalewa 的轨道特征、自转参数以及与地球的相对运动, 通过对光变曲线的拟合, 初步确定了该小行星自转轴的指向 ($\lambda = 67.9^\circ \pm 3.1^\circ$, $\beta = -46.0^\circ \pm 10.6^\circ$). 模拟未来天问二号空间任务对该小行星的探测过程, 得到了探测器在接近小行星过程中可能观测到的视星等级的变化情况. 利用先进热物理模型 (ATPM), 对 Kamo'oalewa 的表面温度分布进行详细分析, 揭示该小行星在不同热惯量条件下的详细温度分布特征. 基于分析对未来深入研究该天体的路径进行了展望, 强调高分辨率探测设备及长期观测数据对提高小行星旋转特性和轨道参数精度的重要意义. 天问二号任务的顺利实施将进一步揭示小行星的起源与演化历史提供宝贵的数据支撑.

关键词 近地小行星, 469219 Kamo'oalewa (2016 HO₃), 自转参数, 数据分析

中图分类号 P185

Rotational Characteristics and Surface Thermal Environment of Asteroid (469219) Kamo'oalewa: Target of the Tianwen-2 Mission

YING Jiajun^{1,2} JI Jianghui^{1,2,3} JIANG Haoxuan⁴
TAN Dongjie^{1,2} HU Shoucun^{1,2,3} BAO Gang^{1,2,3}

1(Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210023)

2(School of Astronomy and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026)

* 国家自然科学基金项目资助 (12150009, 12033010, 12303066)

2025-04-17 收到原稿, 2025-05-12 收到修定稿

©The Author(s) 2025. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

3(Center for Excellence in Comparative Planetology, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230026)

4(School of Mechanical and Electrical Engineering, Chuzhou University, Chuzhou 239099)

Abstract This paper provides a comprehensive analysis of the orbital characteristics, rotation parameters, and relative motion with Earth of the near-Earth asteroid 2016 HO3 (Kamo'oalewa). Through fitting the asteroid observed light curve, we preliminarily determined the orientation of its rotation axis as $\lambda = 67.9^\circ \pm 3.1^\circ$, $\beta = -46.0^\circ \pm 10.6^\circ$. By simulating the forthcoming Tianwen-2 space mission, we predicted changes in the apparent magnitude of the asteroid as observed by the spacecraft during its approach phase. Using the Advanced Thermophysical Model (ATPM), we performed a detailed analysis of the surface temperature distribution of asteroid 2016 HO3, revealing detailed temperature distribution features under varying thermal inertia conditions. Finally, this paper outlines future research directions, highlighting the significant potential for improved accuracy in determining the asteroid rotational parameters and orbital properties through higher-resolution observations and longer-term data accumulation. The successful implementation of the Tianwen-2 mission will provide crucial data, further advancing our understanding of the origins and evolutionary histories of asteroids.

Key words Near-Earth asteroids, 469219 Kamo'oalewa (2016 HO₃), Rotational parameters, Data analysis

0 引言

469219 Kamo'oalewa (临时编号 2016 HO₃) 是一颗快速自转的近地小行星, 其于 2016 年 4 月 27 日由位于夏威夷哈莱阿卡拉天文台的泛星 1 号 (Pan-STARRS1) 巡天望远镜所发现^[1,2]. 该小行星属于阿波罗型小行星. 其特殊之处在于, Kamo'oalewa 与地球以相同的周期共同绕太阳公转, 以地球视角观察, Kamo'oalewa 也在绕地球转动, 此类天体被称为地球准卫星 (Earth Quasi-Satellite), 其短期动力学特性表现为准卫星和马蹄形轨道之间的周期性切换. 由于 Kamo'oalewa 的直径仅为 40~100 m^[3], 雅科夫斯基 (Yarkovsky) 效应在其长期动力学行为中可能发挥了重要作用. 然而, Fenucci 和 Novaković^[4] 的研究表明, 与仅考虑纯引力作用的模型相比, Yarkovsky 效应可能会使 Kamo'oalewa 更快地离开地球共轨区域. 尽管如此, Kamo'oalewa 是迄今发现的最稳定的地球共轨天体, 其在未来的数百万年内仍可能保持地球伴侣的状态^[2].

Kamo'oalewa 半长轴为 1.001 AU, 轨道偏心率为 0.103, 倾角为 7.79°^[5]. 尽管现有的地面观测未能够直接得到 Kamo'oalewa 的具体类型和尺寸, 但通过光谱观测, 发现 Kamo'oalewa 具有异常陡峭 (异常红) 的可见-近红外光谱斜率, 这表明其可能经历了长

期的空间风化过程, 其成分可能与月壤的硅酸盐类似^[6,7]. 另外, Zhang 等^[8] 发现 Kamo'oalewa 的光谱与强烈风化的 LL 球粒陨石高度吻合, 推测其可能为 S 型小行星.

近期对近地小行星 Kamo'oalewa 的起源研究取得了重要进展. Sharkey 等^[6] 通过光谱观测和轨道动力学模拟, 发现该小行星极有可能并非源自常规的主小行星带或一般近地小行星族, 其反射光谱与月球岩石高度相似, 推测其可能是月球撞击喷发物逃逸而来的碎片. Jiao 等^[9] 的最新研究进一步锁定了月球表面的乔尔达诺·布鲁诺 (Giordano Brun) 撞击坑为最可能的源头, 这使得 Kamo'oalewa 成为目前已知的极少数被追溯到月球的近地天体之一. 同时, Fenucci 等^[4] 和 Zhang 等^[8] 使用经典的小行星轨道动力学源区模型, 追踪了 Kamo'oalewa 的源区, 发现其来自内主带中的 v6 的概率最高, 达到 72%±5%.

由于 Kamo'oalewa 小行星与地球间的独特轨道配置, 其成为进行低成本空间实验的理想对象^[10,11]. 进一步地, 中国国家航天局 (CNSA) 计划在 2025 年发射探测器, 旨在实施近地小行星的伴飞探测和采样返回任务^[12-15], 这将是天问系列任务的第二次任务. 天问二号探测器预计于 2026 年开展对近地小行星 Kamo'oalewa 的绕飞探测, 并选择适宜的时机附着于小行星表面采集样本. 探测器将携带这些样本返

回地球, 并通过返回器将样本安全投送至地面. 完成这项任务后, 探测器将继续前往主带彗星 311 P/PanSTARRS (又被称为 P/2013 P5) 进行伴飞探测. 中国在小行星探测领域的前一个空间任务还要追溯到 2013 年, 也就是嫦娥二号对图塔蒂斯小行星的访问, 这是中国首次实现对小行星的近距离飞跃探测^[16-24]. 天问二号任务将在此基础上取得显著进展, 其目标不仅是进行小行星伴飞探测, 还是中国首次从行星际天体取回样本, 这也为中国后续的深空探测任务提供了重要的技术验证.

研究小行星的自转参数与表面温度分布不仅能够揭示小行星的基本物理特性, 更是全面理解其演化历史及执行深空探测任务的必要基础. 对小行星自转参数的精确反演, 可提供包括小行星形状、质量分布及内部结构等关键信息, 而结合热物理模型对其表面温度分布进行反演, 则能够进一步约束小行星表面及浅表层物质的热惯量、颗粒尺寸及物质组成等特征. 这些信息对于空间探测任务的着陆选址、探测器的安全稳定着陆和科学数据采集策略制定具有直接指导作用. 此外, 小行星的自转状态在长期演化过程中可能受到太阳辐射压、碰撞事件及行星潮汐效应的影响而不断发生变化, 通过对这些变化的深入分析, 将有助于重建小行星的演化历史, 并为揭示太阳系早期形成与演化过程提供重要线索.

本文描述了光变曲线拟合所采用的观测数据, 以及使用的小行星的形状模型和拟合分析的方法. 给出了 Kamo'oalewa 的自转轴指向拟合结果, 并从 Kamo'oalewa 的自转参数拟合特征中提出该小行星具有细长形态的猜想. 通过模拟天问二号空间探测任务接近 Kamo'oalewa 的过程, 仿真得到观测视星等变化和空间观测的自转光变曲线. 此外, 采用先进热物理模型对小行星的表面温度分布进行了模拟, 从而得到小行星在不同平均热惯量条件下表面温度分布情况. 依据分析结果对后续研究进行了展望.

1 Kamo'oalewa 自转参数拟合

小行星自转参数的研究对于全面解析一颗小行星的演化历史及其基本属性具有至关重要的意义, 亦是执行空间探测任务不可或缺的基础条件之一. 研究小行星的自转参数 (包括自转周期和自转轴指向) 可以帮助理解其动力学和物理特性, 与小行星热物理模

型的结合应用, 能够推断小行星的热惯量, 进而揭示其表面和浅表层的物质组成特征及其颗粒度大小. 小行星自转速率和自转轴指向对于确定附着点的选择、着陆器的稳定性以及整个探测过程中数据收集策略的制定均有重要影响. 同时, 小行星的自转状态可能会因太阳辐射、撞击事件或潮汐力的作用而发生变化. 对这些自转状态变化的研究, 有助于追溯并理解小行星经历了哪些事件, 这对于解析小行星乃至整个太阳系的起源和演化具有关键意义.

Sharkey 等^[6] 利用大型双筒望远镜 (LBT) 和洛厄尔发现望远镜 (LDT) 对小行星 Kamo'oalewa 进行全面的物理观测, 确定了小行星的自转周期为 28.3 (+1.8/-1.3) min. Zhang 等^[25] 使用了并行粒子群优化算法中的动态系数调整算法 (Dynamic Coefficient Adjustment in Parallel Particle Swarm Optimization, DCAPPSO) 得到了自转轴指向, $\lambda = 133.52^\circ \pm 0.01^\circ$, $\beta = -10.67^\circ \pm 0.05^\circ$.

基于目前已有的光变曲线数据, Li 和 Scheeres^[26] 提出了一种观点, 即 Kamo'oalewa 小行星表面可能覆盖着一层毫米至厘米级别颗粒组成的物质, 这些颗粒主要分布在靠近极轴和短轴的区域. 由于当前关于 Kamo'oalewa 的观测数据有限, 无法精确确定其具体的几何形状参数, 本研究使用 LBT、LDT 得到的观测数据^[6], 采用经典的三轴椭球模型进行计算, 结合 Li 和 Scheeres^[26] 提出小行星长短轴比例可能低于 0.48 的结果, 使用轴比 $a:b:c = 2:1:1$ 的椭球体作为初步探索自转轴指向的形状模型. 同时, 据推测其反照率在 0.10~0.16^[6], 利用式 (1) 结合反照率进行估算, 可以推断出其有效直径在 46~58 m. 为了方便后续分析, 以 50 m 作为 Kamo'oalewa 的直径进行展开讨论.

$$D = 1329 \times 10^{-0.2H} / \sqrt{p_v}, \quad p_v = \frac{A_b}{q}. \quad (1)$$

其中, H 为绝对星等, 使用的是 Sharkey 等^[6] 2021 年的观测结果 $H=24.33$, p_v 为几何反照率, A_b 为邦德反照率, q 为相位积分.

1.1 光变曲线拟合

近地小行星的辐射通量主要来源于两个方面. 一是其表面对太阳光的反射, 二是小行星自身的热辐射. 在这两者中, 小行星表面被照射部分对太阳光的反射, 反射的能量与其反照率成正比, 而其热辐射的

能量则与小行星表面的温度分布紧密相关. 通过对不同自转轴指向以及不同自转相位下的辐射通量进行计算, 能够模拟得到多种光变曲线. 将这些仿真光变曲线与实际观测到的光变曲线进行比对和拟合, 有助于确定小行星自转轴的指向.

三轴椭球形状模型将小行星表面划分为多个平面三角形面元 (本文使用 500 个面元), 根据每个面元的法向量与太阳光照方向的夹角, 计算每个面元接受的太阳光照强度, 累加得到总的反射光通量.

为了估算小行星 Kamo'oalewa 在各个自转相位下的反射光通量, 必须计算其表面每个面元在观测方向上对太阳光的反射通量. 研究采用兰伯特 (Lambert) 反射模型来确定太阳在每个面元上的反射强度. Lambert 反射模型是一种理想化的全漫反射物理模型, 其特点是反射强度与观察者视角无关, 仅与入射光强度以及入射光与表面法线之间的夹角有关. 反射光强度可表示为

$$I = I_0 \cos \theta. \quad (2)$$

其中, I_0 为入射光的强度, θ 为入射光与表面法线夹角. 于是得到某个面元的反射光, 即

$$F_i(\lambda) = \pi B(\lambda, T) \frac{R_s^2}{r^2} A_B(\lambda) \cos \theta. \quad (3)$$

其中, $B(\lambda, T)$ 为普朗克公式, R_s 为太阳半径, r 为日心距, $A_B(\lambda)$ 是波长为 λ 的反照率.

普朗克公式表达为

$$B(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1}. \quad (4)$$

其中, h , c , λ , k 分别为普朗克常数、光速、波长和玻尔兹曼常数. 对于小行星的地面观测, 望远镜捕捉到的是小行星的光通量总和, 也就是每个可见面元的光通量总和, 即

$$F(\lambda) = \sum_{i=0}^N F_i(\lambda). \quad (5)$$

其中, $F_i(\lambda)$ 为每个可见面元在对应波长下的光通量.

1.2 自转参数计算与分析

1.2.1 正向模型计算自转轴指向

对观测数据进行处理, 将所有观测点归一化到同一个周期内, 并采用相对星等来表示光变曲线的变化. 其次, 椭球体的轴比设定为 $a:b:c = 2:1:1$, 设定自转轴指向的先验设定为 $\lambda = [0^\circ, 360^\circ]$; $\beta =$

$[-90^\circ, 90^\circ]$, 步长为 10° , 对参数空间进行初步探索.

由于仿真得到的光变曲线在自转相位的起始点上是不确定的, 因此需对仿真光变曲线的自转相位进行必要的调整. 这里采用的方法是将归一化的周期划分为 120 个相位, 相当于每个相位间隔 3° . 在模拟数据中对观测点的相位在仿真数据上进行插值, 并计算每个观测点的方差. 通过应用最小二乘法, 能够确定最匹配的相位起始点.

同时, 结合先验的自转轴指向, 在全局参数空间内进行初步探索以寻求最佳的自转轴指向, 相关结果如图 1 所示. 获得的最佳拟合自转轴指向为 $(\lambda = 60^\circ, \beta = -50^\circ)$.

1.2.2 MCMC 方法拟合自转轴指向

为了进一步确定 Kamo'oalewa 的自转轴指向, 采用马尔可夫链蒙特卡罗方法 (Markov Chain Monte Carlo, MCMC) 对样本数据进行拟合. MCMC 是一种对高维随机向量抽样的方法, 其基本思想是: 构造一条马尔可夫链, 使其平稳分布为待估参数的后验分布, 通过该条马尔可夫链产生后验分布的样本, 并基于马尔可夫链达到平稳分布时的样本 (即有效样本) 进行蒙特卡罗积分.

在样本处理中, 通常认为误差为遵循高斯分布, 于是选取具有高斯形式的似然函数, 为了使计算过程更为便捷, 取对数似然, 即

$$\ln \mathcal{L} = -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \left[\left(\frac{F_i - F_{\text{obs}}}{\sigma_i} \right)^2 + \ln (2\pi\sigma_i^2) \right]. \quad (6)$$

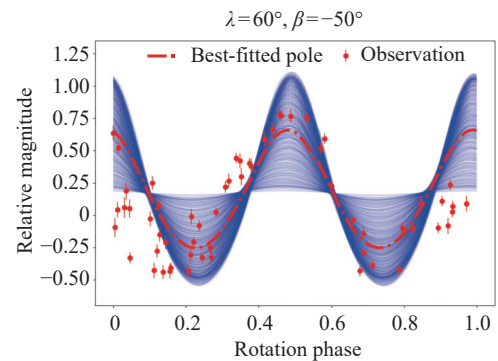


图 1 不同自转轴指向的光变曲线拟合结果. 蓝色曲线代表的是不同自转轴指向先验下的光变曲线仿真

Fig. 1 Fitting plots of light curves pointing to different axes of rotation. The blue curves represent the simulation of the optical curves with different axis of rotation pointing priors

其中, F_i 为计算得到的通量, F_{obs} 为观测值, σ_i 为观测值误差.

研究在计算过程中采用了 32 条马尔可夫链, 每条链都包含 3000 个样本, 其中有 500 个样本被视为先验预热样本. 考虑到先验和后验的复杂性, MCMC 采样器可能需要进行大量的步骤或迭代才能接近最大似然估计的近似解. 为了确保这些样本的统计数据的准确性, 通常会设定一些需要剔除的样本, 这些样本被称为先验预热样本. 在此背景下, 每条马尔可夫链的 3000 个样本中扣除 500 个先验预热样本后, 通常会得到 2500 个有效的后验样本.

在形状模型上, 首先尝试使用轴比为 $a:b:c=2:1:1$ 的三轴椭球模型进行拟合. 由于所选用的模型具有高度的空间反演对称性, 因此在参数空间中得出的解必然在四个象限展现出对应的对称性. 同时, 根据 Vokrouhlický^[27] 的雅科夫斯基效应解析模型, 昼夜分量在快速自转的小行星轨道半长轴漂移中占主导, 昼夜雅科夫斯基效应导致的半长轴变化率可表达为

$$\left(\frac{d\alpha}{dt}\right)_d = -\frac{8\alpha\Phi}{9n}W(R_d, \Theta_d)\cos\gamma. \quad (7)$$

其中, α 为表面吸收系数, Φ 为辐射压力系数, n 为平均运动角速度; $W(R_d, \Theta_d)$ 取决于相应的缩放半径 R_d 和热参数 Θ_d , 是一个负值, 其完整定义见文献 [27]; γ 为自转轴倾角. 由于 Liu 等^[28] 和 Fenucci 等^[29] 测量得到的小行星半长轴漂移率小于零 (向内漂移), 说明 $\cos\gamma$ 小于 0, 推断小行星的自转轴倾角 γ 应大于 90° ,

即 β 应小于 0° , 是逆行自转. 因此, 选择其中一个解作为在参数空间探索的结果.

MCMC 计算得到的概率密度图是混合高斯模型的结果. 接下来, 运用最大期望化算法 (Expectation Maximization, EM) 对混合高斯概率分布进行求解, 得到自转轴的一组显著解 ($\lambda = 67.9^\circ \pm 3.1^\circ$, $\beta = -46.0^\circ \pm 10.6^\circ$). 图 2 给出了 MCMC 的概率密度图以及对应的光变曲线拟合图.

将参数 a/b 纳入作为一个自由参数 x 进行分析时, 即当椭球体的轴比设定为 $a:b:c = x:1:1$, 所获得概率密度分布结果如图 3 所示.

鉴于地面观测的局限性, 特别是观测数据的不足, 当不对椭球轴比进行固定设定时, 在参数空间内拟合过程显露出了显著的多解性问题. 尽管能够在自转轴指向的位置参数上确定解的范围 ($\lambda = 54.2^\circ \pm 1.5^\circ$, $\beta = -46.0^\circ \pm 6.4^\circ$), 但在轴比参数的拟合过程中未能确定一个恰当的解. 然而, 通过分析概率密度图, 观察到在给定的椭球轴比范围内, 向椭球轴比 a/b 增大方向收敛的样本数量明显增多. 这一现象使推断, 在三轴椭球模型的假设下, Kamo'oalewa 更可能是一颗形态细长的小行星. 若后续研究能结合连续周期的空间观测数据, 将有助于进一步明确自转轴的指向及小行星的具体形状.

2 探测任务模拟

近地小行星是当前空间科学与深空探测领域的重要研究对象, 对其进行深入的探测与研究, 不仅有

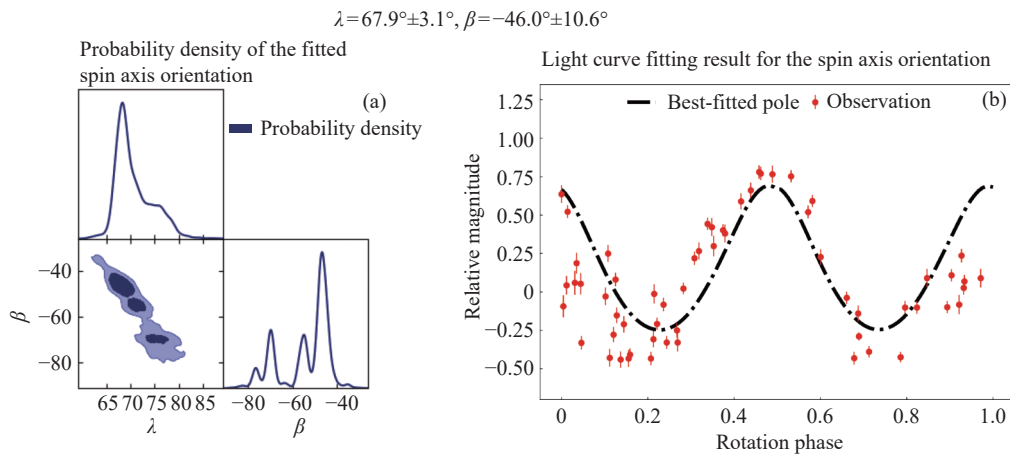
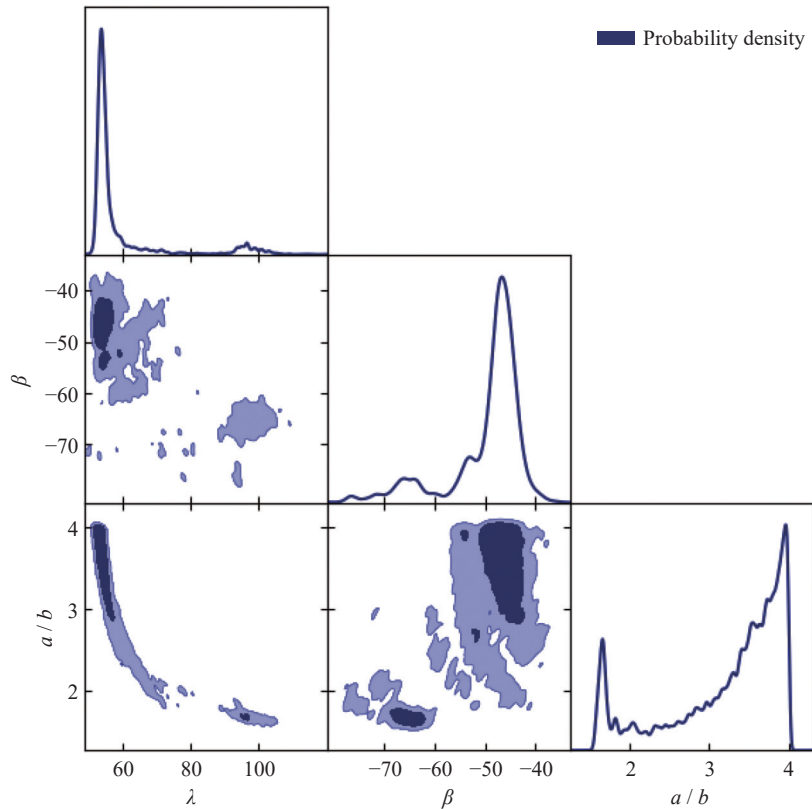


图 2 自转轴指向的拟合结果

Fig. 2 Fitting results of spin axis orientation

图 3 加入椭球轴比 a/b 后的自转轴指向的概率密度Fig. 3 Probability density distribution of the rotation axis direction incorporating the ellipsoid axis ratio a/b

助于揭示太阳系的起源与演化历史, 也为应对潜在的小行星撞击威胁提供重要的科学依据. 然而, 目前针对小行星 Kamo'oalewa 的研究仍然面临数据匮乏的问题, 由于地基观测受到诸多限制, 其自转轴指向、形状参数及详细的表面特性等物理信息尚不明确.

即将发射的天问二号探测任务为解决上述问题提供了难得的契机. 该任务将首次对 Kamo'oalewa 进行近距离的空间观测, 从而能够获取前所未有的高精度观测数据. 为配合和优化天问二号的探测任务, 对空间任务模拟展开深入研究. 通过模拟探测器接近过程中所观测到的小行星视星等变化, 揭示其光变特性; 并采用热成像仿真技术, 分析小行星表面的温度分布情况, 为未来探测任务中探测器的轨道设计、安全着陆区域选址提供科学指导. 同时, 通过自转参数和表面温度分布的深入研究, 可以分析和反演小行星的热物理性质, 结合雅科夫斯基效应和 YORP 效应等进一步研究小行星形成和轨道演化, 有助于深入认识小行星的起源与演化历史, 为行星科学研究提供重要的科学数据支撑.

2.1 抵近前视星等变化观测

由于天问二号的轨道并没有详细的公开数据, 本文模拟了一条轨道作为仿真的任务轨道. 该轨道模拟距离小行星几十万公里处, 运用载荷在可见光波段对小行星进行规律拍摄. 基于模拟时刻的探测器和 2016 HO3 的相对位置, 计算探测器的观测方向, 同时计算 2016 HO3 在观测图像中的张角以及其视星等. 并基于 Gaia DR3 的天体测量数据, 基于 python 的 pymsofa 软件包计算背景中星等小于 10 等的恒星的位置^[30], 将其作为背景导航的依据, 如图 4 所示. 在此仿真中, 探测器视场为 $3^\circ \times 3^\circ$, 当距离小行星约 44000 km 时, 视星等约为 7, 张角为 0.23 arcsec.

基于距离和视星等的变换关系 ($m - M = 5 \lg(D/10)$), 这里 m 为视星等, M 为绝对星等, D 为距离 (单位 AU), 得到探测器接近过程小行星的亮度变化趋势和范围 (见图 5). 在探测器抵达小行星前 60 d 到前 1 d 的过程中, 根据模拟轨道, 其两者间距离将从 44329 km 逐渐减小到 447 km, 并在最后 1 d 内

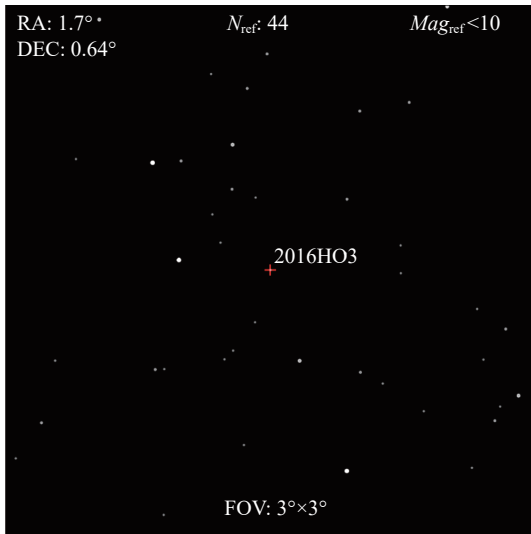


图4 模拟探测器距离小行星 4.4×10^4 km 拍摄的背景星图

Fig. 4 Background star image obtained by the probe at a distance of 4.4×10^4 kilometers from the asteroid

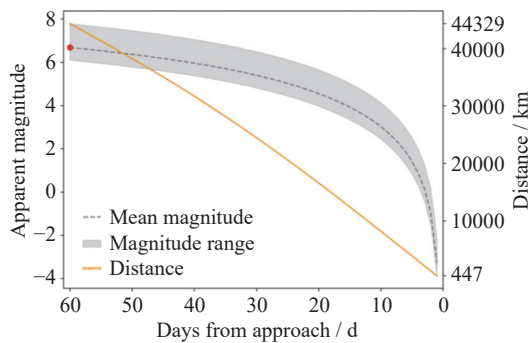


图5 探测器接近过程中小行星视星等变化趋势和范围
Fig. 5 Variation trends and range of the asteroid's apparent magnitude during the probe's approach

将相对速度匀减速到 $0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. 其视星等在探测器靠近的过程中逐渐减小, 并由于小行星的自转因素, 其亮度存在一定的波动, 波动范围如图中灰色区域所示.

探测器逐渐接近过程中所观测到的视星等的变化, 可归因于探测器与小行星之间距离的缩短以及小行星自身自转造成的视星等变化. 通过排除距离变化对星等的影响, 能够准确获取小行星在数个连续周期内, 由自转引起的相对视星等的变化情况 (见图6).

进行 Kamo'oalewa 小行星在探测器接近阶段的导航相机视星等观测模拟, 设定自转周期约为 28 min. 观测计划是每 5 min 进行一次测量, 总共获得 60 个数据点. 这里已排除距离对星等变化的影响,

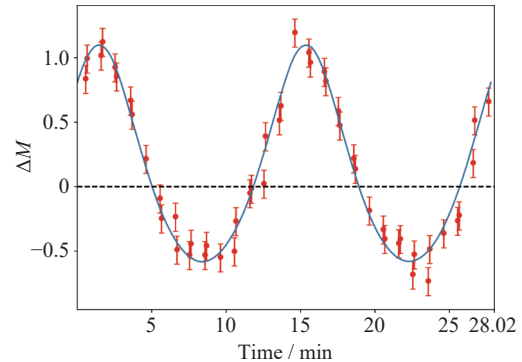


图6 小行星自转引起的相对视星等变化仿真

Fig. 6 Simulation of relative apparent magnitude variations caused by asteroid rotation

将所有数据点归一化至同一自转周期, 假设观测误差为 0.1 (见图6). 相对于地基观测, 空间观测不受地球大气等因素的干扰, 因此具有更高的观测质量和更优的数据点信噪比, 能够更准确地揭示 Kamo'oalewa 小行星的物理特性. 在天问二号接近 Kamo'oalewa 的过程中, 可以利用这一时间窗口, 预先获取小行星的自转参数和几何形状参数. 通过在接近阶段对小行星进行精确探测, 不仅能够为后续的环境探测和附着阶段积累宝贵的先验知识, 而且能够借助近距离成像等技术手段的交叉验证, 对探测模型进行细致优化. 此过程为探测器近距离探测小天体提供了先验信息, 从而显著提升了人类对这些天体特性的理解, 并为未来探测任务的优化提供了坚实的基础.

2.2 环绕阶段表面温度分布模拟

小行星的热物理是研究太阳系内无大气覆盖天体演化过程的重要组成部分, 其主要是通过热物理模型反演小行星的红外辐射, 得到小行星的尺寸、反照率、热惯量等特性. 小行星红外辐射计算涉及计算小行星表面及其近表面层的温度, 这些温度取决于太阳光的吸收、反射和热发射光子的多次散射以及热传导. 其中热惯量 (Γ) 是表征小行星表层土壤特性的一个敏感指标, 其表达式为

$$\Gamma = \sqrt{\kappa \rho C}. \quad (8)$$

其中, κ 为表面风化层的有效热导率, ρ 为密度, C 为体积热容. 可以通过热惯量测量推断出典型的颗粒大小及其胶结程度.

表1给出了部分空间探测任务对不同小行星热惯量的估计.

表 1 四颗小行星的热惯量估计结果
Table 1 Thermal inertia estimations for four asteroids

Object	$\Gamma / (\text{J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1/2} \cdot \text{K}^{-1})$	Ref.
(433) Eros	150 ± 50	[31]
(25143) Itokawa	700 ± 100	[31]
(162173) Ryugu	225 ± 45	[32]
(101955) Bennu	350 ± 20	[33]

Delbo 等^[34]、Hanuš等^[35]和 Rozitis^[36]通过对观测到的小行星热惯量与其尺寸的相关性进行分析, 得出了一个显著的结论: 较大的小行星倾向于拥有细粒度的表层风化层, 而较小的小行星的风化层主要由较粗的砂粒或更高比例的块状物质构成。即热惯量与小行星表面的颗粒大小密切相关, 小行星表面物质颗粒越大, 热惯量也相应增加。这一普遍趋势表明, 小行星的尺寸是判定其表层风化状态的一个重要因素。图 7 给出了近地小行星热惯量与尺寸的分布与趋势^[37], 同时把对 Kamo'oalewa 的估计和几个空间任务得到的结果用红色菱形数据点标识出来。

Kamo'oalewa 是小尺寸的近地小行星, 且自转速度快。从动力学上讲, 小行星的高速自转更易清除掉松散的表面颗粒, 特别是在赤道区域, 大尺寸碎岩难以凭借微弱引力保持静止, 可能在早期或在微小扰动下即被甩离表面, 这意味着 Kamo'oalewa 可能是单一的巨石结构。但是 Fenucci 等^[38,39]对类似天体 (2011 PT 和 2016 GE1) 的热物理研究认为, 超快速自转小行星表面具有极低热导率/热惯量, 最有可能由绝热性很强的细粒尘埃覆盖所致。这意味着在赤道, 大尺寸的松散岩石几乎无法依靠自身重量停留, 会被惯性力抛离表面; 相反, 毫米级及更小的颗粒在一定条件下可以依靠微弱引力和内聚力留在表面, 尤其是在自转轴附近 (极区) 离心力较小的区域。Kamo'oalewa 这种快速自转的天体表面是否能保留细小的颗粒是不确定的关键问题, 也是此类“超快速自转”近地小行星的典型代表, 因此研究其表面物质分布及动力学具有重要意义。

在空间任务的交会阶段, 探测器在与小行星保持几百米距离的状况下, 实施表面映射、形状建模和表面光谱扫描。通过探测器获得的红外光谱信息, 可以借助热物理模型来确定小行星表面的温度分布和颗

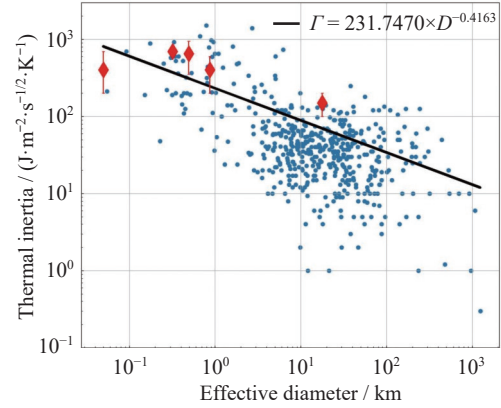


图 7 近地小行星热惯量与尺寸分布。红色菱形数据点从左到右分别代表 Kamo'oalewa, Itokawa^[31], Bennu^[33], Ryugu^[32] 和 Eros^[31]

Fig. 7 Distribution of thermal inertia and size for near-Earth asteroids. The red diamond data points from left to right represent Kamo'oalewa, Itokawa^[31], Bennu^[33], Ryugu^[32], and Eros^[31]

粒属性, 从而为寻找理想附着点和取样点做好铺垫。在这个过程中, 对小行星表面的热惯量分布进行计算以及对表面物质特性进行反演至关重要。

在后续的计算中使用的是先进热物理模型 (Advanced Thermophysical Model, ATPM), ATPM 广泛用于研究粗糙表面的热红外集束效应 (Thermal Infrared Beaming Effect), 以及对不同小行星及小行星家族的热物理特性研究^[40-47]。在 ATPM 中, 假设小行星是由 N 块面元构成的多面体, 那么每一块面元上存在: 太阳光的热辐射 q_s , 来自其他面元的多重太阳光散射 q_{scat} , 其他面元的热辐射 q_{red} , 自身的热辐射, 以及沿着径向的一维热传导。

表壤内温度变化遵循如下二维热传导方程:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \kappa \frac{\partial^2 T}{\partial h^2}. \quad (9)$$

其中, ρ 为表壤物质的密度, c 为比热容, κ 为热导率。对于存在表壤层的小行星, 假设表壤层以下温度不再变化, 即存在如下内部边界条件:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial h} \right|_{h \rightarrow \infty} = 0. \quad (10)$$

沿径向的一维热传导构成的热平衡公式为

$$(1 - A) (\mu_0 \cdot q_s + q_{\text{scat}}) + (1 - A_{\text{th}}) q_{\text{red}} = \varepsilon \sigma T^4 \Big|_{h=0} + \left(-\kappa \frac{dT}{dh} \right) \Big|_{h=0}. \quad (11)$$

其中, q_{scat} 为来自其他面元的太阳光散射, q_{red} 为其他面元的热辐射, ε 为发射率, σ 为斯特藩-玻尔兹曼常数, A 为邦德反照率, A_{th} 为红外反射率, μ_0 为太阳高度角余弦. q_s 近似为

$$q_s = \frac{F_s}{d^2}. \quad (12)$$

其中, F_s 为太阳常数; d 为小行星与太阳的距离, 单位为 AU.

以式 (9) 和式 (10) 为边界条件, 数值求解随时演化偏微分方程式 (11), 就能得到小行星表层和次表层的温度分布.

2.2.1 小行星热惯量

小行星的热惯量是计算表面温度分布的关键参数, 但是目前缺乏 Kamo'oalewa 热红外观测数据对其温度、热惯量进行直接分析.

Fenucci^[48] 提出了一种方法, 可以通过小行星的雅科夫斯基效应来统计推断小行星的热惯量, 根据其方法, Liu 等^[28] 结合地基望远镜测量到的雅科夫斯基效应计算, Kamo'oalewa 的热惯量分布应当在 $402.05^{+376.29}_{-194.37} \text{ J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1/2} \cdot \text{K}^{-1}$, 是一个比较大的热惯量分布. 同时, Ren 等^[49] 在数值模拟中认为 Kamo'oalewa 的表面, 范德华力足够强大, 可以保持略小于几厘米的颗粒. 但是 Fenucci 等^[29] 通过最新观测研究给出了 Kamo'oalewa 相当精确的轨道

半长轴漂移率, 计算得到热惯量仅为 150^{+90}_{-45} 或 $181^{+95}_{-60} \text{ J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1/2} \cdot \text{K}^{-1}$, 表明表面颗粒较细, 尺寸为 $100 \mu\text{m} \sim 3 \text{ mm}$, 该结果与 Zhang 等^[8] 的光谱结论一致.

鉴于当前缺乏对小行星 2016 HO₃ 的实测热红外观测数据, 本研究借助近地小行星热模型 (NEATM) 生成了一系列模拟热辐射数据, 模拟了詹姆斯·韦伯空间望远镜 (JWST) 在红外波段的典型观测情景. 随后, 将这些模拟数据作为观测仿真值, 输入 ATPM 进行反演拟合分析. 具体而言, 分别针对不同自转轴方向, 用 ATPM 计算了理论辐射通量, 再与上述仿真值进行拟合, 探讨了不同自转状态下小行星的热物理特性. 图 8 给出了不同假设自转轴下的拟合结果. 初步分析表明, 在使用前面得到的自转轴指向条件下, 2016 HO₃ 的平均热惯量可能分布在约 $400 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1/2} \cdot \text{K}^{-1}$ 附近.

在对热惯量进行上述探索的基础上, 计划对平均热惯量分别为 400 和 $500 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1/2} \cdot \text{K}^{-1}$ 的情况下, 进行表面温度分布的计算分析, 这两个数值可以被视为是在当前研究情况下相对合适的取值.

2.2.2 表面温度分布

对于人类对小行星的探测计划而言, 掌握小行星温度的知识尤为重要. 小行星表面热辐射产生的净力

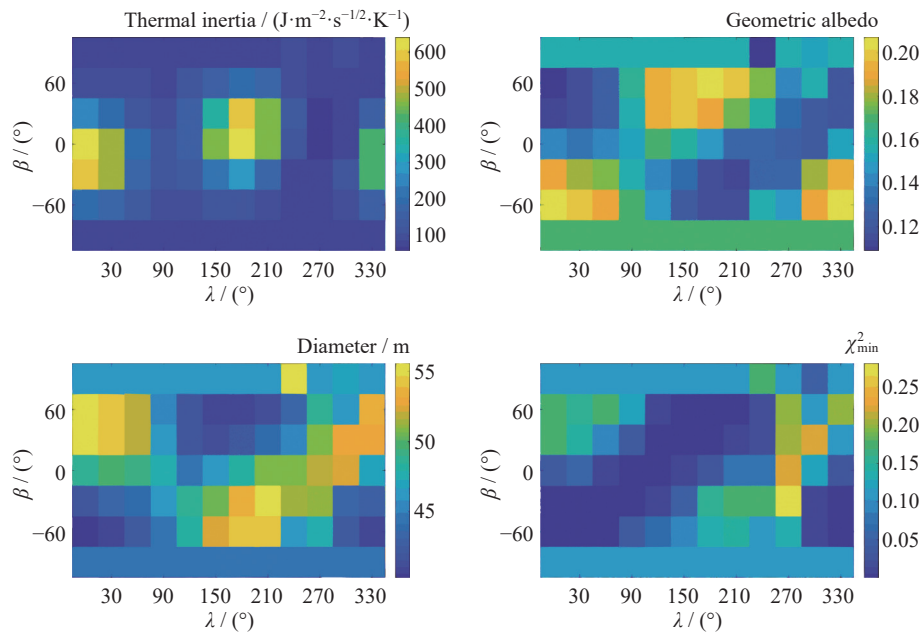


图 8 Kamo'oalewa 不同自转轴指向的热物理特性拟合结果

Fig. 8 Kamo'oalewa fitting results of the thermophysical properties for different orientations of the spin axis

与力矩会引致雅科夫斯基效应和 YORP 效应, 这两种效应显著地影响小行星的轨道演化. 对于体积较小的天体, 这种影响更为明显. 热惯量的大小直接决定了小行星雅科夫斯基效应的强度, 进而影响小行星家族成员的分散情况、潜在危险小行星的轨道演化, 以及小行星和流星体从主带被运送至与地球交会轨道的动态共振区的过程. 在小行星的整个生命周期中, 温度的演变能够改变其表面成分及风化层的性质. 因此, 小行星的表面温度数据对于分析小行星轨迹及表面物质变迁过程具有至关重要的作用. 借助 Kamo'oalewa 的轨道信息与热惯量, ATPM 有能力预测小行星在拥有不同平均热惯量时的表面温度分布情况.

根据任务公开发布的探测计划及载荷数据资料, 可以利用热红外光谱仪在 3 km 和 600 m 的位置上对

小行星 Kamo'oalewa 进行探测分析, 旨在确认其表面的热辐射特性, 并进一步确定小行星表面的热惯量与表面粗糙度分布. 此项分析对于后续的采样过程中选择适宜的着陆点具有重要指导意义. 热辐射光谱仪在轨道高度 3 km 时的相元分辨率 ≤ 15 m, 光谱分辨率优于 10 cm^{-1} , 光谱范围优于 $5.0 \sim 50.0 \text{ } \mu\text{m}$ ^[50]. 在本次模拟的探测任务轨迹中, 预计探测器将于 2026 年 6 月对小行星 Kamo'oalewa 进行近距离探测. 本研究在一个具有代表性的距离 (600 m) 上, 针对小行星不同热惯量, 详细分析了其表面温度分布特征, 如图 9 所示, 图中分别给出了极区、黄道坐标系 X 轴、阳面的温度分布情况.

从图 9 可以观察到, 在预定的交会点处, 给定的自转轴指向下, 小行星在不同热惯量条件下的温度分布呈现出明显的差异. 具体而言, 在热惯量为

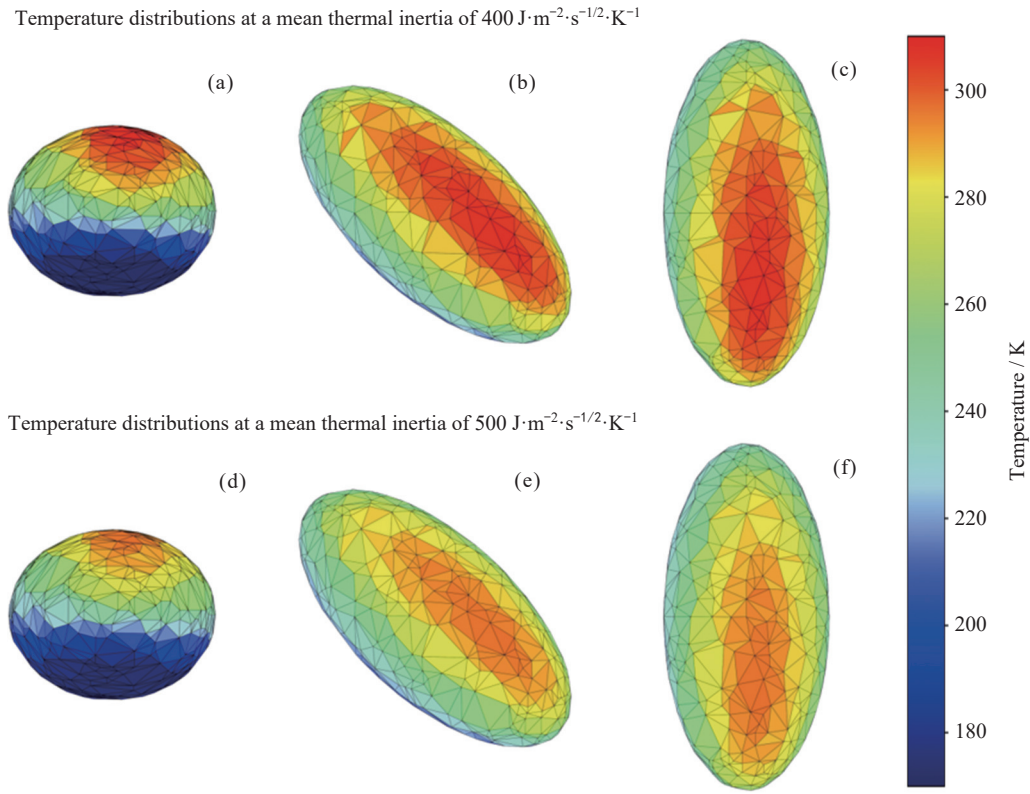


图 9 不同平均热惯量下 Kamo'oalewa 的表面温度分布. (a)~(c) 平均热惯量 $400 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1/2} \cdot \text{K}^{-1}$, (d)~(f) 平均热惯量 $500 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1/2} \cdot \text{K}^{-1}$

Fig. 9 Kamo'oalewa surface temperature distribution plots for different mean thermal inertia. (a)~(c) are the temperature distributions at a mean thermal inertia of $400 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1/2} \cdot \text{K}^{-1}$, and (d)~(f) are the temperature distributions at a mean thermal inertia of $500 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1/2} \cdot \text{K}^{-1}$

$400 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1/2} \cdot \text{K}^{-1}$ 的条件下, 该交会点处的温度分布范围显著更广, 达到 $170 \sim 310 \text{ K}$. 相比之下, 在热惯量提升至 $500 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1/2} \cdot \text{K}^{-1}$ 的情况下, 温度的波动幅度较小, 其分布范围缩减为 $175 \sim 300 \text{ K}$. 这些温度分布特征不仅展示了小行星表面物质成分和热惯量的分布特性, 也为探测器的任务策划提供了重要依据. 在接近阶段, 探测器能够通过连续性观测提前获得小行星的自转参数以及几何形状参数, 为后续的环境探测和附着阶段提供了必要的先验知识, 同时, 通过近距离成像等手段进行交叉验证, 以优化探测模型. 这不仅为详细的探测任务奠定了基础, 也为未来小天体研究提供了珍贵的经验.

3 结论与展望

本文对近地小行星 Kamo'oalewa 进行了详细研究, 包括其轨道特征、自转参数以及与地球的相对运动等方面的分析. 通过对光变曲线的拟合, 初步拟合了其自转轴指向 ($\lambda = 67.9^\circ \pm 3.1^\circ$, $\beta = -46.0^\circ \pm 10.6^\circ$). 这些参数为进一步理解小行星的物理特性和演化历史提供了基础数据. 进一步地, 本文还基于椭圆体模型对小行星的自转特性及光变曲线进行了分析, 从而推断 Kamo'oalewa 可能呈现一种较为细长的形态.

对天问二号未来的空间任务对 Kamo'oalewa 的探测过程进行了模拟, 预期了探测器在接近该小行星过程中可能观测到的视星等变化. 这些模拟数据不仅有助于精确制定探测策略, 同时亦能提供实际任务实施过程中的必要先验信息, 以降低任务执行的潜在风险. 利用 ATPM, 对 Kamo'oalewa 的表面温度分布进行了剖析, 进一步揭示了该小行星在不同热惯量条件下的温度分布特性. 这些发现对于理解小行星表面物质构成及热惯量分布有着重要的参考意义.

未来研究可以充分借助高精度观测技术与长期系统的数据积累, 提升对 Kamo'oalewa 小行星的自转参数和轨道特性的测量精度, 为任务设计、轨道规划与航天器控制提供更加可靠的数据支撑. 在实施天问二号任务期间, 通过近距离探测与现场样品采集, 不仅能够获得更详尽的物理参数与化学成分信息, 也为后续工程应用, 如小行星资源勘探和空间资源开发, 奠定坚实的基础. 此外, 融合天文学、地质学及材

料科学等跨学科方法, 对 Kamo'oalewa 的起源、结构与演化进行深入研究, 能够揭示其形成与发展的关键过程. 这种多维度的分析对于理解太阳系早期演化历史、小行星家族的物理特征及动态行为具有重大科学价值. 通过持续的观测与分析, 不仅能够全面深化对 Kamo'oalewa 这一特定小行星的认知, 更能拓展对近地小行星总体群体特征及运动规律的认知边界. 这对于预防小行星潜在威胁、开展小行星资源商业化利用、促进深空探测技术发展以及推动整个行星科学领域的进步, 均具有重要的工程和科学意义.

参考文献

- [1] THOLEN J D, RAMANJOOLOO Y, FOHRING D, *et al.* A potpourri of near-Earth asteroid observations[C]//American Astronomical Society, DPS Meeting. 2016
- [2] DE LA FUENTE MARCOS C, DE LA FUENTE MARCOS R. Asteroid (469219) 2016 HO₃, the smallest and closest earth quasi-satellite[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2016, **462**(4): 3441-3456
- [3] BENFORD J. Looking for lurkers: Co-orbiters as SETI observables[J]. *The Astronomical Journal*, 2019, **158**(4): 150
- [4] FENUCCI M, NOVAKOVIĆ B. The Role of the Yarkovsky Effect in the long-term dynamics of Asteroid (469219) Kamo'oalewa[J]. *The Astronomical Journal*, 2021, **162**(6): 227
- [5] HU S C, LI B, JIANG H X, *et al.* Peculiar orbital Characteristics of Earth Quasi-Satellite 469219 Kamo'oalewa: Implications for the yarkovsky detection and orbital uncertainty propagation[J]. *The Astronomical Journal*, 2023, **166**(4): 178
- [6] SHARKEY B N L, REDDY V, MALHOTRA R, *et al.* Lunar-like silicate material forms the Earth quasi-satellite (469219) 2016 HO₃ Kamo'oalewa[J]. *Communications Earth & Environment*, 2021, **2**(1): 231
- [7] WINTER O, MOTAES R, GOMES L, *et al.* On the possibility that 2016 HO₃ Kamo'oalewa was a piece of the Moon[C]//44th COSPAR Scientific Assembly. 2022, **44**: 274
- [8] ZHANG P F, LI Y, ZHANG G Z, *et al.* (469219) Kamo'OALEWA, a Space-Weathering-Matured LL-Chondrite-Like Small NEA: Target of the Tianwen-2 Sample Return Mission[C]//Europlanet Science Congress 2024. Berlin: Freie Universität, 2024
- [9] JIAO Y F, CHENG B, HUANG Y K, *et al.* Asteroid Kamo'oalewa's journey from the lunar Giordano Bruno crater to Earth 1: 1 resonance[J]. *Nature Astronomy*, 2024, **8**(7): 819-826
- [10] HEILIGERS J, FERNANDEZ J M, STOHLMAN O R, *et*

- al.* Trajectory design for a solar-sail mission to asteroid 2016 HO₃[J]. *Astrodynamics*, 2019, **3**(3): 231-246
- [11] VENIGALLA C, BARESI N, AZIZ J D, *et al.* Near-Earth Asteroid Characterization and Observation (NEACO) mission to asteroid (469219) 2016 HO₃[J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2019, **56**(4): 1121-1136
- [12] CHI Z M, LI H Y, JIANG F H, *et al.* Power-limited low-thrust trajectory optimization with operation point detection[J]. *Astrophysics and Space Science*, 2018, **363**(6): 112
- [13] HUANG J C, ZHANG X J, WANG T, *et al.* Small body exploration in China[C]//14th Europlanet Science Congress. 2020 (<https://meetingorganizer.copernicus.org/EPSC2020/EPSC2020-1126.html>)
- [14] ZHANG T, WANG B, WEI H Y, *et al.* Review on planetary regolith-sampling technology[J]. *Progress in Aerospace Sciences*, 2021, **127**: 100760
- [15] ZHANG T, XU K, DING X L. China's ambitions and challenges for asteroid-comet exploration[J]. *Nature Astronomy*, 2021, **5**(8): 730-731
- [16] HUANG J C, JI J H, YE P J, *et al.* The Ginger-shaped Asteroid 4179 Toutatis: new Observations from a Successful Flyby of Chang'E-2[J]. *Scientific Reports*, 2013, **3**(1): 3411
- [17] LI Y, ZHAO Y H. The Toutatis (4179) boulders: shallow slope in size distribution and shape statistics[J]. *Solar System Research*, 2023, **57**(5): 495-504
- [18] ZHAO Y, JI J. Study on rotational parameters for asteroid 4179 Toutatis from Chang'E-2's close flyby[C]//Serendipities in the Solar System and Beyond. Taiwan, China: "National Central University", 2018, **513**: 111
- [19] HU S C, JI J H, RICHARDSON D C, *et al.* The formation mechanism of 4179 Toutatis' elongated bilobed structure in a close Earth encounter scenario[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2018, **478**(1): 501-515
- [20] JIANG Y, JI J H, HUANG J C, *et al.* The distribution and source of boulders on asteroid 4179 Toutatis[J]. *Proceedings of the International Astronomical Union*, 2015, **10**(S318): 153-155
- [21] JI J H, JIANG Y, ZHAO Y H, *et al.* Chang'E-2 spacecraft observations of asteroid 4179 Toutatis[J]. *Proceedings of the International Astronomical Union*, 2015, **10**(S318): 144-152
- [22] JI J H, JIANG Y, ZHAO Y H. New observations of asteroid (4179) Toutatis as closely observed by Chang'E-2[J]. *IAU General Assembly*, 2015, **29**: 2256604
- [23] ZHAO Y H, JI J H, HUANG J C, *et al.* Orientation and rotational parameters of asteroid 4179 Toutatis: new insights from Chang'E-2's close flyby[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2015, **450**(4): 3620-3632
- [24] BARUCCI M A, FULCHIGNONI M, JI J H, *et al.* The Flybys of Asteroids (2867) Šteins, (21) Lutetia, and (4179) Toutatis[M]//MICHEL P, DEMEO F E. BOTTKE W F. Asteroids IV. Tucson: University of Arizona Press, 2015: 433-450
- [25] ZHANG Y X, GUO W X, ZHENG H, *et al.* DCAPPSO: A novel approach for inverting asteroid rotational properties with applications to DAMIT and Tianwen-2 target asteroid[J]. *Astronomy and Computing*, 2025, **51**: 100925
- [26] LI X Y, SCHEERES D J. The shape and surface environment of 2016 HO₃[J]. *Icarus*, 2021, **357**: 114249
- [27] VOKROUHLICKÝ D. Diurnal Yarkovsky effect as a source of mobility of meter-sized asteroidal fragments. I. Linear theory[J]. *Astronomy and Astrophysics*, 1998, **335**: 1093-1100
- [28] LIU L, CHEN Q, YAN J G, *et al.* Surface thermal inertia of near-earth asteroid (469219) kamo'oalewa: Statistical estimation and implications[J]. *Solar System Research*, 2024, **58**(4): 469-479
- [29] FENUCCI M, NOVAKOVIĆ B, ZHANG P F, *et al.* Astrometry, orbit determination, and thermal inertia of the Tianwen-2 target asteroid (469219) Kamo'oalewa[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2025, **695**: A196
- [30] JI J H, TAN D J, BAO C H, *et al.* PyMsOfa: A python package for the Standards of Fundamental Astronomy (SOFA) service[J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2023, **23**(12): 125015
- [31] MÜLLER M. Surface Properties of Asteroids from Mid-Infrared Observations and Thermophysical Modeling[D]. Berlin: Free University of Berlin, 2007
- [32] SHIMAKI Y, SENSU H, SAKATANI N, *et al.* Thermophysical properties of the surface of asteroid 162173 Ryugu: Infrared observations and thermal inertia mapping[J]. *Icarus*, 2020, **348**: 113835
- [33] DELLAGIUSTINA D N, EMERY J P, GOLISH D R, *et al.* Properties of rubble-pile asteroid (101955) Bennu from OSIRIS-REx imaging and thermal analysis[J]. *Nature Astronomy*, 2019, **3**(4): 341-351
- [34] DELBO M, MUELLER M, EMERY J P, *et al.* Asteroid Thermophysical Modeling[M]//Asteroids IV. Tucson: University of Arizona Press, 2015, **1**: 107-128
- [35] HANUŠ J, DELBO M, ĎURECH J, *et al.* Thermophysical modeling of main-belt asteroids from WISE thermal data[J]. *Icarus*, 2018, **309**: 297-337
- [36] ROZITIS B, GREEN S F, MACLENNAN E, *et al.* Observing the variation of asteroid thermal inertia with heliocentric distance[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2018, **477**(2): 1782-1802
- [37] HUNG D, HANUŠ J, MASIERO J R, *et al.* Thermal properties of 1847 WISE-observed asteroids[J]. *The Planetary Science Journal*, 2022, **3**(3): 56
- [38] FENUCCI M, NOVAKOVIĆ B, VOKROUHLICKÝ D, *et*

- al.* Low thermal conductivity of the superfast rotator (499998) 2011 PT[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2021, **647**: A61
- [39] FENUCCI M, NOVAKOVIĆ B, MARČETA D. The low surface thermal inertia of the rapidly rotating near-Earth asteroid 2016 GE1[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2023, **675**: A134
- [40] YU Liangliang, JI Jianghui, WANG Su. Investigation of thermal inertia and surface properties for near-Earth Asteroid (162173) 1999 JU3[J]. *Acta Astronomica Sinica*, 2013, **54**(6): 537-549 (余亮亮, 季江徽, 王素. 近地小行星(162173)1999JU3的热惯量和表面特征研究[J]. *天文学报*, 2013, **54**(6): 537-549)
- [41] JIANG H X, JI J H. Thermophysical modeling of 20 Themis Family Asteroids with WISE/NEOWISE Observations[J]. *The Astronomical Journal*, 2021, **162**(2): 40
- [42] JIANG H X, JI J H, YU L L. Determination of size, albedo, and thermal inertia of 10 Vesta Family Asteroids with WISE/NEOWISE observations[J]. *The Astronomical Journal*, 2020, **159**(6): 264
- [43] JIANG H X, JI J H, YU L L, *et al.* Mid-IR observations of IRAS, AKARI, WISE/NEOWISE, and subaru for large icy asteroid (704) Interamnia: a new perspective of regolith properties and water ice fraction[J]. *The Astrophysical Journal*, 2023, **944**(2): 202
- [44] JIANG H X, YU L L, JI J H. Revisiting the advanced thermal physical model: New perspectives on thermophysical characteristics of (341843) 2008 EV5 from Four-band WISE Data with the Sunlight-reflection model[J]. *The Astronomical Journal*, 2019, **158**(5): 205
- [45] YU L L, YANG B, JI J H, *et al.* Thermophysical characteristics of the large main-belt asteroid (349) Dembowska[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2017, **472**(2): 2388-2397
- [46] YU L L, JI J H, IP W H. Surface thermophysical properties on the potentially hazardous asteroid (99942) Apophis[J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2017, **17**(7): 070
- [47] YU L L, JI J H. Surface thermophysical properties determination of OSIRIS-REx target asteroid (101955) Bennu[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2015, **452**(1): 368-375
- [48] NOVAKOVIĆ B, FENUCCI M, MARČETA D, *et al.* ASTERIA—Asteroid thermal inertia analyzer[J]. *The Planetary Science Journal*, 2024, **5**(1): 11
- [49] REN J L, WU B, HESSE M A, *et al.* Surface dynamics of small fast-rotating asteroids: analysis of possible regolith on asteroid 2016 HO₃[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2024, **692**: A62
- [50] LI Chunlai, LIU Jianjun, REN Xin, *et al.* Scientific objectives and payloads configuration of the Tianwen-2 Mission[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2024, **11**(3): 304-310 (李春来, 刘建军, 任鑫, 等. “天问二号”任务科学目标和有效载荷配置[J]. *深空探测学报(中英文)*, 2024, **11**(3): 304-310)

作者简介



应佳峻 男, 1999年11月出生于江苏省苏州市, 现为中国科学技术大学天文与空间科学学院(紫金山天文台)在读博士研究生。主要研究方向为太阳系小天体物理特性研究。

E-mail: jjying@pmo.ac.cn



季江徽(通信作者) 男, 1973年10月出生于江苏如东, 中国科学院紫金山天文台研究员, 博士生导师。主要研究方向为系外行星、原行星盘与太阳系小天体。

E-mail: jijh@pmo.ac.cn