

土星大小的行星，而不是超级木星，更经常出现在内部有超级地球的情况下

ETIENNE LEFÈVRE-FORJÁN^{1,2} AND GIJS D. MULDER¹

¹Facultad de Física, Pontificia Universidad Católica de Chile, Av. Vicuña Mackenna 4860, Macul, Santiago, Chile

²UFR Physique, Université Paris Cité, 4 Rue Elsa Morante, F-75013 Paris, France

摘要

近年来的研究对超级地球是否经常伴随长周期巨型行星，以及反之亦然得出了不同的结论。这种关系已被行星形成模型预测为质量相关。我们利用径向速度样本——加州遗产调查——来探究这一差异的起源。为了排除检测偏差作为结果可能的解释，我们进行了检测完整度校正。在校正偏差后，我们发现冷木星在没有内侧超级地球伴随的情况下，其质量是 $5.65^{+1.08}_{-2.57}$ 倍更大，而超级地球在有外侧巨型行星随时质量并没有显著增加。我们还报告，在存在超级地球的情况下，土星（中位数投影质量为 $0.6M_J$ ）的出现率增加了 ~ 4 倍，而在存在土星的情况下，超级地球的出现率同样增加了这一倍数。这种正相关关系在超级木星（中位数投影质量为 $3.1M_J$ ）身上消失。这些结果表明冷木星通常伴随内侧超级地球，但这并不适用于最大的巨型行星，例如那些将由盖亚发现的行星，它们可能不会被过境行星所伴随。这种质量相关性，结合不同调查的不同检测限制，可以解释关于冷木星和超级地球出现关系的差异。

Keywords: 系外行星，系外行星天文学，系外行星系统

1. 介绍

热超级地球与冷巨行星之间的相互作用对行星系统的形成和演化有影响。这两种类型的行星之间存在正相关关系，这与太阳系中看不到的现象相矛盾，在太阳系中超级地球是不存在的。关于超级地球和冷巨行星之间关系的研究得出了相当不同的结论，其中一些报告了强烈的正相关 (e.g. Zhu & Wu 2018; Bryan et al. 2019)，而另一些则发现了中性或负相关 (e.g. Bonomo et al. 2023)。了解这种相关性的符号将有助于我们理解这些行星是如何形成和相互作用的，因此已经提出了不同变量作为可能导致差异的原因，例如金属量 (e.g. Bryan & Lee 2024; Gajendran et al. 2024) 或间隙复杂度 (e.g. He & Weiss 2023)。

第一次对外层气态巨行星与内层超级地球之间相关性的计算是由 Zhu & Wu (2018) 和 Bryan et al. (2019) 进行的，他们认为存在很强的相关性。Zhu & Wu (2018) 报告说，拥有类木星天体的恒星中有 $90^{+20}_{-20}\%$ 也拥有一颗内层超级地球，而 Bryan et al.

(2019) 对同一指标的报告结果为 $102^{+34}_{-52}\%$ 。之后，Rosenthal et al. (2022) 显示了一个较弱但仍然为正的关联性，报告说冷巨行星宿主中也有 $42^{+17}_{-13}\%$ 的内部小型行星。另一方面，Bonomo et al. (2023) 发现了负相关性，因为他们报道了带有内部小型伴星的冷木星级别的发生率为 $9.3^{+7.7}_{-2.9}\%$ ，这低于从研究样本 (Wittenmyer et al. 2020) 获得的所有冷巨行星的 $20.2^{+6.3}_{-3.4}\%$ 频率。鉴于结果的范围，我们对这种差异进行了关联性的研究以寻找解释。

理论模型也做出了不同的预测：Schlecker et al. (2021) 预测超级地球在有外层巨行星相伴时更容易被摧毁；Chachan et al. (2022) 表明外层巨行星和超级地球可以同时形成；Bitsch & Izidoro (2023) 提出冷木星可以减少超级地球的存活率；而 Best et al. (2023) 报告说，在有冷木星的情况下，固体物质可以被输送到内部系统，从而允许短周期行星的形成。这些模型为观测到的超级地球和冷木星之间的相互作用提供了多种可能的解释。

作为解决观测不一致的一种可能方案, Mulders et al. (2021) 提出了质量依赖性: 在同时存在超级地球和气态巨行星的系统中, 行星的质量应呈负相关 (即最庞大的超级地球不应存在于拥有最大气态巨行星的系统中)。这是通过使用碎石吸积模型 (Ormel & Klahr 2010; Lambrechts & Johansen 2012) 模拟行星核心的增长来实现的, 结果显示气态巨行星倾向于阻挡碎石流, 因此超级地球无法增长到很大。这一提议使我们提出了本文将尝试解答的问题: 外部巨大伴星的存在是否会影响内部小行星的质量? 以及: 内部小伴星的存在是否会影响外部巨大行星的质量?

我们使用加州遗产调查 (CLS) 样本 (Rosenthal et al. 2021) 来比较超级地球和冷木星的质量, 考虑到它们是否有对应的存在。在 section 2 中, 我们展示了样本, 并比较了有或没有冷木星伴星的超级地球的投影质量 (反之亦然)。在 section 3 中, 我们对每个样本 (带有和不带冷木星伴星的超级地球, 以及带有和不带超级地球伴星的冷木星) 进行检测完整性的修正, 以便解决检测偏差问题。在 section 4 中, 我们使用在检测完整性修正过程中计算出的行星内在数量来计算发生率, 目的是测试相关性对巨行星质量的依赖关系。在 section 5 中, 我们将质量依赖性作为解释超级地球和冷木星之间关联差异的一种解决方案, 并解释我们的结果如何融入系外行星人口学和行星系统架构的整体图景。

2. 数据样本

我们使用了来自 California Legacy Survey Catalog 的 Rosenthal et al. (2021) 样本, 比较带有和不带外侧行星伴星的超级地球 (SE) 与冷木星 (CJ) 的质量投影, 并且还考虑了是否有内侧超级地球伴星的情况。为了获得一个基本上不受已知系外行星影响的样本, 选择了 719 颗 FGKM 类型的恒星。这些目标通过径向速度 (RV) 方法进行了三十年的监测, 提供了从热超级地球 ($\sim 10M_{\oplus}$) 到冷气体巨行星的 178 个系外行星的物理和轨道数据。他们还通过对每个目标的数据集以及整个调查进行注入恢复测试 (Fulton et al. 2021) 来表征其检测完整度。这将对第三部分中的计算有用。在以下子部分中, 我们将研究冷木星和超级地球的质量是否在其对应伴星存在时受到影响。

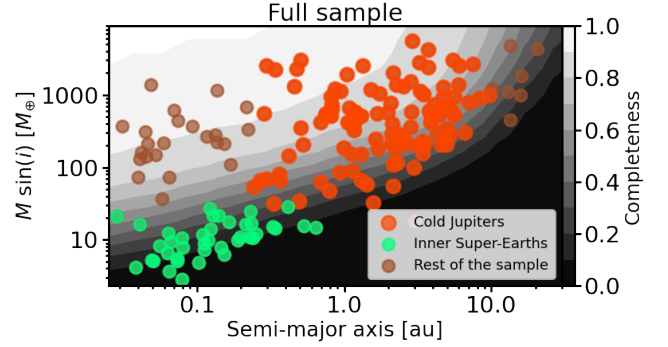


图 1. 来自加州遗产调查的系外行星样本。绿色和红色圆圈分别表示超级地球和冷木星, 定义见 section 2.1。等值线代表探测完整度。

2.1. 超级地球质量当外部巨行星存在时

为了研究超级地球和冷木星, 我们以与 Rosenthal et al. (2022) 相同的方式定义它们, 因为它们基于相同的资料: 冷木星是投影质量在 $30\text{--}6000M_{\oplus}$ 范围内的行星, 而超级地球是投影质量低于 $30M_{\oplus}$ 的行星。对于超级地球的分析, 我们将到宿主边界的平均距离设定为 1 天文单位, 并将任何与超级地球相比具有更远平均距离到宿主的距离的大行星视为外巨行星伴星。

我们将超级地球样本分成两部分: 拥有外部巨行星伴星的超级地球和没有外部巨行星伴星的超级地球, 如 figure 2 所示。这使我们能够比较这两个子样本中超级地球的投影质量。请注意, 其中一些超级地球可能共享同一个宿主, 因此该样本中的宿主数量可能会少于行星数量。事实上, 在统计这些 42 颗超级地球所围绕的恒星数量后, 我们得到总共 29 个宿主, 这将对发生率的计算具有重要意义。

接下来, 我们计算每个子样本的中位行星投影质量, 目的是研究具有外部巨型伴星和没有外部巨型伴星的超级地球之间是否存在显著的质量差异。我们选择中位数是因为它受极值的影响较小, 这对于均值来说将是一个重要的劣势, 因为我们正在处理偏态分布的数据。具有外部巨型伴星的超级地球的中位投影质量为 $10.07^{+2.60}_{-2.36} M_{\oplus}$ (误差对应于中位数与样本中位数引导分布第 16 和 84 百分位之间的差异, 进行了 10000 次迭代), 而不具有外部巨型伴星的超级地球的中位投影质量为 $10.71^{+1.43}_{-0.88} M_{\oplus}$ (参见 table 1), 因此具有外部巨型伴星的超级地球与不具有外部巨型伴星的超级地球之间在质量上没有显著差异。累积分布函数

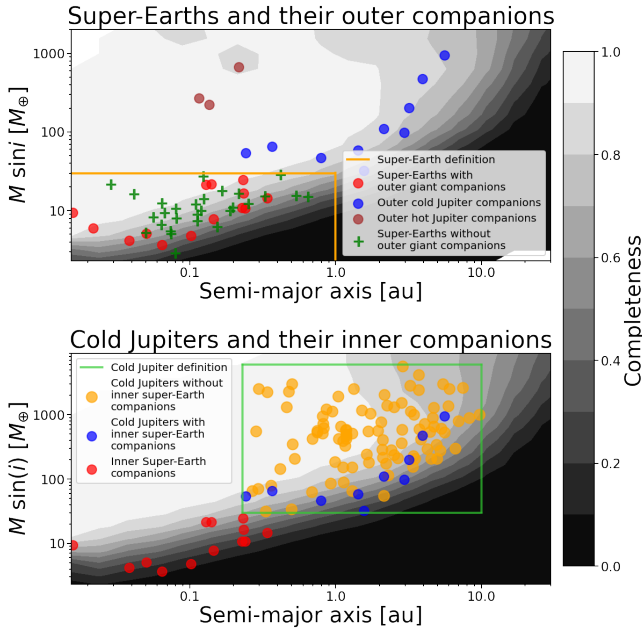


图 2. 超级地球及其外侧的巨型伴星（顶部）&寒冷木星及其内侧的超级地球伴星（底部）。这里的完整度轮廓是从至少拥有一颗超级地球的系统（顶部）和至少拥有一颗寒冷木星的系统（底部）中获得的，与 figure 1 中的不同。基于 Rosenthal et al. (2022) 中的图 1，数据取自 Rosenthal et al. (2021)。

(figure 3) 显示，每个子样本的质量分布非常相似，因为这些线甚至在某些点相交。柯尔莫哥洛夫-斯米尔诺夫检验给出的 p 值为 ~ 0.77 ，因此不能以显著水平拒绝两个样本来自同一潜在分布的零假设。

2.2. 存在超级地球时的冷木星质量

我们为冷木星设定的到宿主边界的平均距离是 0.23 光年到 10 光年 (also taken from Rosenthal et al. 2022)。我们将任何小于 $30M_{\oplus}$ 且与宿主的平均距离低于冷木星的行星视为超级地球伴星。如同前一小节中对超级地球所做的那样，我们把冷木星样本分成两部分：带有内侧超级地球伴星的冷木星和没有内侧超级地球伴星的冷木星。

仔细观察 figure 2 的下图，可以注意到带有和不带超级地球伴星的冷木星在中位数投影质量上可能存在很大差异，因为带有内部超级地球（蓝圈）的冷木星似乎分布在较低的质量区域，而没有内部超级地球（橙圈）的冷木星则不然。我们计算了每个子样本的中位数投影质量：带有超级地球伴星的冷木星的中位数投影质量为 $0.26^{+0.09}_{-0.07}M_J$ ，而不带超级地球伴星的

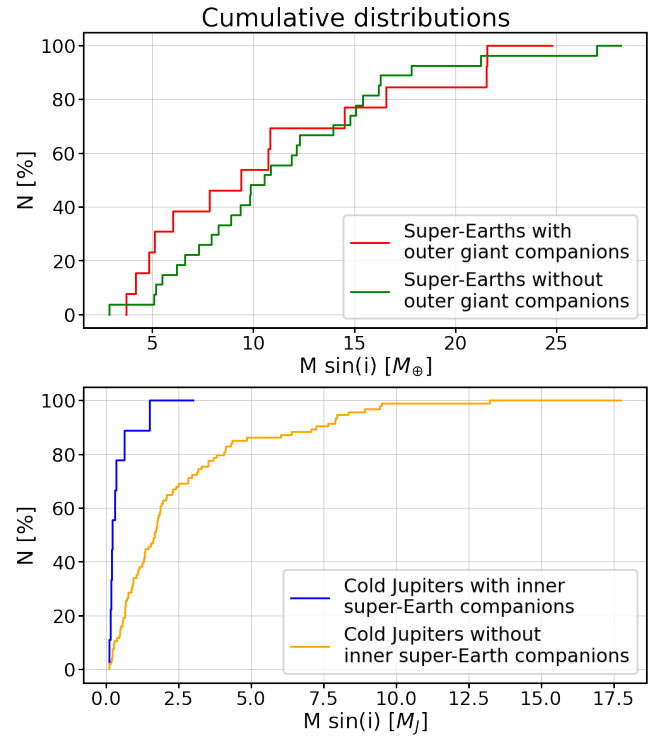


图 3. 超级地球每个子样本的累积分布（上）和寒冷木星每个子样本的累积分布（下）。在超级地球的情况下，无论是分布还是质量阈值，在不同的子样本之间都没有太大差异。在寒冷木星的情况下，拥有超级地球伴星的似乎比没有超级地球伴星的质量低得多。

冷木星的中位数投影质量为 $1.68^{+0.10}_{-0.22}M_J$ (参见 table 1)。对于没有超级地球伴星的冷木星，其中位数投影质量是 $6.46^{+2.62}_{-2.59}$ 倍更高，这表明巨型行星可能影响内部小行星的形成或生存率。

累积分布函数在 figure 3 中确认，没有内部超级地球伴星的冷木星典型投影质量远高于有伴生巨行星的质量。柯尔莫哥洛夫-斯米尔诺夫检验拒绝了两个样本来自同一分布的可能性，显著性水平为 ~ 0.001 (p 值)。这表明，当被超级地球伴随时，观测到的巨行星投影质量确实显著降低。

然而，巨行星质量的差异可能是检测偏差的结果。超级地球需要比巨行星更高的灵敏度才能被检测到，并且调查中的所有恒星并不都具有相同的灵敏度，这可能是由于观测策略或恒星本身的噪声水平不同所致。因此，在灵敏度较低的恒星中，可能会错过超级地球，而质量较大的巨行星仍然可以被检测到。这可能导致在没有超级地球的系统，平均而言巨行星

Sample	Median	With companions	Without companions	Ratio
超级地球	Observed	$10.07^{+2.60}_{-2.36} M_{\oplus}$	$10.71^{+1.43}_{-0.88} M_{\oplus}$	$1.06^{+0.42}_{-0.34}$
	Debiased	$10.74^{+5.84}_{-2.92} M_{\oplus}$	$10.87^{+3.08}_{-1.04} M_{\oplus}$	$1.01^{+0.84}_{-0.37}$
冷木星	Observed	$0.26^{+0.09}_{-0.07} M_J$	$1.68^{+0.10}_{-0.22} M_J$	$6.46^{+2.62}_{-2.59}$
	Debiased	$0.31^{+0.04}_{-0.12} M_J$	$1.75^{+0.11}_{-0.12} M_J$	$5.65^{+1.08}_{-2.57}$

表 1. 每种子样本的中位数投影质量。误差棒对应于样本中位数的引导分布（10000 次迭代）的中位数与第 16 和第 84 百分位之间的差异。比率列显示，超级地球的质量不受外巨行星存在与否的显著影响，但当没有内超级地球伴随时，冷巨行星的质量要大得多。

的质量更高，正如所观察到的那样。应该通过执行由检测完整性校正的方法来考虑这一点，我们将在 [section 3](#) 中解释这一点。

3. 检测完整性的修正

通过 RV 方法检测系外行星倾向于发现距离恒星较近的大行星，因为它们更容易被探测到。可以通过量化检测完备性 (e.g. [Cumming et al. 2008](#); [Howard et al. 2010](#); [Mayor et al. 2011](#)) 来纠正这种偏差。

我们采用通过 [Rosenthal et al. \(2021\)](#) 使用注入恢复测试计算的检测完备性，该测试可在 GitHub 上公开获取¹。由于这些是基于每颗恒星提供的，我们可以计算特定样本的检测完备性。为了校正带有超级地球伴星的冷木星，我们需要考虑容纳超级地球的系统的检测完备性，因为我们想知道在这种系统中检测冷木星的灵敏度是否高或低。然后，该样本的补充（即，不宿主超级地球的恒星的检测完备性）将用于校正没有超级地球伴星的冷木星。我们应用相同的逻辑来校正超级地球：我们使用冷木星宿主的检测完备性来校正带有外部巨行星伴星的超级地球，并使用不宿主冷木星的恒星的检测完备性来校正没有外部巨行星伴星的超级地球。图 [figure 2](#) 中显示的检测完备性轮廓是超级地球宿主（上图）和冷木星宿主（下图）² 的。例如，一个位于 0.1au 的 $10M_{\oplus}$ 行星在超级地球样本（[figure 2](#) 上面板）中的检测概率约为 90%，在冷木星样本（[figure 2](#) 下面板）中的检测概率约为 50%。这证

明了我们对完整函数的仔细处理是合理的，如下面所示，它影响最终结果。

3.1. 冷木星的修正

我们计算每组投影质量-半长轴中的平均检测完整度，选取在距离的对数尺度上均匀分布的 9 组分，范围从 $1.5 \cdot 10^{-2}$ 到 41.6au，并且在质量的对数尺度上均匀分布的 9 组分，范围从 1.9 到 $9.8 \cdot 10^3 M_{\oplus}$ 。然后，我们通过将行星数量除以每个区间内的平均完备性来计算冷木星的内在数量，从而获得一个无偏的内在数量来进行工作（有关此计算的更详细解释，请参见 [appendix A](#)）。这将使我们能够确定中位质量的校正值。

结果（见 [table 1](#)）表明，在 [section 2.2](#) 中获得的比例并不是一个检测偏差问题。事实上，经过校正检测偏差后，冷木星的投影质量比仍接近 6。这是因为所有冷木星无论是否有伴星都位于高完整度区域（见 [figure 2](#)）。因此，没有超级地球伴星的冷木星观测到的质量更高是一个行星群体的真实特征。

3.2. 内部超级地球的修正

我们还对小行星样本进行了相同的分析，以排除 [section 2.1](#) 的结果是由于检测偏差这一假设。

中位数投影质量之间的比率（如 [table 1](#) 所示）实际上没有变化，表明拥有冷木星伴星的超级地球的投影质量与没有冷木星伴星的超级地球的投影质量差不多相同。这表明小行星的质量不受检测偏差的强烈影响。

4. 发生率

¹ <https://github.com/leerosenthalj/CLSI/>

² 为了可视化带有和不带内部超级地球伴星的冷木星检测完整性的差异，请参见 [appendix A](#)。

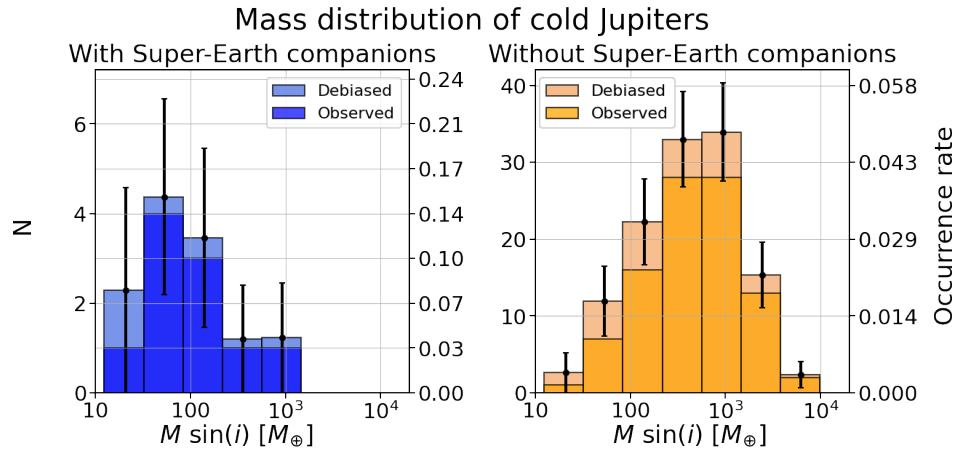


图 4. 每个冷木星子样本的修正行星数量。误差棒对应于标准误差 ($1/\sqrt{N}$), 并且两个面板右侧的垂直轴显示发生率。

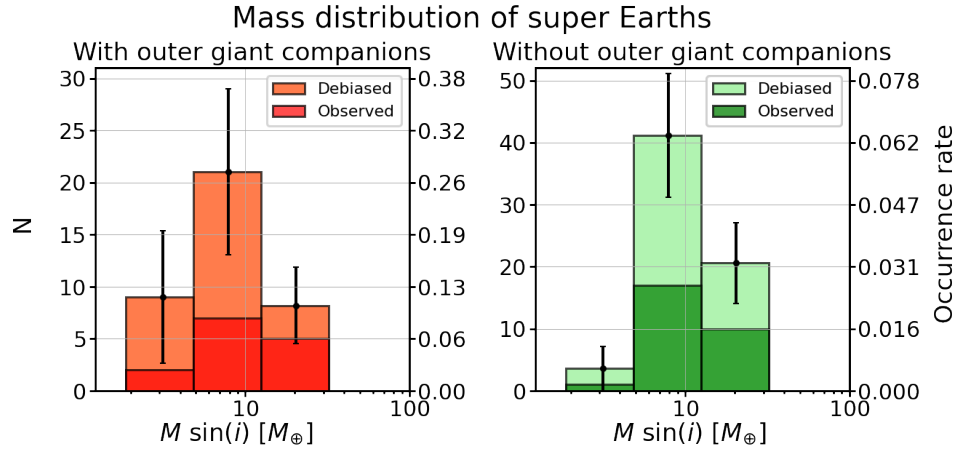


图 5. 每组超级地球子样本的纠正系外行星数量。误差棒对应于标准误差 ($1/\sqrt{N}$), 并且两个面板右侧的垂直轴显示发生率。

我们已经展示了没有超级地球伴星的冷木星比有伴星的冷木星显著更重, 但在这里我们想要检验这种相关性的强度和方向。我们计算发生率来测试超级地球与冷木星之间的相关性。特别是, 我们要寻找证据以确定最巨大的冷木星 (超木星) 是否抑制了超级地球的形成, 或者相关性仍然存在只是变弱了。

为了获得发生率, 我们将每种类型的行星数量除以宿主数量。我们在校正了探测偏差后的样本中这样做。Table 2 (第一行) 显示, 在有内部超级地球伴随的情况下, 冷木星的发生率从 $18.6 \pm 1.8\%$ 增加到 $43.2 \pm 13.7\%$ 。这由 figure 6 补充, 其中可以可视化带有和不带内部超级地球伴星的冷木星之间发生率的差异, 以及这些组之间的投影质量差异。

超地球的出现率在外围存在巨型伴星时从 $14.4 \pm 2.2\%$ 增加到 $49.0 \pm 13.1\%$, 表明它们被外围的巨型伴

星增强。这与 section 1 中概述的一些理论预测相矛盾。为了进一步了解这一问题, 我们测试是否只有质量最小的冷木星对观测到的相关性有所贡献, 而质量最大的冷木星则与超地球呈负相关。

为了做到这一点, 我们计算了 50% 个最巨大的冷木星 (即超木星, 中位投影质量为 $3.1M_J$) 和 50% 个最小的冷木星 (即土星, 中位投影质量为 $0.6M_J$) 的发生率。结果展示在 table 2 中。我们通过将带有超级地球伴星的冷木星发生率 ($P(CJ|SE)$) 除以所有冷木星的发生率 ($P(CJ)$) 来计算增强因子。增强因子对于土星类为 ~ 4 , 对于超木星类为 ~ 0.5 。对于超级地球类, 我们将拥有外部巨大伴星的超级地球的发生率 ($P(SE|CJ)$) 除以所有超级地球的发生率 ($P(SE)$)。增强因子对于土星类为 ~ 4 , 对于超木星类为 ~ 0.6 (我们使用 $P(SE) \approx 14.4 \pm 2.2\%$, 因为超级地球的发生

Sample	$P(CJ)$	$P(CJ SE)$	$P(SE CJ)$	$P(CJ SE)/P(CJ)$	Significance
Cold Jupiters	$18.6 \pm 1.8\%$	$43.2 \pm 13.7\%$	$49.0 \pm 13.1\%$	2.3 ± 0.8	1.8σ
Super-Jupiters	$8.8 \pm 1.2\%$	$4.2 \pm 4.2\%$	$8.4 \pm 5.8\%$	0.5 ± 0.5	1σ
Saturns	$9.8 \pm 1.4\%$	$39.0 \pm 13.0\%$	$56.6 \pm 17.1\%$	4.0 ± 1.4	2.2σ

表 2. 计算的发生率。请注意，在一个包含超级地球的系统中发现一颗冷木星的可能性远大于在整个样本中找到冷木星的可能性。这同样适用于寻找超级地球：在至少拥有一颗冷木星的系统中找到它的可能性更大（考虑到我们得到 $P(SE) \approx 14.4 \pm 2.2\%$ ）。这种相关性适用于质量最低的 50% 的冷木星（土星； $M < 1.5M_J$ ），但不适用于最重的 50%（超木星； $M \geq 1.5M_J$ ）。使用了行星的真实数量，误差条对应于标准误差。

率在土星和超木星样本中没有变化)。这表明当我们选择质量最大的冷木星时，正相关消失，但在选择质量最小的冷木星时仍然存在。

5. 结论与讨论

我们已经分析了加州遗产调查样本，以寻找内超级地球的投影质量和外巨行星的存在之间的相关性，同时也考虑了冷木星的投影质量和内超级地球的存在之间的相关性，并考虑到探测完备性。我们的主要结果是：

- 气态巨行星在没有内侧超级地球伴随时的质量是 $5.65^{+1.08}_{-2.57}$ 倍，这两组之间存在显著的质量差异。
- 地球超级行星在没有外侧巨行星相伴时质量是 $1.01^{+0.84}_{-0.37}$ 倍，这两组之间的质量差异并不显著。
- 气态巨行星的存在并不因内部超级地球的存在而增加，然而土星质量的行星增加了 ~ 4 倍。
- 地球超级行星的出现当存在一颗土星质量巨行星时会增强一个 ~ 4 的因子，但它们在伴有一颗超木星时不会增强。

这些结果表明，超级地球与冷木星之间的正相关性仅适用于质量最小的巨型行星。由于超级地球的存在仅在存在土星质量的巨型行星时增强（而不是超木星），我们的研究结果支持了 [Mulders et al. \(2021\)](#) 提出的假设，即最重的超级地球不应存在于也拥有最大型巨型行星的系统中。另一方面，外部巨型伴星的存在对内部小行星的质量没有显著影响，现在更倾向于如 [Schlecker et al. \(2021\)](#) 所提出的假设，即巨型行

星很可能会摧毁内侧的超级地球；或者如 [Bitsch & Izidoro \(2023\)](#) 所建议的那样，过于巨大的冷木星会降低内部系统的生存率。

鉴于正相关仅存在于质量最小的巨星中，我们重申质量依赖性解释文献中分歧的一种可行解释。发现强相关的 ([Zhu & Wu 2018](#); [Bryan et al. 2019](#); [Rosenthal et al. 2022](#)) 研究主要包含低质量巨星，而来自 [Bonomo et al. \(2023\)](#) 的研究似乎包括了更多的高质量巨行星。这与提出的假设一致，并为未检测到相关性提供了可能的解释。可以在考虑每个调查的敏感度或利用更大数据集的情况下进一步分析该点，以便更严格地检验该假设。

我们还强调了这些结果对当前调查的影响：针对巨行星的超级地球伴星进行搜索的调查，例如 Gaia([Espinoza-Retamal et al. 2023](#))，如果它们的目标恒星主要为超级木星宿主，则可能不会像预期那样成功。这也将是对所提出的假设（即超级地球与冷木星之间的正相关关系仅适用于质量最小的巨行星）的一个良好测试。

最后，如果超级地球的存在确实取决于巨行星伴侣的质量，那么太阳系中没有超级地球的现象可以通过木星属于质量较大的巨行星群体来解释。然而，木星的质量低于我们定义的投影质量阈值 ($1.5M_J$)，并且更符合土星级别的分类（更有可能拥有超级地球），这使得太阳系成为了一个例外。尽管如此，边界仅仅是通过将样本分为两部分来确定的，因此可以通过研究更大的样本集来确定一个更好的阈值。

致谢

我们感谢匿名评审员提出的宝贵意见和建议，这些建议帮助改进了本文。本研究使用了加州遗产

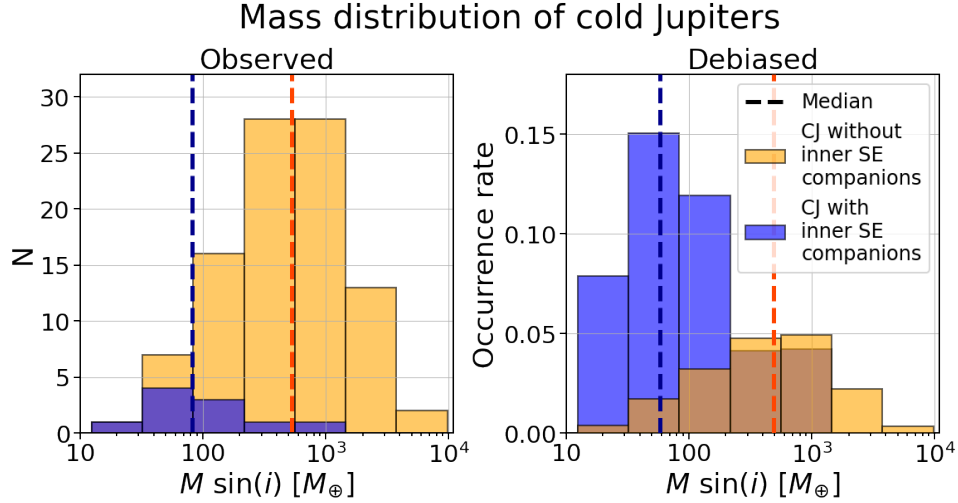


图 6. 冷木星的投影质量分布，虚线表示每个子样本的中位数投影质量。左面板显示行星数量，右面板显示发生率。可以注意到，在修正后虚线之间的距离增加。右侧图表清楚地展示了伴随冷木星的发生率要高得多。

调查的数据，因此我们要感谢 Lee Rosenthal、Benjamin Fulton 以及所有参与的研究人员。G.D.M. 感谢 FONDECYT 项目 1252141 和 11221206 以及 ANID BASAL 项目 FB210003 的支持。E.L. 感谢 FONDE-

CYT 项目 11221206 的支持。E.L. 对 Pilar Forján 和 Jean-Marie Lefèvre 的支持表示感激。我们感谢 Cristóbal Petrovich、Claudia Aguilera、Michele de Leo、Cristóbal Zilleruelo、María Jesús Flores 和 Manuel Cavieres 对本研究提供的有益意见和讨论。

REFERENCES

- Best, S., Sefilian, A., & Petrovich, C. 2023, in AAS/Division of Dynamical Astronomy Meeting, Vol. 55, AAS/Division of Dynamical Astronomy Meeting, 103.06
- Bitsch, B., & Izidoro, A. 2023, A&A, 674, A178, doi: [10.1051/0004-6361/202245040](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202245040)
- Bonomo, A. S., Dumusque, X., Massa, A., et al. 2023, A&A, 677, A33, doi: [10.1051/0004-6361/202346211](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202346211)
- Bryan, M. L., Knutson, H. A., Lee, E. J., et al. 2019, AJ, 157, 52, doi: [10.3847/1538-3881/aaf57f](https://doi.org/10.3847/1538-3881/aaf57f)
- Bryan, M. L., & Lee, E. J. 2024, arXiv e-prints, arXiv:2403.08873, doi: [10.48550/arXiv.2403.08873](https://doi.org/10.48550/arXiv.2403.08873)
- Chachan, Y., Dalba, P. A., Knutson, H. A., et al. 2022, ApJ, 926, 62, doi: [10.3847/1538-4357/ac3ed6](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ac3ed6)
- Cumming, A., Butler, R. P., Marcy, G. W., et al. 2008, PASP, 120, 531, doi: [10.1086/588487](https://doi.org/10.1086/588487)
- Espinoza-Retamal, J. I., Zhu, W., & Petrovich, C. 2023, AJ, 166, 231, doi: [10.3847/1538-3881/ad00b9](https://doi.org/10.3847/1538-3881/ad00b9)
- Fulton, B. J., Rosenthal, L. J., Hirsch, L. A., et al. 2021, ApJS, 255, 14, doi: [10.3847/1538-4365/abfcc1](https://doi.org/10.3847/1538-4365/abfcc1)
- Gajendran, S., Jiang, I.-G., Yeh, L.-C., & Sariya, D. P. 2024, MNRAS, 528, 7202, doi: [10.1093/mnras/stae501](https://doi.org/10.1093/mnras/stae501)
- He, M. Y., & Weiss, L. M. 2023, AJ, 166, 36, doi: [10.3847/1538-3881/acdd56](https://doi.org/10.3847/1538-3881/acdd56)
- Howard, A. W., Marcy, G. W., Johnson, J. A., et al. 2010, Science, 330, 653, doi: [10.1126/science.1194854](https://doi.org/10.1126/science.1194854)
- Lambrechts, M., & Johansen, A. 2012, A&A, 544, A32, doi: [10.1051/0004-6361/201219127](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201219127)
- Mayor, M., Marmier, M., Lovis, C., et al. 2011, arXiv e-prints, arXiv:1109.2497, doi: [10.48550/arXiv.1109.2497](https://doi.org/10.48550/arXiv.1109.2497)
- Mulders, G. D., Drąkowska, J., van der Marel, N., Ciesla, F. J., & Pascucci, I. 2021, ApJL, 920, L1, doi: [10.3847/2041-8213/ac2947](https://doi.org/10.3847/2041-8213/ac2947)
- Ormel, C. W., & Klahr, H. H. 2010, A&A, 520, A43, doi: [10.1051/0004-6361/201014903](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201014903)
- Rosenthal, L. J., Fulton, B. J., Hirsch, L. A., et al. 2021, ApJS, 255, 8, doi: [10.3847/1538-4365/abe23c](https://doi.org/10.3847/1538-4365/abe23c)
- Rosenthal, L. J., Knutson, H. A., Chachan, Y., et al. 2022, ApJS, 262, 1, doi: [10.3847/1538-4365/ac7230](https://doi.org/10.3847/1538-4365/ac7230)
- Schlecker, M., Mordasini, C., Emsenhuber, A., et al. 2021, A&A, 656, A71, doi: [10.1051/0004-6361/202038554](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202038554)
- Wittenmyer, R. A., Wang, S., Horner, J., et al. 2020, MNRAS, 492, 377, doi: [10.1093/mnras/stz3436](https://doi.org/10.1093/mnras/stz3436)
- Zhu, W., & Wu, Y. 2018, AJ, 156, 92, doi: [10.3847/1538-3881/aad22a](https://doi.org/10.3847/1538-3881/aad22a)

APPENDIX

A. 行星内在数量的计算

在本附录中，我们进一步解释了所执行的检测完整性的修正过程。

首先，我们为样本定义二维的箱体：在距离从 $1.5 \cdot 10^{-2}$ 到 41.6au 之间均匀分布的 9 个箱子，以及在质量从 1.9 到 $9.8 \cdot 10^3 M_{\oplus}$ 之间均匀分布的 9 个箱子。然后，我们计算每个箱体内的平均检测完整性。最后，我们将每个箱体内存木星的总数除以相应的平均检测完整性。

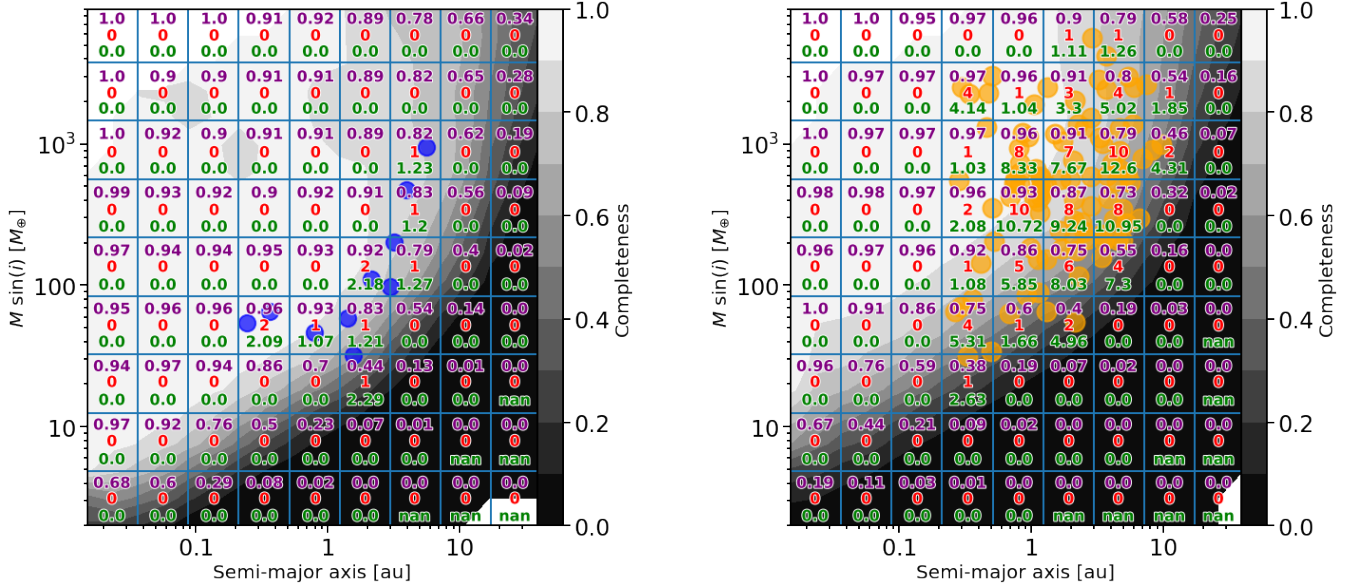


图 7. 平均完整性（紫色）、修正前的行星数量（红色）和修正后的行星数量（绿色）在每个区间内的情况（蓝色线条）。蓝色和橙色圆圈分别代表没有内部超级地球伴星的寒冷木星和有内部超级地球伴星的寒冷木星。左侧面板上的轮廓对应于至少拥有一个超级地球的样本恒星的检测完整性。右侧面板上，轮廓对应的是不拥有超级地球的恒星的检测完整性。请注意，将红色数字除以紫色数字可以得到绿色数字的一个近似值。

例如，注意左侧 figure 7 图中的拥有最大质量冷木星和超级地球伴星的柱状图（即包含最高投影质量值蓝色圆圈的那个柱）。该柱中具有内部超级地球伴星的冷木星数量仅为 1。带有超级地球伴星的冷木星的校正数量是红色数字除以紫色数字： $\frac{1}{0.82} \approx 1.2$ 。我们可以对右侧图中的同一柱进行相同的操作：没有超级地球伴星的冷木星的校正数量为 $\frac{10}{0.79} \approx 12.7$ 。在每个投影质量区间内按半长轴求和，我们得到如 figure 4 所示的去偏差直方图。同样的过程应用于具有或不具有外部巨行星伴星的超级地球。