

在 CNEOS14 区域针对第九行星的目标搜索

Hector Socas-Navarro^{1,2} and Ignacio Trujillo^{1,2}

¹ Instituto de Astrofísica de Canarias, Vía Láctea S/N, La Laguna 38205, Tenerife, Spain
e-mail: hsocas@iac.es, itc@iac.es

² Departamento de Astrofísica, Universidad de La Laguna, 38205, Tenerife, Spain

收到 2024 年 2 月 29 日; 接受

ABSTRACT

假设的第九行星被认为位于遥远的太阳系外层, 可能解释了极端海王星外天体 (ETNOs) 轨道中的各种异常现象。在这项工作中, 我们提出了一项针对第九行星的观测搜索, 动机来自于它与造成 CNEOS14 流星的星际陨石之间可能存在引力相互作用。我们的观察涵盖了 2022 年和 2023 年的两个行动, 覆盖了一个 98 平方度的区域, 在信使假设成立的情况下, 这是最有可能找到第九行星的位置。我们的数据和搜索方法基于连续夜晚之间的视差位置变化检测, 为 r 波段亮度在 21.0 到 21.4 之间 (平均灵敏度极限为 21.3) 的对象提供了 85% 置信度的排除限制。在这个区域和亮度范围内没有识别出任何可信的第九行星候选者。我们方法的一个局限是, 如果候选者的观测位置受到至少一个夜晚明亮恒星散射光的影响, 则会错过该候选者。然而, 我们估计这种情况的概率非常低, 大约为 0.4%。我们讨论了几个可能导致未检测到第九行星的原因。我们的研究补充了之前的搜索工作, 特别是那些使用档案调查数据但受限于银河平面或在较暗亮度限制下的研究。尽管连续夜晚观察方法对最小移动具有高灵敏度, 但要第九行星的搜索扩展到更暗的亮度 (根据最近的预测这可能是至关重要的), 则需要更高灵敏度的仪器。

Key words. 行星和卫星: 探测 – 冥王星带: 一般 – 方法: 观测 – 小行星, 流星体: 个别

1. 介绍

在过去几十年中, 对外太阳系的探索产生了大量新的观测结果, 往往令人惊讶, 这些结果重新塑造了我们对太阳系起源和演化的理解 (Gladman & Volk 2021)。许多跨海王星天体 (TNOs) 已被发现并进行了特征描述, 揭示了一个庞大且多样化的天体群体, 这有助于我们了解太阳系的早期阶段及其行星迁移过程 (例如 Tsiganis et al. 2005; Levison et al. 2008; Walsh et al. 2011; Raymond & Morbidelli 2014), 但也提供了一些引人入胜的线索, 表明我们目前的认识并不完整。我们在理解外太阳系方面缺少了某些东西, 可能是尚未发现的巨大而遥远的行星 (至少)。

现代的第九行星假说, 不应与早期关于新太阳系行星的猜想混淆, 其根源在于近二十年前发现的一种极端 TNO 群体 (ETNOs) (Gladman et al. 2002; Brown et al. 2004)。这个群体的特点是具有非常大的半长轴 (通常

$a \gtrsim 150$ AU) 和比海王星轨道更远的近日点 ($q \gtrsim 35$ AU), 这使得它们在引力上与行星分离。Trujillo & Sheppard (2014) 注意到已知 ETNOs 群体中的轨道参数出现统计学上不太可能的聚类, 并考虑了一个假设, 即一个巨大的“未见干扰者”可能是造成异常的原因。Batygin & Brown (2016) 进一步理解了 ETNO 轨道聚类的现象, 他们认识到这些轨道在物理空间中几何排列, 并进行了大量的详细模拟以限制假想中的第九行星的轨道参数 (例如, Brown & Batygin 2016; Khain et al. 2018; Brown & Batygin 2021)。最近对该方法的一项改进通过 Siraj et al. (2024) 基于其长期稳定性选择了一组 ETNO 样本, 并在目前已知的 51 个稳定或亚稳态 ETNO 轨道中发现了显著的近日点经度聚类现象, 统计显著性水平为 3σ 。

应指出的是, ETNO 轨道排列并非没有争议, 一些作者已经指出了参数聚类可能是由发现这些天体的调查所固有的观测偏差造成的。

由于 ETNOs (已发现天体的典型星等在 22 到 24 之间) 距离遥远且暗淡, 望远镜调查受到天空覆盖率和灵敏度的限制, 可能导致观察样本存在偏斜。

地球上望远镜位置分布不均, 加上对特定观测条件或调查设计的偏好, 可能会优先检测天空某些区域中的天体, 模拟出一个实际上并不存在的聚类效应 (Shankman et al. 2017; Napier et al. 2021)。这种可能性已被 Brown & Batygin (2021) (以下简称 BB21) 和 Siraj et al. (2024) 考虑过, 并得出结论认为观测偏差不太可能解释这一聚类现象。

除了 ETNO 轨道对齐之外, 还有其他证据表明这颗行星的存在。de León et al. (2017) 研究了一对 ETNOs (474640) 2004 VN₁₁₂ (也称为 Alicanto) 和 2013 RF₉₈, 得出结论认为它们很可能是由于在轨道近日点附近发生引力相遇时被分离的一对双小行星。De La Fuente Marcos & De La Fuente Marcos (2022) 发现 ETNOs 升交点与降交点距离分布之间存在非常大的不对称性, 这表明这些天体受到了长期的牧羊作用。最近由 Batygin et al. (2024) 完成的一项研究表明, 穿越海王星轨道的 TNO 观测群体在 ~ 100 Myr 的时间尺度上是不稳定的, 并且必须持续得到补充, 最有可能的是通过一颗位于海王星之外的巨大天体。

已经有多次尝试寻找这颗未被观测到的行星, 最近的一次是 Brown et al. (2024)。参见第 5 节了解其他情况。迄今为止, 这些努力均未取得成果, 这促使一些作者提出了更为奇异的引力异常来源, 如原始黑洞 (Scholtz & Unwin 2020) 或 MOND 效应 (Brown & Mathur 2023)。然而, 一个更简单的解释可能是第九大行星的暗淡加上搜索区域广大, 基本上占了整个天空的一部分。模拟实验, 例如 BB21 和 Siraj et al. (2024) 所做的, 非常有效地约束了第九大行星的轨道参数, 但无法确定其真实异常值, 即它在轨道上的当前位置。

或许一个关键的提示以一种非常特殊的流星的形式传达到了我们这里, 称为 CNEOS14, 在 CNEOS 数据库¹ 中被标识为 Siraj & Loeb (2022), 这是首次检测到的星际陨石。Socas-Navarro (2023) 注意到了这颗陨石的一些统计异常, 包括辐射源非常接近模拟中找到第九行星概率最高的区域。在假设该陨石与太阳系外层的一个大质量天体发生引力相遇并改变了其轨迹的情况下, 这些异常现象将得到解释, 这一假设激发了“信使假说”²。根

据这个假说, 回溯 CNEOS14 穿越太阳系的路径将直接指向该遭遇时 (大约在 40 到 80 年前) 第九行星的位置。

在本研究中, 我们进行了信使假设领域的首次探索。我们使用了 BB21 的计算来限制行星的距离和亮度, 并使用 SN23 的结果进行搜索领域。本文组织如下: 第 2 节描述了我们的观测以及用于识别潜在候选对象的策略。在第 3 节中, 我们讨论了采用这种策略时遇到的问题和误报。第 4 节展示了我们在研究中得出的排除限制结果。这些结果被置于先前工作的更广泛背景之下, 见第 5 节。最后, 在第 6 节中我们提出了我们的结论。

2. 观察与搜索策略

我们的搜索基于两项独立的研究, 这些研究定义了第九大行星的搜索范围和预期亮度范围。对于亮度估计, 我们依赖于 BB21 的预测, 他们考虑了各种轨道参数和反照率假设, 导致可能的斯隆 r 波段星等在 18 到 22 之间 (在整个论文中, 我们采用了 AB 星等系统及与斯隆数字天空调查光度系统一致的滤镜, 参见 Oke 1974)。值得注意的是, 这些作者最近将他们的估计修订为一个更为悲观的范围 (Brown et al. 2024), V 波段星等在 20.6 到 23.1 之间。由于这一更新是在我们的观测设计时不可用的, 因此我们的分析基于原始参数空间, 并将在下面进一步讨论这个调整。

搜索区域是根据 SN23 假设建立的, 表明导致 CNEOS14 流星体的微陨石很可能与第九大行星发生了引力相互作用。指定的 SN23 搜索区域大约覆盖了 98 平方度 ($17.9^\circ \times 5.5^\circ$), 包含约一百万个星源, 其亮度在 $r=18$ 和 22 之间。这一广阔的搜索区域主要源于 CNEOS14 流星体撞击地球时测量速度的不确定性, 如 SN23 所述。尽管实际的不确定性和因此产生的搜索区域可能要小得多, 但测量不确定性的公开可用性有限迫使我们使用保守估计。

鉴于来源数量庞大 (大约为 10^6), 手动搜索未被发现的行星是不切实际的。历史上, 太阳系中的行星是通过它们相对于背景恒星的运动来识别的。对于距离数百天文单位的遥远行星, 自行运动非常小, 但视差仍然可以被探测到。基于对第九大行星预期范围的估计, 视差应约为自行运动的 20 到 30 倍, 在最佳观测条件下 (第九大行星处于冲的位置), 每晚位移在 $4''$ 到 $7''$ 之间。

我们的搜索策略旨在检测一个在连续两个或间距很近的夜晚内以与第九大行星一致的数量和方向移动的来源。鉴于特定的天空位置, 我们可以精确计算预期的位

¹ <https://cneos.jpl.nasa.gov> 火球/

² 术语“信使”是借鉴多信使天文学中的用法, 指的是除光以外携带关于遥远天体信息的粒子。

移。距离仍然存在一定程度的不确定性（我们再次依赖 BB21 的预测），这为潜在的视差值提供了一个范围。然而，位移的方向被高度准确地计算出来，仅由地球绕太阳的轨道运动决定。

对于这项研究，我们使用了在特鲁埃尔的 Javalambre 天体物理天文台 (OAJ) 用 JAST/T80 望远镜和 T80Cam 相机 (Marin-Franch et al. 2012) 收集的数据。图像处理过程采用了一条由 CEFCA 为 OAJ 调查开发的自定义管道类型（参见 Cenarro et al. 2019）。该管道主要用 python 编写，使用源提取器进行源提取和初步测光，并且自 2010 年以来一直在持续开发中。最新版本用于处理此处展示的数据。除了标准的校正步骤（偏置、平场以及需要时的散射校正）之外，它还包括了对于像 JAST80 这样的大视场系统所必需的基本照明校正。具体而言，在具有视场校正器的大视场望远镜上进行标准的平场校正会在图像中引入几十分至几百分之一的二维测光偏差，需要额外的校正步骤（参见 Bonoli et al. 2021 附录 B.1）。该管道还在直径 6'' 的积分区域内应用了孔径测光校正以估计检测到的源的总通量。

观测在两个阶段进行：一个在 2022 年（9 月 27 日和 10 月 2 日），另一个在 2023 年（9 月 24 日和 25 日）。第一次观测遇到了次优条件；尽管第一个夜晚满足了视宁度要求（大约 1''），第二个夜晚的视宁度下降到了 1.5'' 和 2'' 之间。由于我们的检测策略依赖于两个晚上的一致可见性，较差的视宁度将我们搜索的极限星等设定为 $r=20.5$ 。此外，这两个夜晚之间的时差增加了预测视差范围至半到一分弧之间，这使得在不同晚上的光源配对变得复杂，并提高了假阳性率（见下文第 3 节）。因此，这一初步搜索的规模和结果相对有限，但它作为方法论概念验证非常有价值，使我们能够改进软件工具，更重要的是提供了验证数据，如下所述。

2023 年的观测活动满足了所有观察标准，整个区域在连续两个晚上（9 月 24 日和 25 日）进行了两次完整的观测。其他尝试由于持续的观测条件不足而产生了不完整数据集。第一次活动的数据以及第二次活动中其他夜晚的不完全数据集对于排除误报证明极为有用，否则这些误报可能无法被剔除。高误报率源于大量来源。我们发现，仅凭同一区域的两张图像不可能消除所有类似第九行星的影像伪影。示例在第 3 节中讨论。

观测领域的马赛克图表示在图 1 中。每个方块是一个子领域，由一个字母（A、B、C、D 或 E）后跟一个两位数（从 1 到 12）的标签标识。这些子领域具有望远镜视野的大小，并且使用 T80Cam 相机在 SLOAN r 滤光

片中单独曝光观测，曝光时间为 180 秒。每张图像的分辨率为 9200×9200 像素，覆盖了天空上 $1.4^\circ \times 1.4^\circ$ 的区域。该图显示了一个结合每个子领域获得的最佳视见度图像的马赛克。绿色数字是在 85% 置信水平下的一个 r 数量级排除限制，计算方法如下面的第 4 节所述。

3. 假阳性

我们开发了一种自动化搜索算法，用于解析 T80Cam 管道的源目录，旨在识别可能是同一来源但在两个晚上之间按我们的视差计算预测的方向移动了预期距离的源对。采用了保守的容差原则，即增加假阳性数量的危害小于排除第九大行星的风险。

我们的方法首先生成一份孤立来源列表，定义为那些在一个夜晚的目录中出现但在另一个夜晚未出现的来源。为了识别这些来源，我们使用来自 STILTS 软件包中的 `tskymatch2` 工具 (Taylor 2006)，比较第一个夜晚和第二个夜晚的来源，并反之亦然。每个夜晚孤立来源列表相匹配，以提取符合 (RA, dec) 之间位移为 $(-2.05'', -0.91'')$ 和 $(-8.25'', -3.69'')$ 的配对。这些值定义了距离在 270 到 1100 AU 之间的一个来源的视差范围。我们还对每一对校准后的星等 r 施加限制，要求它们之间的差异不超过 1 个星等。

此选择过程产生了 939 个候选对的列表。虽然手动检查每个候选对象是劳动密集型的，但仍然是可行的。通过应用额外的标准（如椭圆度或自动宇宙射线检测）可以进一步减少列表数量。然而，我们选择了更为保守的方法，保留所有已识别的候选对象以供人工审查。

然后我们使用 Skybot (Berthier et al. 2006) 来编译观测期间视野内已知小天体的数据。我们并没有根据这些信息剔除候选对象，而是将已知物体的位置叠加到图像上，在视觉检查时作为参考。

图 2 提供了我们方法中常见误报的例子。最常见的伪影来自亮星周围的衍射尖峰或光环，如顶部一行所示。这些亮度变化有时会被算法错误地识别为来源。这些虚假源中有少量成对出现，并满足我们的搜索标准，因此被标记为候选对象。尽管这种巧合的概率很低，但我们分析的大量来源使得这种误报类型普遍存在，主导了我们手动检查的 939 个候选对象。

宇宙射线是第二大误报来源。在某些情况下，第一次夜晚时有宇宙射线击中，而在第二个夜晚另一个宇宙射线恰好出现在假设九号行星在第一个夜晚被观测到的位置附近。这种情况的一个示例显示在图 2 的第二行。尽

管这种巧合看似不太可能，但广阔的搜索区域使这一场景成为相当常见的现象。对于某些候选者而言，如所示的那样，在没有额外数据集或第一次活动提供的附加图像的情况下，排除它们是不可能的。

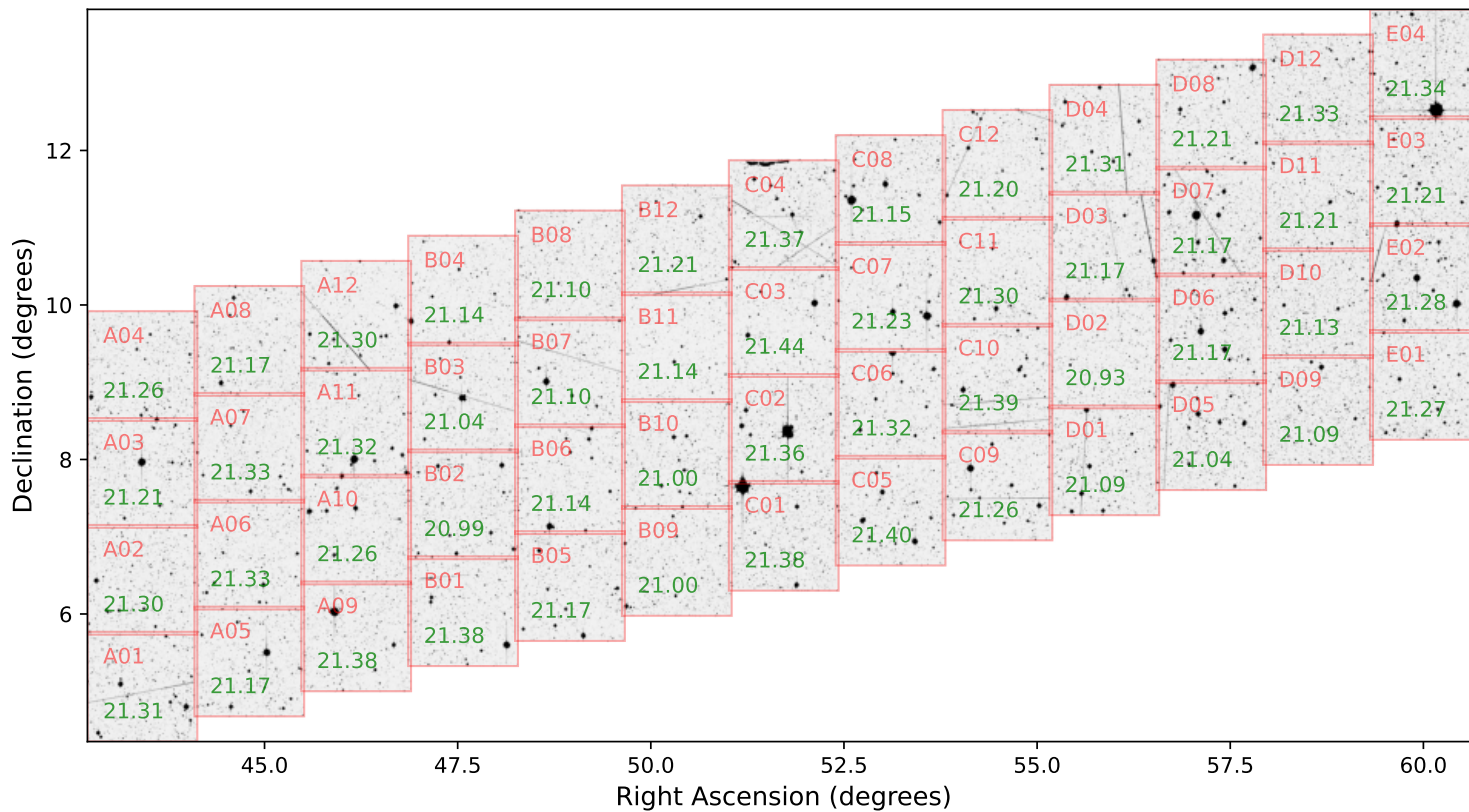


Fig. 1. 观测场的马赛克图。灰度表示对数尺度上的观测通量的负图像，以增强动态范围。对于每个子场，我们显示最佳视见像。红色：子场标签。绿色：Sloan r -星等，有 85% 的概率可以检测到行星九的存在。

有时，不同的混杂因素结合产生配对。在图 2 的第三行中，由第一个夜晚的人造卫星和第二个夜晚的宇宙射线组合产生了假阳性。另一个值得注意的假阳性的来源是间歇性检测到最微弱的源，那些接近噪声阈值的源。源识别算法偶尔会错过这些微弱的源，导致配对中的一个仅在某一夜被检测到的情况发生。这种情形的一个示例显示在图 2 的第四行中。

经过仔细的人工检查，我们排除了所有 939 个候选者作为潜在的第九大行星检测。在某些情况下，需要进行额外的观测，这对于未来类似性质的搜索是一个宝贵的教训。鉴于研究中的大量来源和广阔的天空区域，高度不可能的伪迹组合确实会发生。

4. 排除限制

为了将我们未发现第九大行星的结果转化为有意义的科学约束，我们需要建立从我们的搜索中得出的极限星等。换句话说，有必要估计出我们观测排除的参数空间范围。一个简单的做法是确定我们数据的极限星等，并得出结论认为比这个阈值亮的对象被排除。

然而，这种方法会过于简单化，因为我们的搜索没有一个明确的强度阈值。接近噪声水平的微弱源具有可变的检测概率，这取决于特定的噪声实现或图像伪影的存在。

一般来说，图像中检测到的来源数量随亮度增加而增加，大致遵循幂律。图 3（顶部面板）说明了我们在最高质量的图像中的这种趋势（那些在视宁度优于 0.95'' 的条件下拍摄的图像）。这个阈值平衡了图像质量和可用帧数，最终选出了 27 个帧。选择最优的箱体大小涉及分辨率和由于样本量引起的统计波动之间的权衡。我们使用了 Freedman-Diaconis 规则（Freedman & Diaconis 1981）来确定最优箱宽，在这种情况下是 0.054 星等。来源数量呈现出幂律增长，直到达到灵敏度极限，之后开始下降。

假设这种下降是由我们对微弱源的敏感度降低引起的，并且肘部附近的真正源分布仍然是同样的幂律，我们估计我们可能遗漏的源的数量。通过将我们的观测源与一个外推出来的分布（我们认为这个分布能准确地模拟真正的源群体）进行比较，我们确定了我们在哪个星等开始遗漏一定百分比的源。我们将 15% 和 50% 视为有意义的阈值，并相应地报告我们的结果，即 85% 和 50% 的信心水平。值得一提的是，这种经验方法同时结合了

点状源和扩展源。从这个意义上说，我们预期这里提供的星等会稍微低于点状源所期望的星等，因此是保守估计。

图 3 的四个下部面板显示了单个图像的类似直方图，这些图像代表我们最佳观测的一小部分（随机选取的四张视宁度优于 0.95'' 的图像）。这些单独的直方图比顶部面板中的组合数据更为嘈杂，后者结合了 27 张图像的数据。此处的最佳 Freedman-Diaconis 区间宽度为 0.15 星等。从组合直方图（即顶部面板中所示的那个）得出的线性拟合被叠加到每个单独帧的直方图上，表明所有图像中的源计数与星等之间的幂律关系保持不变。各帧之间的小差异源于光源数量的变化，这略微改变了曝光间的曲线位置。我们通过将线性模型标准化为在范围 r 内约 20 到 20.5 之间的源数目来调整这些差异。

我们定义参数 r_{15} 和 r_{50} 为在给定图像中遗漏 15% 和 50% 现有源的星等。这些值也可以解释为我们遗漏实际存在于图像中的源的概率分别为 15% 或 50% 时的星等。一般来说，遗漏源的比例 $m(r)$ 是由以下分布定义的：

$$m(r) = \frac{N_{True}(r) - N_{Obs}(r)}{N_{True}(r)}, \quad (1)$$

其中 $N_{True}(r)$ 和 $N_{Obs}(r)$ 分别是真实和观测到的源的分布。 $N(r)dr$ 是在区间从 r 到 $r+dr$ 内的星源数量。假定真实的星源数量很好地由线性拟合表示，且由于 $0 \leq N_{Obs}(r) \leq N_{True}(r)$ ， $m(r)$ 的范围是从 0 到 1。

检测第九大行星需要在同一个区域的两张独立图像中成功检测到。由于每次检测都是独立的，因此可以从前一帧 $m_1(r)$ 或后一帧 $m_2(r)$ 中未检测到该对象的概率来计算组合遗漏概率 $m_{12}(r)$ ：

$$1 - m_{12}(r) = (1 - m_1(r))(1 - m_2(r)). \quad (2)$$

这个组合概率在图 4 中进行了说明，展示了子区域 A01 的两张最佳图像的曲线。自然地，在考虑两帧时，相对于单独考虑任一帧而言，错过第九大行星的概率会更高，因为需要在这两张图像中都检测到才能成功识别。

使用这种方法，我们计算每个子域中每对图像的 r_{15} 和 r_{50} 值，选择最佳一对来代表该子域搜索的排除限制。表 4 展示了这些结果（另见图 1）。

5. 与先前工作的比较

最近一次大规模搜寻第九大行星是由 Brown et al. (2024) 进行的，使用了来自多个广视野调查的数据编译，包括 Pan-STARRS1、Zwicky 瞬变设施 (ZTF) 和暗能量

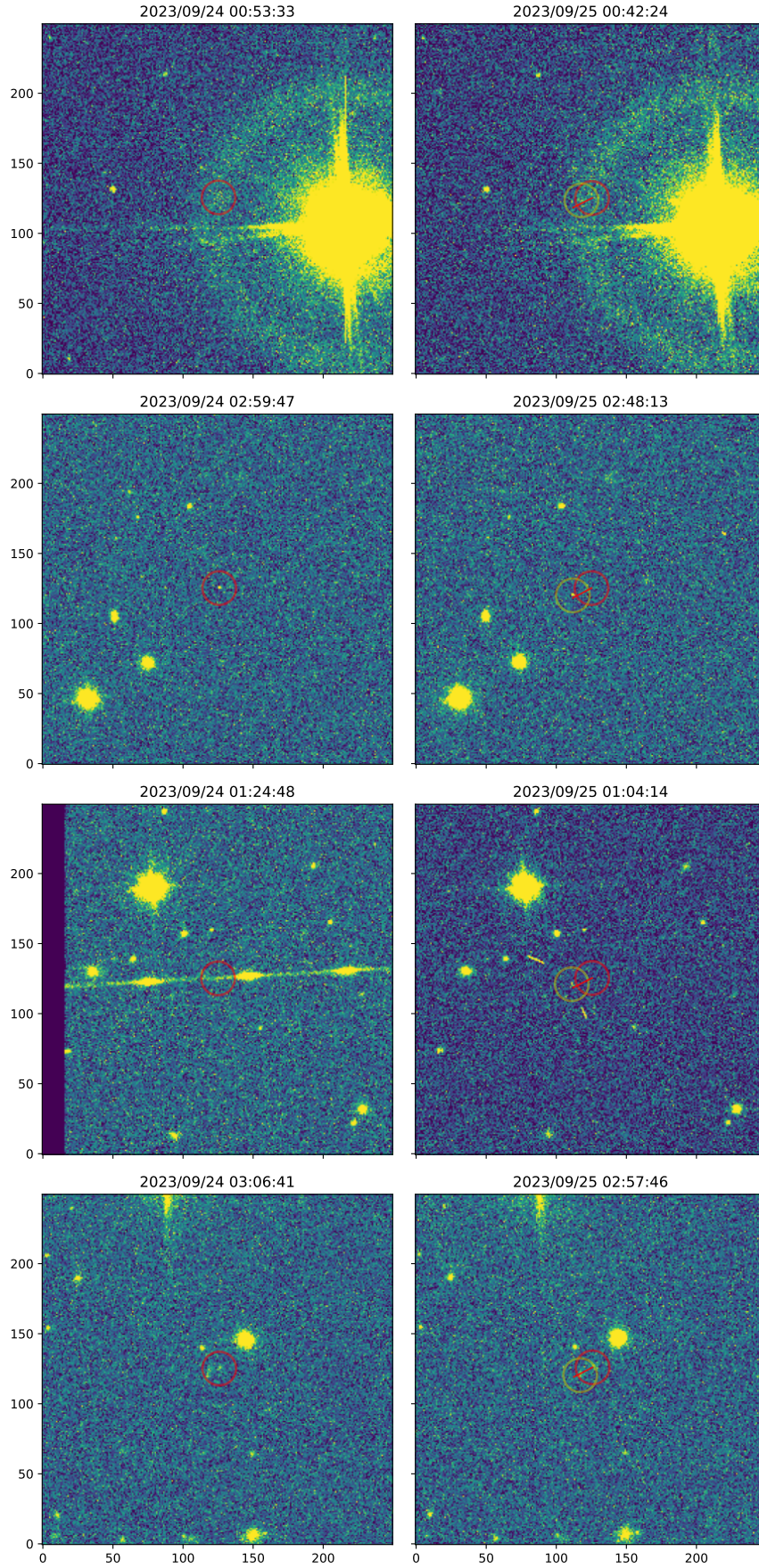


Fig. 2. 四个误报示例（详见正文解释）。左栏：第一个夜晚。右栏：第二个夜晚。红色（黄色）圆圈标记了在第一（第二）个夜晚的源位置，红线表示由于视差引起的第九大行星预期的视运动。 x 和 y 的单位是像素。

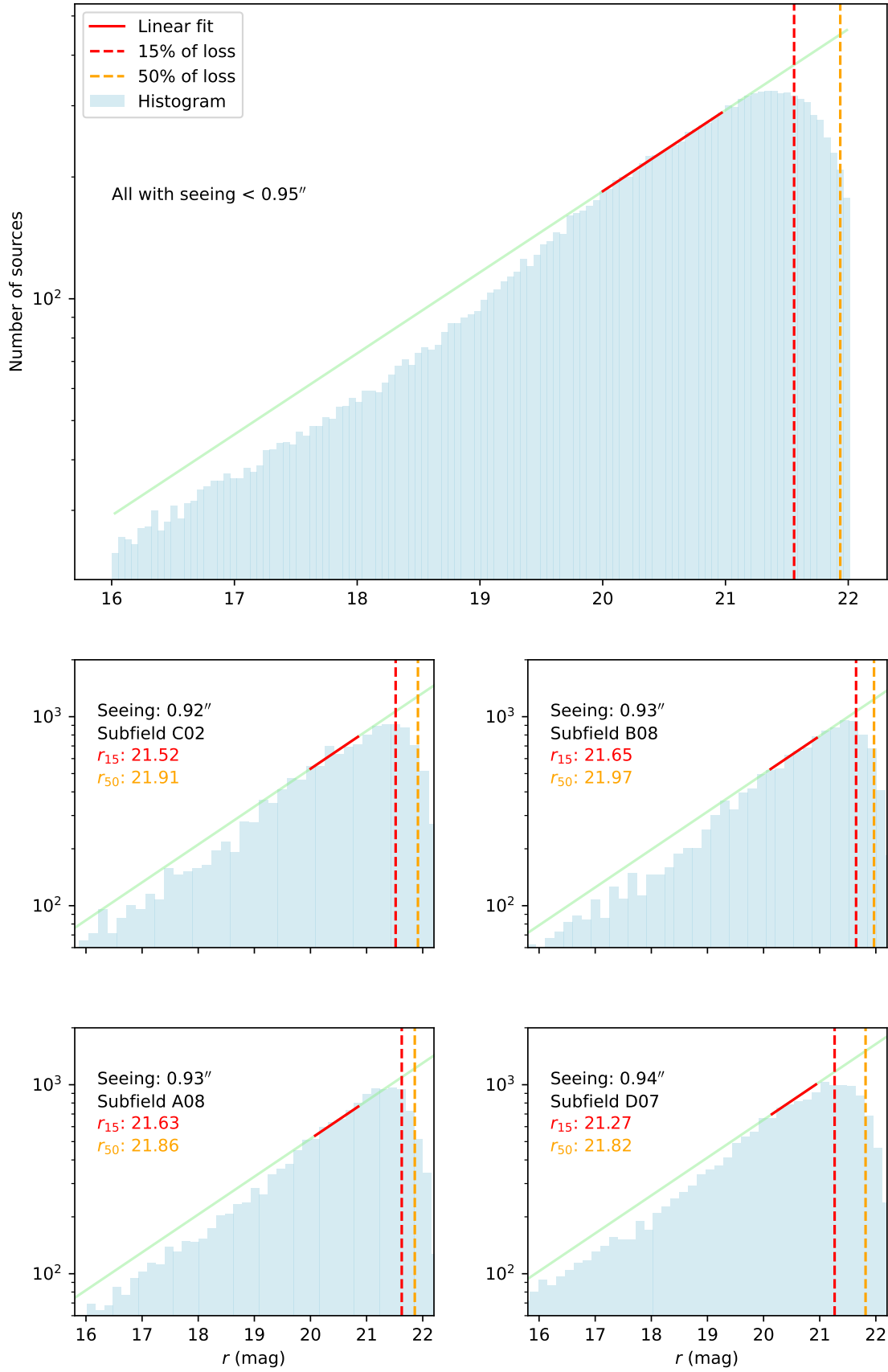


Fig. 3. 各星等区间内检测到的源数量的直方图。绿线：线性拟合。红线：拟合的数据范围。垂直虚线：在这些星等下分别检测到了85%（红色）和50%（黄色）的源（假设真实的源数很好地由拟合近似，见正文）。上图：合并所有视宁度优于 $0.95''$ 的帧。下图：随机选择子区域样本的直方图。

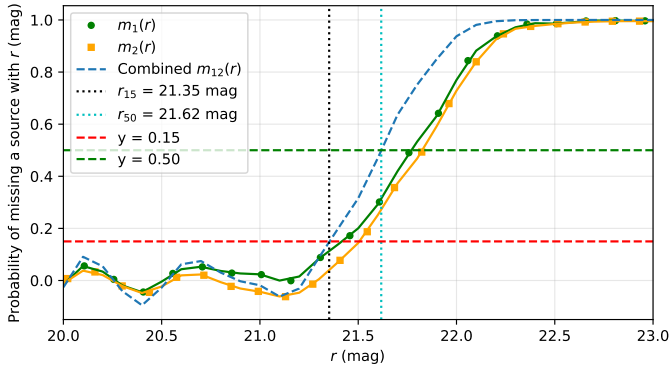


Fig. 4. 估计的缺失源概率 ($m_1(r)$ 和 $m_2(r)$) 以及在子区域 A01 的两张最佳图像中未检测到第九行星的综合概率 $m_{12}(r)$ 。符号显示原始直方图值，曲线通过三次样条插值到更细的网格上。曲线左侧 m 的负值是虚假的，由围绕零的随机波动引起，因为观测源数量 N_{Obs} 在逼近真实源数量 N_{True} 的拟合值上下波动。这一区间对于我们分析无关紧要。

Table 1. 极限星等 r_{15} 和 r_{50} 在每个子领域中

Subfield	r_{15} (mag)	r_{50} (mag)	Subfield	r_{15} (mag)	r_{50} (mag)
A01	21.31	21.59	C03	21.44	21.64
A02	21.30	21.59	C04	21.37	21.71
A03	21.21	21.57	C05	21.40	21.68
A04	21.26	21.62	C06	21.32	21.68
A05	21.17	21.56	C07	21.23	21.67
A06	21.33	21.64	C08	21.15	21.59
A07	21.33	21.62	C09	21.26	21.67
A08	21.17	21.55	C10	21.39	21.68
A09	21.38	21.62	C11	21.30	21.62
A10	21.26	21.63	C12	21.20	21.59
A11	21.32	21.63	D01	21.09	21.51
A12	21.30	21.61	D02	20.93	21.50
B01	21.38	21.64	D03	21.17	21.55
B02	20.99	21.49	D04	21.31	21.58
B03	21.04	21.50	D05	21.04	21.49
B04	21.14	21.51	D06	21.17	21.56
B05	21.17	21.48	D07	21.17	21.56
B06	21.14	21.52	D08	21.21	21.56
B07	21.10	21.48	D09	21.09	21.55
B08	21.10	21.55	D10	21.13	21.55
B09	21.00	21.52	D11	21.21	21.62
B10	21.00	21.43	D12	21.33	21.61
B11	21.14	21.45	E01	21.27	21.55
B12	21.21	21.52	E02	21.28	21.60
C01	21.38	21.69	E03	21.21	21.56
C02	21.36	21.67	E04	21.34	21.67

调查 (DES)，以检查由第九大行星模拟预测 (Brown & Batygin 2021) 的天空区域。与我们的方法不同，这些调查并不是专门为检测第九大行星而设计的；相反，它们利用了跨越多年的广泛存档数据。例如，仅 Pan-STARRS1

数据就覆盖了五年的时间跨度，在广阔的天空区域内进行了观测。

从这个庞大的数据集中，最初标记了超过十亿个单独的探测结果。为了使数据变得可管理，应用了一系列选择过滤器。关键的过滤步骤包括使用遮罩来排除来自被认为不可靠的检测器区域的数据。与我们的方法类似，他们将明亮恒星周围的环境识别为有问题的区域，在他们的案例中需要对这些区域进行遮罩处理。最终，有效的探测数量缩小到大约 2.44 亿个。然后，每个探测结果都进行了交叉匹配，以确定是否有任何一组可以代表在一个开普勒轨道上移动的太阳系物体。为了确保可靠性，他们要求每对象至少有九次一致的探测来确认潜在的轨道对齐情况，因为即使设定为七次探测的阈值也会导致候选者的数量无法管理。

为了评估他们方法的鲁棒性，Brown et al. (2024) 引入了一个具有行星九号预测特征的人工物体群体，并基于这些人工物体的可检测性构建了排除限制图。他们的结果提供了全面的天空覆盖范围，但存在一些局限性。假设的行星九号轨道与银河平面相交以及相邻区域由于高源密度和调查设计时通常优化以避免这些复杂区域（为了其他科学目标）而覆盖较少。因此，某些部分的天空，特别是那些靠近星系的部分，仍然约束较少（参见他们的图 4）。

我们的研究补充了 Brown et al. (2024) 的工作，针对的是天空中一个独特且未充分探索的区域。受到 CNEOS14 流星轨迹 (SN23) 可能存在的引力影响的启发，我们专注于一个巧合地与 Brown et al. (2024) 覆盖范围较低的区域相吻合的地区。具体来说，他们的合成人口模型估计，在我们的搜索区域内未发现第九大行星的可能性从大约 8% 到 50%，这取决于子区域，由于覆盖范围有限。因此，我们的工作为一个观测困难的区域提供了更精确的排除限制。

TESS 太阳系外行星卫星也被用于寻找第九大行星。Rice & Laughlin (2020) 使用了一种新颖的方法，利用 TESS 的全帧图像，并专注于一种称为移位堆叠的技术来增强在密集恒星环境中（特别是沿着银河平面）的信号检测能力。他们的方法涉及沿假设轨道路径对齐并合并图像，从而跨帧相加小的流量增量，以可能揭示那些可能会淹没在噪声中的微弱、缓慢移动的太阳系天体。这种方法将允许探测亮度大于 $V = 21$ 等星且距离小于 150 AU 的第九大行星。

使用红外数据寻找第九大行星的最大规模搜索之一由 Meisner et al. (2017) 进行，并在 Meisner et al. (2018)

中进一步扩展，他们利用 WISE 和 NEOWISE 数据的定制分析来检查了相当一部分天空。他们的搜索方法侧重于叠加 W1 ($3.4\mu\text{m}$) 曝光以提高灵敏度，使他们能够检测到比单独使用 WISE 帧所能达到的更暗淡的物体。他们主要针对高银河纬度的天空区域，覆盖了大约四分之三的天空，并在 90%完整性的情况下亮度限制为 $W1 < 16.7$ 。

与我们的目标短时间尺度观测策略相比，Meisner et al. (2017) 和 Meisner et al. (2018) 利用了七年的存档数据。这使得它们能够覆盖大面积天空区域，但需要复杂的处理来应对帧之间广泛的时间间隔，合并叠加跨越数年。这种方法非常适合捕捉随着时间沿开普勒轨道移动的微弱光源，特别是对于遥远或缓慢移动的对象，但它对我们的策略中可检测到的小范围连续夜晚位移不那么敏感，并且在我们的搜索重点所在的低银道纬度区域受到限制。它们报告了由于高源密度和增加的噪声，在靠近银河平面的区域存在局限性，这使得区分微弱对象与背景光源变得复杂。

6. 结论

我们的搜索没有发现任何可以被认为是可信的第九行星候选者的来源。这一未检测到的情况可能源于以下一个或多个原因：

- 第九大行星不存在。在获得此类天体的直接证据之前，这种可能性仍然存在。历史上，有些行星是通过它们对其他物体的引力效应成功预测出来的，而另一些则是由于后来被证明是虚假的感知异常现象而假设存在的。虽然谨慎是有必要的，但第九大行星假说得到了几条独立证据的支持。即使极端海王星外天体 (ETNO) 轨道的聚类是由观测偏差引起的，仍会有其他需要替代解释的观测结果，包括穿越海王星的小行星带族群 (Batygin et al. 2024)、ETNOs Alicanto 和 2013 RF₉₈ (de León et al. 2017) 令人费解的轨道分离，以及已知小行星带天体升交点和降交点距离的不对称性 (De La Fuente Marcos & De La Fuente Marcos 2022)。
- 信使假设是不正确的。或许第九大行星存在，但它并不位于我们搜索的地方。我们的搜索策略基于 SN23 的假设，该假设认为奇特的 CNEOS14 流星轨迹因与太阳系外未知行星的相互作用而发生了改变。这一场景在统计上具有说服力，根据现有数据，其可能性超过 99.9%。然而，CNEOS 卫星的数据仍然存在争议，

因为其探测器的技术细节是机密的。尽管一些流星事件已被地面科学观测站同时测量，从而允许进行详细的交叉校准，但仍存在相当大的争论。例如，Brown & Borovička (2023) 认为由于测量误差与事件速度之间所谓的相关性，CNEOS14 的星际性质受到了损害，这一说法后来被 Socas-Navarro (2024) 反驳，他们计算出 CNEOS14 确实是星际的可能性为 94.1%。Peña-Asensio 最近的一篇文章 (等人) (准备中) 表明，CNEOS14 可能属于 CNEOS 数据库中测量误差较大的事件群体。这种流星体的星际性质是信使假设统计吸引力的前提，在这一点上，它是一个有争议的说法。

- 第九行星可能位于我们的搜索区域之外。即使第九行星存在且信使假设成立，从 SN23 得出的搜索区域仍可能错过真实位置。提出的搜索区域依赖于对流星体速度不确定性和其他轨迹参数的合理近似。然而，CNEOS 数据库不包括不确定性估计，这意味着我们依赖于基于地面站确认事件的间接误差近似。尽管测量误差不太可能改变将 CNEOS14 分类为星际物体的结果，但它们可能导致推导出的辐射位置发生偏移。对 CNEOS 测量不确定性的更精细理解对于缩小辐射范围和优化搜索区域将是极其宝贵的。
- 图像伪影。我们观察到的行星九号的一张图像可能被附近的一颗亮星或另一个图像伪影遮挡，从而无法检测到它。然而，这种情况非常不可能发生，因为在我们的图像中亮度显著高于背景噪声的像素比例是 $\approx 0.4\%$ 。
- 第九大行星可能比我们的检测极限还要暗淡。我们的搜索假设了对第九大行星的乐观亮度估计，在 r 波段的星等约为 18 至 22 之间。覆盖了由 Brown & Batygin (2021) 预测的大约第 84 百分位的亮度。我们在不同子区域的 85% 置信排除极限范围在 20.7 和 21.5 星等之间，平均极限为 21.3。考虑到我们的检测信心以及第 84 百分位假设，如果第九大行星落在这个亮度范围内，我们可能会有大约 30% 的概率错过它。Brown et al. (2024) 的一项近期工作提供了修订后的 V 波段星等估计值，在约 20.6 至 23.1 之间，其中大部分超出我们的灵敏度范围，需要更大的望远镜和/或更长的积分时间。

鉴于行星九号可能超出我们观测灵敏度范围的可能性，继续使用具有更高灵敏度的仪器进行搜索是有价值的。我们的工作补充了之前的调查，在特定领域提供了额外的限制，并达到了一些更广泛的档案和调查数据未

涵盖的深度极限。因此，本研究作为进一步缩小行星九号潜在位置的另一步，展示了一种相对简单因而能够抵御退化和其他常见问题的方法论。

Acknowledgements. 基于在特鲁埃尔的 Javalambre 天体物理天文台 (OAJ) 使用 JAST80 望远镜进行的观测，该天文台由阿拉贡宇宙物理学研究中心 (CEFCA) 拥有、管理和运营。我们感谢 CEFCA 为本项目分配了主任自由支配时间。我们感谢 OAJ 数据处理和归档单位 (UPAD) 对本文使用的 OAJ 数据进行了减法和平差处理。IT 感谢加那利群岛政府经济、知识与就业厅以及欧洲区域发展基金 (ERDF) 通过编号为 PROID2021010044 的资助提供的支持，以及西班牙科学创新部国家研究机构 (AEI-MCINN) 在 PID2022-140869NB-I00 资助和由加那利群岛政府经济、知识与就业厅通过地方预算及科学技术创新部国库资助的 IAC 项目 P/302302 的支持。本研究利用了 NASA 的天体物理学数据系统文献服务，以及喷气推进实验室的 CNEOS 和 Horizons 数据库。本文中的图表和数据分析使用了包括 Matplotlib(Hunter 2007)、Numpy(Van Der Walt et al. 2011) 和 iPython(Pérez & Granger 2007) 在内的 Python 模块生成。

References

- Batygin, K. & Brown, M. E. 2016, *The Astronomical Journal*, 151, 22
- Batygin, K., Morbidelli, A., Brown, M. E., & Nesvorný, D. 2024, *The Astrophysical Journal Letters*, 966, L8
- Berthier, J., Vachier, F., Thuillot, W., et al. 2006, in *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, Vol. 351, *Astronomical Data Analysis Software and Systems XV*, ed. C. Gabriel, C. Arviset, D. Ponz, & S. Enrique, 367–4
- Bonoli, S., Marin-Franch, A., Varela, J., et al. 2021, *A&A*, 653, A31
- Brown, K. & Mathur, H. 2023, *The Astronomical Journal*, 166, 168
- Brown, M. E. & Batygin, K. 2016, *The Astrophysical Journal Letters*, 824, L23
- Brown, M. E. & Batygin, K. 2021, *The Astronomical Journal*, 162, 219
- Brown, M. E. & Batygin, K. 2021, *AJ*, 162, 219
- Brown, M. E., Holman, M. J., & Batygin, K. 2024, *The Astronomical Journal*, 167, 146
- Brown, M. E., Trujillo, C., & Rabinowitz, D. 2004, *The Astrophysical Journal*, 617, 645
- Brown, P. G. & Borovička, J. 2023, *The Astrophysical Journal*, 953, 167
- Cenarro, A. J., Moles, M., Cristóbal-Hornillos, D., et al. 2019, *A&A*, 622, A176
- De La Fuente Marcos, C. & De La Fuente Marcos, R. 2022, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters*, 512, L6
- de León, J., de la Fuente Marcos, C., & de la Fuente Marcos, R. 2017, *MNRAS*, 467, L66
- Freedman, D. & Diaconis, P. 1981, *Zeitschrift für Wahrscheinlichkeitstheorie und verwandte Gebiete*, 57, 453
- Gladman, B., Holman, M., Grav, T., et al. 2002, *Icarus*, 157, 269
- Gladman, B. & Volk, K. 2021, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 59, 203
- Hunter, J. D. 2007, *Computing In Science & Engineering*, 9, 90
- Khain, T., Batygin, K., & Brown, M. E. 2018, *The Astronomical Journal*, 155, 250
- Levison, H. F., Morbidelli, A., VanLaerhoven, C., Gomes, R., & Tsiganis, K. 2008, *Icarus*, 196, 258
- Marin-Franch, A., Taylor, K., Cepa, J., et al. 2012, in *Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy IV*, Vol. 8446, *SPIE*, 1925–1931
- Meisner, A., Bromley, B., Kenyon, S., & Anderson, T. 2018, *The Astronomical Journal*, 155, 166
- Meisner, A. M., Bromley, B. C., Nugent, P. E., et al. 2017, *The Astronomical Journal*, 153, 65
- Napier, K., Gerdes, D., & Dark Energy Survey Collaboration. 2021, in *AAS/Division of Dynamical Astronomy Meeting*, Vol. 53, *AAS/Division of Dynamical Astronomy Meeting*, 502.03
- Oke, J. B. 1974, *ApJS*, 27, 21
- Pérez, F. & Granger, B. E. 2007, *Computing in Science and Engineering*, 9, 21
- Raymond, S. N. & Morbidelli, A. 2014, *Proceedings of the International Astronomical Union*, 9, 194
- Rice, M. & Laughlin, G. 2020, *The Planetary Science Journal*, 1, 81
- Scholtz, J. & Unwin, J. 2020, *Phys. Rev. Lett.*, 125, 051103
- Shankman, C., Kavelaars, J., Bannister, M. T., et al. 2017, *The Astronomical Journal*, 154, 50
- Siraj, A., Chyba, C. F., & Tremaine, S. 2024, *arXiv preprint arXiv:2410.18170*
- Siraj, A. & Loeb, A. 2022, *ApJ*, 939, 53
- Socas-Navarro, H. 2023, *ApJ*, 945, 22
- Socas-Navarro, H. 2024, *arXiv preprint arXiv:2405.17219*
- Taylor, M. B. 2006, in *Astronomical Data Analysis Software and Systems XV*, Vol. 351, 666
- Trujillo, C. A. & Sheppard, S. S. 2014, *Nature*, 507, 471
- Tsiganis, K., Gomes, R., Morbidelli, A., & Levison, H. F. 2005, *Nature*, 435, 459
- Van Der Walt, S., Colbert, S. C., & Varoquaux, G. 2011, *Computing in Science & Engineering*, 13, 22
- Walsh, K. J., Morbidelli, A., Raymond, S. N., O'Brien, D. P., & Mandell, A. M. 2011, *Nature*, 475, 206