arXiv:2602.00802v1 [astro-ph.EP] 31 Jan 2026

克洛诺斯吞噬了第九行星及其衍生版本吗?

Lorenzo Iorio

意大利教育与功绩部意大利统一大道68号,
I-70125，巴里，意大利，电子邮箱:
lorenzo.iorio@libero.it

2026年2月3日

摘要

第九行星假说认为存在一个质量约为地球的5至8倍的天体，其轨道平面相对黄道面倾斜约十几至二十度，近日点距离则约为240至385天文单位。最近又出现了几个衍生版本：行星X和行星Y。前者可视为第九行星的缩小版，其物理参数和轨道参数都较小。后者的质量则介于水星和地球之间，半长轴在100至200天文单位之间。利用土星轨道进动的现实上限，可以推测它们的位置；对于第九行星而言，其位置似乎大致局限在远日点附近。行星Y可能只是一个水星大小的天体，距离至少约125天文单位；而行星X似乎可以排除。要验证目前的结论（这些结论只是提示行星星历若纳入此类摄动体，哪些可能被探测到），还需要通过对这类摄动体建模，专门开展数据约化。数十年后，一艘沿旅行者1号相同路线飞行的探测器将受到第九行星的摄动，偏移约20至40千米。

关键词——太阳系行星；土星；天体力学；轨道根数；摄动方法：轨道确定

1 引言

在过去约两个半世纪里，与自古以来已知的行星相比，太阳系中仅发现了两颗主要行星：天王星和海王星。自发现海王星以来，过去180年间再无新行星现身。另一个尚未发现的行星潜伏在太阳系遥远边缘的可能性引人遐想，它通常被称为行星X；这种设想甚至可以追溯到海王星被发现之前（Grosser，1964）。数十年来，这一设想以各种形式多次重现于天文学研究中，最近的版本主要关注行星X对柯伊伯带结构的影响。

在这方面，过去二十年来收集到的关于这一假说的各种观测线索于2016年汇聚，当时提出了如下假说：一个遥远、仍未被发现的大型行星天体，暂定名为Telisto[1]或第九行星（第九行星），可能潜伏在我们太阳系的遥远外围，该假说由Trujillo 和 Sheppard （2014年）；Sheppard 和 Trujillo （2016年），并在更具说服力的层面上由Batygin 和 Brown （2016a）提出。这样一个天体可以解释观测到的这些线

[1]这个名称由Iorio (2017年）提出，源自古希腊语中意为“最远、最偏远”的词语，因为据称它与太阳的距离很远。有关这一名称的最新讨论，参见Iorio (2025年）。

拱点线以及轨道角动量线的排列，涉及仅十余个沿偏心轨道运动、且未受到海王星强烈引力影响的遥远柯伊伯带天体（柯伊伯带天体）（Gladman 等人，2002年；Emel'yanenko 等人，2003年；Gomes 等人，2006年）。另一方面，Lawler 等人（2017）、Shankman 等人（2017）和 Napier 等人（2021）并未报告存在此种排列的证据。尽管如此，第九行星还能够解释某些高倾角海王星外天体（海王星外天体）的存在——其轨道平面几乎垂直于黄道面——以及一些表现出异常高倾角的逆行半人马小天体（Batygin 和 Brown，2016b；Köhne 和 Batygin，2020），还有太阳自转轴的倾斜（Gomes 等人，2017）。最近，就在海王星轨道以内运行的某些低倾角小行星的观测轨道性质而言，又发现了支持第九行星的新证据（Batygin 等人，2024年）。关于第九行星的近期综述，见（Batygin 等人，2019）。该设想的最新版本为这样一个假想的重摄动体给出的质量 m' 范围为4.9至8.4个地球质量 $m_\oplus$，半长轴 a' 高达 300 至 520 天文单位（ au ），相对黄道面的倾角 I' 为 $11-21°$，近日点距离 q' 处于 $240-385$ au 范围内（Brown 和 Batygin，2021），对应于偏心率 $e' \simeq 0.2-0.538$，尽管其中大多数，尤其是"最佳拟合情形"，已被 Fienga 等人（2016年）排除。未来几年发现第九行星的最佳机会，似乎是刚刚在智利投入使用的维拉·C·鲁宾天文台（Means，2024年）。

最近，又有研究提出了一颗遥远的行星候选天体。在关于太阳系遥远行星的漫长假说史中，它再次被命名为行星X（PX）（Siraj 等人，2025a），旨在解释 ϖ扩展样本中柯伊伯带天体的近日点经度聚集。就其假定的物理和轨道参数都系统性地小于第九行星而言，它可被视为第九行星的一种"缩小版"或"次要版本"，其参数为 $m' \simeq 3-5\,m_\oplus$，$a' \simeq 260-320$ 天文单位，$I' \simeq 2-12°$，$q' \simeq 150-270$ 天文单位。值得注意的是，第九行星与这一版本的行星X应当互不相容，因为它们都旨在解释柯伊伯带中部分相似的轨道聚集特征。

迄今提出的、旨在解释柯伊伯带结构某些特征的太阳系假想大型行星家族中，最新成员似乎是行星Y（PY）（Siraj 等人，2025b）。其质量 m' 介于水星和地球之间，轨道相对于黄道面的倾角 I' 不小于 $10°$，半长轴 a' 介于100至200天文单位之间，因此它可以解释遥远柯伊伯带平均平面的翘曲。

本文通过考察上述行星候选体不可避免地对太阳系已知行星产生的引力效应，及其对行星运动造成的一定程度的扰动，初步推测了这些候选体的位置。具体而言，本文采用土星的轨道，因为得益于卡西尼号探测器长达13年的探测任务（2004年至2017年），以及它传回的长期无线电跟踪数据，土星轨道近期已被确定到米级精度（Folkner等人，2015年；Di Ruscio等人，2020）（[2] Spilker，2019）。正如后文将要说明的那样，这些结果不应被视为实际约束，而只能作为一种提示：如果有意利用包含这些天体引力牵引作用的行星星历来持续搜寻它们，那么或许能够探测到它们。

本文结构如下。在第2节中，介绍并讨论由遥远的点状天体引起的行星摄动解析模型。第3 节解释如何将第2 节所得结果与当前对土星轨道进动的上限约束结合起来，以探索假想远距行星的参数空间。在第4节中，通过假定土星轨道受到第九行星及其近期衍生版本的扰动，利用其轨道对第九行星及其近期衍生版本进行了这项研究。若能改善我们目前对天王星轨道的有限认知，所带来的机遇ff将

[2]源自拉丁语专有名词*Cr˘on˘os*，¯ı，借自希腊语专有名词 Κρ'ονος，-ου, ὁ 指泰坦神族之一，他是乌拉诺斯与盖亚之子、瑞亚的丈夫，也是宙斯等人的父亲。他被认作罗马神萨图尔努斯。神话预言，他的一个儿子将取代他并夺走他的权力，于是他开始将孩子们一个接一个地吞下。

在第5节中进行了考察。第6节则通过采用一条类似旅行者1号的路径，仅为说明之用，探讨了使用专用深空探测器的可能性。第7 节总结研究结果并提ff出结论。

2 由遥远点状摄动体引起的轨道摄动

为便于说明，以下分析将采用广为人知的开普勒轨道根数，具体如下。半长轴 a 和偏心率 $0 \leq e < 1$ 分别决定椭圆的大小和形状，其中 $e = 0.0$ 对应圆轨道。通常会用近日点距离 q := a (1 – e) 代替 e。倾角 I 是轨道平面相对于所采用的参考平面的倾斜角 Π；在本例中，参考平面是 J2000.0历元的平均黄道面。升交点经度 Ω 是 Π 中的一个角度，从指向 J2000.0历元 ♈平均春分点的参考 x 方向起算，到 Π 与轨道平面的交线（称为交点线）上的升交点 ☊为止。升交点是指行星从下方穿过 Π 的位置。近心点幅角 ω 是轨道平面内的一个角度，从 ☊ 起算，到最近接近点为止。近日点经度 ϖ 定义为 $\varpi := \Omega + \omega$；因此它是一个折线角。最后，$\eta$ 是历元时的平近点角。在引力束缚二体系统中，这些量保持不变；但如果有其他力作用于原本不受扰动的双星系统，它们就会随时间逐渐变化；远处摄动体的作用正是这种情况。假设摄动体足够遥远，在受扰行星完成一次轨道周转期间，其位置变化可以忽略不计，那么利用标准摄动方法，可以解析计算由 m′ 产生的附加势在牛顿四极阶下，受扰行星开普勒轨道根数的长期变化率（Hogg 等，1991）。结果为

$$\left\langle \frac{da}{dt} \right\rangle = 0, \tag{1}$$

$$\left\langle \frac{de}{dt} \right\rangle = \frac{15e\mu' \sqrt{1-e^2}}{4r'^3 n_K} \left[-2\mathrm{Rl}\,\mathrm{Rm}\cos 2\omega + \left(\mathrm{Rl}^2 - \mathrm{Rm}^2\right)\sin 2\omega \right], \tag{2}$$

$$\left\langle \frac{dI}{dt} \right\rangle = \frac{3\mu' \mathrm{Rh}}{4r'^3 n_K \sqrt{1-e^2}} \left[\left(2+3e^2\right)\mathrm{Rl} + 5e^2 \left(\mathrm{Rl}\cos 2\omega + \mathrm{Rm}\sin 2\omega\right) \right], \tag{3}$$

$$\left\langle \frac{d\Omega}{dt} \right\rangle = \frac{3\mu' \csc I \mathrm{Rh}}{4r'^3 n_K \sqrt{1-e^2}} \left\{ \left(2+3e^2\right)\mathrm{Rm} + 5e^2 \left(-\mathrm{Rm}\cos 2\omega + \mathrm{Rl}\sin 2\omega\right) \right\}, \tag{4}$$

$$\begin{aligned} \left\langle \frac{d\omega}{dt} \right\rangle = & -\frac{3\mu'}{4r'^3 n_K \sqrt{1-e^2}} \left\{ \left(-1+e^2\right)\left[-2+3\left(\mathrm{Rl}^2+\mathrm{Rm}^2\right)\right] + \left(2+3e^2\right)\mathrm{Rh}\,\mathrm{Rm}\cot I \right. \\ & \left. -5\left[-\left(-1+e^2\right)\left(\mathrm{Rl}^2-\mathrm{Rm}^2\right) + e^2\mathrm{Rh}\,\mathrm{Rm}\cot I\right]\cos 2\omega + 5\mathrm{Rl}\left[2\mathrm{Rm}\left(-1+e^2\right) + e^2\mathrm{Rh}\cot I\right]\sin 2\omega \right\}, \end{aligned} \tag{5}$$

$$\left\langle \frac{d\eta}{dt} \right\rangle = -\frac{\mu'}{4r'^3 n_{\mathrm{K}}} \left\{ \left(7+3e^2\right)\left[-2+3\left(\mathtt{Rl}^2+\mathtt{Rm}^2\right)\right] + 15\left(1+e^2\right)\left(\mathtt{Rl}^2-\mathtt{Rm}^2\right)\cos 2\omega + \right.$$

$$\left. +30\left(1+e^2\right)\mathtt{Rl}\,\mathtt{Rm}\sin 2\omega \right\}. \tag{6}$$

由方程（4）–（5），近日点经度进动的方程为

$$\frac{d\varpi}{dt} = \frac{d\Omega}{dt} + \frac{d\omega}{dt} \tag{7}$$

可直接得出。

在方程 (1)–(6) 中，受扰行星的开普勒平均运动为 $n_{\mathrm{K}} := \sqrt{\mu_\odot / a^3}$, 其中$\mu_\odot := GM_\odot$是太阳的标准引力参数，由牛顿万有引力常数 G 与其质量 $M_\odot$ 的乘积给出。在方程 (1)–(6) 中，$\mu' := Gm'$ 是远距离摄动体的标准引力参数，而 r' 是其日心距离，定义为

$$r' = \frac{a'\left(1-e'^2\right)}{1+e'\cos f'}, \tag{8}$$

其中 e' 和 f' 分别是其偏心率和真近点角。此外，在方程 (1)–(6) 中，Rl、Rm、Rh 定义如下

$$\mathtt{Rl} := \hat{\boldsymbol{r}}' \cdot \hat{\boldsymbol{l}}, \tag{9}$$

$$\mathtt{Rm} := \hat{\boldsymbol{r}}' \cdot \hat{\boldsymbol{m}}, \tag{10}$$

$$\mathtt{Rh} := \hat{\boldsymbol{r}}' \cdot \hat{\boldsymbol{h}}, \tag{11}$$

其中

$$\hat{\boldsymbol{l}} = \{\cos\Omega, \sin\Omega, 0\}, \tag{12}$$

$$\hat{\boldsymbol{m}} = \{-\cos I \sin\Omega, \cos I \cos\Omega, \sin I\}, \tag{13}$$

$$\hat{\boldsymbol{h}} = \{\sin I \sin\Omega, -\sin I \cos\Omega, \cos I\}. \tag{14}$$

$\hat{}$ $\hat{}$单位向量 $\boldsymbol{l}$ 沿交点线指向升交点 ☊, $\boldsymbol{h}$ 则与轨道角动量方向一致。最后，$\hat{}\boldsymbol{m}$位于轨道平面内，其定义满足关系式 $\hat{}\boldsymbol{l} \times \hat{}\boldsymbol{m} = \hat{}\boldsymbol{h}$ 成立。位置矢量 $\hat{}\boldsymbol{r}'$ 的单位向量，其中 $\boldsymbol{r}'$ 为方程 (9)–(11) 中出现的远距离摄动体的位置矢量，可表示为

$$\hat{\boldsymbol{r}}' = \hat{\boldsymbol{l}}' \cos u' + \hat{\boldsymbol{m}}' \sin u', \tag{15}$$

其中单位向量

$$\hat{\boldsymbol{l}}' = \left\{\cos\Omega', \sin\Omega', 0\right\}, \tag{16}$$

$$\hat{\boldsymbol{m}}' = \left\{-\cos I' \sin\Omega', \cos I' \cos\Omega', \sin I'\right\} \tag{17}$$

张成其轨道平面，并且 $u' := \omega' + f'$ 是其纬 аргумент。在受扰行星的一个轨道周期 $P_K = 2\pi/n_K$内，方程（15）–（17）可视为常数；它们对时间 t 的依赖基本上通过 f'体现。

3 利用受扰行星的轨道进动约束远距离摄动体的位置

设 κ 为太阳系某颗已知大行星的任一开普勒轨道根数。相对于用于生成行星星历的软件中所建模的标准动力学，该轨道根数在所考虑行星的一个轨道周转上平均后的任何反常变化率，称为 $\Delta\dot{\kappa}$。此外，设$\sigma_{\dot{\kappa}}$ 为在某一时间跨度内确定的 κ变化率不确定度的观测推断量度。由于迄今尚未测定出任何在统计显著水平上异于零的长期变化 $\Delta\dot{\kappa}$，因此可以写出

$$|\Delta\dot{\kappa}| \leq \sigma_{\dot{\kappa}} \tag{18}$$

对它们全部成立。

目前，关于不确定度 $\sigma_{\dot{\kappa}}$ 在a、e、I、Ω、ϖ的长期变化率方面，对太阳系所有已知行星以及冥王星的最新评估可追溯至2019年（Iorio，2019）。它们是根据已发表的、由Pitjeva和Pitjev（2018）利用EPM2017星历确定的太阳系行星非奇异轨道根数的形式统计误差计算得出的，该星历属于星历[3] 行星与月球（EPM）系列，由俄罗斯科学院（RAS）应用天文学研究所（IAA）开发，且未对任何假想的远距离行星进行建模。

原则上，通过直接将 $\Delta\dot{\kappa}$ 与假定的远距离摄动体作用下行星开普勒轨道根数长期变化率的解析计算结果相对应，并将其视为f', Ω', ω'的函数，对于a', e', I'的任意给定值，都可以初步了解参数空间中与其位置相关的那部分区域。由于所有轨道根数的不确定度均已知（Iorio，2019），因此可以通过要求土星的所有变化率同时满足方程（18）的条件，得到更严格的结果。选择环状气态巨行星是因为，尽管天王星、海王星和冥王星距离太阳远得多，原则上对假想的脱离行星摄动体更为敏感，但如第5节所示，它们的轨道进动不确定度远高于土星。后者列于表1中。可以认为这些数值并非

表1：土星偏心率$^{-1}$、倾角e、升交点经度I和升交点经度Ω 以及近日点经度 ϖ 长期变化率的形式不确定度，单位为每世纪毫角秒（mas cty根据Iorio（2019），依据Pitjeva和Pitjev表3（2018）表1。

$\sigma_{\dot{e}}$	$\sigma_{\dot{I}}$	$\sigma_{\dot{\Omega}}$	$\sigma_{\dot{\varpi}}$
0.0023	0.063	1.806	0.067

[3]迄今为止，除EPM系列外，最知名的行星星历包括美国国家航空航天局（NASA）喷气推进实验室（JPL）编制的“发展星历”（DE/LE）系列行星和月球星历，以及天体力学与历算研究所（IMCCE，现已更名）编制的巴黎天文台行星数值积分器（INPOP）系列行星星历。

与土星相当现实的精度相去甚远。原因如下。首先，近日点的不确定度可以转换为约为[4] $\sigma_r \simeq ae\sigma_{\Delta\varpi}$的线性精度。表1最后一列中的 $\sigma_{\dot{\varpi}}$ 值意味着，13年内的偏差为 $\sigma_r \simeq 3.4$米，这与已发表的基于卡西尼号数据的轨道精度相符（Di Ruscio等人，2020；Park等人，2021）；具体而言，Park等人（2021）的图11显示，在同一时间跨度内，卡西尼测距数据相对于星历DE440的均方根（rms）残差约为3米。借助表1中的 σ_j, σ_Ω，还可以估算土星轨道法向上的线性精度，在同一时间跨度内约为180米。此外，对于土星而言，0.067 mas cty^{-1} 对应于参数化后牛顿（PPN）参数 β 和 γ 约为 5×10^{-3} 的不确定度，而广义相对论进动正是用这两个参数表示的

$$\dot{\varpi}_{\rm GR} = \left(\frac{2+2\gamma-\beta}{3}\right)\frac{3n_{\rm K}\mu}{c^2 a\,(1-e^2)}, \tag{19}$$

其中 c 是真空光速，这与不同星历之间的差异相符 s
对于土星日心距离而言（Fienga 等人，2021）。不过，Pitjeva和Pitjev（2018）提醒，实际不确定度可能大一个数量级。还需谨慎，因为更精确的处理方法需要使用专门编制的星历，并明确对假设的远距离摄动体进行建模，如 Fienga 等人（2016）、Holman 和 Payne（2016a、b）及 Fienga 等人（2020）所做的那样；另见（Gomes 等人，2023）。否则，如果其信号确实存在，原则上可能会被部分或完全消除，因为它会被吸收到数据处理程序中估计的待估参数数值里，从而导致约束过于乐观、过于严格（Fienga 和 Minazzoli，2024）。另一方面，即使对第九行星进行明确建模并采用特定方法处理数据，也仍可能遗漏某些其他动力学效应（无论其是否属于标准效应），或对其建模不充分。在这种情况下，这些特定星历中估计的参数仍可能受到其他未建模或建模不充分的力的偏置。确实，必须牢记，始终需要选择要估计的参数。还应指出，世界各地的大多数研究人员都广泛采用此处所用的方法来对许多非标准动力学效应施加约束，例如各种修正引力模型所预言的效应。考虑到星历的编制是一项极其繁重且耗时的工作，只能由高度专业的科学家完成，而他们并非总是（甚至可能从不）关注各种假设的奇异效应，因此不可能认为针对每一种此类效应，都可以每次重新处理数十年的观测数据，并专门对所关注的动力学效应进行建模和估计。无论如何，在先前的一项分析中（Iorio，2017），本方法并未给出约束，这与通过将第九行星纳入动力学力模型、重新处理数据记录所得出的约束形成对照（Fienga 等人，2016）。

4 关于行星Y、行星X和第九行星的暂定约束

同时要求远距离摄动体引起的所有土星轨道根数变化率的绝对值均小于表1中列出的形式不确定度。在PY的情况下，结果表明，在 $\{f_{\rm Y}、\Omega_{\rm Y}、\omega_{\rm Y}\}$ 参数空间中，无论是地球质量天体，还是PY假说为其设想的轨道特征的水星大小天体，都完全不存在允许区域。

如果将表 $\sigma_{\dot{\kappa}}$ 1中的不确定度保守地放大十倍，那么只有$m_{\rm Y} = m_{☿}$、$a_{\rm Y} \gtrsim 125$ au这一情形不会被排除。在 $\{f_{\rm Y}、\Omega_{\rm Y}、\omega_{\rm Y}\}$ 参数

[4]在这里，忽略偏心率误差的影响，因为它比近日点误差的影响小约30倍。

空间范围会随着行星距离的增加而扩大，如图1所示。在生成这些结果时，合理地假设偏心率（$e_Y = 0.2$）取中等值。事实上，如果偏心率极高，就会导致海王星外天体出现一种与 PX/P9 造成的聚集不同的近日点聚集，但观测并未发现这种现象。另一方面，考虑到 PY 假定的形成过程，它不太可能具有完全的圆轨道[5] (Siraj 等人，2025b)。

土星轨道进动的综合结果完全排除了 PX 情景，即使将表1 中列出的形式不确定度放大 10 倍也是如此。

就第九行星而言，它主要可能存在于远日点附近，如采用表1中重新缩放后的数值所得的图2（$m_9 = 5m_\oplus$）和图3（$m_9 = 8.4\ m_\oplus$）所示。特别是，对于一个质量为 5 地球质量的天体，当 $a_9 = 520$au 时，存在允许区域。当 $e_9 = 0.538$ 时，Ω_9 和 ω_9 几乎可以取从 $0°$ 到 $360°$ 之间的任意值；而当 $e_9 = 0.259$ 时，它们在整个角度范围内似乎受到更多限制，在 $\{f_9, \Omega 9, \omega_9\}$ 参数空间中分布于彼此分离的“孤岛”；两种情况下，f_9 大致都处于 $140° - 220°$范围内。质量最大的第九行星版本（$m_9 = 8.4\ m_\oplus$）似乎仅限于 $a_9 = 520$au、$e_9 = 0.538$。在这种情况下，参数空间中只有彼此分离良好的允许区域，对应于整个角度范围内少数几个 Ω_9 和 ω_9 取值；真近点角 f_9 的范围则更窄，约为 $160° - 200°$。图4展示了参数空间 $\{r9, \alpha_9, \delta_9\}$ 中的允许区域，其中 r_9 是第九行星的日心距离，而 α_9, δ_9 分别是其赤经（RA）和赤纬（decl.）。根据 Brown 和 Batygin （2021），赤经不受限制，而赤纬范围为 $-12°$ 至 $12°$。相比之下，Holman 和 Payne（2016b）得到 $20° \leq \alpha_9 \leq 60°$，$-35° \leq \delta_9 \leq +5°$。至于 Brown 和 Batygin（2021）设想的最大日心距离，$a_9 = 520$au 和 $q_9 = 240$au 对应的远日点距离可高达 $Q_9 = 800$au。值得注意的是，在 Brown 和 Batygin（2021）给出的预期赤纬区间内，质量较小的第九行星版本只有在赤经取值范围很窄时，才可能位于约 560 au 以外；对于大多数赤经取值，其距离则不小于约 600 au。相比之下，质量为 $8.4\ m_\oplus$ 的天体，其赤经仅限于几个彼此分离的允许区间，而其日心距离不能小于约 670 au。如果考虑 Holman 和 Payne（2016b）给出的 α_9, δ_9 范围，那么 α_9 接近 $20°$ 时的允许区域通常比赤经取值较大的区域更广：其下限分别为 600 au（$m_9 = 4.9\ m_\oplus$）和 700 au（$m_9 = 8.4\ m_\oplus$）。不过，总体而言，这些区域仍然相当小。图4还展示了取消先前对 α_9, δ_9的限制后得到的允许区域。一般来说，赤纬绝对值最大的天体可能存在于更近的日心距离处，甚至小于 400 au。这些发现总体上并不与 Fienga 等人（2020）的结论相矛盾；他们使用经过专门修改、同样纳入第九行星引力作用的 INPOP19a 星历表版本得出了这些结论，Iorio（2017）的研究也是如此。事实上，Fienga 等人（2020）得出结论，一个质量为 5 地球质量的天体距离不能小于 500 au。此外，他们无法指出第九行星的精确位置，只给出了允许区域；在这些区域内，第九行星的存在与 INPOP 行星星历的精度相容。Holman 和 Payne（2016b）也未能确定第九行星在太空中的唯一位置，只给出了一组 $\{\alpha_9, \delta_9\}$参数空间中的允许区域。

5 如果天王星的轨道能像土星的轨道一样被精确测定?

原则上，天王星距离太阳20天文单位，轨道周期长达84年，因此像迄今所考虑的那类遥远行星天体对天王星轨道的影响会比对土星更大。不幸的是，目前我们只能依靠对这颗蓝色行星进行的天体测量光学观测，此外只有旅行者2号探测器在1986年飞掠期间采集的极少量无线电测量数据（受Stone

[5]它就会　在遥远的过去被其他行星胚胎从已知行星所在的区域散射出去去，这　　会使 PY 留下一些残余偏心率。

和 Miner，1986年；Stone，1987年）。因此，如表2所示，目前对其轨道变化率的约束非常有限。这些很大的形式误差，很可能至少要按某个因子进行重新缩放

表2：根据[-1]，天王星偏心率的长期变化率（e）、倾角（I）、升交点经度（Ω）和近日点经度（ϖ）的形式不确定度，单位为每世纪毫角秒（mas cty）。该数据依据Iorio (2019)表1，并以Pitjeva和Pitjev(2018)的表3为基础。

$\sigma_{\dot{e}}$	$\sigma_{\dot{I}}$	$\sigma_{\dot{\Omega}}$	$\sigma_{\dot{\varpi}}$
2.732	3.827	269.177	47.998

为十倍，这使得重复第4 节的分析毫无意义，因为结果表明，先前考虑的行星候选体所对应的整个参数空间都将是允许的。只需要指出，$\sigma_{\dot{\varpi}}$ 表2 中的形式线性不确定度高达 $\sigma_r \simeq ae\,\sigma_{\dot{\varpi}} \simeq 32$千米/世纪。若保守地将其放大十倍，则为 $\sigma_r \lesssim 320$千米，这与最新评估的天王星轨道不确定度基本一致（Jacobson和Park，2025年）；该评估是通过利用盖亚星表对天体测量数据进行归算得出的。

相反，如果能够以与土星相同的精度确定天王星的轨道，情况将发生巨大变化。事实上，倘若有一天能够将天王星轨道变化率的实际误差降至[6] 表 2中所列数值的百分之一，那么，如果届时仍未发现统计上显著异于零的异常轨道特征，就有可能彻底排除所有行星候选体的存在。也就是说，即使测量精度有了如此显著的提升，天王星的异常轨道进动在统计上仍与零相容，那么重复对土星所做的分析便会发现：对于迄今提出的各种行星候选体，参数空间中将完全不存在允许区域。例如，质量为 5 个地球质量的天体，其参数空间中只有当$a' \gtrsim 750$ au 时，才会开始出现允许区域；而当$m' = 8.4m_\oplus$时，摄动体的参数空间中则不会有$a' \lesssim 950$au 的容身之处。

鉴于多年来人们一直高度关注一项前往太阳系第七颗行星的行星际自动化任务，改善我们对天王星轨道的认识这一前景或许并非完全不切实际（Arridge et al.,2012,2014; Turrini et al., 2014; Bocanegra-Bahamón et al., 2015; Mansell et al., 2017; Mousis et al., 2018; Xu et al., 2018; Hofstadter et al., 2019; Fletcher et al., 2020; Gibney, 2020; Jarmak et al., 2020; Sayanagi et al., 2020; Venkatapathy et al., 2020; Guillot, 2022; Saikia et al., 2021; Cohen et al., 2022; Witze, 2022; Bucko et al., 2023; Girija, 2023; Iorio et al., 2023; Mandt, 2023; Zwick et al., 2025年）。

或许有人会想，鉴于此前引用的部分关于天王星的研究也将太阳系第八颗行星列为研究目标之一，此外还有专门研究海王星及其卫星海卫一的工作，那么同样的考量是否也适用于海王星（Moore 等人，2021；Rymer 等人，2021）。实际上，很难给出肯定的回答，因为海王星的轨道周期长达165年。这意味着，始于1913年的现代观测记录目前尚未覆盖其完整的一次轨道周转，至少还需要50年才能做到。此外，即便有轨道飞行任务真的抵达海王星，若要使其观测结果对该行星的轨道确定产生显著影响，探测器也必须连续多年传回数据。因此，希望有朝一日能够使用按其轨道周期取平均的海王星轨道进动，看来并不现实。冥王星的情况更是如此。

[6]这相当于天王星轨道在大约十年内存在约 32 米的线性不确定度。

6 专用深空探测器能做些什么

1977年发射的旅行者1号探测器如今距太阳约170个天文单位（AU），仍在传回数据。它正以约[7] 3.6 AUyr^{-1}的速度逃离太阳系，位于黄道面以北35度。因此，即便只是想到可以利用其遥测数据来约束此前考察过的行星候选体的位置，也是一种难以抗拒、且至少原则上完全有理有据的设想；尤其是考虑到其测距精度似乎可能远优于[8] 1千米，2010年时或许已达到约10米的量级。图5 展示了旅行者1号的距离 ρ、 α 和 δ 时间序列之差。这些数据是通过数值积分其运动方程得到的，分别对应于纳入和不纳入第九行星的情况；时间跨度从1986年3月开始——此时，在六年前飞掠土星后，探测器已驶入星际航线——一直延续至今。第九行星的质量取其预期最小值和最大值，其轨道参数则大致对应于第4节中根据土星轨道效应推得的允许区域。可以看出，尽管39年后第九行星引起的天体测量特征仍处于毫角秒量级，但距离偏移却可能达到显著数值，最高约为 $20-40$ 千米。同样值得一提的是，2010年时偏移量也曾达到 $\Delta\rho \simeq 5-10$ 千米。考虑到这些较大数值对应的是土星轨道所允许的第九行星轨道构型，它们无疑表明，旅行者1号在约束这颗假想行星方面具有潜在价值。

遗憾的是，出于下文所述的若干原因，这种理想而诱人的可能性应当被视为不可行[9]。通常，由于材料气体逸出或热辐射等非引力效应导致的行星际航天器加速度估算不确定度，可能远大于由遥远的候选行星（例如第九行星）引起的不确定度；后者约为$\simeq 10^{-13}\,\mathrm{ms}^{-2}$ 或更小。例如，先驱者10号航天器因其放射性同位素热电机（RTG）的热辐射而产生的加速度，其估算不确定度约为 $2\times10^{-10}\,\mathrm{ms}^{-2}$ (Turyshev等人，2012）。先驱者10号的热加速度尤其容易估算，因为它是一艘远离太阳的自旋航天器。相比之下，旅行者号航天器并非自旋稳定，而是使用推进器控制姿态；推进器以不平衡模式点火，因此姿态控制所用推进器造成的未知加速度要大得多（Campbell等人，1983）。旅行者号所用放射性同位素热电机产生的热辐射所导致的加速度不确定度，可能大于先驱者10号所受效应的不确定度，但无论如何都远小于推进器导致的加速度不确定度。

不过，如果将图 5 视为第九行星在例如 39年内对一台假想的自旋稳定深空探测器所产生影响的代表性示例，它仍可能具有一定的参考价值。该探测器配备了精确的测距设备，多年来持续进行发射，并且仅为说明之便，沿着与旅行者1号相同的路径运行。这个设想并非完全脱离实际，因为十年前曾有人提出过类似方案（Buscaino 等人，2015年），利用位于100天文单位处的航天器检验各种红外（IR）修正引力模型，包括汤川型模型。然而在该方案中，柯伊伯带天体的影响被视为主要干扰源；为将其降至最低，研究人员选择了垂直于黄道面的轨迹。

[7]参见 http://voyager.jpl.nasa.gov/mission/fastfacts.html 网页。查阅于2025年12月13日。 [8]参见 http://boards.straightdope.com/sdmb/showthread.php?t=548525网络页面。查阅于2025年12月13日。[9] W.M. Folkner，私人通信，2014年7月

7 总结与结论

在偏心率和倾角较小的极限情况下，对受远处点状大质量天体摄动的二体系统，其开普勒轨道根数的长期变化率进行了牛顿潮汐四极阶的解析计算。当轨道以黄道面为参照时，这一近似对于太阳系的主要行星是有效的。为消除这一限制，研究人员还针对倾角的任意取值重复了计算。所得表达式是在假定远处摄动体的位置在一个轨道周期内基本不发生变化的前提下，对受扰行星的一个轨道周期进行平均得到的。

结合文献中给出的土星观测确定的轨道变化率的当前不确定度，这些结果被用于初步约束近年来提出的某些假想行星候选体的参数空间；这些候选体旨在解释柯伊伯带中据称观测到的某些特征。后者所设想的情景通常认为，存在一颗尚未发现的行星，其质量预计从约一个水星质量到 8.4 个地球质量不等，距离太阳数百天文单位，轨道平面相对黄道面倾斜约十几或二十几度。原则上，不能直接将此类假定天体引起轨道效应的解析公式，与通过将不完整的动力学力模型（未纳入上述摄动体）拟合到数据记录而得到的拟合后残差量进行比较；而本研究正是采用了这种做法。这是因为在数据处理程序中，若所寻找的信号确实存在，它可能会在某种程度上被吸收到待估参数的确定值中，例如行星的状态向量，从而可能导致约束不切实际地严格。事实上，用于确定所采用不确定度的行星星历并未对本文考虑的任何假想天体进行建模。尽管如此，为了应对这一潜在问题，我们将土星轨道变化率的形式误差放大了十倍。此外，本研究结果与其他采用上述方法处理真实观测数据的研究并不矛盾。

结果表明，尽管最新版本的行星X暂时已被排除，但对于水星大小的行星Y，只有当其半长轴a_{Y} 为125天文单位时，参数空间中才存在几个彼此分离且相当狭窄的允许区域；随着半长轴增大至其预测最大值200天文单位，这些区域趋于扩展并相互合并。在所有这类情况下，其真近点角f_{Y} 的允许取值范围大致都对应于远日点附近。相比之下，质量为一个地球质量的行星Y则已被排除。至于第九行星的最新预测，它尚未被排除。对于质量为4.9地球质量的天体，只有当其半长轴a_9 高达520天文单位时，才会出现允许区域。当偏心率e_9 约为0.2时，这些区域彼此分离得更远、范围也更狭窄；而当$e_9 \simeq 0.5$时，区域则更宽。在这两种情况下，真近点角f_9 都被限制在 140° 与 220°之间，因此可能指向远日点附近的位置。质量为8.4地球质量的天体，其参数空间中仅在$a_9 = 520$天文单位、$e_9 \simeq 0.5$时存在允许区域；这些区域彼此分离且相当狭窄，f_9 被限制在约 160° – 200°之内。在所有这类情况下，第九行星的近心点幅角 ω_9 和升交点经度Ω_9 似乎都受到约束，分布在从 0° 到 360°的宽窄不一、彼此分离的允许区域内。采用基于国际天球参考架（ICRF）和常用天体测量角的另一种参数空间后，结果表明，对于质量分别为4.9和8.4地球质量的天体，只有当日心距离r_9 分别高达600和700天文单位时，才会出现允许区域。

通过一项以这颗气态巨行为目标的潜在行星际任务，提高天王星的轨道精度，将具有重大意义。目前，由于缺乏足够长时间的高精度无线电技术观测记录，天王星的轨道精度相当有限。事实上，如果能将其轨道进动的精度提高到土星的水平，即比目前提高约 100 倍，那么对于一个地球质量为 5 和 8 的假想天体，

如果没有记录到任何异常信号，其允许区域的起始距离将分别不小于 750 和 950 天文单位。

假设一艘深空航天器沿着与旅行者1号相同的路径飞行，那么大约40年后，第九行星会使其轨迹偏移数十公里，这使得实施这一项目颇具吸引力。

总之，严格来说，这里得到的允许区域不能视为对所研究行星候选体位置的实际约束，因为这些区域最终是根据未对任何额外行星进行建模而生成的行星星历推断出来的。相反，更恰当地说，它们提示了若行星星历确实将这些天体纳入拟合观测数据的动力学模型中，哪些信号可能可以探测到。尽管如此，这些区域仍然值得信赖：一方面，用于得到它们的形式误差经过了保守处理，放大了十倍；另一方面，就第九行星而言，这些区域与其他研究者明确对其进行建模后独立得到的约束大体一致。毕竟，勒威耶曾用纯牛顿动力学模型拟合水星的观测数据，但当时异常的近日点进动依然存在，并未被吸收到估计参数中的广义相对论信号所消除。

数据可用性

本研究未生成或分析任何新数据。

利益冲突声明

本人声明不存在利益冲突。

经费

本研究未获得外部资助。

致谢

我感谢 Amir Siraj 和 William M. Folkner，他们进行了重要的讨论并提供了相关信息，对改进本文作出了显著贡献。

参考文献

C. S. Arridge、C. B. Agnor、N. André、K. H. Baines、L. N. Fletcher、D. Gautier、M. D. Hofstadter、G. H. Jones、L. Lamy、Y. Langevin、O. Mousis、N. Nettelmann、C. T. Russell、T. Stallard、M. S. Tiscareno、G. Tobie、A. Bacon、C. Chaloner、M. Guest、S. Kemble、L. Peacocke、N. Achilleos、T. P. Andert、D. Banfield、S. Barabash、M. Barthelemy、C. Bertucci、P. Brandt、B. Cecconi、S. Chakrabarti、A. F. Cheng、U. Christensen、A. Christou、A. J. Coates、G. Collinson、J. F. Cooper、R. Courtin、M. K. Dougherty、R. W. Ebert、M. Entradas、A. N. Fazakerley、J. J. Fortney、M. Galand、J. Gustin、M. Hed- man、R. Helled、P. Henri、S. Hess、R. Holme、Ö. Karatekin、N. Krupp、J. Leisner、J. Martin-Torres、A. Masters、H. Melin、S. Miller、I.Müller-Wodarg、B. Noyelles、C. Paranicas、I. de Pater、M. Pätzold、R. Prangé、E. Quémerais、E. Roussos、A. M. Rymer、A. Sánchez-Lavega、J. Saur、K. M. Sayanagi、P. Schenk、G. Schubert、N. Sergis、F. Sohl、E. C. Sittler、N. A. Teanby、S. Tellmann、E. P. Turtle、

S. Vinatier、J.-E. Wahlund 和 P. Zarka。天王星探路者：探索……的起源与演化冰巨星。《Exp. Astron.》，33:753–791，2012年。doi: 10.1007/s10686-011-9251-4。C. S. Arridge、N. Achilleos、J. Agarwal、C. B. Agnor、R. Ambrosi、N. André、S. V. Badman、K. Baines、D. Banfield、M. Barthélémy、M. M. Bisi、J. Blum、T. Bocanegra-Bahamon、B. Bonfond、C. Bracken、P. Brandt、C. Briand、C. Briois、S. Brooks、J. Castillo-Rogez、T. Cavalié、B. Christophe、A. J. Coates、G. Collinson、J. F. Cooper、M. Costa-Sitja、R. Courtin、I. A. Daglis、I. de Pater、M. Desai、D. Dirkx、M. K. Dougherty、R. W. Ebert、G. Filacchione、L. N. Fletcher、J. Fortney、I. Gerth、D. Grassi、D. Gro- dent、E. Grün、J. Gustin、M. Hedman、R. Helled、P. Henri、S. Hess、J. K. Hillier、M. H. Hofstadter、R. Holme、M. Horanyi、G. Hospodarsky、S. Hsu、P. Irwin、C. M. Jackman、O. Karatekin、S. Kempf、E. Khalisi、K. Konstantinidis、H. Krüger、W. S. Kurth、C. Labrianidis、V. Lainey、L. L. Lamy、M. Laneuville、D. Lucchesi、A. Luntzer、J. MacArthur、A. Maier、A. Masters、S. McKenna-Lawlor、H. Melin、A. Milillo、G. Moragas-Klostermeyer、A. Morschhauser、J. I. Moses、O. Mousis、N. Net- telmann、F. M. Neubauer、T. Nordheim、B. Noyelles、G. S. Orton、M. Owens、R. Peron、C. Plainaki、F. Postberg、N. Rambaux、K. Retherford、S. Reynaud、E. Roussos、C. T. Russell、A. M. Rymer、R. Sal- lantin、A. Sánchez-Lavega、O. Santolik、J. Saur、K. M. Sayanagi、P. Schenk、J. Schubert、N. Sergis、E. C. Sittler、A. Smith、F. Spahn、R. Srama、T. Stallard、V. Sterken、Z. Ster"Nov"sky、M. Tiscareno、G. Tobie、F. Tosi、M. Trieloff、D. Turrini、E. P. Turtle、S. Vinatier、R. Wilson和P. Zarka。《天王星轨道任务的科学价值：探索冰巨星的起源与演化》。《Planet. Space Sci.》，104:122–140，2014年。doi: 10.1016/j.pss.2014.08.009。K. Batygin和M. E. Brown。《太阳系中存在一颗遥远巨行星的证据》。《天文学杂志》，151 (2):22，2016a。doi: 10.3847/0004-6256/151/2/22。K. Batygin和M. E. Brown。《第九行星产生高倾角海王星外天体》。《Astrophys. J. Lett.》，833:L3，2016b。doi: 10.3847/2041-8205/833/1/L3。K. Batygin、F. C. Adams、M. E. Brown和J. C. Becker。《第九行星假说》。《Phys. Rep.》，805: 1–53，2019。doi: 10.1016/j.physrep.2019.01.009。K. Batygin、A. Morbidelli、M. E. Brown和D. Nesvorný。《第九行星产生低倾角、穿越海王星轨道的海王星外天体》。《Astrophys. J. Lett.》，966:L8，2024年。doi: 10.3847/ 2041-8213/ad3cd2。T. Bocanegra-Bahamón、C. Bracken、M. Costa Sitjà、D. Dirkx、I. Gerth、K. Konstantinidis、C. Labri- anidis、M. Laneuville、A. Luntzer、J. L. MacArthur、A. Maier、A. Morschhauser、T. A. Nordheim、R. Sallantin和R. Tlustos。《MUSE——天王星系统探测任务：揭示冰巨星的演化与形成》。《空间研究进展》，55:2190–2216，2015年。doi: 10.1016/j.asr.2015.01.037。M. E. Brown和K. Batygin。《第九行星的轨道》。《天文学杂志》，162:219，2021。doi: 10.3847/ 1538-3881/ac2056。J. Bucko、D. Soyuer和L. Zwick。《利用未来天王星任务定位第九行星的前景》。《皇家天文学会月刊》，524:L32–L37，2023年。doi: 10.1093/mnrasl/slad067。B. Buscaino、D. DeBra、P. W. Graham、G. Gratta和T. D. Wiser。《检验延伸至100天文单位的长距离引力修正》。《物理评论D辑》，92:104048，2015年。doi: 10.1103/PhysRevD.92. 104048。J. K. Campbell、S. P. Synnott和G. J. Bierman。《旅行者号在木星的轨道确定》。《IEEE Trans- actions on Automatic Control》，28:256–268，1983年。doi: 10.1109/TAC.1983.1103223。

I. J. Cohen、C. Beddingfield、R. Chancia、G. DiBraccio、M. Hedman、S. MacKenzie、B. Mauk、K. M. Sayanagi、K. M. Soderlund、E. Turtle、C. Ahrens、C. S. Arridge、S. M. Brooks、E. Bunce、S. Charnoz、A. Coustenis、R. A. Dillman、S. Dutta、L. N. Fletcher、R. Harbison、R. Helled、R. Holme、L. Jozwiak、Y. Kasaba、P. Kollmann、S. Luszcz-Cook、K. Mandt、O. Mousis、A. Mura、G. Murakami、M. Parisi、A. Rymer、S. Stanley、K. Stephan、R. J Jr. Vervack、M. H. Wong和P. Wurz。《新前沿级天王星轨道器任务的立项依据：通过中型任务研究这颗尚未充分探索的独特星球及其系统》。《行星科学杂志》，3:58，2022年。doi: 10.3847/PSJ/ac5113。A. Di Ruscio、A. Fienga、D. Durante、L. Iess、J. Laskar和M. Gastineau。《分析卡西尼号无线电跟踪数据以构建INPOP19a：柯伊伯带质量的新估计》。《天文学与天体物理学》，640:A7，2020。doi: 10.1051/0004-6361/202037920。V. V. Emel'yanenko、D. J. Asher和M. E. Bailey。《高偏心率轨道海王星外天体的新类别》。《皇家天文学会月刊》，338:443–451，2003年。doi: 10.1046/j.1365-8711.2003. 06066.x。A. Fienga和O. Minazzoli。《利用行星星历检验引力理论》。《相对论生活评论》，27:1，2024年。doi: 10.1007/s41114-023-00047-0。A. Fienga、J. Laskar、H. Manche和M. Gastineau。《根据卡西尼号数据得出的可能第九行星位置约束》。《天文学与天体物理学》，587:L8，2016年。doi: 10.1051/0004-6361/201628227。A. Fienga、A. Di Ruscio、L. Bernus等。《利用INPOP19a行星星历获得的P9位置新约束》。《天文学与天体物理学》，640:A6，2020年。doi: 10.1051/0004-6361/202037919。A. Fienga、P. Deram、A. Di Ruscio等。《INPOP21a行星星历》。《天体力学研究所科学与技术笔记》S110，天体力学与历表计算研究所，2021年。L. N. Fletcher、R. Helled、E. Roussos、G. Jones、S. Charnoz、N. André、D. Andrews、M. Bannister、E. Bunce、T. Cavalié、F. Ferri、J. Fortney、D. Grassi、L. Griton、P. Hartogh、R. Hueso、Y. Kaspi、L. Lamy、A. Masters、H. Melin、J. Moses、O. Mousis、N. Nettleman、C. Plainaki、J. Schmidt、A. Simon、G. Tobie、P. Tortora、F. Tosi和D. Turrini。《冰巨星系统：天王星和海王星轨道探测任务的科学潜力》。《行星与空间科学》，191:105030，2020年。doi: 10.1016/j.pss.2020.105030。W. M. Folkner、R. A. Jacobson和D. Jones。《利用卡西尼号和朱诺号任务改进土星与木星的轨道》。载于《国际天文学联合会大会》，第29卷，第2244873页，2015年。E. Gibney。《目的地：天王星！难得的探访冰巨星机会令科学家振奋》。《自然》，579:17，2020年。doi: 10.1038/d41586-020-00619-y。A. P. Girija。《采用气动捕获的旗舰级天王星轨道器与探测器任务概念》。《宇航学报》，202:104–118，2023年。doi: 10.1016/j.actaastro.2022.10.005。B. Gladman、M. Holman、T. Grav、J. Kavelaars、P. Nicholson、K. Aksnes和J.-M. Petit。《扩展散射盘的证据》。《伊卡洛斯》，157:269–279，2002年。doi: 10.1006/icar.2002.6860。D. C. H. Gomes、Z. Murray、R. C. H. Gomes、M. J. Holman和G. M. Bernstein。《能否从当代对已知大行星和小行星的跟踪中探测到行星X的引力效应？》《行星科学杂志》，4:66，2023年。doi: 10.3847/PSJ/acc7a2。

R. Gomes、R. Deienno和A. Morbidelli。行星系统相对于太阳赤道的倾角或许可由第九行星的存在来解释。《天文学杂志》，153:27，2017。doi: 10.3847/ 1538-3881/153/1/27。R. S. Gomes、J. J. Matese和J. J. Lissauer。一颗遥远的行星质量级太阳伴星可能产生了远距分离天体。《伊卡洛斯》，184:589–601，2006。doi: 10.1016/j.icarus.2006.05.026。M. Grosser。寻找海王星外行星。《伊西斯》，55(2):163–183，1964。doi: 10.1086/349825。T. Guillot。天王星和海王星是理解具有氢大气层的行星的关键。《实验天文学》，54:1027–1049，2022年。doi: 10.1007/s10686-021-09812-x。M. Hofstadter、A. Simon、S. Atreya、D. Banfield、J. J. Fortney、A. Hayes、M. Hedman、G. Hospodarsky、K. Mandt、A. Masters、M. Showalter、K. M. Soderlund、D. Turrini、E. Turtle、K. Reh、J. Elliott、N. Arora、A. Petropoulos以及冰巨星任务研究团队。天王星和海王星任务：为下一次行星科学十年调查所做的预先研究。《行星与空间科学》，177:104680，2019。doi: 10.1016/j.pss.2019.06.004。D. W. Hogg、G. D. Quinlan和S. Tremaine。太阳系中暗质量的动力学限制。《天文学杂志》，101:2274，1991。doi: 10.1086/115849。M. J. Holman和M. J. Payne。对第九行星的观测约束：冥王星及其他海王星外天体的天体测量。《天文学杂志》，152:80，2016年a。doi: 10.3847/0004-6256/152/4/80。M. J. Holman和M. J. Payne。对第九行星的观测约束：卡西尼号距离观测。《天文学杂志》，152:94，2016b。doi: 10.3847/0004-6256/152/4/94。L. Iorio。根据行星轨道动力学对太阳系中最近假设的新行星位置的初步约束。《天体物理学与空间科学》，362:11，2017。doi: 10.1007/s10509-016-2993-8。L. Iorio。利用最新EPM2017星历计算行星进动的不确定度及其在基础物理学及其他领域中的应用。《天文学杂志》，157:220，2019。doi: 10.3847/1538-3881/ab19bf。L. Iorio。为太阳系中一颗假想遥远行星命名的一项审慎提议。《宇宙》，11:405，2025年。doi: 10.3390/universe11120405。L. Iorio、A. P. Girija和D. Durante。献给天王星的一个EURO：椭圆天王星相对论轨道器任务。《皇家天文学会月刊》，523:3595–3614，2023年。doi: 10.1093/mnras/stad1446。R. A. Jacobson和R. S. Park。天王星及其卫星和行星环的轨道、天王星系统的引力场，以及天王星及其卫星极轴的取向。《天文学杂志》，169:65，2025年。doi: 10.3847/1538-3881/ad99d1。S. Jarmak、E. Leonard、A. Akins、E. Dahl、D. R. Cremons、S. Cofield、A. Curtis、C. Dong、E. T. Dunham、B. Journaux、D. Murakami、W. Ng、M. Piquette、A. Pradeepku"Mar" Girija、K. Rink、L. Schurmeier、N. Stein、N. Tallarida、M. Telus、L. Lowes、C. Budney和K. L. Mitchell。QUEST：一项新疆界天王星轨道器任务概念研究。《宇航学报》，170:6–26，2020。doi: 10.1016/j.actaastro. 2020.01.030。T. Köhne和K. Batygin。论逆行木星特洛伊天体的动力学起源及其与高倾角海王星外天体的联系。《天体力学与动力天文学》，132:44，2020。doi: 10.1007/s10569-020-09985-1。

S. M. Lawler、C. Shankman、N. Kaib、M. T. Bannister、B. Gladman和J. J. Kavelaars。散射盘上大质量遥远行星的观测特征。《天文学杂志》，153:33，2017。doi: 10.3847/ 1538-3881/153/1/33。K. E. Mandt。首个专用冰巨星任务。《科学》，379:640–642，2023年。doi: 10.1126/science. ade8446。J. Mansell、N. Kolencherry、K. Hughes、A. Arora、H. S. Chye、K. Coleman、J. Elliott、S. Fulton、N. Ho- bar、B. Libben、Y. Lu、J. Millane、A. Mudek、L. Podesta、J. Pouplin、E. Shibata、G. Smith、B. Tackett、T. Ukai、P. Witsberger和S. Saikia。Oceanus：一项探索土星和天王星的多航天器旗舰任务概念。《空间研究进展》，59:2407–2433，2017。doi: 10.1016/j.asr.2017.02.012。H. H. Means。第九行星近况如何？《今日物理》，77:22–23，2024年。doi: 10.1063/pt.rtmi.ithf。J. Moore、L. Spilker、J. Bowman、M. Cable、S. Edgington、A. Hendrix、M. Hofstadter、T. Hurford、K. Mandt、A. McEwen、C. Paty、L. Quick、A. Rymer、K. Sayanagi、B. Schmidt和T. Spilker。2023—2032年外行星探测战略：目标与优先事项。载于《美国天文学会通报》，第53卷，第371页，2021。doi: 10.3847/25c2cfeb.1f297498。O. Mousis、D. H. Atkinson、T. Cavalié、L. N. Fletcher、M. J. Amato、S. Aslam、F. Ferri、J. B. Renard、T. Spilker、E. Venkatapathy、P. Wurz、K. Aplin、A. Coustenis、M. Deleuil、M. Dobrijevic、T. Fouchet、T. Guillot、P. Hartogh、T. Hewagama、M. D. Hofstadter、V. Hue、R. Hueso、J. P. Lebreton、E. Lellouch、J. Moses、G. S. Orton、J. C. Pearl、A. Sánchez-Lavega、A. Simon、O. Venot、J. H. Waite、R. K. Achterberg、S. Atreya、F. Billebaud、M. Blanc、F. Borget、B. Brugger、S. Charnoz、T. Chiavassa、V. Cottini、L. d’Hendecourt、G. Danger、T. Encrenaz、N. J. P. Gorius、L. Jorda、B. Marty、R. Moreno、A. Morse、C. Nixon、K. Reh、T. Ronnet、F. X. Schmider、S. Sheridan、C. Sotin、P. Vernazza和G. L. Villanueva。天王星和海王星原位探测的科学依据。《行星与空间科学》，155: 12–40，2018。doi: 10.1016/j.pss.2017.10.005。K. J. Napier、D. W. Gerdes、Hsing Wen Lin、S. J. Hamilton、G. M. Bernstein、P. H. Bernardinelli、T. M. C. Abbott、M. Aguena、J. Annis、S. Avila、D. Bacon、E. Bertin、D. Brooks、D. L. Burke、A. Carnero Rosell、M. Carrasco Kind、J. Carretero、M. Costanzi、L. N. da Costa、J. De Vicente、H. T. Diehl、P. Doel、S. Everett、I. Ferrero、P. Fosalba、J. García-Bellido、D. Gruen、R. A. Gruendl、G. Gutierrez、D. L. Hollowood、K. Honscheid、B. Hoyle、D. J. James、S. Kent、K. Kuehn、N. Kuropatkin、M. A. G. Maia、F. Menanteau、R. Miquel、R. Morgan、A. Palmese、F. Paz-Chinchón、A. A. Plazas、E. Sanchez、V. Scarpine、S. Serrano、I. Sevilla-Noarbe、M. Smith、E. Suchyta、M. E. C. Swanson、C. To、A. R. Walker、R. D. Wilkinson以及暗能量巡天合作组。极端海王星外天体中不存在轨道聚集的证据。《行星科学杂志》，2:59，2021。doi: 10.3847/PSJ/abe53e。R. S. Park、W. M. Folkner、J. G. Williams和D. H. Boggs。JPL行星与月球星历表DE440和DE441。《天文学杂志》，161:105，2021。doi: 10.3847/1538-3881/abd414。E. V. Pitjeva和N. P. Pitjev。由行星和航天器运动得出的主小行星带与柯伊伯带质量。《天文学快报》，44:554–566，2018。doi: 10.1134/S1063773718090050。A. M. Rymer、K. D. Runyon、B. Clyde、J. I. Núñez、R. Nikoukar、K. M. Soderlund、K. Sayanagi、M. Hofstadter、L. C. Quick、A. S. Stern、T. Becker、M. Hedman、I. Cohen、F. Crary、J. J. Fortney、J. Vertesi、C. Hansen、I. de Pater、C. Paty、T. Spilker、T. Stallard、G. B. Hospodarsky、H. T. Smith、H. Wakeford、S. E. Moran、A. Annex、P. Schenk、M. Ozimek、J. Arrieta、R. L. McNutt、A. Masters、A. A. Simon、S. Ensor、C. T. Apland、J. Bruzzi、D. A. Patthoff、C. Scott、C. Campo、C. Krupiarz、C. J. Cochrane、C. Gantz、D. Rodriguez、D. Gallagher、D. Hurley、D. Crowley、E. Abel、E. Provornikova,

E. P. Turtle, G. Clark, J. Wilkes, J. Hunt, J. H. Roberts, J. Rehm, K. Murray, L. Wolfarth, L. N. Fletcher, L. Spilker, E. S. Martin, M. Parisi, M. Norkus, N. Izenberg, R. Stough, R. J. Vervack, K. Mandt, K. B. Stevenson, S. Kijewski, W. Cheng, J. D. Feldman, G. Allen, D. Prabhu, S. Dutta, C. Young, and J. Williams。《海王星奥德赛：探索海王星—海卫一系统的旗舰任务概念》。《行星科学杂志》，2:184，2021。doi：10.3847/PSJ/abf654。S. J. Saikia, J. Millane, Y. Lu, A. Mudek, A. Arora, P. Witsberge, K. Hughes, J. M. Longuski, T. Spilker, A. Petropoulos, N. Arora, J. Cutts, J. Elliott, J. Sims, and K. Reh。《美国国家航空航天局冰巨星十年调查前任务研究的气动捕获评估》。《航天器与火箭》，58:505–515，2021。doi：10.2514/1.A34703。K. M. Sayanagi, R. A. Dillman, D. H. Atkinson, J. Li, S. Saikia, A. A. Simon, T. R. Spilker, M. H. Wong, W. C. Edwards, D. Hope, A. Arora, S. C. Bowen, A. Bowes, J. S. Brady, T. O. Clark, R. E. Fairbairn, D. G. Goggin, T. A. Grondin, S. J. Horan, S. I. Infeld, J. P. Leckey, J. M. Longuski, T. E. Marvel, R. M. McCabe, A. M. Parikh, D. J. Peterson, S. J. Primeaux, A. D. Scammell, K. M. Somervill, L. W. Taylor, C. Thames, H. P. Tosoc, and L. D. Tran。《小型新一代大气探测器（SNAP）概念：助力未来多探测器任务——天王星案例研究》。《空间科学评论》，216:72，2020。doi：10.1007/s11214-020-00686-7。C. Shankman, J. J. Kavelaars, S. M. Lawler, B. J. Gladman, and M. T. Bannister。《遥远的大质量行星对大半长轴海王星外天体的影响》。《天文学杂志》，153:63，2017。doi：10.3847/1538-3881/153/2/63。S. S. Sheppard and C. A. Trujillo。《新的极端海王星外天体：探寻太阳系外围的超级地球》。《天文学杂志》，152:221，2016。doi：10.3847/1538-3881/152/6/221。A. Siraj, C. F. Chyba, and S. Tremaine。《可能的行星X的轨道》。《天体物理学杂志》，978(2):139，2025a。doi：10.3847/1538-4357/ad98f6。A. Siraj, C. F. Chyba, and S. Tremaine。《测量遥远柯伊伯带的平均平面》。《皇家天文学会月刊》，543(1):L27–L33，2025b。doi：10.1093/mnrasl/slaf091。L. Spilker。《卡西尼-惠更斯号对土星系统的探索：13年的发现》。《科学》，364：1046–1051，2019。doi：10.1126/science.aat3760。E. C. Stone。《旅行者2号与天王星的相遇》。《地球物理研究杂志：空间物理》，92:14873–14876，1987。doi：10.1029/JA092iA13p14873。E. C. Stone and E. D. Miner。《旅行者2号与天王星系统的相遇》。《科学》，233:39–43，1986。doi：10.1126/science.233.4759.39。C. A. Trujillo and S. S. Sheppard。《近日点距为80天文单位的塞德娜类天体》。《自然》，507:471–474，2014。doi：10.1038/nature13156。D. Turrini, R. Politi, R. Peron, D. Grassi, C. Plainaki, M. Barbieri, D. M. Lucchesi, G. Magni, F. Altieri, V. Cottini, N. Gorius, P. Gaulme, F.-X. Schmider, A. Adriani, and G. Piccioni。《利用双航天器对冰巨行星开展比较探测：揭示太阳系的历史》。《行星与空间科学》，104:93–107，2014。doi：10.1016/j.pss.2014.09.005。S. G. Turyshev, V. T. Toth, G. Kinsella, et al.《支持先驱者异常源于热效应的证据》。《物理评论快报》，108:241101，2012。doi：10.1103/PhysRevLett.108.241101。

E. Venkatapathy, D. Ellerby, P. Gage, D. Prabhu, M. Gasch, C. Kazemba, C. Kellerman, S. Langston, B. Libben, M. Mahzari, F. Milos, A. Murphy, O. Nishioka, K. Peterson, C. Poteet, S. Splinter, M. Stackpoole, J. Williams, and Z. Young。《冰巨星探测器任务的进入系统技术成熟度》。《空间科学评论》，216:22，2020。doi：10.1007/s11214-020-0638-2。A. Witze。《下一站，天王星？冰质行星位列美国国家航空航天局下一项大型任务的优先清单榜首》。《自然》，604:607，2022。doi：10.1038/d41586-022-01087-2。L. Xu, Y. Zou, and Y. Jia。《中国在2030年前对深空探测和月球探测的规划》。《中国空间科学技术》，38:591–592，2018。doi：10.11728/cjss2018.05.591。L. Zwick, D. Soyuer, D. J. D’Orazio, D. O’Neill, A. Derdzinski, P. Saha, D. Blas, A. C. Jenkins, and L. Z. Kelley。《通过天王星轨道器与探测器任务的多普勒跟踪弥合微赫兹引力波空白：大质量双黑洞、早期宇宙信号与超轻暗物质》。《物理评论D辑》，112:083029，2025。doi：10.1103/qp2h-y4b2。

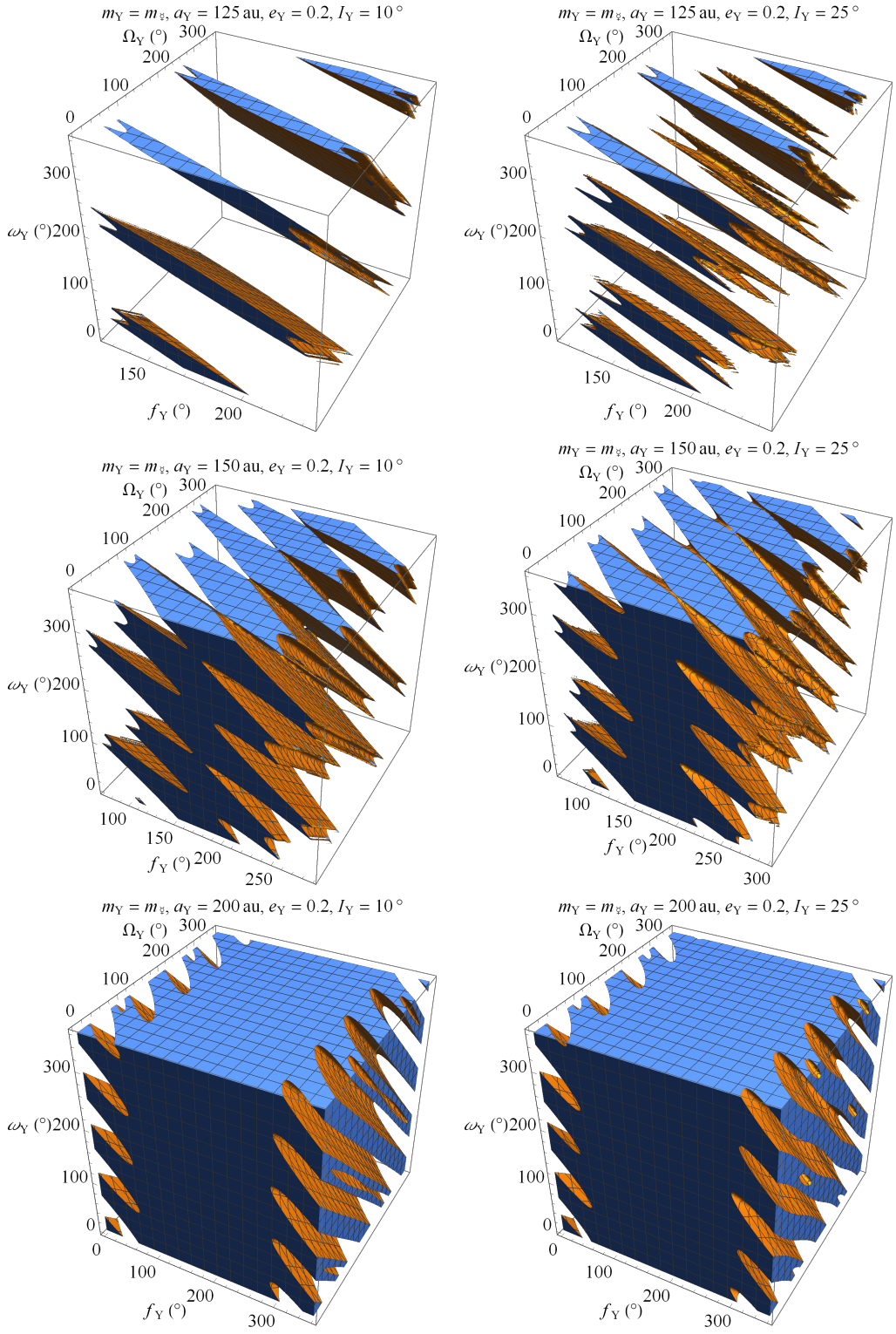


图1：对于由 e_Y = 0.2 表征的水星质量的行星Y的椭圆轨道，在 {f_Y、Ω_Y、ω_Y} 参数空间中，半长轴 a_Y （125 au、150 au 和 200 au）以及相对于黄道面的倾角 I_Y （10° 和 25°）取不同值时的允许区域。这些区域是通过施加以下条件推导出的：利用方程（1）–（7）计算出的行星Y导致的土星 e、I、Ω、ϖ 理论变化率，在使用表1中的不确定度并将其放大十倍后，同时满足方程（18）的条件。

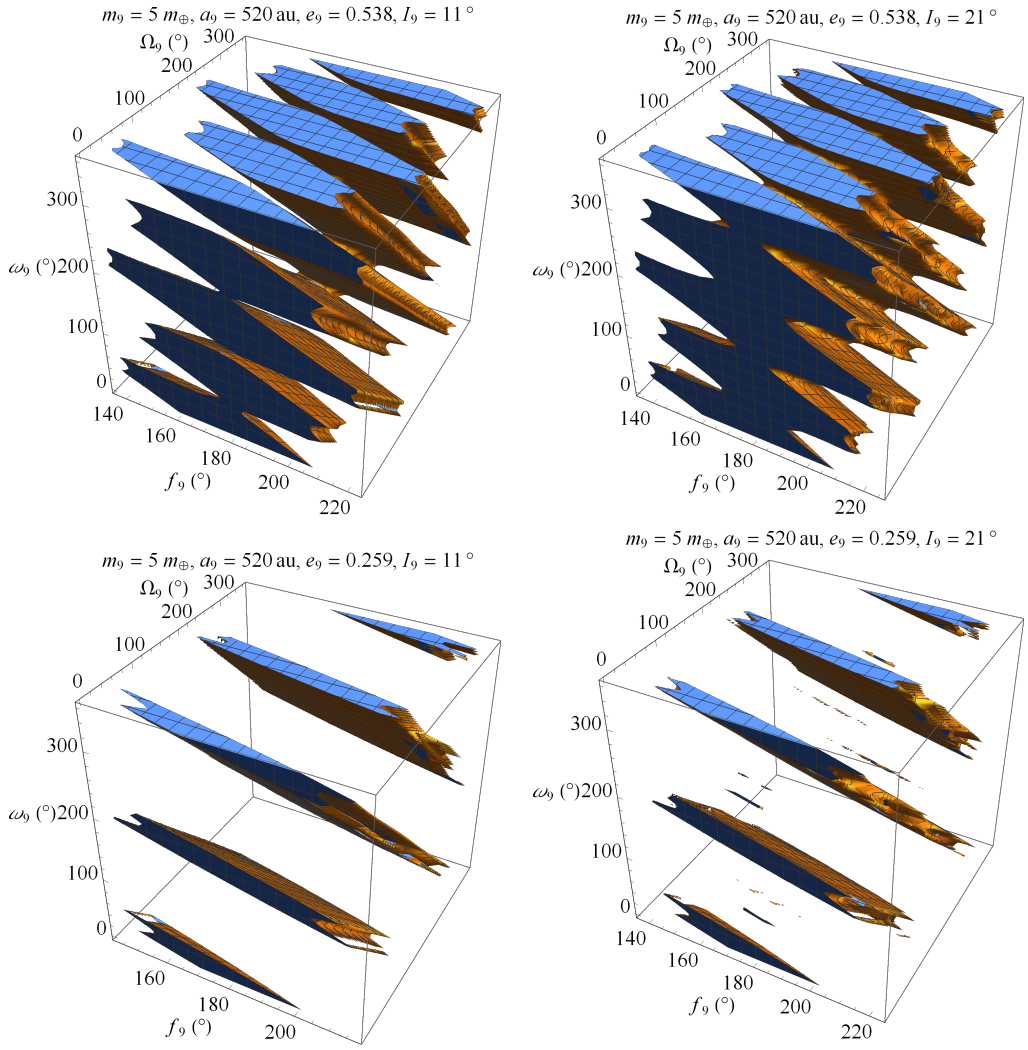


图2：对于半长轴为$_9$ = 520au、质量为 5 m$_\oplus$ 的第九行星椭圆轨道，当偏心率 e$_9$ （0.259 和 0.538）及相对于黄道面的倾角 I$_9$ （11° 和 21°）取不同值时， $\{f_9, \Omega 9, \omega_9\}$参数空间中的允许区域。通过将表1中的不确定度放大十倍，并使用方程（1）–（7）计算第九行星对土星的 e、I、Ω、 ϖ 理论变化率，筛选出这些区域；筛选条件是这些理论变化率同时满足方程（18）的条件。

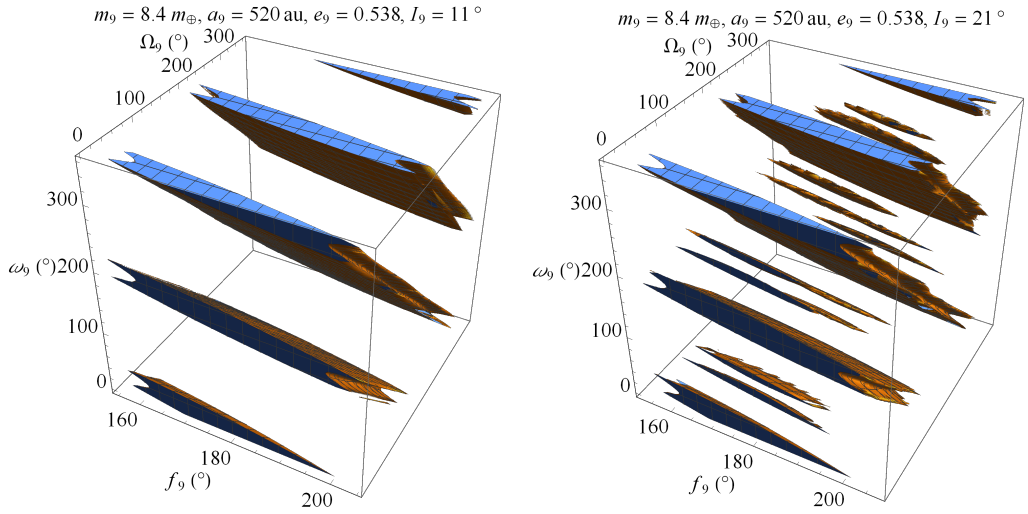


图3：质量为8.4 $m_\oplus$的第九行星椭圆轨道在 $\{f_9, \Omega 9, \omega_9\}$ 参数空间中的允许区域；该轨道由$a_9 = 520$au、$e_9 = 0.538$以及相对于黄道面的不同倾角I_9 （11° 和21°）表征。这些区域是通过要求用方程（1）–（7）计算的、由第九行星引起的土星e、I、Ω、 ϖ的理论变化率同时满足方程（18）的条件而推断得出的，所采用的是表1中按十倍重新标度后的不确定度。

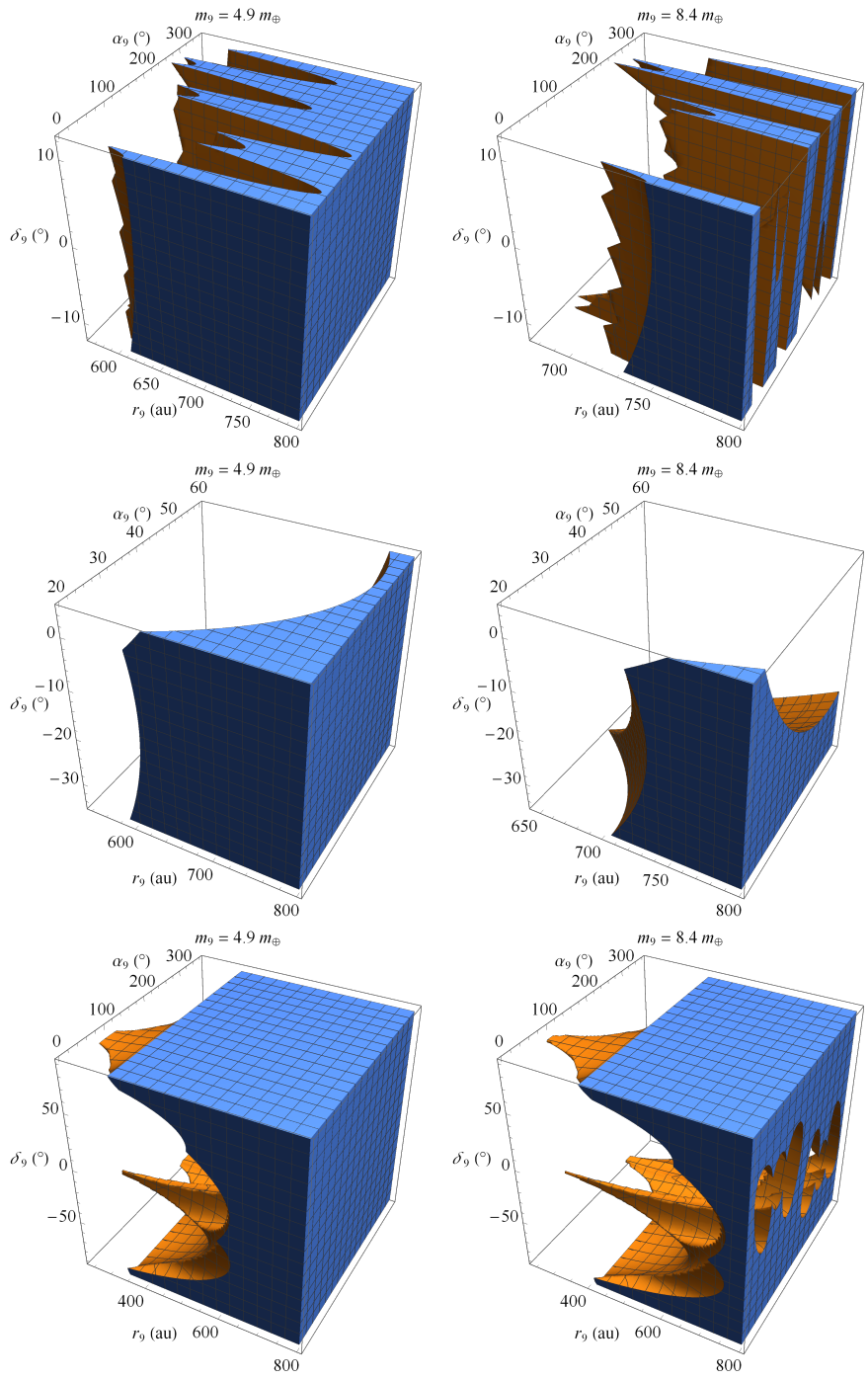


图4：第九行星椭圆轨道在不同质量 m_9（4.9 $m_\oplus$ 和 8.4 $m_\oplus$）下的 $\{r9, \alpha_9, \delta_9\}$ 参数空间允许区域。通过施加如下条件推导出这些区域：根据国际天球参考系（国际天球参考架），利用方程（1）–（7）计算的第九行星导致的理论土星轨道变化率 e、I、Ω, ϖ，在采用表1中不确定度并将其放大十倍后，须同时满足方程（18）的条件。第九行星的日心距离 r_9 和天体测量角 α_9, δ_9 的变化范围取自 Brown 和 Batygin（2021）（上排）以及 Holman 和 Payne（2016b）（中排）；下排则显示未对 α_9, δ_9 预设任何先验界限时的允许区域。

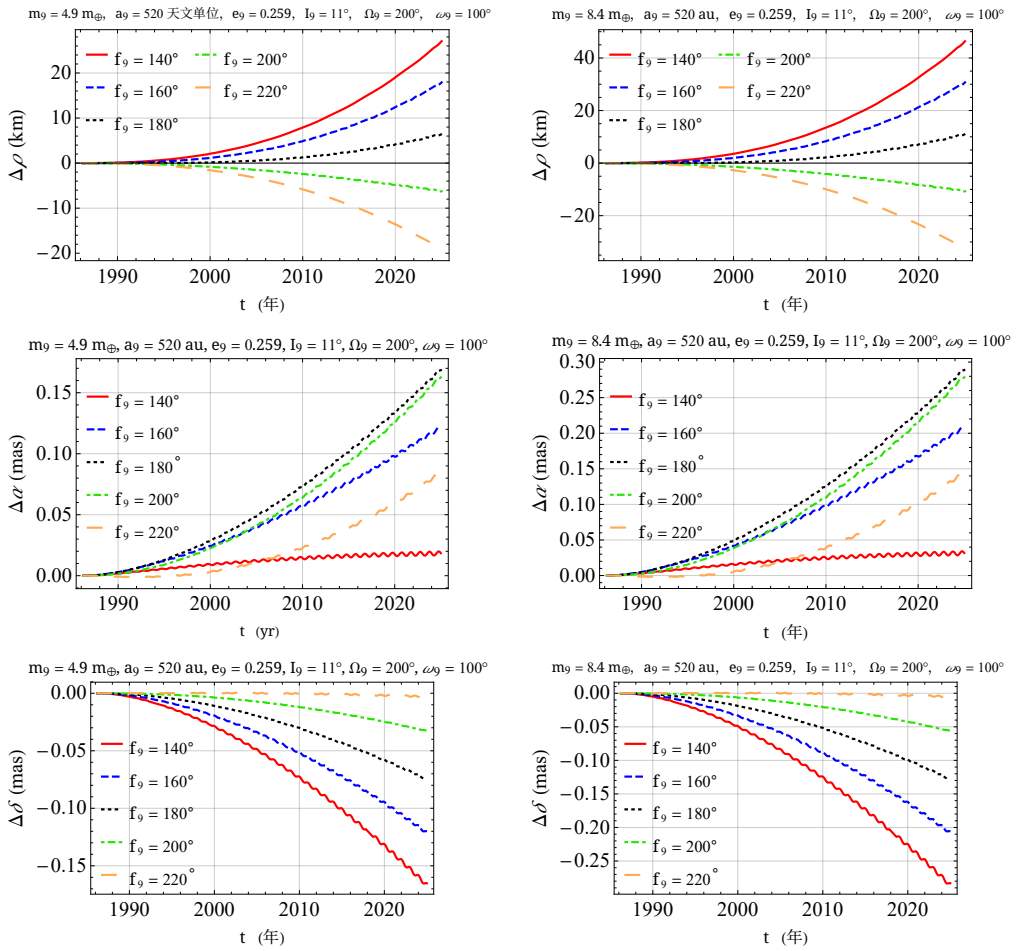


图5：数值生成的时间序列 $\Delta\rho(t)$、$\Delta\alpha(t)$、$\Delta\delta(t)$，显示了从1986年3月至今，第九行星对旅行者1号的距离ρ、赤经和赤纬造成的特征信号；第九行星的质量分别为 $m_9 = 4.9m_\oplus$ （左栏）和 $m_9 = 8.4m_\oplus$ （右栏）。这些结果通过积分探测器和太阳系全部八颗已知行星相对于国际天球参考架的质心运动方程获得，计算中分别纳入和不纳入第九行星。两次计算均采用了太阳系行星从水星到海王星的引力作用，以及通过 JPL（美国国家航空航天局）维护的 HORIZONS 程序网页界面获取的探测器和各行星相同的初始条件。