

行星 9 的一个候选位置来自一颗星际流星体：信使假说

HECTOR SOCAS-NAVARRO^{1,2}

¹*Instituto de Astrofísica de Canarias, Vía Láctea S/N, La Laguna 38205, Tenerife, Spain*

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

摘要

假设存在一颗行星 9，位于太阳系外围，这被提议为解释超海王星天体轨道异常聚类现象的一种合理解释。在这里我们提出，一些到达地球的流星可能充当信使，有可能揭示出一个迄今尚未发现的大质量物体的存在。最近提出的第一个星际流星 CNEOS 2014-01-08 可能是这样一个信使。这颗流星的辐射点位于之前工作中计算的行星 9 位置的最大概率区域内。这种巧合是由偶然造成的几率约为 $\sim 1\%$ 。此外，在假设它因引力相遇而被弹向地球的情况下，关于 CNEOS 2014-01-08 的一些统计异常得到了解决。反向追踪其轨迹将引导到行星 9 更有可能存在的天空区域。根据现有数据，我们提出坐标赤经 $53.0 \pm 4.3^\circ$ ，赤纬 $9.2 \pm 1.3^\circ$ 作为行星 9 的一个可能候选位置。

Keywords: 行星和卫星：探测 – 柯伊伯带：一般 – 小行星，asteroid：一般 – 陨石，流星，流星体

1. 介绍

在极端偏心的超海王星天体 (ETNOs) 中观察到的轨道参数的独特聚类现象促使人们推测，在外太阳系可能存在一个尚未被发现的巨大行星质量物体 (Trujillo & Sheppard 2014; de la Fuente Marcos & de la Fuente Marcos 2014; Batygin & Brown 2016; Brown & Batygin 2016; Millholland & Laughlin 2017)。这些 ETNOs 距离海王星太远，无法感受到其引力影响。然而，大多数它们在黄道面达到近日点，并且椭圆轨道对齐，升交点 (Ω) 和轨道平面倾角 (i) 紧密聚类。这种巧合可以通过存在一个质量介于地球 4 到 8.4 倍之间、半长轴在 300 至 520 天文单位 (Brown & Batygin 2021, 下文简称 BB21, 另见 de la Fuente Marcos & de la Fuente Marcos 2016) 的巨大遥远行星来解释。甚至有人推测这个未被发现的扰动源可能根本不是一颗行星，而是一个原初黑洞 (Scholtz & Unwin 2020)，这是一种假想中的在宇宙早期形成的黑洞类别。

应指出的是，ETNO 聚类的证据并非无可争议。存在争议认为这是否是真实效应或由观测偏差引起的统计伪影 (见 Shankman et al. 2017; Bernardinelli

et al. 2020; Napier et al. 2021; Brown & Batygin 2021)。支持假想中的行星 9 存在的独立线索来自 ETNO 对 2004 VN₁₁₂ 和 2013 RF₉₈。de León et al. (2017) 提出了光谱和动态证据，表明这两个物体可能是双小行星，在近日点附近因与未知的跨海王星天体的引力相遇而分离。

读者可以在 Gladman & Volk (2021) 中找到关于我们当前对太阳系外部了解的综述。如果行星 9 确实存在，那么它将极难被探测和识别。首先，它会是一个非常微弱的天体 (可能在 R 波段的视星等约为 20 ± 2)。此外，它的轨道速度将会极其缓慢，每 7,000 到 15,000 年完成一次公转 (参见 BB21)。

多信使天文学在过去十年中迅速变得越来越重要，并经常被资金机构认定为高优先级 (见，例如，Astro2020, National Academies 2021)。这里的“信使”指的是来自天体并朝我们方向发送的粒子或波，不包括光子。通常情况下，这指的是中微子、引力波和宇宙射线。我们注意到，由巨大物体加速的小型小行星或流星体最终以流星的形式撞击地球时，它们作为带来遥远天体信息的粒子行为。因此，它们也可以被认为是宇宙信使。在这篇论文中，我们认为第一个检测

到这种流星体信使可能是 CNEOS 2014-01-08 (以下简称 CNEOS14), 或许向我们揭示了行星 9 的位置。

2. 陨星

在寻找新星际物体的搜索中, Siraj & Loeb (2022) (以下简称 SL22) 解析了 CNEOS fireball database 中的流星事件, 这些流星具有双曲线轨迹。在所有记录的事件中, SL22 发现了一颗具有明显双曲线轨迹的流星 CNEOS14, 该流星于 17:05:34 (UT) 在巴布亚新几内亚附近撞击 (撞击坐标 1.3°S , 147.6°E)。其在那一刻的视向速度为 $\simeq 60 \text{ km s}^{-1}$, 根据 SL22, 或 $61 \pm 5.8 \text{ km s}^{-1}$, 根据 Peña-Asensio et al. (2022)。

通过数值模拟 (如下所述), 我们追踪了 CNEOS14 的轨迹回到外太阳系, 并确定了流星体穿越行星 9 可能轨道时在天空中的位置 (遥远辐射点), 距离太阳 300 至 600 AU。获得的遥远辐射点是赤经 $51.6 \pm 4.3^\circ$, 赤纬 $8.6 \pm 1.2^\circ$ 。引人注目的是, 这个位置处于 BB21 中公布的行星 9 可能存在的带状区域内, 如图 1 所示。事实上, 它位于更高概率发现该行星的红色区域内部。这是一个非常显著的巧合, 因为我们下面讨论的内容表明这种情况偶然发生的可能性相当低。

其他先前工作中给出的辐射坐标具有略微不同的含义, 这可能是它们之间存在小差异的原因 (当然, 还包括可能存在的模拟细节差异)。Peña-Asensio et al. (2022) 获得 R.A. $62.8 \pm 1.1^\circ$, dec $14.0 \pm 2.8^\circ$ 地心辐射坐标。这指的是如果流星体的轨迹没有被地球引力弯曲, 其撞击前的入射方向。SL22 获得了 R.A. $49.4 \pm 4.1^\circ$, dec $11.2 \pm 1.8^\circ$ 的渐近辐射方向, 这是流星体在无穷远处的方向。

我们通过与撞击位置向后整合 CNEOS14 的运动轨迹, 探索了其在整个太阳系乃至向外至 1000 AU 的路径。采用了考虑太阳、行星和月球引力的新牛顿 N 体模拟代码。该代码是公开可用的, 并已在其他地方进行了描述 (Socas-Navarro 2019)。

模拟以陨石在撞击点和观测速度初始化。行星和月球的位置及初始速度来自 JPL Horizons 系统 (Giorgini 2015)。总共生成了 1,000 个克隆体, 并对初始速度应用随机扰动, 以考虑观测不确定性。在前

500 个克隆体中, 初始速度扰动遵循均值为 0、标准差等于观测值 10% 的高斯分布。

剩余的 500 个克隆体的初始速度模长乘以一个在 1.0 和 1.1 之间均匀分布的随机因子, 以考虑流星体接触大气层时可能经历的一些减速 (最多 10%)。

模拟分为两个阶段。在第一阶段, 流星体非常接近地球和月球, 我们需要更高的时间分辨率以获得准确的轨迹重建。在这个阶段我们使用了 1 秒的时间分辨率并计算了一百万个时间步长。这一阶段的模拟时长为 11.57 天, 并以流星体位于距离地球 0.3 天文单位的行星际空间中结束。第二阶段从第一阶段结束开始, 具有较粗的时间分辨率和更长的模拟时间跨度, 以便覆盖流星体进入外太阳系的过程。在这个阶段我们使用了 1 小时的时间分辨率并再次计算了一百万个时间步长, 总共涵盖了 110 年的模拟时长。

根据模拟结果, 该流星体分别在撞击前 32 年和 65 年穿越了 300 和 600 天文单位的日心距离。其天球坐标 (辐射点) 在 300 和 600 天文单位之间没有显著变化, 但在克隆体之间存在变化。这些数据绘制在图 2 中, 橙色点代表前 500 个克隆体, 蓝色点代表大气减速不超过 10% 的克隆体。中位坐标为赤经 $50.7 \pm 4.1^\circ$, 赤纬 $8.3 \pm 1.2^\circ$ 对于前 500 个克隆, 当考虑整个样本时为赤经 $51.6 \pm 4.3^\circ$, 赤纬 $8.6 \pm 1.2^\circ$ 。请注意, 这些坐标的误差并非不相关。平均而言, 右 ascension 值较高的克隆体的赤纬也略高。

3. 统计异常

如果我们认为 CNEOS14 是一个来自星际介质且入射轨迹未受扰动的星际物体, 那么关于它有一些有趣的统计异常。

1. 其接近轨迹非常靠近黄道平面, 仅倾斜 7° 。一个星际物体预计会从任意随机方向进入。假设入射速度分布均匀, 相对于黄道平面的倾角 (i) 将遵循在 $\sin(i)$ 中的均匀分布, 单个物体具有小于 i_0 倾角的累积概率由 $P(i < i_0) = \sin(i_0)$ 给出。在我们的案例中, $P(i < 7^\circ)$ 仅为 12%。我们可以将这个值与其他已知的星际闯入者进行比较。1I/'Oumuamua 的倾角为 122° (即距离黄道面 58° 但以逆行运动), 导致累积概率 $P=85\%$ 。2I/鲍里斯沃夫的倾角为 44° , 得出的

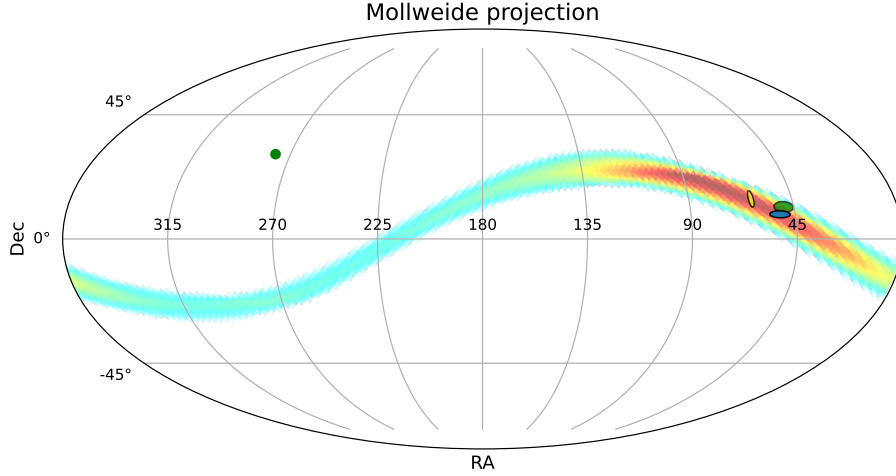


图 1. 整个天空的莫尔斯维德投影图。彩色带标记了可能的第九大行星轨道范围，由 BB21 获得（红色表示概率较高）。水平蓝色椭圆：CNEOS14 在距离太阳 300 至 600 天文单位之间时的位置（预测的第九大行星轨道的距离范围）。水平绿色椭圆：由 SL22 得出的渐近辐射点（即无穷远处）。垂直黄色椭圆：由 Peña-Asensio et al. (2022) 得出的地心辐射点（即撞击前的瞬间位置）。绿色点标记太阳顶点，即太阳系运动的方向。

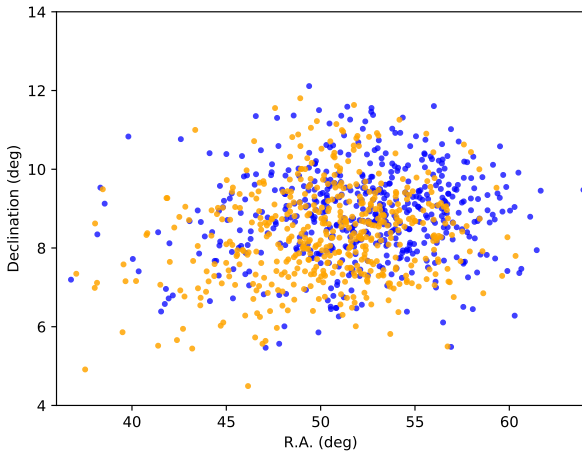


图 2. 模拟克隆体在 300 AU 处的分布。橙色点：前 500 个克隆体，未考虑大气减速效应。蓝色点：剩余 500 个克隆体，初始速度增加了介于 1 和 1.1 之间的随机因子（均匀分布）。

概率是 $P=69\%$ 。当然，目前的星际闯入者样本数量太过有限，无法进行有意义的比较。这里提到它们仅仅是作为展示预期统计行为的示例。

- 其相对于本地静止标准（LSR，银河中心周围物质的平均运动）的速度异常大，为 $v_{LSR}=58 \text{ km s}^{-1}$ (SL22)。在太阳邻域的 $1-\sigma$ 速度弥散是 $\sim 38 \text{ km s}^{-1}$ (Dehnen & Binney 1998)，这

意味着只有 6% 的恒星移动速度为 58 km s^{-1} 或更快（作为参考，太阳相对于 LSR 的速度是 18 km s^{-1} , Schönrich et al. 2010; Zbinden & Saha 2019)。CNEOS14 的 LSR 速度异常高。为了与另外两个已知的星际闯入者进行比较，1I/'Oumuamua 和 2I/Borisov 相对于 LSR 的速度分别为 11 和 35 km s^{-1} (Mamajek 2017; Bailer-Jones et al. 2020)。如果我们认为 CNEOS14 是从一颗运动速度低于 38 km s^{-1} 的“正常”恒星中被抛射出来的，它必须获得了足够强大的推力，使其相对于母恒星的无限远相对速度 v_{∞} 至少达到 20 km s^{-1} 。为了说明这一点，旅行者号探测器在经过两次利用木星和土星的重力助推后，以 $v_{\infty}=17 \text{ km s}^{-1}$ 的速度离开太阳系。不仅需要极强的推动力，还需要与恒星运动方向对齐，才能将 CNEOS14 以相对于局部标准静止系的速度为 58 km s^{-1} 投射到星际介质中。这样的对齐极为不可能出现。SL22 建议，也许母恒星来自银河系厚盘，其速度弥散度为 $\sim 50 \text{ km s}^{-1}$ 。这是可能的，但再次说来可能性很低，因为厚盘中的恒星仅占大约 $\sim 10\%$ 的比例。总之，CNEOS14 相对于局部标准静止系的速度异常高，这与只有 6% 到 10% 的恒星相符。

3. SL22 声称, 为了在 ~ 10 年的时间内探测到一个星际物体, 这样的物体在环境中的数密度应该是 $n = 10^{6+0.75-1.5} \text{ AU}^{-3}$ (以 95% 的置信度假设泊松统计), 而这种数量的物体与预计在太阳星云中位于 60 km s^{-1} 轨道内的可用星子物质的质量存在矛盾。这意味着, 根据我们目前的知识, 数据库中不太可能有一个像 CNEOS14 这样的星际物体。

识别星际流星是一项具有悠久研究历史的极具挑战性的任务 (参见例如 Opik 1950; Wiegert 2014; Hajdukova et al. 2020)。鉴于这些困难, 很可能有些事件被忽略了, 这意味着实际数量 (和矛盾) 会更大。

当综合考虑时, 这三个异常现象是由偶然性引起的概率小于 1%。在本文的其余部分中, 我们讨论了一个假设情景, 该情景通过假定 CNEOS14 的轨迹因与太阳系外的一个大质量物体发生引力相互作用而偏转来解释这些异常。

4. 直接撞击物或信使

关于 CNEOS14 的来源有两个可能性。第一个是它是一颗星际小行星, 直接以撞击地球的路线进入太阳系, 并且没有其他任何干预的情况下撞击了我们 (直接撞击假设)。我们在本文中提出的另一种可能性是它经历了一次与大质量天体的引力相遇, 并被甩向我们的方向 (信使假设)。

直接撞击假设无法解释行星 9 高概率区域与流星体辐射点之间显著的巧合, 如图 1 所示。这种巧合随机发生的可能性相当低。如果流星体以任意方向进入太阳系, 它在图中 (莫尔韦德投影保持面积) 任何地方起源的概率都是相同的。偶然巧合发生在高概率区域 (红色轮廓) 内的概率约为 1% (该轮廓与整个天空所对应的立体角之比)。如果我们考虑 BB21 计算的整个天空中的行星 9 带, 则偶然巧合的概率将增加到 9%。

上述概率是上限, 因为它们假设了在日心参考系中星际物体的速度呈各向同性分布。太阳系相对于局部标准组以 18 km/s 的速度朝着太阳顶点方向移动, 在图中标记为一个绿色的点 (Schönrich et al. 2010; Zbinden & Saha 2019)。这意味着从该侧天空

进入的星际小行星的概率相对较高, 反之则较低。太阳顶点与 CNEOS14 辐射源在赤经上相差 133° , 因此应该较少有物体从那个方向进入太阳系, 从而降低了前一段所述的偶然巧合概率。

信使假设解释了 CNEOS14 辐射与行星 9 高概率轮廓的巧合, 同时也解决了在上述第 3 节中讨论的 CNEOS14 异常。CNEOS14 本身没有什么特别奇怪的地方。它在日心参考系中的 60 km/s 的较大撞击速度有很大一部分是由太阳引力加速度提供的 (高达 42 km/s)。剩余的动能, 相当于另一个 42 km/s , 将是它从星际介质进入日心参考系的速度加上行星 9 提供的 Δv 。在极限情况下, 即零 Δv (也就是说, 引力弹弓效应只会导致偏转而不会增加速度), 所需的 42 km/s 很接近相对于 LSR 的典型均方根速度 (38 km/s)。对于其他 Δv 值, 流星体在 LSR 中的速度会更低。

到目前为止, 我们在讨论 CNEOS14 时都是在先前 Planet 9 线索的背景下进行的。也可以考虑这个流星独立于所有前期工作向我们传达了什么信息。CNEOS14 是在寻找具有高日心速度的流星的过程中被发现的, 返回了一个与 $\sim 60 \text{ km/s}$ 的匹配结果。在如此高的速度下, CNEOS14 并未受太阳引力束缚, 因此它要么是一个星际直接撞击体, 要么是通过引力相遇加速向我们方向飞来的信使。

在第一种情况 (直接撞击者) 中, 预计流星将以任意方向从空间到达, 并且相对于黄道面具有随机的倾角 (均匀分布于 $\sin(i)$ 中)。然而, CNEOS14 的轨迹非常接近黄道面, 仅有 7° 的倾角。偶然对齐的概率仅为 12%, 这使得第一个场景不太可能。

此外, 如果 CNEOS14 是一个未受偏转的流星体, 它相对于 LSR 的速度将是 58 km/s , 正如第 3 节讨论的那样, 这是一个异常高的速度。只有大约 6% 的恒星移动得那么快。

将这两个概率视为独立 (不相关) 的属性, 可以保守地估计, 在撞击地球之前穿过太阳系时, CNEOS14 发生引力相遇的可能性可能高于 99%。然而, 它并没有接近任何已知的行星。表 1 列出了 CNEOS14 预测轨迹穿越每个外行星轨道的大致日期以及该时间点上各行星的坐标。

表 1. 外行星在 CNEOS14 穿越它们轨道的那一天的坐标。没有一颗接近该陨星在天空中的位置（大约为。赤经：51.6°，赤纬：8.6°）

Planet	Orbit crossing	R.A.	dec
Mars	2013-12-21	187.24°	0.88°
Jupiter	2013-08-12	101.33°	22.88°
Saturn	2013-03-01	219.80°	-11.19°
Uranus	2012-02-19	2.71°	0.41°
Neptune	2010-12-13	328.70°	-12.79°

因此，即使忽略所有基于 ETNO 聚类的第九行星证据，这颗流星最有可能是来自太阳系外层或更远处某个未知大质量天体抛向我们的信使。这是支持第九行星存在性的额外证据，而不仅仅是 ETNO 奇特轨道参数空间提供的证据。

行星 9 的当前位置在其假设与流星体相遇后的 32 至 65 年间由于自身的运动而发生了变化。根据对行星 9 轨道参数的估计（例如 BB21），其自行必须在 1.3° 和 1.7° 之间。考虑到这一点，我们最终得到的坐标为赤经 $53.0 \pm 4.3^\circ$ ，赤纬 $9.2 \pm 1.3^\circ$ ，这是预测的行星 9 当前的位置。

5. 结论

我们提出太阳系第九大行星可能的当前位置位于赤经 $53.0 \pm 4.3^\circ$ ，赤纬 $9.2 \pm 1.3^\circ$ 处，在白羊座、金牛座和鲸鱼座的交界区域。此外，我们认为 CNEOS14 提供了额外的支持证据，这与遥远 ETNOs 轨道聚集现象完全独立。需要强调的是，提出的这个位置只是一个候选点，并不能确定这一预测不是巧合。然而，这是一个合理且易于测试的提议。太阳系第九大行星轨道和 CNEOS14 起源之间随机巧合的概率低于 9% 或 1%（取决于考虑整个轨道带还是高概率区域）。图 1 显示了这些位置以及太阳系运动的方向（太阳顶点），其位于天空的另一侧。这种巧合的统计显著性不是很高，但当与 CNEOS14 的整体统计异常结合起来时，随机几率增加到 $\sim 0.1\%$ 。

有两种可能性：要么 CNEOS14 是直接撞击物，要么它通过引力相遇被重新导向到我们的方向（信使假设）。

信使场景解释了 CNEOS14 辐射与 Planet 9 轨道带的巧合，并解决了第 3 节中的 CNEOS14 异常。该流星体初始不必以 58 公里/秒⁻¹ 相对于局部标准星系运动。它可以以 LSR 中恒星的典型速度移动。

我们将信使假说视为与所有现有证据最简洁一致的假设。然而，有一些需要注意的保留意见：

1. 行星 9 可能不存在。当前的证据是间接且存在争议的。一些作者将 ETNO 聚类归因于观测偏差 (Shankman et al. 2017; Bernardinelli et al. 2020; Napier et al. 2021)。对于反对方的观点，请参阅 Brown & Batygin (2021)。然而，除了 ETNO 聚类之外，还有其他支持行星 9 假设的证据。de León et al. (2017) 认为两个 ETNOs 2004 VN₁₁₂ 和 2013 RF₉₈ 原本是一对双小行星，并在与海王星外天体相遇时被分离。此外，在本文中，我们发现 CNEOS14 辐射源与预计行星 9 居住区域之间存在显著巧合，这种情况不太可能偶然发生。
2. 本文中的大部分论证基于以下判断：CNEOS14 轨道为双曲线，考虑到其在 1 AU 处的高日心速度。如果这种判断被认为是不正确的（如 Vaubaillon 2022 所建议的），那么该流星体可能是太阳系内的天体，在这种情况下，其异常现象的统计意义将大幅下降。然而，对于双曲线轨道的观测证据非常稳健。正如 SL22 指出的那样，为了使其成为有界的轨道，测量的速度需要误差大约为 20 km s⁻¹，或接近 50%。对 CNEOS 数据库中事件准确性的独立研究没有观察到如此大的误差 (Devillepoix et al. 2019; Borovička et al. 2017; Peña-Asensio et al. 2022)。
3. 即使信使假设是正确的，巨大的扰动源也可能不是第九大行星。一种可能性是该流星体起源于奥尔特云，在与经过的恒星近距离接触期间（也许是在那颗恒星的奥尔特云中）。我们通过比较流星体起源的时间和最近恒星相遇的列表来探讨这一假设。将模拟扩展到距离超过 ~ 1 光年，我们发现这样的距离在 7000 年前就已经达到（24000 年前为 1 秒差距）。然而，在 80000 年前之后没有比 1 秒差距更近的相遇事件发生过

(Bailer-Jones 2022; Mamajek et al. 2015)。另一种可能性是数千年前与经过的褐矮星或流浪行星（指星际介质中的自由漂浮行星）的相遇，再次扰乱了奥尔特云中的天体。这种情景当然是可能的，但它无法解释流星体与预测的第九大行星位置的巧合，也无法解释较低的黄道倾角。

4. Huang et al. (2022) 提出一个替代解释，其中 ETNO 群体是由一个不再存在的遥远行星创造的。在他们的设想中，第九大行星曾经是太阳系的一个临时居民（用他们的话说是流浪行星，在此处不要与上一段中的“流浪”一词的意义混淆），我们理解海王星外异常现象的努力将被视为行星考古学。这一设想与所有现有证据一致，除了本文提出的线索要求在 32 至 65 年前存在一颗太阳系的第九大行星。
5. 信使假设中的一个开放问题是，为什么第一个星际流星会是信使而不是直接撞击者。答案可能与搜索偏差有关。该天体是在数据库中寻找最高的日心速度时被识别出来的。也许最快的物体是由引力弹弓效应产生的，这在搜索过程中引入了一种偏差，使得它们更容易在所有背景事件中被辨认出来。这个问题可以通过详细模拟太阳系穿越星际介质的运动来探讨。一个自然的后续问题是，为什么这个信使来自第九大行星而不是木星或其他巨大的行星，这些行星的质量要大得多。然而，由希尔半径给出的引力影响范围更多地依赖于距离太阳的距离而非行星质量。虽然木星的希尔半径为 0.35 AU，第九大行星的希尔半径则

在 5 到 12 AU 之间。因此，第九大行星的引力主导体积是木星的 2,400 至 38,600 倍。

6. 也许最重要的警告是，这里提出的第九行星位置取决于 CNEOS14 观测速度的准确性。先前的研究将 CNEOS 数据库中的事件与地面观测结果进行比较发现，虽然大多数情况下有很好的—致性，但在少数事件中发现了显著差异 (Devillepoix et al. 2019; Borovička et al. 2017; Peña-Asensio et al. 2022)。不幸的是，没有其他关于 CNEOS14 的观测数据存在，所以我们需要依赖这一单一测量。

考虑到所有这些因素，支持 CNEOS14 起源的行星 9 信使假说的证据似乎足够有说服力，值得进行搜寻工作。缓慢的自行使得在观测中识别出行星 9 极具挑战性。相对于背景恒星来说，需要非常长的时间才能检测到显著的运动。然而，视差观测可能会有所帮助。在预测的距离上，预期会有一个介于 12' 和 23' 的视差。不幸的是，BB21 的计算表明行星 9 刚好超出 GAIA 的星等限制。然而，考虑到他们的计算探索性质以及与限制值之间的微小差异，进行一些搜寻工作可能是值得的。

- 1 本研究利用了 NASA 的天体物理学数据系统文献服
- 2 务，以及喷气推进实验室的 CNEOS 和 Horizons 数据
- 3 库。Python Matplotlib (Hunter 2007)、Numpy (Van
- 4 Der Walt et al. 2011) 和 iPython (Pérez & Granger
- 5 2007) 模块已被用于生成本文中的图形并分析计算。
- 6 感谢 Eloy Peña-Asensio 进行了许多富有成效的讨论。

REFERENCES

- Bailer-Jones, C. A. L. 2022, *ApJL*, 935, L9
- Bailer-Jones, C. A. L., Farnocchia, D., Ye, Q., Meech, K. J., & Micheli, M. 2020, *A&A*, 634, A14
- Batygin, K. & Brown, M. E. 2016, *AJ*, 151, 22
- Bernardinelli, P. H., Bernstein, G. M., Sako, M., et al. 2020, *The Planetary Science Journal*, 1, 28
- Borovička, J., Spurný, P., Grigore, V. I., & Svoreň, J. 2017, *Planetary and Space Science*, 143, 147, sI:Meteoroids 2016
- Brown, M. E. & Batygin, K. 2016, *ApJL*, 824, L23
- Brown, M. E. & Batygin, K. 2021, *AJ*, 162, 219
- CNEOS fireball database. 2022, CNEOS fireball database, <https://cneos.jpl.nasa.gov/fireballs/>, accessed: 2022-05-12
- de la Fuente Marcos, C. & de la Fuente Marcos, R. 2014, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters*, 443, L59
- de León, J., de la Fuente Marcos, C., & de la Fuente Marcos, R. 2017, *MNRAS*, 467, L66
- Dehnen, W. & Binney, J. J. 1998, *MNRAS*, 298, 387
- Devillepoix, H. A. R., Bland, P. A., Sansom, E. K., et al. 2019, *MNRAS*, 483, 5166

- de la Fuente Marcos, C. & de la Fuente Marcos, R. 2016, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters, 459, L66
- Giorgini, J. D. 2015, in IAU General Assembly, Vol. 29, 2256293
- Gladman, B. & Volk, K. 2021, ARA&A, 59, 203
- Hajdukova, M., Sterken, V., Wiegert, P., & Kornoš, L. 2020, Planet. Space Sci., 192, 105060
- Huang, Y., Gladman, B., Beaudoin, M., & Zhang, K. 2022, ApJL, 938, L23
- Hunter, J. D. 2007, Computing In Science & Engineering, 9, 90
- Mamajek, E. 2017, Research Notes of the American Astronomical Society, 1, 21
- Mamajek, E. E., Barenfeld, S. A., Ivanov, V. D., et al. 2015, The Astrophysical Journal Letters, 800, L17
- Millholland, S. & Laughlin, G. 2017, The Astronomical Journal, 153, 91
- 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
- National Academies. 2021, Pathways to Discovery in Astronomy and Astrophysics for the 2020s (2021), <https://nap.nationalacademies.org/catalog/26141/pathways-to-discovery-in-astronomy-and-astrophysics-for-the-2020s>, 73
accessed: 2022-05-12
- Opik, E. J. 1950, Irish Astronomical Journal, 1, 80
- Peña-Asensio, E., Trigo-Rodríguez, J. M., & Rimola, A. 2022, AJ, 164, 76
- Pérez, F. & Granger, B. E. 2007, Computing in Science and Engineering, 9, 21
- Scholtz, J. & Unwin, J. 2020, PhRvL, 125, 051103
- Schönrich, R., Binney, J., & Dehnen, W. 2010, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 403, 1829
- Shankman, C., Kavelaars, J. J., Bannister, M. T., et al. 2017, The Astronomical Journal, 154, 50
- Siraj, A. & Loeb, A. 2022, ApJ, 939, 53
- Socas-Navarro, H. 2019, A&A, 626, A5
- Trujillo, C. A. & Sheppard, S. S. 2014, Nature, 507, 471
- Van Der Walt, S., Colbert, S. C., & Varoquaux, G. 2011, Computing in Science & Engineering, 13, 22
- Vaubailon, J. 2022, WGN, Journal of the International Meteor Organization, 50, 140
- Wiegert, P. A. 2014, Icarus, 242, 112
- Zbinden, O. & Saha, P. 2019, Research Notes of the AAS,