《天文学与天体物理学研究》稿件编号（LaTeX:
ms.tex；打印于2026年1月21日；4:33）

arXiv:2601.13585v1 [astro-ph.EP] 20 Jan 2026

# 天问二号任务目标小行星 (469219)Kamo‘oalewa 的主小行星带动力学起源： $\nu_6$ 长期共振、弗洛拉族或与木星的3:1共振

Yandong Wang[1,2], 胡守存[1,2], 季江徽[1,2] 和应佳俊[1,2]

[1] 中国科学院紫金山天文台，中国南京 210023；*jijh@pmo.ac.cn*[2] 中国科学技术大学天文学与空间科学学院，中国合肥 230026

收稿日期：202x年某月某日；录用日期：202x年某月某日

**摘要** 中国的天问二号任务于2025年5月29日发射，目标是近地天体 (469219) Kamo‘oalewa。它是一颗被地球1:1平均运动共振俘获的地球准卫星。确定 Kamo‘oalewa 的起源对于理解地球准卫星群体的形成途径和动力学演化至关重要。本文通过长期动力学模拟，指出 Kamo‘oalewa 很可能起源于主小行星带。我们考察了三个候选源区： $\nu_6$ 长期共振（$\nu_6$）、与木星的3:1平均运动共振（3:1木星平均运动共振）以及弗洛拉族。共对42825个测试粒子进行了为期1亿年的积分。我们发现，来自这三个区域的小行星均可转移至类似Kamo‘oalewa的轨道，但转移效率存在显著差异。来自 $\nu_6$ 附近的粒子转移概率最高（3.31%），其次是弗洛拉族（2.54%）和3:1木星平均运动共振（0.39%）。我们还确定了连接这些源区与地球准卫星轨道的代表性动力学路径。预计天问二号航天器将于2026年与 Kamo‘oalewa 交会，执行近距离操作并带回样品。该任务将为小行星成分和物理性质提供决定性的观测约束，从而对其假定起源进行关键检验。

**关键词：** 小行星，小行星：个体：(469219) Kamo‘oalewa — 天体力学 — 数值方法

## 1 引言

中国的天问二号任务旨在通过与一颗近地小行星交会并执行采样返回任务，推进对小天体的探测。该航天器于2025年5月29日发射，

目标是(469219) Kamoʻoalewa（临时编号2016 $HO_3$）。它于2016年4月27日由夏威夷哈雷阿卡拉天文台的Pan-STARRS1巡天望远镜发现，被认为是一颗地球准卫星，暂时被困在与地球的1:1平均运动共振中（de la Fuente Marcos & de la Fuente Marcos 2016）。这类天体为研究近地天体群与主小行星带之间的动力学耦合提供了天然实验室。通过近距离观测并带回原始物质，天问二号 将为准卫星的物理性质和起源提供新的约束。

在限制性三体问题中，准卫星（也称为逆行卫星；Jackson，1913）是一类特殊的小天体，它们与宿主行星处于1:1平均运动共振状态，相对平黄经围绕 $0^\circ$（de la Fuente Marcos 和 de la Fuente Marcos（2016）） libration。在随宿主行星旋转的日心参考系中，这些天体表现出类似卫星的视运动，绕行于该行星；然而，它们的轨道始终位于宿主行星希尔球半径之外，并不受其引力束缚。因此，从动力学角度看，它们保持的是日心轨道，而非真正的卫星状态（Mikkola 等，2006）。截至2025年11月，仅有8个地球准卫星得到确认，其中(469219) Kamoʻoalewa是目前已知动力学稳定性最高的地球共轨天体之一（de la Fuente Marcos 和 de la Fuente Marcos（2016，2025））。其独特的物理和动力学特性使其成为研究地球共轨天体的重要目标。

Kamoʻoalewa 的绝对星等为 $H = 24.33$ mag，半长轴为 $a = 1.00098$ au（历元 JD 2461000.5），其轨道周期与地球的轨道周期非常接近。其轨道偏心率和倾角分别为 $e = 0.10237$ 和 $i = 7.80322^\circ$。宽带颜色测光和可见光谱表明，其分类类型与 S 型硅酸盐小行星一致，但光谱斜率比典型的 S 型天体更红（Sharkey 等人 2021），这表明它可能经历了显著的空间风化（Zhang 等人 2024）。假设几何反照率为 0.1，Zhang 等人（2024）估算其等效直径约为 57 m。此外，Kamoʻoalewa 的自转周期极短，约为 28 min，远低于无内聚力小天体的 2.2-h 自转屏障（Pravec & Harris 2000；Chang 等人 2017）。这意味着它可能具有相对坚实的整体式内部结构，表面或覆盖着由毫米至厘米级颗粒组成的风化层（Li & Scheeres 2021；Cheng & Baoyin 2024；Liu 等人 2024；Ren 等人 2024；Ying 等，2025）。

从动力学视角来看，de la Fuente Marcos & de la Fuente Marcos（2016）的数值模拟表明，Kamoʻoalewa 会在准卫星构型与马蹄形构型之间反复且稳定地转换，时间尺度为百万年。估计其当前的准卫星阶段始于约100年前，并预计将在约300年后结束。此外，Fenucci & Novakovi´c（2021）探讨了在不同表面热性质情景下，雅科夫斯基效应引起的半长轴漂移对 Kamoʻoalewa 长期动力学的影响。他们指出，雅科夫斯基效应对小行星的短期动力学影响甚微，但在表面热导率较低时，会显著影响其长期稳定性，加速其脱离地球共轨区域。在这一理论框架的基础上，Liu 等人（2022）基于地基光学天体测量，报告了首次观测探测到雅科夫斯基效应作用于Kamoʻoalewa。他们的结果证实，该效应在短时间尺度上可以忽略不计，但会缩短小行星处于地球共轨状态的驻留时间，这与先前的数值预测一致。Hu等（2023）进一步取得进展，他们推导出

新的非引力参数估计值 $A_2$，并探讨了轨道不稳定性的传播，指出准卫星构型本身可能在限制轨道不确定性方面发挥关键作用。Fenucci 等人（2025）利用更新后的天体测量观测，进一步约束了非引力参数 $A_2$ 和 Kamoʻoalewa 的热惯量，从而提高了天问二号航天器在交会期间的预定目标精度。

与木星特洛伊小行星等长寿命共轨群体不同，内太阳系复杂的多体摄动使近地天体的轨道混沌程度高得多（Morais & Morbidelli 2002）。因此，与类地行星相关的共轨小天体展现出丰富而独特的动力学行为，其起源和演化路径为深入理解内太阳系的动力学结构提供了重要线索。

近期，已有多项专门研究探讨 Kamoʻoalewa 的起源。基于对可见光和近红外反射光谱的分析，Sharkey 等人（2021）发现，该天体的光谱特征，尤其是 $1\,\mu$m 吸收带的位置和形状，与阿波罗任务带回的月壤样品高度相似，并首次提出了 Kamoʻoalewa 的月球起源假说。

利用 $N$体数值模拟，Castro-Cisneros 等人（2023）考察了月球撞击抛射物被注入地球共轨区域的动力学可行性。他们表明，从月球后随侧以略高于月球逃逸速度的速度释放的月球抛射物，有着不容忽视的概率被捕获为地球共轨天体，甚至可能演化为准卫星轨道。结合光谱约束与动力学分析，Jiao 等人（2024年）认为，Kamoʻoalewa 最有可能起源于年轻的月球撞击坑乔尔达诺·布鲁诺。相比之下，Zhu 等人（2025）基于更为详细的光谱比较和撞击动力学模拟，指出第谷坑可能是一个更符合观测约束和动力学约束的源区。

尽管先前的研究已通过光谱观测和 $N$体数值模拟为 Kamoʻoalewa 的月球起源提供了证据，但这一情景仍存在争议。基于光谱分析，Fenucci 和 Novakovi´c（2021）是最早提出 Kamoʻoalewa 可能与主小行星带中的巴巴里型小行星有关，并可能通过位于约 2.5 au 处的 3:1木星平均运动共振迁移至当前轨道的研究者之一；该共振对应于整比关系 $n/n_J = 3$，其中 $n$ 和 $n_J$ 分别为小行星和木星的平均运动（Wisdom 1985；Gladman 等人 1997；Bottke 等人 2002；Granvik 等人 2018）。Zhang 等人（2024）结合光谱比较与轨道动力学计算方法，认为 Kamoʻoalewa 在成分上与 LL球粒陨石更为一致，并有 $72 \pm 5$%的概率起源于 $\nu_6$ 区域；在该区域，小行星近日点经度的进动频率 $g$ 等于土星近日点经度的平均进动频率 $g_6$ （Froeschle 和 Scholl 1989；Morbidelli 等，2002）。主小行星带，尤其是其中强共振区域，被广泛认为是近地天体的主要来源（Binzel 等人 1992；Morbidelli 等，2002；Morbidelli 和 Vokrouhlick´y 2003；Michel 等人 2005）。在这一背景下，地球共轨小天体并非一个孤立的动力学群体，而可能与近地小行星和主小行星带小行星存在联系。因此，有必要评估主带区域产生类似 Kamoʻoalewa 轨道构型的动力学可行性。

此外，现有研究 Kamo‘oalewa 月球起源的动力学模拟仅考虑了行星引力摄动，未纳入雅科夫斯基效应。对于直径仅数十米的小天体而言，这一效应能够在百万年时间尺度上显著改变轨道演化，进而影响其进入并维持共轨构型的概率（Fenucci 和 Novakovi´c 2021；Liu 等人 2022）。这些局限为从动力学视角进一步研究 Kamo‘oalewa 的起源和动力学演化留下了很大空间。

受此启发，我们采用包含由亚尔科夫斯基效应驱动的力的数值积分，以评估Kamo‘oalewa是否可能起源于主小行星带，并确定粒子演化至类似Kamo‘oalewa的轨道所经历的动力学路径。天问二号 航天器计划于2026年7月与Kamo‘oalewa交会，这将成为中国首次小行星采样返回任务；我们的结果为解读该任务即将获得的观测结果提供了重要的动力学背景。

本文的组织结构如下：第2节介绍本研究所使用的数据和数值设置。第3节分析结果，并为候选源区给出若干具有代表性的演化路径。结论与讨论见第4节。

## 2 数据与方法

de la Fuente Marcos 与 de la Fuente Marcos（2016）报告称，Kamo‘oalewa的李雅普诺夫时间约为7500年，表明其轨道在相对较短的时间尺度上具有高度混沌性。此外，Morbidelli 等人（2020）指出，长期反向轨道积分无法可靠地追溯小天体的起源。鉴于这些考虑，我们采用结合统计分析的正向轨道积分方法，以评估来自不同主带源区的天体演化至Kamo‘oalewa当前轨道的动力学可行性。我们关注测试粒子的统计行为，并假设对于足够大的样本，大量测试粒子的集体演化能够代表通向Kamo‘oalewa的可能动力学路径。

基于 Nesvorn´y 等人（2024）提出的去偏差近地天体模型，我们估算了 Kamo‘oalewa 可能的动力学来源。结果表明，主小行星带中的 $\nu_6$ 和 3:1木星平均运动共振（Ji & Liu 2007；Nesvorn´y 等人 2023）是最可能的来源，相应概率分别为 71.7% 和 17.5%。此外，Zhang 等人（2024）进一步指出，弗洛拉族也值得考虑。弗洛拉族是位于内主小行星带、靠近 $\nu_6$ 的一个大型小行星族，被认为是 LL 球粒陨石类近地天体以及地月撞击体的主要来源（Vokrouhlick´y 等人 2017；Zhang 等人 2025a）。综合以上因素，我们选取主小行星带中的三个候选来源，即 $\nu_6$、3:1木星平均运动共振和弗洛拉族，进行进一步的数值模拟，以探究这类轨道的动力学起源。

$\nu_6$ 与3:1木星平均运动共振的近似边界按照Nesvorn´y等人（2023）的方法确定，并排除火星穿越天体。鉴于 $\nu_6$ 在3:1木星平均运动共振附近的相空间结构，我们将 $\nu_6$ 的倾角上限限制为 17°。弗洛拉族成员取自NASA 行星数据系统 [1]（另见Nesvorny（2020））。

[1] https://sbn.psi.edu/pds/resource/nesvornyfam.html

我们从小行星中心提供的MPCORB.DAT目录（版本日期为2025年6月4日）中选取位于三个候选源中的真实小行星，并将其用作模拟粒子。所有模拟粒子的初始轨道根数均直接取自该目录，初始历元为JD 2460800.5。

需要强调的是，我们的数值模拟并非旨在研究单个真实小行星的详细演化。相反，我们将观测小行星视为相应来源的样本，以提取其长期演化中具有统计代表性的动力学行为及其潜在机制。

采样粒子总数为 42 825 个，其中 $\nu_6$ 中有 7 122 个，弗洛拉族中有 13 786 个，3:1木星平均运动共振中有 21 917 个。这些粒子在 $a$–$i$ 平面上的初始分布如图 1 所示。

我们使用 MERCURY6软件包（Chambers 1999）中的 Hybrid积分器，对模拟粒子进行数值积分。模型纳入了从水星到冥王星所有大天体的引力摄动，并将地月系统视为一个质心。所有摄动天体的初始状态均取自 JPL星历DE441（Park等，2021），并设定在与模拟粒子相同的历元。

本文对代码进行了修改，以纳入雅科夫斯基效应。尽管雅科夫斯基效应引起的加速度远小于行星引力摄动所致的加速度，但它可通过增加或减少小天体的轨道能量，在百万年至十亿年的时间尺度上引起半长轴 $a$ 的长期变化（Bottke等，2006；Vokrouhlicky等，2015）。要精确处理雅科夫斯基效应，需要详细了解各个天体的物理性质；然而，鉴于对Kamoʻoalewa物理性质的了解有限，我们采用Deo与Kushvah（2017）以及Hu等（2023）提出的简化雅科夫斯基加速度模型：

$$\boldsymbol{F}_{\mathrm{Yark}} = A_2 \, (r_0/r)^{d} \, \hat{\boldsymbol{t}} \tag{1}$$

其中，$r_0 = 1$ au为参考日心距离，$r$ 为以au表示的粒子的瞬时日心距离，$d$ 为与小行星热物理性质相关的参数。本文采用 $d = 2$。单位向量$\hat{\boldsymbol{t}}$ 指向轨道的横向方向，$A_2$ 为非引力横向参数，取自JPL Horizons系统公布的Kamoʻoalewa数值，即 $A_2 = -1.3455 \times 10^{-13}$ au day$^{-2}$；该数值对应逆行自转状态，并在整个数值积分过程中保持不变。我们对Kamoʻoalewa的所有模拟测试粒子统一采用单一固定值 $A_2$。

在数值积分过程中，所有模拟粒子均被视为无质量天体，仅受大质量天体的引力摄动和雅科夫斯基效应影响。如果模拟粒子与任何大质量天体发生碰撞，或其日心距离超过 100 au，则会将其从数值积分中移除。

遵循 Bottke 等（2015）的方法，我们采用修正后的判据来识别演化至类似Kamoʻoalewa的轨道的粒子。具体而言，我们计算了 Kamoʻoalewa 在 $2 \times 10^4$ yr 时间区间内的平均轨道根数 $\bar{}$（$a$，$e$，$i$），得到（0.99989 au，0.09934，$7.57547^\circ$）。该判据旨在减小瞬时轨道根数的短期波动对分类的影响。如果模拟粒子的演化轨道根数满足以下条件，则将其归类为类似Kamoʻoalewa的粒子：

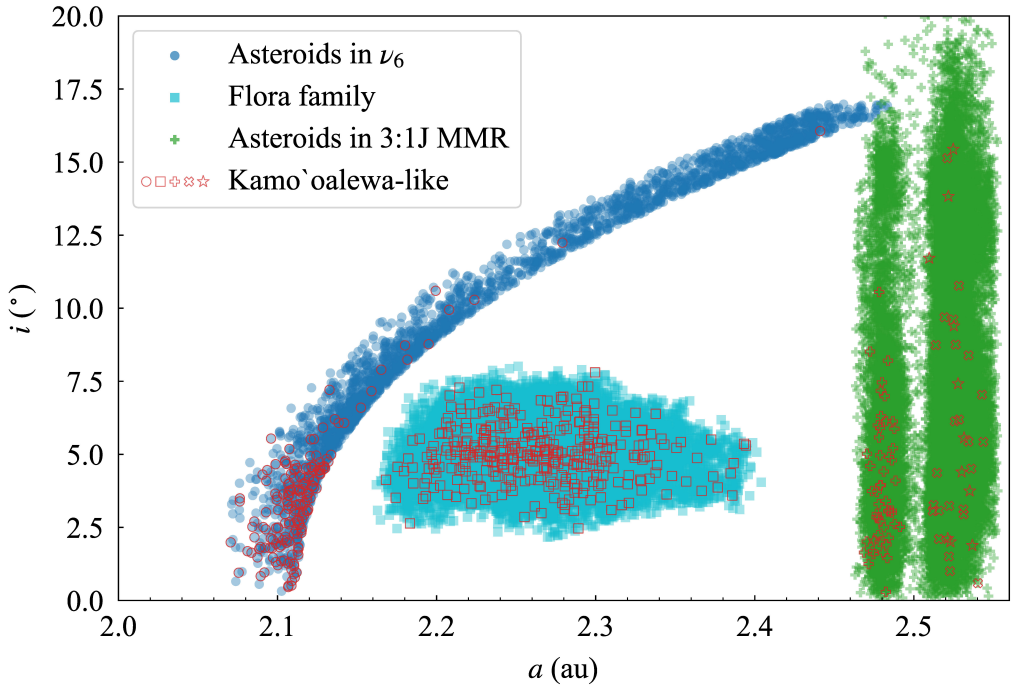


图1：模拟粒子在 $a$–$i$ 平面上的初始分布。蓝色圆圈、青色方块和绿色加号分别表示初始位于 $\nu_6$、弗洛拉族和3:1木星平均运动共振附近的粒子。红色空心符号表示在数值积分过程中最终演化为类似Kamoʻoalewa的轨道的候选源区粒子。对于初始与3:1木星平均运动共振相关的粒子，红色空心加号和叉号分别表示通过 $\nu_6$ 和3:1木星平均运动共振演化为类似Kamoʻoalewa的轨道的粒子，而红色星形符号表示先穿越3:1木星平均运动共振、随后通过 $\nu_6$演化的粒子。

$\Delta a \leq 0.01$ au、 $\Delta e \leq 0.1$和 $\Delta i \leq 5°$，其中 $\Delta a$、 $\Delta e$和 $\Delta i$ 分别表示与参考平均值的绝对差值。尽管采用的判据比以往研究中使用的判据更宽松（例如，Bottke 等人（2015）；Zhou 等人（2019）），但鉴于 Kamoʻoalewa 会在不同的共轨状态之间转换，其轨道根数可能随时间在较宽范围内变化（de la Fuente Marcos &de la Fuente Marcos 2016）。因此，我们采用一组相对宽泛的判据，以涵盖其轨道根数在有限时间区间内的时间变化，而非仅与其当前瞬时轨道相匹配。我们的目的不是重现 Kamoʻoalewa 当前精确的准卫星构型，而是识别其轨道演化在一定时间尺度上与 Kamoʻoalewa 相当的模拟粒子。

## 3 结果

考虑雅科夫斯基效应后，我们从三个候选主小行星带源区—— $\nu_6$、3:1木星平均运动共振和弗洛拉族——中选取了总计42825颗真实小行星，并对其进行了为期1亿年的数值积分。随后，我们识别出从这些区域逃逸并进一步演化为类似Kamoʻoalewa的轨道的粒子。

在数值积分过程中，三个候选来源中共有672个模拟粒子被发现进入类似Kamoʻoalewa的轨道。其中，236个源自 $\nu_6$，350个源自弗洛拉族，86个源自3:1木星平均运动共振，分别占其来源种群的3.31%、2.54%和0.39%

种群。这些结果表明，尽管类似Kamoʻoalewa的轨道在当前相空间中仅占据有限区域，源自主小行星带的粒子仍能进入此类构型。

Kamoʻoalewa 类粒子在初始轨道参数空间中的分布还呈现出其他特征。在来自 $\nu_6$的粒子中，约96.2%的倾角低于 $7.8^\circ$（Kamoʻoalewa当前的倾角）；而对于3:1木星平均运动共振，相应的比例约为83.7%。这一分布表明，对于此处考虑的两个动力学源区，只有相空间中初始轨道参数特定的粒子——尤其是初始倾角较低的粒子——才能演化到类似Kamoʻoalewa的轨道上。

模拟粒子在动力学演化过程中，处于主小行星带时轨道行为相对规则，但进入近地空间后则变得越来越混沌（图2）。总体而言，它们的演化受到大质量天体引力散射和暂时共振捕获事件的共同支配，这些事件主要涉及与地球、火星和木星的二体及三体平均运动共振。这种总体演化行为与Gladman 等（1997）和Michel 等人（2005）报告的结果一致。

图2展示了源自三种候选来源的粒子的典型演化行为。总体而言，粒子在迁移至近地空间的过程中，大部分演化寿命都处于主小行星带内。一旦接近主小行星带的逃逸通道——在我们的模拟中主要由 $\nu_6$ 和3:1木星平均运动共振主导——它们便会在 $10^5$–$10^6$ 年的时间尺度内抵达近地空间。

图2的A面板展示了一个源自 $\nu_6$附近的粒子的典型演化路径。该粒子最初位于 $a = 2.15$ au处，$i = 5.8^\circ$，并受困于 $\nu_6$，其共振角$\Delta\varpi = \varpi - \varpi_6$围绕 $180^\circ$振荡；其中，$\varpi$ 和 $\varpi_6$ 分别表示粒子和土星的近日点经度。这种构型对应于与土星相对稳定的反向对齐状态（Carruba et al. 2022），使粒子得以在 $\nu_6$ 中停留约12百万年。在此阶段，偏心率呈现振荡变化，整体缓慢增加，但增幅不足以使近日点距离降至地球穿越值。在随后的 $\sim$1 百万年内，偏心率迅速增至 $\sim 0.6$，使粒子进入地球穿越轨道，并最终在与地球近距离遭遇后脱离共振。

离开共振后，粒子的演化过程中，其近日点始终接近 $q \simeq 1$。在此阶段，粒子经历了多次暂时共振捕获。如图2A右图所示，这些共振不仅调制偏心率，也调制倾角，使 $i$ 发生振荡，而 $a$ 则几乎保持不变。捕获持续时间从数千年至数万年不等。最长的一次捕获发生在接近 $a \simeq 1.524$ au 处，对应于与火星的1:1平均运动共振（以竖直虚线标出）；粒子在此处停留近 $3 \times 10^4$ yr，倾角从 $\sim 8^\circ$ 降至 $\sim 4^\circ$。

由于模拟采用了负值的雅科夫斯基参数 $A_2$，粒子的半长轴会长期向内漂移（Farnocchia等，2013）。因此，最初位于弗洛拉族的粒子半长轴逐渐减小，导致其轨道向 $a$ 漂移，趋向于 $\nu_6$的特征半长轴，如图2B所示。在$\sim$30 百万年时进入 $\nu_6$ 后，偏心率在3百万年内被激发至 $\sim$0.4，使粒子成为火星穿越小行星。

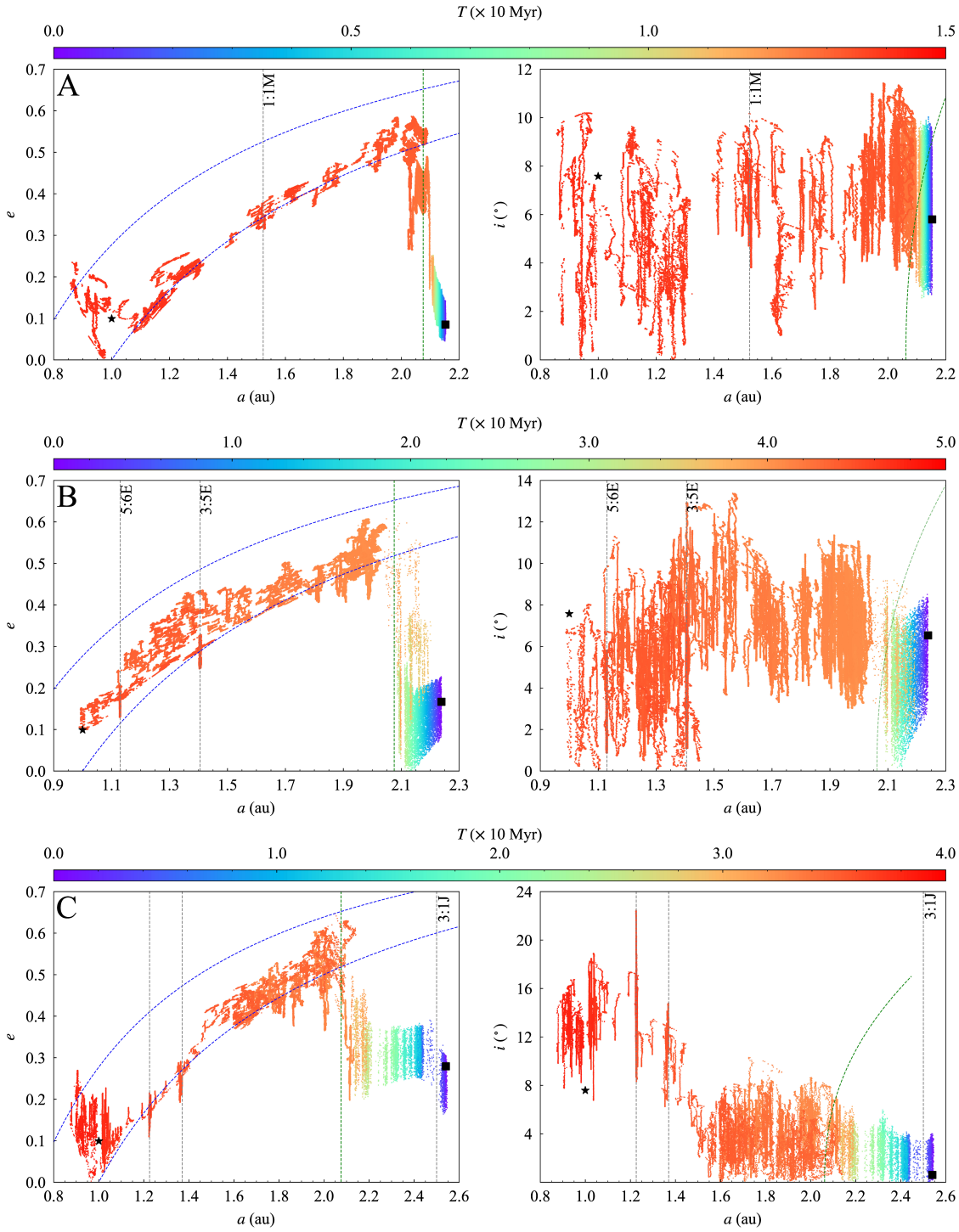


图2：从上到下，A、B 和 C 面板分别展示了模拟粒子从主小行星带（时间$T = 0$）的 $\nu_6$、弗洛拉族和 3:1木星平均运动共振出发，演化至 $a$–$e$ （左）和平面及 $a$–$i$ （右）平面中的类似Kamo‘oalewa的轨道的代表性过程。颜色表示时间推进，从紫色（早期阶段）到红色（接近类似Kamo‘oalewa的轨道）。黑色方块标示粒子的初始位置，黑色星形标示 Kamo‘oalewa 的当前位置。灰色虚线表示代表性的平均运动共振，未标注的虚线对应间距较近的共振。绿色和蓝色虚线分别表示 $\nu_6$ 的大致位置，以及近日点距离等于地球或金星近日点距离的轨迹。为清晰起见，散点经过降采样后显示。

随后与火星的近距离遭遇进一步将该粒子推入地球穿越轨道。该粒子后续的演化与初始位于 $\nu_6$ 附近的粒子非常相似。在图2B中，竖直虚线标示了在 $a \simeq 1.225$ au 和 $a \simeq 1.37$ au 附近发生的几次暂时共振捕获；密集的共振结构延缓了粒子进入类似Kamoʻoalewa的轨道。

初始位于3:1木星平均运动共振附近的小行星表现出更多样的行为，这是由于它们分布在共振两侧（图1）。从共振右侧开始的粒子（以红色空心叉号标记）会在雅科夫斯基效应的作用下向内发生半长轴漂移，因为我们的模拟仅采用 $A_2$ 的负值。鉴于3:1木星平均运动共振在激发偏心率方面效率很高，进入该共振的粒子到达行星穿越偏心率的概率远高于留在共振之外的粒子。在我们的模拟中，从共振右侧漂移进入3:1木星平均运动共振的粒子通常会经历偏心率快速增长，在不到1百万年内达到$e \gtrsim 0.6$，从而成为地球穿越天体，这与Morbidelli与Gladman（1998）的结果一致。相比之下，初始位于共振左侧的粒子（以红色空心加号标记）的演化方式与弗洛拉族的粒子相似，但需要长得多的迁移时间；在我们的模拟中，它们通常至少需要50百万年才能到达 $\nu_6$。

我们进一步确定了第三种演化路径：一些最初位于 $a > 2.5$ au处的粒子（以红色空心星号标记）并未被3:1木星平均运动共振稳定捕获，而是在∼0.1百万年内迅速穿越该共振。在穿越过程中，它们的偏心率发生了小幅振荡，振幅为 ∼0.2。在我们的模拟中，有11个到达类似Kamoʻoalewa的轨道的粒子沿着这一路径演化。这一行为表明，对于从右侧接近的粒子而言，被3:1木星平均运动共振捕获并非必然，而是取决于迁移速率和/或初始轨道构型等因素。Folonier等（2014）曾利用类似的共振穿越过程解释位于灶神星族之外的V型小行星的起源，这表明其背后可能存在共同的动力学机制。穿越3:1木星平均运动共振的粒子，其后续演化与最初位于弗洛拉族的粒子以及位于该共振左侧的粒子相似，代表性示例见图2C。所有这些粒子都沿着类似的演化路径，通过 $\nu_6$ 到达类似Kamoʻoalewa的轨道，这一点可由 $\Delta\varpi$的天平动得到证实。

图3总结了来自三个候选源的模拟粒子演化至类似Kamoʻoalewa的轨道所需的时间。结果表明，在数值积分的早期阶段（前 ∼30百万年），类似Kamoʻoalewa的天体主要由最初位于$\nu_6$附近的粒子提供，这表明该区域在早期更有效地将粒子输送到类似Kamoʻoalewa的轨道上。

随着数值积分的推进，弗洛拉族的相对贡献逐渐增加，并最终占据主导地位。这一转变可归因于雅科夫斯基效应的长期作用：该效应持续驱使弗洛拉族的粒子沿半长轴向内迁移，使其逐步进入 $\nu_6$，从而大幅提高它们演化至类似Kamoʻoalewa的轨道的概率。

相比之下，3:1木星平均运动共振附近的时间分布呈现出明显不同的模式。如上所述，较短时间尺度内贡献的粒子主要源自3:1木星平均运动共振的右侧，并

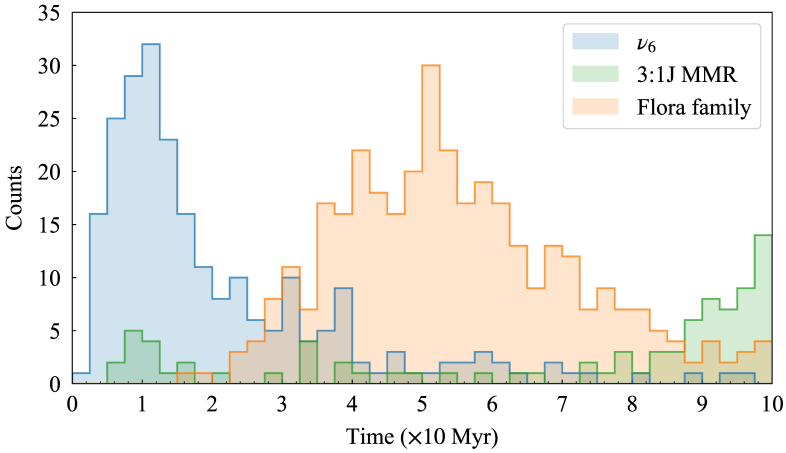


图3：统计从三个候选源区起源的模拟粒子从其初始位置演化为类似Kamo‘oalewa的轨道所需时间的分布。

在共振相互作用期间偏心率受到直接激发后，演化至类似Kamo‘oalewa的轨道。在我们的模拟中，经由3:1木星平均运动共振输运的粒子约有50%能在20百万年内到达类似Kamo‘oalewa的轨道。图3中80百万年后出现的明显增幅，是由最初位于共振左侧的粒子，以及源自右侧并在进一步演化前经历共振穿越的粒子共同造成的。

Zhang 等人（2024年）近期的光谱分析表明，Kamo‘oalewa 是一个已经历空间风化的天体，其相关时间尺度至少为 ~50 百万年。结合图3所示的结果，类似Kamo‘oalewa的天体更倾向于起源于弗洛拉族或3:1木星平均运动共振。然而，不能完全排除来自 $\nu_6$ 源区的贡献。

综上，在已知主带天体能够向近地空间输运的情况下，我们的结果表明，主带区域可以提供通向类似Kamo‘oalewa的轨道的动力学可行路径。尽管这类演化结果仅占总体数量的一小部分，但它们的存在表明，从动力学角度来看，类似Kamo‘oalewa的天体具有主带起源的可能性极高。

## 4 结论与讨论

此前关于 (469219) Kamo‘oalewa 起源的研究主要聚焦于月球撞击喷出物情景，并通过光谱学和动力学分析取得了重要认识。然而，已知的近地天体储库，尤其是主小行星带，能否在动力学上将类似Kamo‘oalewa的天体输送至近地空间，仍不明确。本文探讨这一可能性，并研究可能将此类天体输送出去的主小行星带路径。我们考虑雅科夫斯基效应，使用 MERCURY6软件包对来自三个主小行星带源区的 42825 颗小行星开展长期数值积分： $\nu_6$、3:1木星平均运动共振以及弗洛拉族。我们的目标是系统评估主小行星带能否在动力学上将天体输送至类似Kamo‘oalewa的轨道。

我们的模拟表明，来自 $\nu_6$、3:1木星平均运动共振和弗洛拉族的部分粒子能够演化至类似Kamo‘oalewa的轨道，转移效率分别为3.31%、0.39%和2.54%。这些发现表明，主小行星带，尤其是低倾角内侧区域，可能是一个可行的

类似Kamoʻoalewa天体的来源。我们进一步考察了具有代表性的动力学路径：来自弗洛拉族和 $\nu_6$ 附近的粒子主要经由 $\nu_6$输送，而3:1木星平均运动共振附近的粒子则遵循更多样的路径，可经由3:1木星平均运动共振或 $\nu_6$。我们指出，这些路径仅具示例性，并未涵盖所有可能的演化情景。

总体而言，我们的结果表明，月球并非Kamoʻoalewa唯一的动力学可达源（Jiao 等，2024；Zhu 等，2025）。我们确定了来自主小行星带候选区域的代表性输运路径，这些路径可将粒子输送至类似Kamoʻoalewa的轨道。需要指出的是，近地天体的源区分布于整个主小行星带中（例如，Morbidelli 等，2002；Granvik 等，2017；Zhou 等，2024、2025）。然而，在本文中，我们聚焦于动力学效率高、与产生Kamoʻoalewa最相关的路径和区域。在所采用的1亿年积分时间尺度内，经典的强共振（如 $\nu_6$ 和3:1木星平均运动共振）是将主小行星带天体输送至近地球区域的最高效途径。因此，作为第一步，我们系统地考察了与形成类似Kamoʻoalewa的轨道相关的、数量有限但最可能且最有效的路径。未来的研究将通过更严格的判据和专门分析，探讨如何从这一轨道域过渡到Kamoʻoalewa当前的共轨状态。

过去几十年来，多项小行星探测任务通过交会、采样返回和飞掠观测相结合的方式，显著增进了我们对小天体的认识。除了隼鸟号、隼鸟2号和奥西里斯-REx等专门任务分别探测了近地小行星丝川、龙宫和贝努（Fujiwara 等，2006；Yano 等，2006；Watanabe 等，2017；Lauretta 等，2017、2019；Watanabe 等，2019；Kitazato 等，2019；Hamilton 等，2019；Arakawa 等，2020；Potiszil 等，2023；Glavin 等，2025），还有几艘航天器近距离飞掠过小天体，包括嫦娥二号飞掠图塔蒂斯（Huang 等，2013；Jiang 等，2015 及其中所引文献）。在此背景下，作为首个探测小型快速自转小行星的采样返回任务，天问二号任务（Zhang 等，2019、2025b；Ying 等，2025）有望为我们深入了解小行星的表面环境、内部结构和动力学特性提供宝贵见解。

**致谢** 我们衷心感谢审稿人提出的宝贵意见和建设性建议，这些意见和建议提升了稿件的质量。本研究得到国家自然科学基金委员会（批准号：12561160085 和 12150009）以及紫金山天文台小行星基金的资助。本研究使用了国际天文学联合会小行星中心提供的数据。

**参考文献**

Arakawa, M., Saiki, T., Wada, K., & et al. 2020, 《科学》, 368, 67 11 Binzel, R. P., Xu, S., Bus, S. J., & Bowell, E. 1992, 《科学》, 257, 779 3 Bottke, Jr., W. F., Vokrouhlick´y, D., Rubincam, D. P., & Nesvorn´y, D. 2006, 《地球与行星科学年度评论》, 34, 157 5 Bottke, W. F., Morbidelli, A., Jedicke, R., et al. 2002, 《伊卡洛斯》, 156, 399 3 Bottke, W. F., Vokrouhlick´y, D., Walsh, K. J., et al. 2015, 《伊卡洛斯》, 247, 191 5, 6 Carruba, V., Aljbaae, S., Domingos, R. C., Huaman, M., & Martins, B. 2022, 《皇家天文学会月刊》, 514, 4803 7

Castro-Cisneros, J. D., Malhotra, R., & Rosengren, A. J. 2023, 《地球与环境通讯》, 4 ,

372 3 Chambers, J. E. 1999, 《皇家天文学会月刊》, 304, 793 5 Chang, C.-K., Lin, H.-W., Ip, W.-H., 等 2017, 《地球科学快报》, 4, 17 2 Cheng, B., & Baoyin, H. 2024年, 皇家天文学会月刊, 534, 1376 2 de la Fuente Marcos, C., & de la Fuente Marcos, R. 2016, 《皇家天文学会月刊》, 462, 3441 2, 4, 6 de la Fuente Marcos, C., & de la Fuente Marcos, R. 2025, 《美国天文学会研究札记》

l

学会, 9, 235 2 Deo, S. N., & Kushvah, B. S. 2017, 《天文学与计算》, 20, 97 5 Farnocchia, D., Chesley, S. R., Vokrouhlick´y, D., 等 2013, 《伊卡洛斯》, 224, 1 7 Fenucci, M., & Novakovi´c, B. 2021, 《天文学杂志》, 162, 227 2, 3, 4 Fenucci, M., Novakovi´c, B., Zhang, P., 等 2025, 《天文学与天体物理学》, 695, A196 3 Folonier, H. A., Roig, F., & Beaug´e, C. 2014, 《天体力学与动力天文学》, 119, 1 9 Froeschle, C., & Scholl, H. 1989, 《天体力学与动力天文学》, 46, 231 3 Fujiwara, A., Kawaguchi, J., Yeomans, D. K., 等 2006, 《科学》, 312, 1330 11 Gladman, B. J., Migliorini, F., Morbidelli, A., 等 1997, 《科学》, 277, 197 3, 7 Glavin, D. P., Dworkin, J. P., Alexander, C. M. O., & 等 2025, 《自然·天文学》 11 Granvik, M., Morbidelli, A., Vokrouhlick´y, D., 等 2017, 《天文学与天体物理学》, 598, A52 11 Granvik, M., Morbidelli, A., Jedicke, R., 等 2018, 《伊卡洛斯》, 312, 181 3 Hamilton, V. E., Simon, A. A., Christensen, P. R., 等 2019, 《自然·天文学》, 3, 332 11 Hu, S., Li, B., Jiang, H., Bao, G., & Ji, J. 2023, 《天文学杂志》, 166, 178 2, 5 Huang, J., Ji, J., Ye, P., 等 2013, 《科学报告》, 3, 3411 11 Jackson, J. 1913, 《皇家天文学会月刊》 , 74, 62 2 Ji, J.-H., & Liu, L. 2007, 《中国天文学和天体物理学杂志》 (《中国天文学和天体物理学杂志》), 7, 148 4 Jiang, Y., Ji, J., Huang, J., 等 2015, 《科学报告》, 5, 16029 11 Jiao, Y., Cheng, B., Huang, Y., 等 2024年, 《自然·天文学》, 8, 819 3, 11 Kitazato, K., Milliken, R. E., Iwata, T., & 等 2019, 《科学》 , 364, 272 11 Lauretta, D. S., Balram-Knutson, S. S., Beshore, E., 等 2017, 《空间科学评论》, 212, 925 11 Lauretta, D. S., Dellagiustina, D. N., Bennett, C. A., 等 2019, 《自然》, 568, 55 11 Li, X., & Scheeres, D. J. 2021, 《伊卡洛斯》, 357, 114249 2 Liu, L., Yan, J., Ye, M., 等 2022, 《天文学与天体物理学》, 667, A150 2, 4 Liu, L., Chen, Q., Yan, J., 等 2024年, 《太阳系研究》, 58, 469 2 Michel, P., Morbidelli, A., & Bottke, W. F. 2005, 《物理学报告》, 6, 291 3, 7 Mikkola, S., Innanen, K., Wiegert, P., Connors, M., & Brasser, R. 2006, 《皇家天文学会月刊》, 369, 15 2 Morais, M. H. M., & Morbidelli, A. 2002, 《伊卡洛斯》, 160, 1 3 Morbidelli, A., Batygin, K., Brasser, R., & Raymond, S. N. 2020, 《皇家天文学会月刊》, 497, L46 4 Morbidelli, A., Bottke, Jr., W. F., Froeschl´e, C., & Michel, P. 2002, 收录于《小行星 III》, 编者 W. F. Bottke, Jr.

,

A. Cellino, P. Paolicchi, & R. P. Binzel, 409 3, 11 Morbidelli, A., & Gladman, B. 1998, 《陨石学与行星科学》, 33, 999, 出版商：Wiley 9

Morbidelli, A., & Vokrouhlick´y, D. 2003, 《伊卡洛斯》, 163, 120 3 Nesvorny, D. 2020, Nesvorny HCM 小行星族数据包 V1.0, NASA 行星数据系统, urn:nasa:pds:ast.nesvorny.families::1.0 4 Nesvorn´y, D., Deienno, R., Bottke, W. F., et al. 2023, 《天文学杂志》, 166, 55 4 Nesvorn´y, D., Vokrouhlick´y, D., Shelly, F., et al. 2024, 《伊卡洛斯》, 417, 116110 4 Park, R. S., Folkner, W. M., Williams, J. G., & Boggs, D. H. 2021, 《天文学杂志》, 161, 105 5 Potiszil, C., Yamanaka, M., Ota, T., & et al. 2023, 《自然·通讯》, 14, 6523 11 Pravec, P., & Harris, A. W. 2000, 《伊卡洛斯》, 148, 12 2 Ren, J., Wu, B., Hesse, M. A., et al. 2024, 《天文学与天体物理学》, 692, A62 2 Sharkey, B. N. L., Reddy, V., Malhotra, R., et al. 2021, 《地球与环境通讯》, 2, 231 2, 3 Vokrouhlicky, D., Bottke, W. F., Chesley, S. R., Scheeres, D. J., & Statler, T. S. 2015, arXiv 预印本 arXiv:1502.01249 5 Vokrouhlick´y, D., Bottke, W. F., & Nesvorn´y, D. 2017, 《天文学杂志》, 153, 172 4 Watanabe, S.-i., Tsuda, Y., Yoshikawa, M., et al. 2017, 《空间科学评论》, 208, 3 11 Watanabe, S., Hirabayashi, M., Hirata, N., et al. 2019, 《科学》, 364, 268 11 Wisdom, J. 1985, 《自然》, 315, 731 3 Yano, H., Kubota, T., Miyamoto, H., & et al. 2006, 《科学》, 312, 1350 11 Ying, J., Ji, J., Jiang, H., et al. 2025, 《空间科学学报》, 45, 736 2, 11 Zhang, P. F., Li, Y., Tang, J. Y., et al. 2025a, 《空间科学与实验学报》, 2, 1 4 Zhang, P. F., Li, Y., Zhang, G. Z., et al. 2024, 收录于 LPI 论文集, 第 3040卷, 第55届月球与行星科学会议, 1845 2, 3, 4, 10 Zhang, R., Huang, J., He, R., Gen, Y., & Meng, L. 2019, 《深空探测学报》, 6, 417 11 Zhang, R., Zhang, H., Liu, J., et al. 2025b, 《中国科学：物理学、力学、天文学》, 55, 279501 11 Zhou, L., Xu, Y.-B., Zhou, L.-Y., Dvorak, R., & Li, J. 2019, 《天文学与天体物理学》, 622, A97 6 Zhou, Y. F., Li, H., Li, Z., & Zhou, L. 2024, 《皇家天文学会月刊》, 532, L7 11 Zhou, Y. F., Li, Z., Li, H., & Zhou, L. 2025, 《皇家天文学会月刊》, 538, 258 11 Zhu, M.-H., Morbidelli, A., Wei, Z., et al. 2025, 《创新》, 出版商：爱思唯尔 3, 11