



# 行星风: 电磁力主导的行星演化

魏勇<sup>1,2\*</sup>

1. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029;

2. 中国科学院大学地球与行星科学学院, 北京 100049

\* 通讯作者, E-mail: [weiy@mail.iggcas.ac.cn](mailto:weiy@mail.iggcas.ac.cn)

收稿日期: 2024-02-29; 收修改稿日期: 2024-08-07; 接受日期: 2024-08-29; 网络版发表日期: 2024-09-05

国家自然科学基金项目(42241106、42388101)和腾讯科学探索奖项目资助

## 1 引言

哥白尼以来的五百年, 行星科学的研究对象从可见扩展到不可见。太空时代以来的六十余年, 人们认知行星的能力范围从万有引力扩展到了电磁力, 基本掌握了行星系统中粒子运动的图像: 太阳系的行星系统(包括行星、卫星和环)以粒子的形式持续失去物质, 呈现出明确的消散趋势。行星系统的消散超出了经典的太阳系形成演化理论关注的范畴, 需要新的理论解释, 是行星科学研究的主要问题之一。本文提出“行星风(Planet Wind)”假说, 认为行星系统的消散本质上属于电磁力主导的行星演化阶段, 并划分出卫星行星风、大气行星风、表面行星风三种类型。行星风假说是一种现代版的牛顿宇宙观, 为行星科学研究提供了哲学意义上的学科基础。

## 2 行星科学作为学科的根本性问题

行星科学这门新兴交叉学科无疑已经创造了极其丰富的知识(白春礼, 2019)。行星科学的研究对象多种多样, 包括各行星系统的圈层结构、物质组分、表面形貌、动力学过程等, 在时间和空间上都覆盖了极大的尺度范围。行星探测代价高昂, 研究资料稀少珍贵,

行星科学却能够在短短几十年的时间里取得如此大的成就, 这在所有自然科学学科中显得很寻常。一个重要原因在于行星科学的交叉学科属性, 使其能够迅速有效地从相关学科的经典知识和最新进展中汲取营养, 扩大行星科学自身的知识储备。这种学科发展模式决定了行星科学在思维方式上的特色——类比远远多于归纳和演绎, 甚至我们可以说, 类比推理是行星科学的主要研究方式。在人类能够到行星上自由活动之前, 可以预见, 来自行星本身的研究资料的规模体量很难支撑可靠的归纳和演绎, 类比推理将继续作为主要研究方式。我们知道, 类比推理是从特殊到特殊, 那么身居地球的我们怎样获得关于行星的一般性知识? 为什么这些知识是可以被获取的? 怎样证明这些知识是正确的和准确的?

关于类比推理的可靠程度有一些原则性的经典观点: 二者具有的共同属性的数目越多越好; 二者具有的共同属性越本质越好; 二者具有的共同属性与结论中涉及的标的属性的相关程度越高越好。在行星科学研究中, 类比推理暗含的基本前提是, 我们在地球上观察和认识到的自然界规律(包括物理、化学、地质、天文等学科)同样适用于其它行星和天体, 甚至系外行星。若非如此, 我们现有的知识体系将被认为是特殊的而非一般的, 且现有的逻辑思维工具均无法应用

中文引用格式: 魏勇. 2024. 行星风: 电磁力主导的行星演化. 中国科学: 地球科学, 54(10): 3369–3374, doi: [10.1360/SSTe-2024-0064](https://doi.org/10.1360/SSTe-2024-0064)

英文引用格式: Wei Y. 2024. Planet wind: Planetary evolution dominated by electromagnetic forces. Science China Earth Sciences, 67(10): 3331–3336, <https://doi.org/10.1007/s11430-024-1419-y>

于行星科学，甚至说明了人类的理性无法理解地球之外的东西。虽然这是可能性极小的情况，但无法完全排除。因此，行星科学的最高使命必须包括证明类比推理的根基，即：寻找一个或多个时间和空间的范围，在此范围内，太阳系可被看作是整体形成与演化的，所有行星(包括地球)和所有天体之间都存在直接或间接的物质能量交换，以确保研究对象不是孤立演化的。

这一任务必定又是难度极大的，绝非一个民族一代人能够完成。从数千年的人类文明史来看，深空探测只不过是最近几十年的事情，我们能够拿在手里的只有来自月球、火星和一些小天体的大小不一的样品，行星、卫星和一些小天体的实地拍摄的照片，以及借助仪器获得的肉眼可见和不可见的形貌状态、物理场、粒子、能量流等信息而已。这些研究资料体量太小，很难支持对整个太阳系进行较为全面的归纳和演绎。我倾向于另外一种思路，即伊曼纽尔·康德 (Immanuel Kant)在《纯粹理性批判》的第二版前言中所提出的尝试把形而上学科学化的思路：“就像决定天体运行的万有引力定律那样，它为哥白尼最初的假说赋予了确定性，同时证明了整合宇宙的不可见的力量(牛顿的引力)的存在，但如果不是哥白尼大胆地以一种违背感官但却真实的方式——不是在天穹中，而是在这些对象的观察者中——寻找被观察的运动的话，万有引力定律是永远不会被发现的。在这篇序言中，我还把自己对形而上学的看法作为假说提出来，它与哥白尼的假说有许多相似之处，尽管在《批判》本身中它已经通过我们对空间和时间的表述以及理解的基本概念来证明了不是假说而是不容置疑的；因为我希望人们应当看到，引发变革的最初的尝试必须总是以假说的形式出现的。”接下来，本文主要讨论在电磁力的时空尺度上太阳系中的太阳、各行星系、彗星、小天体等整体演化的可能性，也就是预备在电磁力的时空尺度上建立新假说。

### 3 电磁力主导的行星演化过程

哥白尼发表于1543年的假说在开普勒那里得到了理论化，这已经是肉眼观测时代的研究极限。借助伽利略的望远镜，牛顿在1687年建立了经典力学体系，完成了康德所谓的“哥白尼式革命”。基于牛顿时力学中的万有引力和离心力的概念，康德在1755年提出了星

云假说，奠定了现代太阳系形成与演化理论的基础，这已经是太空时代到来之前的思想巅峰。现代星云假说(Woolfson, 1993)在天文学的时空尺度上很好地解释了太阳系的形成和早期演化，万有引力主导了星子的吸积、巨行星轨道迁移、晚期重轰炸(太阳系形成后约5~8亿年)等重大事件，直至各行星系统的状态、位置、轨道等宏观物理参数都达到了相对稳定的状态。目前，这一类研究更多地报告在天文学领域，或许是因为行星科学领域的研究资料(地球古老岩石、月壤、陨石等)对太阳系早期研究的支撑较为有限。值得一提的是，天文学领域也大量使用类比推理将其他年轻行星系的观测资料纳入研究。

正如毛泽东1937年在《矛盾论》中所指出的，“无论什么事物的运动都采取两种状态，相对地静止的状态和显著地变动的状态。两种状态的运动都是由事物内部包含的两个矛盾着的因素互相斗争所引起的。”当行星的圈层结构趋于稳定、地球板块构造开始启动、大气海洋系统耦合运转，太阳系的状态似乎也达到了一个相对稳定的状态，各行星系统在各自的轨道上分别走上了不同的演化路径，造成了我们今天所见到的多样性。当然情况绝非如此简单。凭借望远镜观测，牛顿1687年在《自然哲学的数学原理》中就曾写道：“从太阳、恒星以及彗星的尾部上升的蒸汽可能最终落入行星。”这展现了一个动态互联的宇宙(Heaven)，暗示了行星演化涉及的矛盾因素及其竞争的多样性、复杂性和整体性。以今天的眼光来看，动态互联的宇宙观只能在当前时代得到充分发展，因为后世三百年的积累才满足两个必要条件：1873年诞生的麦克斯韦方程组和1957年起步的行星就位探测能力。今天我们意识到，整合宇宙的牛顿引力是人类肉眼不可见的，太阳系中的物质和能量传输也同样是不可见的，需要借助火箭飞船和科学仪器延伸拓展我们的感知能力，以将其纳入我们的经验知识体系。在这个超出人类感知能力的时空范围，物质形态以等离子体为主，主要由电磁力驱动，万有引力的作用则次之；今天我们观察到，太阳系的行星系统(包括行星、卫星和环)以粒子的形式持续失去物质(Gronoff等, 2020; Seki等, 2015)，呈现出明确的消散趋势。行星系统的消散超出了经典的太阳系形成演化理论关注的范畴，需要新的理论解释，是行星科学研究的主要问题；今天我们认识到，牛顿基于肉眼观测形成的动态互联的宇宙观在哲学层面上是足

够本质的, 所以同样适用于肉眼不可见的粒子运动, 而对这个时空范围中的自然规律的描述必定是异于肉眼可见的时空范围, 天然地与哥白尼式的假说有更多相似。

为此建立的任何新的假说都应当直面如下三个问题: (1) 太阳系演化的总体趋势是什么? (2) 太阳系各类天体之间物质能量是如何传输的? (3) 太阳系演化中的对立统一规律是什么?

针对第1个问题, 现代观测结果展现出了明确的一致性。处于主序星阶段的太阳持续不断地损失物质, 形成了时速数百万公里的太阳风粒子流(太阳风, Solar Wind), 冲击日球层中的每一个天体; 距离太阳最近的水星, 已经完全损失掉大气, 起源于其表面的重元素正在大量损失; 金星、地球和火星的大气受到太阳风的冲击而向行星际空间逃逸; 木星和土星的重力对于其大气有很强的束缚, 但木卫一和土卫二喷发出大量粒子, 构成木星系统和土星系统物质损失的主要成分; 彗星、冥王星, 甚至一些系外星也被观测到有显著的物质损失。如果说太阳系形成阶段的演化趋势是积聚(物质的吸积), 那么其后的演化——至少当前看到情况是如此——趋势应当是消散(物质的损失), 即太阳系的总质量以及各天体的质量都在持续减少。值得一提的是木星和土星, 其大气粒子在极区存在损失, 与此同时又从其卫星的喷发物中获得质量, 但如果我们考察的对象是行星系——也就是说行星及其卫星和环——那么消散的趋势将是明确的。

关于第2个问题, 现代观测仅仅展示了一些端倪。太阳通过电磁辐射和太阳风向行星际空间以及其中的各天体传播物质能量, 太阳的磁场遍布日球层, 等离子体波所到之处引起各种扰动; 源自地球磁层的离子可以朝向太阳运动(Kronberg等, 2011), 也可以到达月球的近面和背面(Wei等, 2020); 木星辐射带的电子可以达到地球甚至更远的范围; 土卫二喷发出的物质可以进入土卫六的大气; 彗星则代表了一种特殊的情况, 彗核可以融入太阳和行星, 彗尾中的粒子也可以进入行星大气。总体看来, 太阳风和冻结于其中的太阳磁场提供了一个背景环境, 使得电磁力驱动的带电粒子可以在各天体之间传播——也许可以在任意两个天体之间传播, 这个可能性与我们现在稀少的观测并不冲突。这些肉眼不可见的过程仅能借助电磁学和光学仪器来探测, 航天能力和仪器水平决定了我们的感知

极限。

第3个问题是理解太阳系演化的关键所在。首先列举一些当前的基本认识: 距离太阳越近, 太阳风的密度就越大, 太阳风动量的通量就越大; 行星磁层越大, 与太阳风的接触面积越大, 接收到的太阳风的动量就越大; 行星物质损失所携带的动量越大, 卸掉的太阳风的动量就越大; 行星磁场越强, 越能有效削弱太阳风粒子对行星大气或表面的冲击, 太阳风冲击引起的行星物质损失就越少(当然轨道也是一个影响因素)。根据对第1个问题的理解, 行星的积聚和消散是主要矛盾, 而决定矛盾发展趋势的内因在行星的内部——行星内部发电机过程伴生的电磁力。磁场增强固然能够减少行星物质损失, 但由于磁层体积增大, 接收到的太阳风动量也随之增加, 行星轨道外移的趋势也会增强; 磁场减弱虽然会带来行星物质损失的增加, 但有效减少了太阳风对行星轨道的影响。更有趣的是木星系统, 木卫一喷发物在电磁力导致的离心力作用下向外运动, 与木星磁层相互作用从而显著增加了木星磁层的体积, 使木星受到更强烈的太阳风冲击, 但木卫一喷发物又构成了木星系统物质损失的主要成分。

经由以上分析可以看出, 由于行星和其他天体的特征的多样性, 当前极度匮乏的研究资料难以支撑我们使用归纳法和演绎法来准确回答以上三个问题。提出一个合适的假说, 将有助于引导未来的深空探测任务的规划和设计, 事半功倍地获取关键的研究资料。同时, 这个假说需要解决行星演化的主要矛盾: 积聚和消散, 以及两者之间的关联、平衡和变化。

## 4 行星风: 电磁力主导的行星消散过程

当太阳系形成并达到相对稳定的状态以后, 在太阳的驱动和行星内部过程的调控下, 行星系统(包括行星、卫星和环)以粒子的形式失去物质, 这个行星消散的过程称之为行星风(Planet Wind)。

行星风假说至少包括如下涵义: (1) 行星系统是一个开放的系统, 其内部存在物质能量的转移, 与外部存在物质能量交换, 但总质量的变化趋势是在减少; (2) 行星系统不是孤立演化的, 行星系统之间存在物质能量交换, 行星系统既有自身的演化规律, 又与其他行星系统协同演化; (3) 决定行星系统的演化的主要因



素是行星系统自身的状态, 次要因素是外部条件, 但地外天体撞击等灾变条件也可能暂时地成为主要因素。

行星风假说从行星的本质出发, 并且考虑了行星之间的关联性, 因此能够为类比推理提供有效的思想框架, 确保在地球上认知到的物理化学规律同样可以应用于其它行星系统, 更重要的是, 我们也因此可以通过其他行星的现状来类比推理过去的地球和未来的地球, 反向推理也仍然成立。从行星科学和地球科学研究的角度看, 行星风假说是一种现代版的牛顿宇宙观, 从“可见”的世界拓展到了“不可见”的世界; 从哲学意义上讲, 行星风假说把“一切事物”的可实验范围做了时空拓展, 从当下的地球拓展到了过去和未来的地球以及行星的历史与发展, 建立了不同天体之间的关联性和整体性。

当前我们在太阳系中观察到的行星风, 根据行星风粒子的来源可以分为三类, 代表着行星风演化的三个阶段(图1): (1) 卫星行星风(Satellite Planet Wind), 例如木星和土星, 行星风粒子主要来源于卫星和环而非行星; (2) 大气行星风(Atmosphere Planet Wind), 例如金星、地球和火星, 卫星不再活跃或缺乏卫星, 行星风粒子主要来源于行星大气; (3) 表面行星风(Surface Planet Wind), 例如水星, 行星风粒子来源于行星的表面, 代表着大气已经消散殆尽, 行星的本体开始消散。

那么在第3个阶段, 行星如何终结? 以吸积过程的逆过程的方式消解至星子的状态? 我认为大抵不会如此。假使一切发生在太阳演化至红巨星吞没行星(行星风图像自然终结)之前, 角动量配置状态的改变会达到某一个阈值, 太阳系会结束相对稳定的状态, 再次转化到万有引力主导的剧变之中。

最后, 关于“行星风(Planet Wind)”名称的由来, 是充分考虑了相关研究的历史, 并兼顾行星科学和天文学两个学科的语言习惯, 在此进行一些简单讨论。使用“风(Wind)”来描述空间中等离子体的运动行为始于1958年的“太阳风(Solar Wind)”(Parker, 1958)。研究行星空间环境的研究者们使用“Magnetospheric Wind”和“Planetary Wind”来描述行星等离子体向行星际空间逃逸(Vasyliunas, 1983), 而月球的研究者则倾向于把这些能够影响月球的地球等离子体称之为“Earth Wind”(Ozima等, 2005)。另一方面, 天文学的研究者把系外恒星的“风”称为“Stellar Wind”, 且把系外行星的“Planetary Wind”和“atmospheric escape”互换使用:

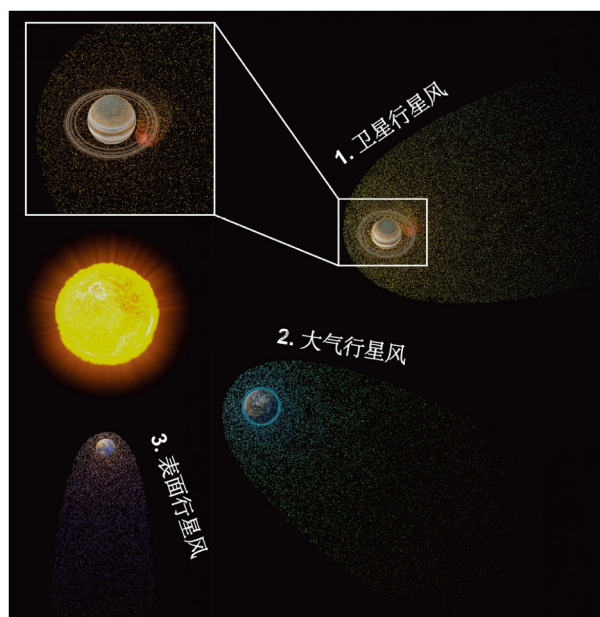


图1 三种行星风示意图

“Planetary winds, or atmospheric escape, represent the outflow of atmospheric material occurring on different space- and timescales”(Kubyshkina, 2023). 另外, 行星大气和气候的研究者们则使用“Planetary Wind”描述行星低层大气的运动, 近似气象学上“风”的经典意义。本文使用“Planet Wind”于2023年在国际学界提出讨论(Wei, 2023), 表达的是一个假说, 一种宇宙观, 旨在揭示行星自身的发展演化规律, 包含但不限于大气逃逸这种行星的特征或属性。简言之, Stellar Wind和Planetary Wind都是指一种物质损失的现象, 是一些恒星和行星的共性特征, 而本文所使用的Planet Wind则是用来表达关于行星演化的一个假说。

## 5 展望

在自然科学体系中, 行星科学是极为特殊的一门学科。在国外, “当一个深奥的研究专业因远远超出其控制范围的事件而突然提升到突出地位时, 这个学科几乎立即诞生了”(Burns, 2010)。在中国, 我们也可以看到, 在国家深空探测战略的带动下(Wei等, 2018; Li等, 2019), 行星科学的发展也是极为迅速的(Rong等, 2021)。但是, 一些根本的问题是无法回避的, 我们必

须要在哲学意义上认真系统地解决学科根基的问题。在验证行星风假说的道路上, 可以预期有无数激动人心的发现, 甚至显著地重塑我们的哲学与科学体系。应当做的事情至少包括如下几项。

(1) 建立完备的“探测-理论-实验”研究体系。当前世界行星科学研究的特点是重探测、轻理论、缺实验。各国在探测任务上的花费都以亿万计数, 然而并未产生如板块构造一般的理论高峰, 自然也牵引不了以验证理论为目的的实验研究。虽然这种局面是客观因素和历史原因造成的, 但这给学科发展带来很大的制约, 那就是知识难以体系化, 不利于传播、应用和传承。最好的突破口就是理论, 一个好的理论能够概括解释深空探测的结果, 还能够对验证实验提出明确需求, 更能前瞻指引未来深空探测的发展方向, 形成“探测-理论-实验”研究体系。

(2) 增强研究行星内部运行过程的能力。行星演化的内因在行星内部, 探测研究内部的能力决定着理解行星演化的上限。地球内部“不可入”, 探测主要依靠重、磁、电、震等地球物理方法。其他岩石行星的内部同样“不可入”。木星等气态行星虽无岩石圈和地幔的遮挡, 但想要进入探测仍然极为困难, 目前尚不具备从太空中极低温极低压环境到极高温极高压气体状态的连续探测能力。行星内部的研究, 应当是在有限间接探测的基础上, 主要依靠理论和实验进行研究。

(3) 增强准确评估行星物质收支的能力。有多少物质正在进入行星系统, 又有多少物质正在离开行星系统? 这些物质多以微小颗粒和带电粒子的形式存在, 当前对微粒和粒子进行就位探测能力不足以对这些物质进行全面监测, 暂时难以准确回答这个问题。发展出准确评估行星物质收支的新技术新方法, 并且连续运行相当长一段时间之后, 才有可能检验行星风假说。

行星风在太阳系内和系外应当具有普适性, 因为吸积和消散是行星演化的最根本的趋势。行星风的三种类型中, 最复杂的是卫星行星风。如木星的卫星行星风, 既有万有引力主导的特征(木星与木卫一之间的潮汐作用导致木卫一剧烈的地质活动, 是木星风的主要来源), 又有电磁力主导的特征(木星风的演化主要由电磁力控制), 具有极其重要的研究价值。中国行星探测工程中的天问四号任务把木星风的探测作为重点任务, 将对近木空间环境长期环绕探测、对四颗伽利略卫星的空间环境多次飞掠探测, 且会多次穿越中磁

尾木星风的关键区域。天问四号预计2035年前后到达木星, 同期形成联测的还有欧洲和美国的木星任务, 期待给行星风的研究带来极大突破。

**致谢** 感谢顾炜东、刘倍贝、石振、史全歧、张辉、尧中华、何飞、戎昭金进行讨论并提出修改建议。

## 参考文献

- 白春礼. 2019. 序言: 行星科学引领深空探测. 中国科学院院刊, 34: 739–740
- Burns J A. 2010. The four hundred years of planetary science since Galileo and Kepler. *Nature*, 466: 575–584
- Gronoff G, Arras P, Baraka S, Bell J M, Cessateur G, Cohen O, Curry S M, Drake J J, Elrod M, Erwin J, Garcia-Sage K, Garraffo C, Glocer A, Heavens N G, Lovato K, Maggiolo R, Parkinson C D, Simon Wedlund C, Weimer D R, Moore W B. 2020. Atmospheric escape processes and planetary atmospheric evolution. *J Geophys Res Space Phys*, 125: e2019JA027639
- Kronberg E A, Bučik R, Haaland S, Klecker B, Keika K, Desai M I, Daly P W, Yamauchi M, Gómez-Herrero R, Lui A T Y. 2011. On the origin of the energetic ion events measured upstream of the Earth's bow shock by STEREO, Cluster, and Geotail. *J Geophys Res*, 116: A02210
- Kubyskhina D. 2023. The origin of planetary winds. *Proceed Inter Astronom Union*, 17: 103–121
- Li C, Wang C, Wei Y, Lin Y. 2019. China's present and future lunar exploration program. *Science*, 365: 238–239
- Ozima M, Seki K, Terada N, Miura Y N, Podosek F A, Shinagawa H. 2005. Terrestrial nitrogen and noble gases in lunar soils. *Nature*, 436: 655–659
- Parker E N. 1958. Suprathermal particle generation in the Solar Corona. *Astrophys J*, 128: 677–685
- Rong Z, Cui J, Wei Y. 2021. Inaugural Chinese planetary science conference. *Nat Astron*, 5: 991–992
- Seki K, Nagy A, Jackman C M, Crary F, Fontaine D, Zarka P, Wurz P, Milillo A, Slavin J A, Delcourt D C, Wiltberger M, Ilie R, Jia X, Ledvina S A, Liemohn M W, Schunk R W. 2015. A review of general physical and chemical processes related to plasma sources and losses for solar system magnetospheres. *Space Sci Rev*, 192: 27–89
- Vasyliunas V M. 1983. Plasma distribution and flow. In: Dessler A J, ed. *Physics of the Jovian Magnetosphere*. Cambridge: Cambridge University Press. 395–453
- Wei Y. 2023. A global perspective on the interaction between solar wind

- and planets [abstract]. Presented at the 20th Annual Meeting of the Asia Oceania Geosciences Society, Singapore, 30 July–04 August 2023
- Wei Y, Yao Z, Wan W. 2018. China's roadmap for planetary exploration. [Nat Astron](#), 2: 346–348
- Wei Y, Zhong J, Hui H, Shi Q, Cui J, He H, Zhang H, Yao Z, Yue X, Rong Z, He F, Chai L, Wan W. 2020. Implantation of Earth's atmospheric ions into the nearside and farside lunar soil: Implications to geodynamo evolution. [Geophys Res Lett](#), 47: e2019GL086208
- Woolfson M M. 1993. Solar System—its origin and evolution. [Q J R Astron Soc](#), 34: 1–20

(责任编辑: 傅绥燕)