

骆松, 倪冬冬. 2027. 气态巨行星内部结构研究进展[J]. 地球与行星物理论评 (中英文), 58(1): 78-97. doi: 10.19975/j.dqyxx.2025-063.

Luo S, Ni D D. 2027. Recent advances in the interior structure of the gas giants[J]. Reviews of Geophysics and Planetary Physics, 58(1): 78-97 (in Chinese). doi:10.19975/j.dqyxx.2025-063.

气态巨行星内部结构研究进展

骆松¹, 倪冬冬^{1,2*}

1 南京大学 深空探测科学与技术研究院, 苏州 215163

2 澳门科技大学 月球与行星科学全国重点实验室, 澳门 999078

摘要: 木星和土星作为太阳系的气态巨行星, 不仅占据了太阳系除太阳外总质量的 90% 以上, 更持有了整个系统绝大部分的角动量, 在太阳系早期历史中起着至关重要的作用. 二者形成过程中捕获了原行星盘中大量物质, 其内部圈层结构和物质分布, 本质上是太阳系早期物质相互作用、引力坍缩及后续热演化过程的共同塑造结果. 因此, 对气态巨行星的内部结构的深入研究, 可以为行星科学领域多个核心问题提供关键支撑, 包括追溯原太阳星云的状态条件和演化历史、揭示太阳系行星的形成与演化机制、阐明系外巨行星的内部特征与演化规律等. 当前, 气态巨行星内部结构研究主要依托重力场、磁场与大气性质等外部探测数据, 通过行星结构模型构建、内部物态性质研究以及形状与重力场计算, 开展多物理场联合反演分析. 近年来, 朱诺号 (Juno) 和卡西尼号 (Cassini) 探测器分别对木星和土星开展近距离环绕探测, 获取了前所未有的高精度重力场数据; 与此同时, 极端温压条件下氢、氦等物质的物态性质研究也在实验和理论研究方面取得关键突破. 基于上述科学背景与研究进展, 本文首先回顾木星与土星的主要探测任务, 继而围绕气态巨行星形状与重力场的理论计算、氢氦微观物态性质研究等核心环节展开叙述, 系统梳理木星和土星内部结构的研究历程, 并总结近年来具有代表性的前沿成果.

关键词: 木星; 土星; 重力场; 氢氦状态方程; 内部结构

doi: 10.19975/j.dqyxx.2025-063

中图分类号: P185

文献标识码: A

Recent advances in the interior structure of the gas giants

Luo Song¹, Ni Dongdong^{1,2*}

1 Institute of Science and Technology for Deep Space Exploration, Nanjing University, Suzhou 215163, China

2 State Key Laboratory of Lunar and Planetary Sciences, Macau University of Science and Technology, Macao 999078, China

Abstract: Jupiter and Saturn, as the gas giants of our solar system, account for over 90% of the total mass beyond the Sun and hold most of the system's angular momentum, playing a crucial role in the early history of the solar system. During their formation, these planets captured vast amounts of material from the protoplanetary disk. Their internal structure and interior composition are fundamentally affected by material interaction, gravitational collapse, and subsequent long-term thermal evolution. Exploring the interior structure of the gas giants provides critical insights into several core questions in planetary sciences, including the conditions and evolutionary history of the protosolar nebula, the formation and evolution mechanisms of solar system planets, and the interior structure and evolution history of giant exoplanets. Furthermore, comparative studies between Jupiter and Saturn reveal important dif-

收稿日期: 2025-12-23; 录用日期: 2026-02-24

Received Date: 2025-12-23; Accepted Date: 2026-02-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (42578010, T2495234); 中国国家航天局民用航天技术预研项目 (D010303); 澳门特别行政区科技发展基金 (0139/2024/RIA2)

Supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 42578010, T2495234), the Pre-Research Projects on Civil Aerospace Technologies of China National Space Administration (Grant No. D010303), and the Science and Technology Development Fund, Macau SAR (Grant No. 0139/2024/RIA2)

第一作者: 骆松 (1999-), 男, 在读博士研究生, 主要从事气态巨行星内部结构研究. E-mail: luosong@smail.nju.edu.cn

*通信作者: 倪冬冬 (1986-), 男, 教授, 主要从事巨行星与系外行星内部结构、行星大气物理与化学性质以及天体表面水资源演化等课题的研究. E-mail: ddni@nju.edu.cn



ferences in their internal dynamics and evolutionary pathways, offering valuable benchmarks for understanding giant planets both within and beyond our solar system. Current research on the interior structure of the gas giants primarily relies on external observational constraints such as gravity fields, magnetic fields, and atmospheric properties. However, inferring the interior structure from these constraints is inherently a highly degenerate inversion problem, depending on interior structural models, internal material properties, and calculations of planetary shape and gravity fields. Modern approaches increasingly integrate multiple physical constraints by combining gravity harmonics with magnetic field measurements and zonal wind profiles to reduce degeneracies in interior models. In recent years, the Juno and Cassini spacecraft have conducted close orbital explorations of Jupiter and Saturn, respectively, acquiring unprecedented high-precision gravity field data. Simultaneously, experimental and theoretical research on the physical properties of hydrogen and helium under extreme temperature and pressure conditions has achieved critical breakthroughs. With these in mind, this paper reviews the major exploration missions for Jupiter and Saturn and elaborates on the core aspects of interior modelling, such as theoretical calculations of planetary shapes and gravity fields, current knowledge of hydrogen/helium microphysical properties. The research progress on the internal structures of Jupiter and Saturn is also summarized, showing some representative frontier achievements.

Keywords: Jupiter; Saturn; gravity field; equation of state of hydrogen-helium; interior structure

0 引 言

木星与土星, 作为太阳系行星系统中仅有的两颗气态巨行星, 其内部结构研究是行星科学领域的核心课题之一, 研究意义贯穿太阳系早期形成与演化、系外行星认知等重要领域 (Stevenson, 2020). 从物质组成来看, 两者元素比例与构成太阳的物质相近, 特别是氢和氦的比例, 这表明它们必须在太阳星云气体完全消散之前形成, 是太阳系中最早阶段形成的行星, 它们的形成直接影响着太阳系行星系统的形成与演化. 更关键的是, 木星和土星还占据了太阳系除太阳外总质量的 90% 以上, 更持有了整个太阳系绝大部分的角动量, 这种压倒性优势使其对太阳系行星系统的形成和长期动力学演化发挥着举足轻重的作用 (Helled et al., 2013, 2023).

研究气态巨行星内部结构, 能为破解行星科学领域的若干核心问题提供重要支撑 (Lissauer and de Pater, 2013). 以木星为例, 其氢氦元素占比与原太阳星云高度吻合, 被认为是最接近原始太阳星云组成的天体之一, 大概率保留了原太阳星云的状态条件和历史信息; 其大气中的重元素^①丰度显著高于原太阳星云丰度, 这一特征可能蕴含着行星形成位置的关键线索 (John and Caroline, 2006); 而行星内部圈层结构、重元素含量以及分布等性质

(Helled and Stevenson, 2024), 本质上就是行星形成和演化的直接体现, 能为核心吸积、引力不稳定性等行星形成理论提供关键佐证 (Ikoma and Kobayashi, 2025). 此外, 已确认的系外行星中存在大量气态巨行星. 受探测条件限制, 目前对其内部结构和形成机制尚未形成直接认知. 木星与土星作为太阳系内的“天然样本”, 其内部结构研究可以以为系外气态巨行星的认知突破提供重要借鉴.

木星系和土星系的探测与研究始终是深空探测和空间科学领域的前沿热点之一. 从早期地面望远镜观测到太空时代各类深空探测飞船的近距离探测, 人们累计获取了大量关于行星磁场、重力场及大气性质等基础数据 (顾炜东等, 2024; 宋心仪等, 2025). 然而, 受行星内部极端温压环境难以在地面实验室再现、早期探测获取的科学数据精度有限等因素制约, 其内部结构建模与研究陷入瓶颈. 近年来, 朱诺号 (Juno) 和卡西尼号 (Cassini) 航天器分别对木星、土星实施多次近距离环绕探测, 获取了前所未有的高精度重力场数据 (Iess et al., 2018, 2019); 与此同时, 极端温压条件下氢、氦等物质的物态性质研究取得关键性突破 (Brygoo et al., 2021; Gao et al., 2022; Ji et al., 2019; McMahon et al., 2012; Pan et al., 2023), 二者结合推动了气态巨行星内部结构研究取得一系列重要进展. 鉴于气态

^① 在行星科学中, 重元素泛指除氢和氦以外的其他所有元素. 这些重元素在行星内部常以岩石 (如硅酸盐、铁镍合金)、冰 (水、甲烷、氨) 或溶解于流体包层中的形式存在.

巨行星内部结构研究的重要科学价值, 本文将对该领域进行系统论述: 首先简要梳理相关探测任务, 介绍内部结构研究的主要依赖数据; 随后概述当前该领域的核心研究方法, 涵盖行星形状和重力场计算、氢氦状态方程最新结果以及氢氦相分离微观机制研究; 在此基础上, 回顾木星与土星内部结构的研究历程, 总结最新研究进展; 最后聚焦大气较差自转、内部约束新方法等关键问题展开讨论, 为后续深入研究提供参考。

1 气态巨行星探测任务回顾

与类地行星拥有着陆、采样返回、环绕探测等多样化探测手段不同, 气态巨行星被浓密大气包裹, 当前探测方式以飞越和环绕探测为主。气态巨行星探测任务整体呈现出难度高、数量少、周期长的特点, 获取的科学数据多集中于空间环境、磁场、重力场以及大气性质等方面。本节将简要回顾木星与土星的相关探测任务。

1.1 木星探测任务

作为太阳系最大的气态巨行星, 人们对木星的探测较为全面, 相关探测任务概览如图 1 所示。木星的探测历程最早可追溯至地面观测时期, 意大利天文学家伽利略早在 1610 年便通过自制望远镜完成人类对木星的首次观测, 揭开了木星探索的序幕。

木星飞越探测以先驱者号、旅行者号系列探测器为代表, 首次实现木星近距离观测, 为内部模型研究提供了初始约束。1972 年 3 月, 美国国家航天局 (NASA) 发射的先驱者 10 号 (Pioneer 10), 是人类历史上首个成功飞越木星并进入星际空间的探测器 (Hall, 1974)。它以约 13 万公里的距离飞越木星赤道区域, 任务期间陆续传回木星及其卫星基础图像, 并初步测量了木星磁场信息。其姊妹探测器先驱者 11 号 (Pioneer 11) 于 1973 年 4 月发射, 次年 12 月以约 4.3 万公里高度近距离飞越木星, 首次获取木星极区高分辨率图像, 进一步完善了木星磁场分布与辐射带的刻画 (Hall, 1983)。1977 年 NASA 发射的孪生探测器旅行者 1 号 (Voyager 1) 和 2 号 (Voyager 2), 于 1979 年先后飞越木星, 实现木星系精细化探测: 旅行者 1 号首次近距离拍摄大红斑照片, 揭示了其内部深层风暴特征, 还通过红外测量仪获取木星浅层大气温度数据 (Smith et al., 1979); 旅行者 2 号重点关注木星南半球及伽利略卫星, 其确认了木卫一火山活动的持续性, 同时为木卫二“冰下海洋”的猜想提供了关键佐证 (Hanel et al., 1979)。1990 年 NASA 和欧空局 (ESA) 联合发射的尤利西斯号 (Ulysses), 于 1992 年 8 月以约 38 万公里飞越木星, 重点测量木星高纬度的磁层信息 (Smith et al., 1992)。综合先驱者号、旅行者号系列任务的探测数据, 科学团队通过探测木星重力场对飞船的轨道扰动, 获取了

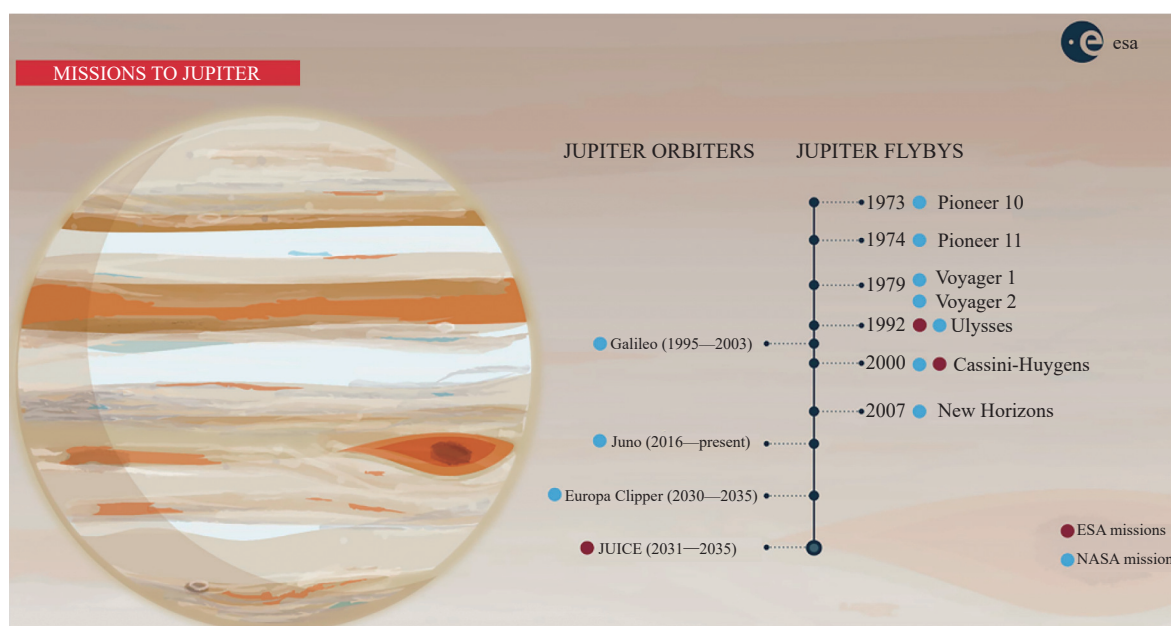


图 1 木星主要探测任务 (引自 ESA/Science & Exploration, https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Juice/A_history_of_Jupiter_exploration_the_journey_to_Juice)

Fig. 1 Exploration missions for Jupiter (from ESA/Science & Exploration)

以 J_2 和 J_4 为主的木星低阶重力矩, 成为早期木星内部结构研究的核心约束 (Campbell and Synnott, 1985). 此外, 诸如卡西尼号和新视野号 (New Horizons) 等探测器, 虽未以木星系探测为核心目标, 但飞越木星时仍提供了补充观测, 相关内容此处不再详述 (Porco et al., 2003; Reuter et al., 2007).

木星环绕探测以伽利略号、朱诺号探测任务为核心, 二者实现了对木星的长期近距离环绕探测, 获取了内部结构研究所需的高精度科学数据. 1989 年 10 月, NASA 发射的伽利略号探测器 (Galileo), 实现人类对木星的首次环绕探测 (Young, 1998). 其核心贡献在于释放大气探针开展木星大气就位测量, 获取了浅层大气温压结构、成分等关键信息, 具体成果包括: 木星 1 bar 压力处的温度为 165 ± 5 K, 大气氦质量比 $Y = 0.238 \pm 0.005$, 以及大气重元素丰度 $Z = 0.0167 \pm 0.006$ 等. 这些数据为木星内部结构模型构建提供了关键参数与边界条件, 至今仍是内部结构建模的重要依据. 2011 年 8 月, NASA 发射的朱诺号探测器于 2016 年进入木星极轨 (Bolton et al., 2017a). 该任务以揭示木星内部与形成演化为核心科学目标, 搭载高精度重力仪和磁强计, 在近木点仅 4000 km 的轨道上开展探测, 其获取的高精度重力场数据是当前木星内部结构研究的关键约束之一. 此外, 2023 年 4 月 ESA 主导、NASA 参与的木星冰卫星探测器 (JUICE) 成功发射, 预计 2031 年抵达木星系并环绕木星, 但其核心任务聚焦木卫三 (冰卫星) 的专项探测 (Bou-tonnet et al., 2024). NASA 主导的欧罗巴快帆探测器 (Europa Clipper) 于 2024 年 10 月发射, 预计 2030 年抵达木星系, 其核心科学目标是通过多次近距离飞越, 探测木卫二的冰层结构、地下海洋特性, 以及评估这颗卫星是否具备生命存在的宜居要素 (Pappalardo et al., 2024).

1.2 土星探测任务

相较于木星, 土星的探测任务整体较少. 早期飞越探测主要以先驱者 11 号、旅行者号系列探测器为核心. 1973 年 4 月发射的先驱者 11 号, 在完成木星探测任务后, 借助木星引力弹弓效应转向土星, 于 1979 年 9 月实现人类历史上首次土星近距离探测, 最近距离土星云顶约 2.1 万公里. 作为首个近距离抵达土星的航天器, 其探测成果包括: 首次获取土星及其环系的清晰图像, 发现土星 F 环以及新的土卫; 通过磁场测量发现土星磁轴与自转轴

几乎完全重合 (Acuña and Ness, 1980). 前文提及的孪生探测器旅行者 1 号和 2 号, 均在木星探测任务结束后调整轨道前往土星. 旅行者 1 号于 1980 年 11 月穿越土星弓形激波, 重点探测土星本体、环及多颗卫星. 该任务最大突破是颠覆了此前土星环为单一结构的认知, 明确其由数千至上万条细环构成, 环间存在明显缝隙与复杂纹理 (Hanel et al., 1981). 由于任务后期科学团队重点聚焦土卫六的探测, 旅行者 1 号没有继续前往天王星和海王星. 旅行者 2 号于 1981 年 8 月以约 10.1 万公里距离飞越土星 (Smith et al., 1982), 其在旅行者 1 号的基础上进一步完善了探测成果: 明确土星环系的温度分布, 补充观测土星赤道区域的强风结构等. 作为旅行者系列探测器的延续, 其在完成土星探测任务后继续向天王星、海王星飞行, 是目前唯一探测过太阳系四大巨行星的航天器. 综合先驱者号、旅行者号系列任务的探测数据, 科学团队通过探测土星重力场对探测器的轨道扰动, 获取了以 J_2 和 J_4 为主的土星低阶重力矩, 成为早期土星内部结构研究的主要约束 (Campbell and Anderson, 1989).

迄今为止, 土星唯一的环绕探测任务由卡西尼号探测器完成 (Ingersoll, 2020). 该探测器由 NASA、ESA 与意大利航天局 (ASI) 联合研制, 于 1997 年 10 月发射, 2004 年 7 月成功进入土星轨道, 开启长达 13 年的持续环绕探测, 是当前最为全面的土星探测任务. 探测期间, 卡西尼号实现多项创举: 其完整捕捉到土星的季节性变化, 记录到赤道风带强度随季节的显著波动; 任务早期获取了 J_2 - J_6 等相对准确的低阶重力矩, 是这一时期内部结构研究的主要约束. 受土星环轨道干扰, 近距离高精度探测长期面临瓶颈. 卡西尼任务结束末期, 科学团队为其设计了“大结局”受控撞入任务: 自 2017 年 4 月起, 该探测器执行了 22 次近距离探测, 多次穿越土星环与土星大气层之间的狭窄缝隙, 最近探测距离距土星云顶仅 1600 km, 其获取的土星高精度重力场数据与磁场数据, 是当前土星内部结构研究的核心约束 (Iess et al., 2019). 同年 9 月, 卡西尼号探测器按预定轨道坠入土星大气层, 直至信号消失 (Galanti et al., 2019).

尽管探测任务取得诸多进展, 但当前土星内部建模的科学数据不确定性仍显著高于木星. 目前已明确的基础参数中, 除行星基本属性外, 仅土星 1 bar 处的温度 (135 ± 5 K) 由先驱者 11 号探测器通过遥感观测确定 (Ingersoll et al., 1980). 核心建

模参数的缺失主要体现在两个方面: 其一, 土星至今尚未开展大气就位探测, 其大气氢质量比、重元素丰度等关键参数缺乏直接探测数据支撑. 尽管普遍认为由于“氢雨”较木星更加强烈, 推测其大气氢质量比低于木星, 但定量结果仍不明确; 其二, 土星磁轴与自转轴高度重合 (Acuña and Ness, 1980), 导致通过磁场反推深层自转周期的常规研究途径失效. 对于快速旋转的气态巨行星而言, 深层自转速度直接影响离心势, 进而影响行星重力场与等势面形状计算. 这些参数的不确定性进一步加剧了内部结构反演的难度 (Ni, 2020a).

2 气态巨行星内部结构研究方法

由于无法直接探测气态巨行星内部, 通过外部探测数据推断其内部结构成为当前该领域的主要途径. 在各类外部探测数据中, 重力场数据是反映行星内部密度分布的核心指标, 可通过探测行星重力场对航天器轨道的扰动获取. 结合已获取的重力场信息, 通过建立行星内部结构模型、基于假设的密度分布计算行星形状和重力场, 进而与探测结果进行对比是当前间接约束其内部结构的主要方法之一.

气态巨行星内部结构研究本质上是一类复杂的反演问题, 核心环节包括结构模型构建、内部物态性质研究以及形状与重力场计算. 其准确反演依赖两个关键环节: 其一, 快速准确的行星形状与重力场计算方法, 是开展内部结构反演的关键前提; 其二, 气态巨行星以氢、氦为绝对主导成分, 极端温压下的物态性质直接关系到对其内部物质分布和圈层结构的正确认知. 本节后续将围绕这两方面内容展开: 首先阐述巨行星形状与重力场的计算方法, 其次汇总氢、氦物态性质研究的最新进展.

2.1 巨行星形状与重力场计算

气态巨行星 (自转较快的流体行星) 形状与重力场的自洽计算, 是内部结构反演的核心基础. 目前理论方法主要有两种: 形状理论 (Theory of Figures) 和麦克劳林同心椭球方法 (Concentric Maclaurin Spheroids), 二者分别以“微扰近似”和“多层嵌套”为核心思想.

形状理论最早可追溯至 19 世纪初, 该方法本质上是一种基于流体静力学平衡的微扰理论, 核心逻辑为: 将气态巨行星因高速旋转形成的椭球形态, 视为对完美球体的微小偏离 (即微扰), 通过

系统化的数学框架量化这种偏离与重力场的内在关联. 该理论的前提是行星内部流体需要满足正压条件, 即等压面与等密度面重合. 行星内部任意质点所受的压力梯度, 与该点密度及总势梯度严格平衡, 而总势由重力势和离心势叠加而成. 为刻画非球对称的椭球形态, 该方法采用球谐函数展开来描述等势面形状: 以行星平均半径为基准, 将等势面的径向坐标分解为基准半径与若干修正项, 其中修正项由无量纲的形状函数与勒让德多项式共同构成, 实现对不同纬度形态差异的精准拟合. 自洽求解的核心流程为: 基于流体静力学平衡方程和势叠加原理, 先求解满足给定密度分布的形状函数; 再通过形状函数推导重力势的球谐展开系数, 进而计算得到各阶重力场参数. 这一微扰理论自提出以来, 逐步发展为更高阶、更高效的数值实现形式. Zharkov 等 (1973) 在前人工作基础上, 构建了 3 阶版本的自洽数值求解框架, 最高可计算至 6 阶重力矩. 最新研究分别将其发展至 5 阶 (Ni, 2019)、7 阶 (Nettelmann et al., 2021) 和 10 阶版本 (Morf et al., 2024). 该方法的显著优势是将三维问题简化为一维求解 (仅需求解赤道平面形状, 高纬度等势面形态由球谐函数自然延展), 计算效率高, 非常适用于复杂模型迭代和快速反演场景.

麦克劳林同心椭球方法由 Hubbard (2013) 首次提出, 最新研究将其扩展至较差自转的框架 (Kong et al., 2013; Militzer et al., 2019). 其本质是无近似的多层嵌套方法, 核心思路为通过多层密度恒定的同心椭球嵌套叠加, 实现形状和重力场的自洽计算. 该方法将气态巨行星视为一系列同心嵌套的旋转对称椭球体, 每层椭球密度恒定, 通过灵活设置分层数量, 可精准适配从核心到外层的连续密度梯度变化. 每层椭球的物理参数 (扁平度、密度、径向尺度) 共同决定其重力势的球谐展开特征. 行星总的重力场则是各层椭球重力势的叠加与离心势的耦合, 形成最终的重力场分布. 自洽求解的关键逻辑是: 通过迭代调整每层椭球形状, 确保所有层的边界均为总势的等势面, 从而使等势面形状和重力场严格匹配, 实现二者的自洽耦合. 该方法的核心优势在于无近似处理, 能精准计算给定密度分布下的重力场, 但计算复杂度随分层数量显著上升, 对计算资源的要求更高.

2.2 巨行星内部氢氦物态性质研究

作为气态巨行星的主要成分, 氢和氦在极端温

压条件下的物态性质, 既是解析其内部物质分布和圈层划分的核心物理依据, 也是衔接结构模型与重力场计算的关键纽带. 在当前气态巨行星的内部结构研究中, 氢的非金属-金属相变 (non-metallic to metallic transition, NMT) 温压边界, 描述物态性质的状态方程 (equation of state, EOS), 以及氢氮不相溶的微观机制, 仍是制约对气态巨行星内部正确认知的主要因素 (Fortney et al., 2023; Howard et al., 2023).

氢的 NMT 研究是物态性质研究领域的经典议题. 早在近百年前, Wigner 和 Huntington (1935) 就推测氢的相图中可能存在金属相. 随后, Stevenson 和 Salpeter (1977a, 1977b) 首次将氢的 NMT 与气态巨行星内部结构研究相关联, 预测其相变压力条件在 2~4 Mbar. 氢的 NMT 本质上是从绝缘分子流体到导电原子流体的转变, 该相变可通过电导率、反射率等宏观物理量的实验测定. 早期不同实验手段的结果存在显著差异: 动态冲击实验表明, 温度约为 3000 K 的流体氢在 1.4 Mbar 压力条件下发生 NMT (Weir et al., 1996); 而静态高压反射率测量结果则显示, 相变可能发生在 0.5 Mbar 的更低压力下 (Celliers et al., 2000). 这种差异凸显了极端温压环境下物态性质研究的复杂性. Helled 等 (2020) 近期对氢相图的实验和理论研究开展了全面梳理, 相关结果如图 2 所示. 尽管部分区域的实验与理论结果已经形成共识, 但相变的温压条件边界尚未完全明确. 虽然氢是结构最简单的元素, 但是其在极端温压下的物态性质, 至今仍未被彻底厘清.

EOS 是一个基础物理方程, 它描述在一定的物质组成下, 物质的压力、温度、密度与熵等核心状态参量之间的定量关系. EOS 的实验研究方法主要分为静态和动态压缩两类, 前者以金刚石对顶砧压缩为核心 (Loubeyre et al., 2002; Zaghoo et al., 2016), 后者以气枪冲击压缩为代表 (Hicks et al., 2009; Knudson and Desjarlais, 2017; Li et al., 2023). 目前不同高压实验测得的氘 (当前氢在极端温压下的物态数据主要基于氘的高压实验) 的 EOS 存在分歧, 且在给定压强条件下, 实验所达到的温度远远高于木星的内部温度 (Militzer et al., 2016). 由于气态巨行星内部极端温压环境难以在实验室完全再现, 基于理论计算方法获取状态方程对行星内部研究而言至关重要. 理论计算方法主要分为两类: 一类是半经验方法 (基于化学图像), 通过拟合实验数据的对

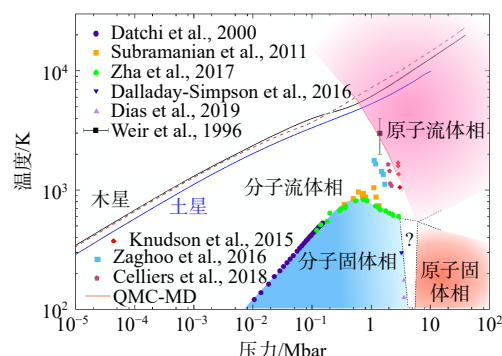


图 2 氢的相图以及木星、土星的温压剖面. 其中不同颜色的点代表从实验或模拟方法确定的氢的 NMT 条件. QMC-MD: 量子蒙特卡罗-分子动力学模拟 (引自 Helled et al., 2020)

Fig. 2 The phase diagram of hydrogen and the temperature-pressure profiles of Jupiter and Saturn, where points of different colors represent the NMT conditions of hydrogen determined by experimental or simulation methods (from Helled et al., 2020)

势函数描述分子或原子间相互作用, 基于自由能最小化原理实现热力学平衡 (Saumon et al., 1995). 该方法获取的 EOS 在低压区域与实验结果吻合较好, 但高密度区域 (如氢的 NMT 相变区域) 与冲击实验曲线存在明显偏差, 物理严谨性不足 (Mazevet et al., 2022); 另一类是第一性原理计算 (基于物理图像), 仅通过库仑势描述电子与离子间相互作用, 直接求解薛定谔方程模拟粒子微观行为, 常用方法包括密度泛函分子动力学理论 (density function theory molecular dynamics, DFT-MD) 和量子蒙特卡罗方法 (Quantum Monte Carlo, QMC). 该方法无需经验参数, 物理基础更为牢固, 是当前 EOS 理论计算的主流方向, 更多细节可参见 McMahon 等 (2012) 的综述.

在气态巨行星内部结构研究领域, 目前多数状态方程聚焦纯物质 (纯氢、纯氦) 的物态特性, 处理氢、氦混合体系时, 常采用纯物质 EOS 数据结合体积叠加定理近似. 纯氢理论 EOS 发展历程如下: 早期半经验模型 SCvH95 因高密度区域与冲击压缩实验数据不符, 在木星、土星的内部研究中逐渐被替代 (Saumon et al., 1995); 基于第一性原理计算的 MH13 首次模拟了木星氢氦混合体系并纳入非理想混合效应, 是理论计算方法的重大突破 (Militzer and Hubbard, 2013). 但存在混合比单一 (仅含特定氦质量比)、低压数据 (≤ 0.1 Mbar) 覆盖不足的缺陷, 需与其他 EOS 互补使用. 近年来, 氢的 EOS 则聚焦多段拼接与混合效应修正, 代表性成果包括: CMS19 (Chabrier et al., 2019) 采用分段拼

接, 低压区 (分子氢) 沿用 SCvH95 数据、中压区 (约 Mbar 量级) 采用 Caillabet 等 (2011) 的分子动力学模拟结果、高压区采用 Chabrier 和 Potekhin (1998) 的致密等离子体模型; MLS22 作为 CMS19 的更新版本, 进一步优化了中低压区间数据的插值范围和插值精度 (Mazevet et al., 2022); MGF16+MH13 与 CD21 均基于 MH13 构建, 前者将含混合效应的纯氢 EOS 与 SCvH95 拼接而成 (Miguel et al., 2016), 后者则替换拼接对象为 CMS19 (Chabrier and Debras, 2021); REOS (Nettelmann et al., 2008) 以及后续的更新版本 (Becker et al., 2014) 均是多段拼接思路, 此处不再详细赘述. 上述基于不同方法获取的状态方程, 其在低压区域的密度与压力特性如图 3 所示. 纯氢的 EOS 研究也同样积累了丰富成果: 实验方面已通过静态压缩、动态冲击等手段获取了对应的物态数据 (Eggert et al., 2008; Loubeyre et al., 1982), 理论方面亦构建了纯氢的状态方程数据体系, 如上述 SCvH95、CMS19 和 REOS 均提供了纯氢的 EOS 数据表格.

氢氦不相溶 (相分离) 是指在行星内部特定温压条件下, 均匀混合的氢氦体系会自发分离为富氢相和富氦相 (Salpeter, 1973). 其微观机制为: 极端温压驱动氢分子解离、电离并形成电子海, 氢氦间相互作用从理想混合态向非理想排斥态转变. 这一效应的研究源于土星演化模型的经典难题: 早期土星演化模型始终无法解释土星 “超额亮度” 现象, 即土星自身辐射能量长期大于其接收到的太阳辐射能量, 存在能量盈余 (Low, 1966). Stevenson 和 Salpeter (1977a, 1977b) 将氢氦相分离的物态性质

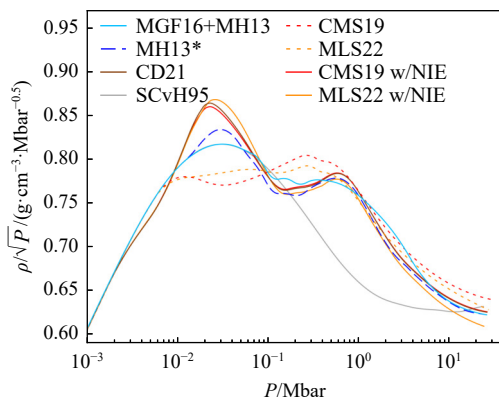


图 3 不同状态方程对应的压力密度关系. 基于无致密核心的均匀模型, 氦丰度 $Y = 0.245$, w/NIE 表示考虑氢氦非理想混合效应 (引自 Howard, 2023)

Fig. 3 Adiabats obtained from different EOSs and corresponding to a homogeneous model, with no compact core, with $Y = 0.245$ (from Howard, 2023)

纳入到气态巨行星的演化计算, 提出关键的 “氢雨” 假说: 富氢液滴从氢氦混合体系析出后向土星内部沉降, 释放的引力能补充了相应的超额热量. 此后, 众多研究通过蒙特卡洛模拟、分子动力学等方法尝试确定氢氦分离的温压条件, 但早期理论结果普遍存在分离温度过低的问题, 甚至远低于土星内部的温压条件 (Hubbard and DeWitt, 1985; Pfaffenzeller et al., 1995). 第一性原理计算的发展推动了该领域的突破, 最新的氢氦分离研究对应的温压曲线如图 4 所示. Lorenzen 等 (2009, 2011) 采用 DFT-MD 模拟, 得到 1~24 Mbar 压力下不同氦丰度的分离曲线 L0911, 但理论计算结果偏高, 需经温度偏移才能匹配行星观测; Morales 等 (2009, 2013) 在计算中首次考虑非理想混合效应, 得到更低的分离温度, 但受限于原太阳星云氦质量比的固定约束; Schöttler 和 Redmer (2018a, 2018b) 改用范德华交换关联泛函, 得到兼顾非理想混合效应与任意氦质量比的分离曲线 SR18, 综合适用性更优. 尽管理论方面取得进展, 但这些结果仍面临实验挑战: Brygoo 等 (2021) 最新的高压实验显示, 氦丰度 $Y = 0.33$ 的分离温度比 SR18 理论值高约 2000 K, 远超合理偏移量, 二者的矛盾仍待解决 (详细信息见图 4). 关于氢氦相分离的更多细节可参见 Arevalo 等 (2024) 的专题研究.

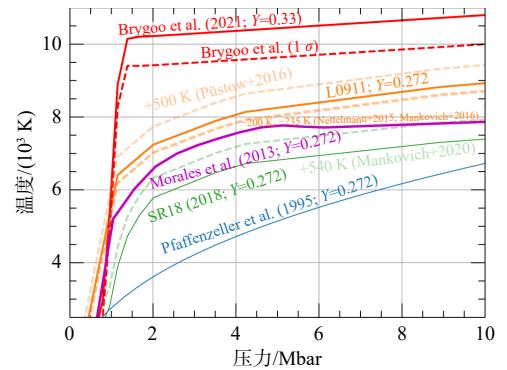


图 4 基于不同理论方法计算的氢氦混溶曲线以及最新的高压冲击实验数据 (引自 Arevalo et al., 2024)

Fig. 4 The hydrogen-helium miscibility curves calculated by different theoretical methods, as well as the latest high-pressure shock experiment data (from Arevalo et al., 2024)

3 木星与土星内部结构: 研究历程与前沿进展

气态巨行星内部结构的研究已逾百年, 核心议题始终围绕物质组成、圈层结构及核心性质展开.

得益于深空探测数据的持续积累、极端温压条件实验技术的进步以及氢氦物态方程理论计算的突破, 目前对木星和土星内部结构已形成一系列共识. 下文将按照时间顺序分别回顾木星与土星的研究历程并总结最新进展.

3.1 物态方程与重力场数据融合: 内部结构解析

3.1.1 木星内部结构

Jeffreys (1924) 在气态巨行星的研究中取得开创性突破, 首次建立起木星扁率 (赤道半径与极半径差异) 与转动惯量的定量关联. 以“密度均匀分布的理想行星”为参照 (其归一化转动惯量理论值为 0.4), 结合观测到的木星实际扁率, 推导出木星归一化转动惯量约 0.265, 直接证实木星内部存在密度梯度 (非均匀分布). 为进一步约束物质组成, 文章基于“行星实际转动惯量, 必然大于全行星以表层密度均匀分布时的理论值”这一前提, 结合木星平均密度推导出表层密度, 与当时已知最轻的氢、氦等化学元素进行密度对比后, 明确指出木星外层主要由氢和氦构成. 基于此, Jeffreys 构建了首个木星层状结构模型: 由内向外依次为岩石核心、冰层及外部的氢氦包层. 其中氢氦包层最薄, 约占行星半径的 9%, 冰层约占 25%, 其余全部为岩石核心. 在当时仅能获取平均密度和转动惯量的情况下, 这已是对木星内部结构的最佳约束. 20 世纪 50 年代至 70 年代初, 人们对木星内部的认识发生关键变革. 在 Wildt (1947) 基于光谱分析结果证实木星内部氢占主导后, Demarcus (1958) 进一步提出: 木星或由约占行星总质量 2% 的致密核心以及包裹其外的氢氦包层构成; 其整体化学组成与太阳相近, 其中氢的质量占比 78%、氦的质量占比 20%, 且氦丰度随深度增加而逐渐升高 (因氦密度高于氢). 与 Demarcus 观点不同的是, Peebles (1964) 提出木星内部温度可能比此前认识的更高, 存在较深对流大气, 因此氢氦包层中的氦倾向均匀混合. 这一设想直至对木星的红外观测发现其内部存在热源才得以证实, 人们进一步认识到气态巨行星内部的流体特征 (Low, 1966). 结合此前 Wigner 和 Huntington 关于氢相图中金属相的猜想, 这一时期普遍认为: 木星内部由内而外依次为致密核心、金属氢层和分子氢层, 氦丰度因对流作用在各层间保持均匀.

20 世纪 70 年代至 21 世纪初, 是木星内部认

知深化的关键阶段. 这一时期, 先驱者号、旅行者号、伽利略号等深空探测任务获取了重力场、磁场、大气性质等关键数据 (Hall, 1983; Young, 1998), 同时氢氦物态性质研究也取得突破, 共同推动着气态巨行星内部结构研究的发展. 物态性质方面, Smoluchowski (1967) 以及 Salpeter (1973) 率先提出“木星内部可能存在氦的分异”: 氦在不同物态的氢中溶解度存在差异, 导致氦质量比在金属氢和分子氢包层间呈现显著差异. 随后, Stevenson 和 Salpeter (1977a, 1977b) 将氢氦不混溶纳入演化模型, 其研究结果表明氦的分化在木星内部可能尚未发生或者刚刚启动. 这一推测被伽利略号环绕探测任务证实: 其释放的大气探针就位测量显示, 木星大气中氦质量比仅略低于原太阳星云的氦质量比 (Von Zahn et al., 1998). 此后, 木星内部结构研究的范式得以建立: 由内向外依次为致密核心、富氦的金属氢层以及贫氦的分子氢层 (示意图见图 5 木星对应的左半部分). 后续研究均以此为基础, 聚焦其核心大小, 重元素含量及分布等核心科学问题. 早期研究对木星核心的质量估计介于 10~30 倍地球质量之间 (Stevenson, 1982). 自 20 世纪 80 年代开始, 不同研究或基于对氢相变区域的不同考虑 (Hubbard and Marley, 1989)、或基于不同状态方程 (Zharkov and Gudkova, 1992) 对木星核心质量的估算大都介于 0~12 倍地球质量之间, 显著低于早期模型计算结果 (Fortney and Nettelmann, 2010),

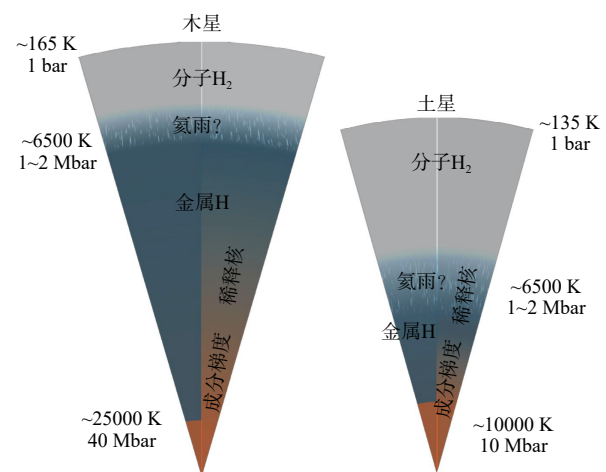


图 5 木星与土星内部圈层结构示意图. 每幅图左侧为传统层状结构, 右侧为包含稀释核及成分梯度的内部结构 (引自 Helled et al., 2020)

Fig. 5 Sketches of internal structures of Jupiter and Saturn. Left side of each diagram: traditional layered structure. Right side of each diagram: Deep interiors with diluted core and composition gradients (from Helled et al., 2020)

相关核心质量的推断结果详见图 6. 这一阶段, 氢氦 EOS 的应用在气态巨行星研究领域逐渐趋于集中, 以半经验模型 SCvH95 应用最为广泛 (Saumon and Guillot, 2004). 该时期研究以 Guillot (1999a, 1999b) 的工作为代表, 基于 SCvH95 状态方程与标准三层结构模型, 对木星内部开展了系统研究. 其研究结果表明: 木星核心质量介于 0~10 倍地球质量之间, 重元素主要集中在金属氢包层中, 整体重元素质量则介于 11~42 倍地球质量之间.

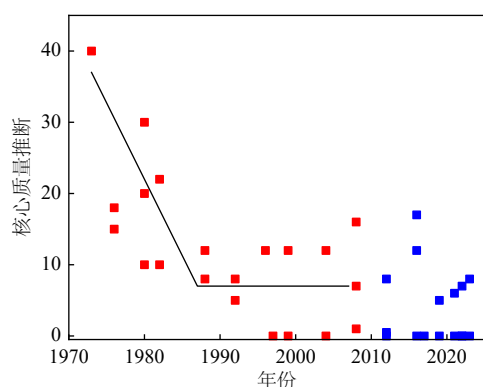


图 6 自 20 世纪 70 年代以来, 不同内部模型推断的木星核心质量 (引自 Howard et al., 2023)

Fig. 6 Inferred core masses from different Jupiter interior models since the early 1970s (from Howard et al., 2023)

直至 21 世纪初, 第一性原理计算在微观物态模拟领域取得突破, 为木星内部结构研究提供了更多可能. 但需明确的是, 这一阶段对木星内部的核心认识并未发生本质改变, 仍以 Guillot 提出的三层结构模型为基准. Nettelmann 等 (2008) 首次将基于大规模的量子分子动力学 (QMD) 模拟构建的温稠密状态方程 (LM-REOS, 涵盖氢、氦、水) 应用于木星内部研究, 得到木星核心质量不超过 7 倍的地球质量这一结论; 其更新版本 H-REOS.2 (增加粒子模拟数量、拓展更高温度区间) 进一步表明: 所有模型解对应的核心质量均在 10 倍地球质量以内, 且金属氢中的重元素含量显著高于分子氢层 (Nettelmann et al., 2012). Leconte 和 Chabrier (2012) 进一步指出, 木星氢氦包层中重元素分布可能并不均匀, 这种成分梯度会抑制大尺度对流并转向双扩散对流, 导致木星内部热结构偏离传统绝热假设. 其研究结果表明, 气态巨行星的重元素含量可能比此前设想高 30%~60%, 而木星和土星的核心质量更小, 部分模型甚至倾向于木星无致密核心. Hubbard 和 Militzer (2016) 基于 MH13 状态方程, 结合氢氦不混溶效应对行星内部成分和温度分布的影响, 提出木星或由约 12 倍地球质量的致密

核心, 以及金属丰度约为原太阳 3 倍的氢氦包层构成. Miguel 等 (2016) 采用不同 EOS 开展对比研究, 发现尽管这些状态方程与冲击压缩实验数据吻合, 但因内能和熵的计算方式存在差异, 会导致木星内部热结构不一致, 进而影响重元素质量的估算: 基于 REOS3b 的结果对应木星内部的温度高于 SCvH95, 核心质量介于 7~16 倍地球质量之间, 高于 Nettelmann 等 (2012) 的研究结果; 基于 SCvH95 的结果对应的温度次之, 整体倾向于较小的致密核心; 基于 MH13+ SCvH95 (低密度采用 SCvH95 数据, 详见前文叙述) 的结果致密核心质量上限最大, 介于 11~17 倍地球质量之间, 与 Hubbard 和 Militzer (2016) 模型最优解一致.

对木星内部结构的最新认知始于 2016 年朱诺号近距离环绕探测任务. 其获取了木星前所未有的高精度重力场数据, 为木星内部结构反演提供关键约束 (Bolton et al., 2017b; Durante et al., 2020; Folkner et al., 2017; Iess et al., 2018). 基于朱诺号前两次近木点探测的重力场数据, Wahl 等 (2017) 证实: 引入一个延伸至行星半径相当比例的稀释核, 有利于调和朱诺号重力矩 J_2 - J_8 的测量结果与理论模型的矛盾. 需说明的是, 稀释核的概念并非 Wahl 等首次提出, 早在 20 世纪 80 年代便已有研究提出“弥散核”的概念 (Stevenson, 1982, 1985), 朱诺号的探测结果则进一步支持了这一猜想 (示意图见图 5 木星对应的右半部分). 所谓稀释核, 是指木星核心与氢氦包层之间无清晰分界, 重元素与氢氦流体混合分布并延伸至相当比例的行星半径处. 研究表明, 行星内部高压高温环境会使重元素逐渐溶解于金属氢中, 最终导致核心被逐步侵蚀, 但侵蚀的程度未知 (Wilson and Militzer, 2012a, 2012b). 与 Guillot 的标准三层模型不同, 新的结构模型在原本致密核心上方增加了稀释核区域, 行星的核心则被认为由致密核心 (全由重元素组成) 以及稀释核共同构成. 基于稀释核模型并采用 MH13 状态方程, Wahl 等 (2017) 的研究结果显示, 木星核心重元素质量介于 10~24 倍的地球质量之间. 相较于致密核的模型结果而言, 行星核心重元素质量增加, 氢氦包层中重元素质量减少. Vazan 等 (2018) 认为, 木星内部的对流可能因较大成分梯度而受抑制, 导致其内部温度更高, 从而允许更多重元素存在于木星内部. Debras 和 Chabrier (2019) 指出, 要同时匹配朱诺号的重力场探测数据和伽利略号的大气金属丰度测量, 分子氢大气与金属氢包层之间需存在

“成分过渡区”以产生显著熵增,这一条件可通过重元素丰度在该区域向内递减实现. Ni (2019) 基于四层结构模型分析表明,稀释核(岩石、冰)配置中岩石占比越高,木星核心及重元素总质量越小;氢氦不混溶导致的非绝热效应越强烈,内部温度越高,所能容纳的重元素含量也越多. 此外,还进一步分析了不同状态方程对计算结果的影响:基于 MH13+SCvH95、REOS3b、SCvH95 状态方程的反演结果,对应的核心重元素质量整体介于 5~32 倍地球质量之间,基于 CMS19 的反演结果对应的核心重元素质量最小,介于 3~12 倍地球质量之间. Nettelmann 等 (2021) 通过四层结构模型研究木星内部,发现需假设分子氢大气中重元素丰度为负值才能同时契合朱诺号重力场数据和伽利略号进入探测温压数据. 为规避这一非物理情况,他们提出两种潜在解决方案:一是在重力矩 J_4 最敏感的上方区域设置超绝热区域(稳定分层形成的超绝热温度剖面);二是在 10~100 GPa 区间内对氢氦绝热曲线进行低密度修正(调整密度-压强关系). 他们还指出,若行星 1 bar 压力处的温度高于伽利略探测结果,模型会倾向更高的大气金属丰度,尽管这一温度剖面与现有观测矛盾. Militzer 等 (2022) 的研究认为木星稀释核或延伸至行星半径的 63%,且内部可能存在两个独立的全对流发电机层(金属氢包层与稀释核区),二者被稳定分层区域分隔. 此外,通过在 10~100 GPa 压力区间内设置不同的密度修正,反演分子氢大气中重元素丰度,进一步证实了 Nettelmann 等 (2021) 的研究结论. Miguel 等 (2022) 采用稀释核模型进一步证实,木星氢氦包层中重元素分布的不均匀性,金属氢中的重元素丰度显著高于分子氢大气;同时确定了木星致密核心的质量上限小于 7 倍地球质量,该结论与状态方程无关. 但该反演模型参数倾向于较高的木星表面温度,1 bar 压力处的温度介于 165~182 K 之间,整体高于伽利略号的探测结果. 目前尚不清楚伽利略号的探测是否能代表木星典型 1 bar 处的表面温度 (Fletcher et al., 2020). Gupta 等 (2022) 对旅行者号无线电掩星数据的重新评估发现,表面温度较原测量值升高约 4 K. 若木星浅层存在超绝热区域,其对应的熵增也会使表面温度升高,相关情况仍存在较多的不确定性. 此外,还有诸多基于不同状态方程 (Helled et al., 2020) 或多层结构模型 (Militzer and Hubbard, 2024) 应用于木星内部结构分析.

3.1.2 土星内部结构

土星内部结构的研究历程与木星高度契合,其早期结构模型的核心框架源于 Stevenson 和 Salpeter (1977a, 1977b) 在 20 世纪 70 年代末对气态巨行星内部氢氦不相溶性质的深入研究. 与木星可能处于早期氢分离的猜想不同,“氢雨”是土星内部结构与热演化的核心特征,更是解释其“超额亮度”的关键. 传统土星内部结构模型与木星相近:由内向外依次为致密核心、富氢的金属氢包层、贫氢的分子氢包层,但土星内部氢氦不相溶的影响则更为显著.

卡西尼号探测任务以前,土星的低阶重力场信息主要来自旅行者号探测器的近距离飞越探测 (Campbell and Anderson, 1989). 基于早期数据约束,Guillot (1999a, 1999b) 以标准三层结构模型为基础(示意图见图 5 土星对应的左半部分),结合 SCvH95 状态方程开展土星内部研究. 研究结果表明,土星核心质量介于 0~22 倍的地球质量之间,整体重元素质量则处于 19~31 倍地球质量范围内. Saumon 和 Guillot (2004) 进一步突破此前单一或少数状态方程建模的局限,通过改进的氢氦状态方程分析土星内部结构,发现不同状态方程推断的土星核心质量基本介于 9~22 倍地球质量之间,整体重元素质量介于 13~28 倍地球质量范围内. 由于土星质量较小,高压区域占比更低,行星内部对氢氦状态方程的敏感性更低,因此他们认为土星核心质量与整体重元素质量的约束精度高于木星. Leconte 和 Chabrier (2012) 进一步打破原有土星内部全对流的认知,提出重元素在氢氦包层内分布不均匀会引发双扩散对流. 其研究结果显示土星核心质量介于 10~21 倍地球质量之间,行星整体重元素质量处于 26~50 倍地球质量范围内,显著高于此前研究结果.

尽管卡西尼号对土星的环绕探测长达 13 年,但在其大结局任务前,对土星重力场的最佳探测仅能获取较为准确的低阶重力矩 (Fortney et al., 2018; Jacobson et al., 2006). 依赖这些初期数据,一系列相关研究也同步展开. Nettelmann 等 (2013) 基于三层结构模型,采用不同状态方程对土星内部展开分析. 研究结果表明:基于 LM-REOS 计算得到的核心质量介于 0~17 倍地球质量之间;基于 Sesame-EOS 与 SCvH-i EOS 计算得到的核心质量介于 0~20 倍地球质量之间. 半经验 Sesame-EOS 与 SCvH-i EOS 的模型结果显示分子氢包层中最大

金属丰度可达 7 倍太阳丰度, 重元素总质量介于 25~30 倍地球质量之间; 第一性原理计算的 LM-REOS 模型结果显示, 分子氢大气中最大金属丰度接近 3 倍太阳丰度, 重元素总质量在 16~20 倍地球质量以内. Helled 和 Guillot (2013) 在三层结构模型基础上, 同时纳入较差自转^②对土星形状、重力场和内部结构的影响. 研究发现: 土星自转周期的不确定性会显著影响其核心质量及重元素总质量的推断, 土星核心质量整体介于 5~20 倍地球质量之间, 与氢氦相分离条件密切相关: 相分离压力越大 (对应深度越深), 核心质量往往越小.

卡西尼大结局任务获取了前所未有的土星高精度重力场数据, 进而推动土星内部研究迎来里程碑式的跨越和革新 (Iess et al., 2019). 基于最新数据约束, Militzer 等 (2019) 构建了土星四层结构模型 (示意图见图 5 土星对应的右半部分), 并在研究中同步纳入三项关键因素: 一是基于柱面旋转假设的较差自转模型, 二是不同的深层自转周期设定, 三是基于 Morales 等 (2013) 氢氦相图的不混溶分析. 最终研究表明: 土星致密核心在 15~18 倍地球质量范围内, 氢氦包层中重元素质量介于 1.5~5 倍地球质量之间; 结合重力矩和行星扁率的约束, 获得了与模型相匹配的土星深层自转周期为 $10:33:34 \text{ hr} \pm 55 \text{ s}$, 该结果与 Helled 等 (2015) 反演结果以及 Mankovich 等 (2019) 环震学研究结果基本一致. Ni (2020a) 基于稀释核结构模型 (由内向外依次为致密核、稀释核区、金属氢包层以及分子氢包层, 其中氢雨所导致的非绝热效应通过分子氢-金属氢包层边界的温度跃升进行模拟), 重点分析了不同状态方程及深层自转周期对土星内部研究的影响. 状态方程方面: 采用 MH13+SCvH 状

态方程计算的核心重元素质量介于 12~18 倍地球质量之间, 整体的重元素丰度为太阳丰度的 11.5~13.0 倍; 采用 REOS3b 状态方程计算的核心重元素质量介于 13~19 倍地球质量之间, 整体的重元素丰度为太阳丰度的 12.0~13.5 倍. 在内部结构反演中, 所采用的自转周期作为模型输入参数, 会影响对重元素分布的推断结果: 较短的自转周期设定下, 模型解倾向于给出较低的大气重元素丰度和较小的核心质量; 在较长的自转周期设定下, 则呈现出相反趋势. 此外, 还有一些结合土星环震学的研究约束土星内部结构 (French et al., 2021; Hedman et al., 2018; Mankovich, 2020; Mankovich and Fuller, 2021), 基本结论与前面研究基本一致, 土星核心与氢氦包层之间的过渡区呈现出弥散且渐变的稳定分层特征, 延伸至约行星半径的 60% 以上. 表 1 总结了部分具有代表性的土星内部结构模型推断的重元素含量、核心质量及半径等信息. 目前普遍认为: 土星内部圈层结构由内向外依次为稀释核、金属氢包层、氢雨区域以及最外层的分子氢大气. 其中, 氢质量比在分子氢层和金属氢层之间因为氢氦相分离存在显著差异; 重元素整体呈现渐变分布, 由内向外逐渐减少, 这一分布可能反映了行星的原始结构和演化历程.

3.2 重力场数据主导的经验化内部结构建模

上述研究大多依托物态方程与重力场探测数据的协同建模, 但氢的相变区域、氢氦相分离温压边界, 以及不同方法获取的 EOS, 本身存在显著不确定性 (见前文叙述). 这引发了人们对内部结构研究的另一思考: 能否摒弃复杂的微观物态过程带来的不确定性干扰, 仅依赖重力场探测数据, 约束气

表 1 基于部分代表性土星内部结构模型推断的重元素总质量、核心质量及核心半径总结 (质量单位: 地球质量; 半径单位: 归一化土星半径)

Table 1 Inferred total heavy-element mass, core masses, and core radii from different Saturn interior models

部分代表性研究工作	重元素总质量	核心质量	核心半径	核心属性
Leconte and Chabrier, 2012	26~50	10~21	0.2~0.3	致密核
Nettelmann et al., 2013	17~27	0~20	0~0.2	致密核
Helled and Guillot, 2013	5~35	5~20	~0.2	致密核
Militzer et al., 2019	18~22	15~18	0.19~0.23	致密核
Movshovitz et al., 2020	24~32	—	—	经验模型, 无致密核
Ni, 2020a	16.5~19.5	12~18	—	致密核+稀释核
Mankovich and Fuller, 2021	23~26	20~24	0.33~0.36	稀释核

② 较差自转对木星、土星内部结构的认识均有重要影响, 后续将在讨论部分详细叙述.

态巨行星的内部密度分布? 本节将以此为补充, 简要介绍这类绕开物态方程, 以经验化或参数化手段构建行星内部模型的研究工作.

Anderson 和 Schubert (2007) 首次依赖 6 次多项式密度模型, 实现了对土星质量、半径及低阶重力矩 J_2 - J_6 的准确拟合. 该模型摒弃了传统研究对氢氦 EOS 的固有依赖, 通过多项式构造的密度剖面表征行星内部的可能密度分布, 并据此推断了土星氢相变界面位置以及深层的自转速率. Helled 等 (2009) 基于简化的压力-密度关系构建土星内部模型, 发现若假设土星内部氢氦质量比与原太阳丰度保持一致, 其内部重元素总质量介于 6~20 倍地球质量范围内; 后续进一步通过参数化模型构建土星内部密度剖面, 结合重力场与行星形状探测数据, 将土星深层的自转周期约束至 $10\text{ h } 32\text{ min } 45 \pm 46\text{ s}$ (Helled et al., 2015). Movshovitz 等 (2020) 提出与 EOS 无关的多段密度参数化模型, 通过灵活的

密度分布设定与贝叶斯采样方法约束土星内部. 研究表明: 多数模型倾向于“稀释核”或“模糊核”结构, 无明确致密核幔边界; 行星整体重元素质量介于 24~32 倍地球质量之间. Ni (2018) 在 Anderson 和 Schubert (2007) 的研究基础上, 进一步发展了经验的密度模型, 基于朱诺号高精度重力场数据, 获取了木星内部可能的密度剖面, 并揭示了木星的转动惯量和木星系的潮汐洛夫数 k_2 可以进一步约束木星核心的性质; 在此基础上, 基于获取的密度剖面 and 旋转流体静力学平衡, 提取了木星内部经验 EOS, 发现外层大气氦的耗损与金属氢包层中氦的富集形成显著对比, 这一特征正是木星内部氢氦相分离过程的直接体现, 同时发现金属氢包层的金属丰度高达原太阳星云丰度的 11~13 倍, 这一结果为重元素溶解于金属氢中并向外扩散的稀释核模型提供了有力支撑 (Ni, 2020b). 值得关注的是, 类似这种经验的压力-密度模型已逐步扩展

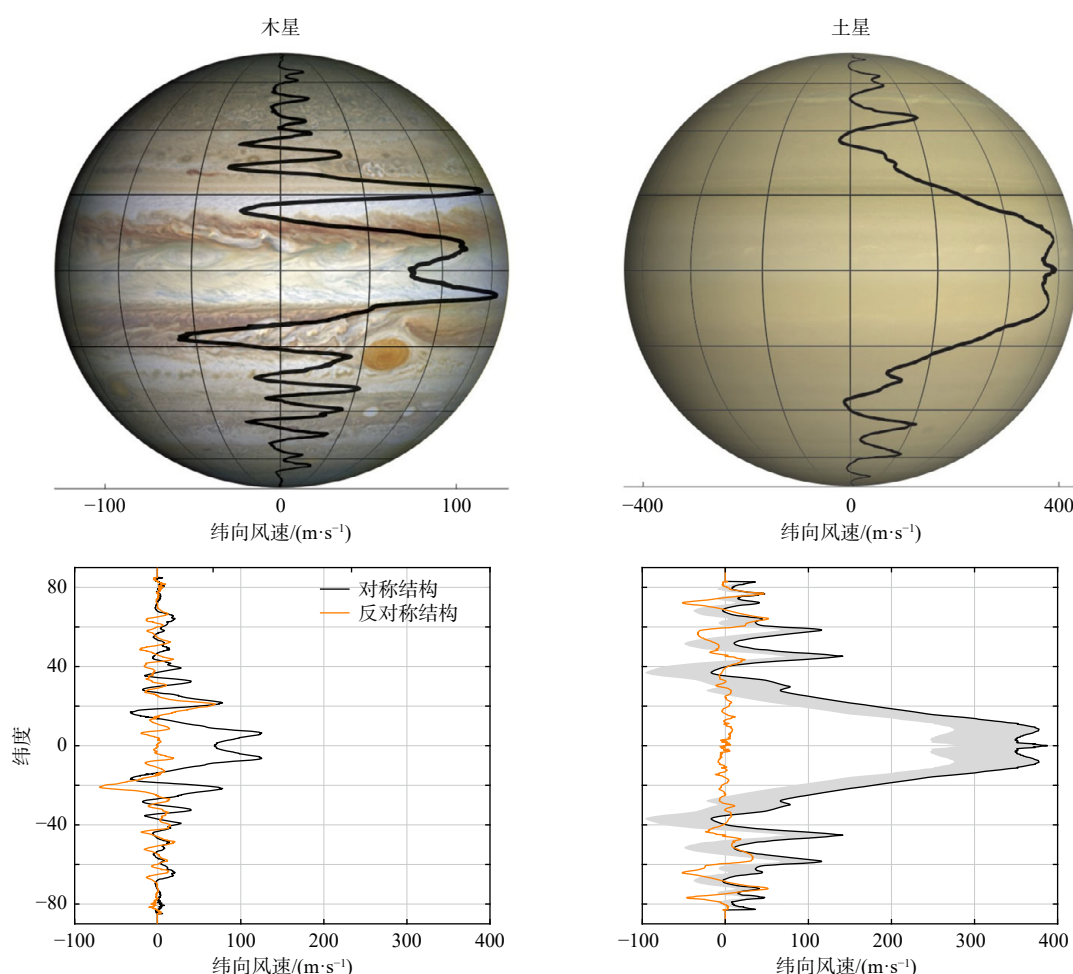


图 7 木星与土星的纬向风剖面. 黑色曲线对应云顶风速的南北对称结构, 橙色曲线对应南北反对称结构 (引自 Kaspi et al., 2020)

Fig. 7 The zonal wind profile of Jupiter (left) and Saturn (right), divided in the bottom panels into the north-south symmetric (black) and anti-symmetric (orange) parts (from Kaspi et al., 2020)

至天王星和海王星的内部结构分析, 为冰巨星研究提供了新的技术路径 (Neuenschwander and Helled, 2022) .

4 讨论与展望

随着探测数据精度的持续提升, 此前未受充分关注的大气动力学效应, 逐渐被纳入内部结构研究的考虑范畴. 鉴于木星和土星大气中均存在这一特征, 本节将对相关研究进展进行统一阐述. 此外, 由于重力场仅能反映行星的浅层密度分布特征, 对深层的物质分布敏感性较低, 近年来亦有新的约束方法应用于气态巨行星内部结构研究, 下文将同步展开讨论.

4.1 巨行星大气动力学的影响

长期对木星、土星云层追踪观测结果表明, 两颗行星均存在大尺度的纬向急流, 且不同纬度风速存在显著差异, 整体表现出较差自转特征 (见图 7) . 具体来看, 木星每个半球至少存在 6 支急流, 最大风速出现在北纬 20° 附近, 相对于木星系统 III 自转速度^③而言风速可达 140 m/s; 赤道区域均为自西向东的急流, 风速普遍超过 100 m/s (Tollefson et al., 2017) . 土星则形成了更宽的风场结构, 主要集中在南北纬 30° 范围内, 最大风速超过 400 m/s (García-Melendo et al., 2011) . 针对这一强纬向风场结构, 研究普遍提出两种可能的形成机制: 第一种认为其与类地行星相似, 地转湍流可以驱动东西向气流, 但相应动力学过程仅局限于行星浅层 (Chemke and Kaspi, 2015; Showman, 2007); 第二种则认为观测到的急流是行星内部高温对流柱在表层的直接体现 (Heimpel et al., 2016; Wicht et al., 2019) . 两种假说持续存在争议, 本质上源于行星大气与内部动力学之间复杂的耦合机制.

而关于风场的垂直结构特征, 目前仅有伽利略号大气探针对木星浅层 (亚云层) 风速的探测数据 (Atkinson et al., 1996) . 结果显示, 1 bar 压力水平风速为 80 m/s, 至 4 bar 时增加至 160 m/s, 此后风速保持恒定, 直至 24 bar 处探测器失去信号. 不过有研究指出, 该大气探针可能坠入木星内部的“热点区域”, 其探测结果或无法代表木星浅层整体的

风场特征 (Showman and Dowling, 2000) . Dowling 和 Ingersoll (1988) 通过亚云层风的间接观测, 推断在热点区域下方存在纬向风; 相关研究利用热成风关系, 推断云顶之下应当存在深层纬向风 (Conrath et al., 1981; Gierasch et al., 1986) . 然而, 这些推断的风深仅局限于行星半径的 1% 以内, 难以对风场的实际深度做出进一步约束. 这一局面的突破, 得益于朱诺号与卡西尼号探测获取的高精度重力场数据. 对纬向流的深入研究, 源于行星内部结构分析对高精度重力场数据的依赖. 气态巨行星主要由轻元素构成且无固体表面, 这意味大气动力学过程引发的密度扰动对重力场的影响, 相较于类地行星更为突出. 若强风延伸至行星内部深处, 将进一步加剧这一效应. 鉴于当前行星内部结构的约束高度依赖重力场数据, 对纬向流的研究便成为解析内部结构的重要环节. Hubbard (1999) 指出, 若木星观测到的纬向流对应长期稳定的圆柱结构, 那么纬向流引发的密度扰动对重力矩的动态贡献, 可通过探测结果与刚体旋转流体静力学条件下行星重力场的差异来表征. 目前, 将较差自转纳入重力场计算的方法主要有两种: 第一种是将行星内部动力学简化为贯穿赤道平面的圆柱均匀旋转, 这种简化的风场结构可以通过势理论, 自洽融入形状理论或麦克劳林同心椭球方法 (Militzer et al., 2019; Nettelmann, 2020; Wisdom and Hubbard, 2016) . 具体而言, 差分旋转对势能的贡献会改变等势面形状, 行星的形状和密度分布会随之调整以维持静力学平衡, 进而影响重力场计算. 第二种方法则假设纬向风对均匀旋转模型的重力场引入一定修正, 借助热成风方程或重力-热成风方程, 从假定的流动结构推导出密度的局部校正, 进而计算纬向流对重力矩的动态贡献 (Cao et al., 2023; Galanti and Kaspi, 2016; Kong et al., 2016) . 当前大多数气态巨行星内部结构的研究倾向于后者, 即剥离重力场的动态部分 (纬向风引起的密度扰动), 以静态分量约束木星内部结构. 此外, 木星与土星的重力测量结果揭示了其重力场的南北不对称性 (Iess et al., 2018, 2019) . 由于刚性旋转的流体行星重力场不会呈现出南北不对称, 所以奇次重力矩必然源于纬向流贡献, 进而可以约束云层下方纬向风的深度信息. 目前多数研究依赖热成风方程, 结合假设的复杂风场结构, 对两颗气态巨行星的纬向风深度均进行了约

③ 木星系统 III 自转基于其磁层发出的周期性射电信号定义, 国际天文联合会采纳的周期为 9 h 55 min 29.7 s. 该射电信号的周期反映了木星全球性内禀磁场的旋转, 同时也表征其深层内部的自转状态.

束: 木星内部风深被限制在 2000~3500 km, 土星内部则延伸至约 9000~10000 km (Galanti et al., 2019; Guillot et al., 2018; Iess et al., 2019; Kaspi et al., 2018). 然而, Kong 等 (2018) 研究发现, 浅层与深层风模型均能在测量不确定性范围内合理解释探测到的木星奇次重力矩, 这一结果揭示了依赖重力场数据反演纬向风深度的非唯一性. 近年来, 有研究提出可以基于磁场观测对纬向风深度提供互补约束: 若纬向风延伸至行星内部的导电区域, 其剪切运动会通过电磁感应影响行星背景磁场, 从而在磁场观测数据中保留可观测信号 (Cao and Stevenson, 2017). 基于朱诺号与卡西尼号高精度的磁场观测, 已有工作对木星和土星的风深提出了独立于重力场的约束 (Wicht and Christensen, 2024), 为多物理场联合反演风深提供了重要途径.

4.2 多手段协同约束气态巨行星内部结构

如前文所述, 重力场对于气态巨行星深层物质分布的敏感性较低 (如图 8 所示), 仅依赖重力场信息难以完整揭示其内部核心边界、深层成分梯度等关键信息, 因此发展互补性的多物理约束手段成为当前研究的重要方向. 目前, 转动惯量、潮汐效应及星震学等方法逐步应用至气态巨行星的内部结构研究. 转动惯量研究是约束行星内部质量分布的经典手段, 其核心逻辑是通过量化行星自转的惯性大小, 反推内部物质的径向分布规律. 然而, 气态巨行星因无固体表面且内部流体运动活跃, 其测量难度远高于火星、地球这样的类地行星. Helled 等 (2011) 则进一步讨论了朱诺号航天器测量木星转动惯量的可能性. 潮汐响应约束通过解析行星对外部引力摄动的响应特征反推深层结构, 核心物理量为潮汐洛夫数. 传统的潮汐洛夫数测量反映的是行

星的静态形变, 本质上属于重力约束的延伸. Lainey 等 (2017) 首次从卡西尼号的探测数据中确定了土星的潮汐洛夫数 k_2 , 后续的探测对其结果进行了更新 (Lainey et al., 2020). 朱诺号团队同样发布了木星的潮汐洛夫数探测结果 (Durante et al., 2020; Iess et al., 2018). 相关科学团队也开始探讨利用转动惯量或静态潮汐洛夫数约束木星内部结构的可能性 (Ni, 2018). 最新研究进一步将潮汐响应拓展至动力潮汐范畴, 关注其频率依赖特性对内部精细结构的敏感性 (Idini and Stevenson, 2021, 2022; Lai, 2021; Lin, 2023). 星震学方法的核心原理是: 当行星处于平衡状态时受到外部扰动, 其内部的热力学不平衡会为振动的产生提供能量来源; 这些振动以声波、重力波、惯性波与表面重力波的混合形式传播, 而不同类型的波动对传播路径上的不同介质敏感性不同, 以此反推圈层结构. 由于木星环系微弱, 无法通过掩星方法获取振动信号, 因此需依赖地面望远镜开展长期观测. 国际科学团队提出的 JOVIAL 计划已于 2021 年 8 月启动, 分别对木星和土星开展为期两周的持续观测, 旨在通过探测两颗行星的全球振荡, 反演其内部结构. 我国冷湖行星地质观测中心也提出木星全球振动监测计划, 以鸿鹄专项 0.8 m PAST 以及 1.8 m TINTIN 地面望远镜为核心, 重点观测木星轨道以内主要行星的轨道运动特性、大气与等离子体分布、光谱辐射及地质活动等, 同时聚焦木星的全球振动监测 (何飞等, 2021). 通过对朱诺号航天器 22 次重力探测的多普勒数据分析, 进一步为木星全球振动提供了关键证据——其探测到的重力异常信号, 可通过行星本征振动模式 (p 模) 解释, 这些 p 模在 900~1200 μHz 频率区间的径向速度峰值达 10~50 cm/s, 与地面观测结果高度吻合, 而更低频率的 f 模振幅则小于 1 cm/s (Durante et al., 2022). 卡西尼号则通过土星环掩星观测发现, C 环中存在规则密度波, 分析表明这些密度波由土星全球尺度的内部振动激发产生, 据此推断土星深处可能与木星类似存在明显成分梯度, 但由于该方法信号分离难度大、信噪比低等因素, 目前仍处于初步探索阶段 (Mankovich, 2020; Mankovich and Fuller, 2021).

木星和土星都具有内源磁场. 这些磁场的存在及其特性, 为研究这两颗行星当前的内部结构和动力学过程提供了重要的观测约束. 内源磁场的存在, 要求行星内部存在大尺度运动的导电介质. 对于木星和土星而言, 这种大尺度的径向运动是由同样负

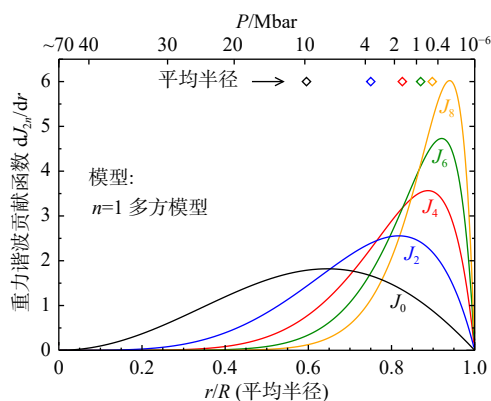


图 8 木星各阶重力矩贡献函数 (引自 Nettelmann, 2009)

Fig. 8 Contribution functions of the gravitational moments of Jupiter (from Nettelmann, 2009)

责将热量从深部输送到外层的对流运动所引起的,而导电介质则是金属氢.结合木星和土星内部的电导率、观测到的行星磁场强度以及表面热辐射,可以估算其内部的欧姆耗散,从而为行星结构模型引入额外的约束条件 (Cao and Stevenson, 2017).因此,根据磁场观测数据来解读木星和土星内部结构的能力,在很大程度上受限于当前对发电机过程的理解.最新的朱诺号观测揭示了木星磁场形态中几个令人意外的特征:赤道附近存在一个孤立的、强度很高的负磁通区(磁斑);北半球约 45° 纬度带有一个强度很高且相对狭窄的正磁通带;而南半球的磁场则相对平滑.这种南北不对称性,被推测是由于其内部存在一个稀释核.该核心的存在要么将发电机作用限制在木星的上层区域,要么在木星内部催生了两个空间上分离的发电机作用区域 (Moore et al., 2018).这一发现为仅基于重力数据和磁场测量的内部结构模型之间建立了良好的联系.卡西尼大结局任务证实了土星磁场呈现出与自转轴完美对称的特征,这种极度轴对称的现象,被归因于在深层发电机区域的上方存在一个稳定的分层区域 (Cao et al., 2020; Dougherty et al., 2018).此外,土星磁场在纬度方向上的快速变化表明,除了深层发电机之外,还存在一个由深层发电机背景场、小尺度螺旋运动以及大气纬向流共同维持的第二浅层发电机 (Dougherty et al., 2018).然而,关于土星内部是否真的能够形成显著的稳定分层,以及第二浅层发电机是否真的存在,这些仍是目前研究中待解决的问题.

综上,新的约束方法从不同物理维度弥补了依赖重力场反演的固有局限,目前仍处于尝试阶段.就当前研究现状而言,未来较长时间内难以有新的探测数据补充,后续研究或可通过氢氦微观性质的深化研究,或新约束方法的应用取得进展,进而推动对气态巨行星内部认识的跨越式提升.

4.3 内部结构对行星形成以及系外巨行星研究的启示

目前,对气态巨行星内部结构的认识聚焦于“稀释核”或成分梯度的存在,这一特征为行星形成机制的研究提供了重要线索.早期传统模型认为气态巨行星具有一个界限分明的致密核心,而当前高精度的重力场数据约束及最新的星震学研究更倾向于支持重元素从中心向外平缓过渡的分布形式 (Mankovich, 2020; Wahl et al., 2017).此类成分梯

度难以通过后期对流混合形成,因为巨行星内部的对流过程倾向于物质均匀化,而非维持大尺度的成分不均匀性;其存在可能反映了行星在气体盘消散前通过持续吸积富含重元素的星子或尘埃所形成的原初结构,并由成分稳定性或双扩散对流机制抑制了物质的大规模混合,从而得以长期保存 (Leconte and Chabrier, 2012; Vazan et al., 2018).另一可能的解释是,在大约 45 亿年前木星捕获并吞噬了一个约 10 倍地球质量的行星胚胎,巨大的撞击瓦解了木星的原初致密核,形成稀释核结构并长期维持 (Liu et al., 2019).此外,当前反演和理论建模给出的行星核心的重元素总量普遍在数倍至数十倍地球质量之间,行星整体的金属丰度显著高于原太阳星云丰度.木星大气中重元素富集的起源至今仍是一个未解之谜,科学家们提出了多种假说来解释这一现象.一种观点认为,大气中的富集是由原始重元素核心的侵蚀所导致的.然而,在这种情况下,溶解到深部的重元素必须通过对流混合,并被输送到上层的包层中.由于近期木星结构模型表明,木星并非完全对流 (Leconte and Chabrier, 2012; Vazan et al., 2018),因此这种解释的有效性存疑,需要更详细的研究.另一种可能是,木星大气的重元素富集源于其吸积了富含重元素的盘气体.但该理论无法解释水和难熔物质在大气中的富集 (Schneider and Bitsch, 2021).还有一种观点认为,木星大气可能是通过晚期吸积星子形式的重元素而得以富集 (Shibata and Helled, 2022).

重元素含量对理解系外巨行星亦具有重要参考价值. Thorngren 等 (2016) 基于 47 颗凌日巨行星的半径、质量和年龄数据,通过热演化模型反演其内部重元素总质量,揭示了系外巨行星的重元素含量与行星质量之间存在统计关联,即行星重元素总质量随行星质量增加而上升,而整体金属丰度(即重元素占比)则随质量增加而降低.这一趋势源于大质量行星吸积了更多的氢氦气体,从而稀释了重元素的比例.尤为关键的是,木星与土星内部重元素含量大致落在该系外样本所定义的趋势范围内,表明太阳系巨行星与系外巨行星在重元素富集机制上可能存在共性.然而需要指出的是, Thorngren 等 (2016) 的样本主要由受强恒星辐照的热木星构成,较冷的巨行星观测数据相对有限,因此其结论在更广泛行星群体中的适用性尚需谨慎对待.目前已知有数十颗近距离轨道巨行星,其内部含有数十个地球质量以上的重元素.一个极端的例子是热木星

HD 149026 b, 其总质量约为 110 个地球质量, 而其中重元素含量据推测高达 50~80 个地球质量. 这种重元素富集状态在结构上很可能表现为类似木星的“稀释核”, 即重元素并非完全沉降为一个致密的纯重元素核心, 而是弥散分布于核心区及深层包层中. 然而, 经典核吸积模型难以解释这种富集程度, 还需要引入一些更为剧烈、高效的动力学过程, 例如行星迁移、巨大撞击、卵石吸积等. 目前, 研究团队能够利用质量、半径、年龄以及大气金属丰度等可观测量, 结合自洽的演化模型与内部结构模型, 对系外巨行星内部结构进行一定程度的约束. 然而, 要揭示更精细的内部结构特征, 例如成分梯度、稀释核的具体形态等, 仍然迫切需要更多维度的观测数据来突破当前模型的不确定性.

References

- Acuña M H, Ness N F. 1980. The magnetic field of Saturn: Pioneer 11 observations[J]. *Science*, 207(4429): 444-446.
- Anderson J D, Schubert G. 2007. Saturn's gravitational field, internal rotation, and interior structure[J]. *Science*, 317(5843): 1384-1387.
- Arevalo R T, Su Y, Sur A, et al. 2024. Equations of state, thermodynamics, and miscibility curves for Jovian planet and giant exoplanet evolutionary models[J]. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 274(2): 34.
- Atkinson D H, Pollack J B, Seiff A. 1996. Galileo Doppler measurements of the deep zonal winds at Jupiter[J]. *Science*, 272(5263): 842-843.
- Becker A, Lorenzen W, Fortney J J, et al. 2014. Ab initio equations of state for hydrogen (H-REOS. 3) and helium (He-REOS. 3) and their implications for the interior of brown dwarfs[J]. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 215(2): 21.
- Bolton S J, Adriani A, Adamitroaie V, et al. 2017a. Jupiter's interior and deep atmosphere: The initial pole-to-pole passes with the Juno spacecraft[J]. *Science*, 356(6340): 821-825.
- Bolton S J, Lunine J, Stevenson D, et al. 2017b. The Juno mission[J]. *Space Science Reviews*, 213(1): 5-37.
- Boutonnet A, Langevin Y, Erd C. 2024. Designing the JUICE trajectory[J]. *Space Science Reviews*, 220(6): 67.
- Brygoo S, Loubeyre P, Millot M, et al. 2021. Evidence of hydrogen-helium immiscibility at Jupiter-interior conditions[J]. *Nature*, 593(7860): 517-521.
- Caillabet L, Mazevet S, Loubeyre P. 2011. Multiphase equation of state of hydrogen from ab initio calculations in the range 0.2 to 5 g/cc up to 10 eV[J]. *Physical Review B—Condensed Matter and Materials Physics*, 83(9): 094101.
- Campbell J K, Synnott S P. 1985. Gravity field of the Jovian system from Pioneer and Voyager tracking data[J]. *Astronomical Journal*, 90: 364-372.
- Campbell J K, Anderson J D. 1989. Gravity field of the Saturnian system from Pioneer and Voyager tracking data[J]. *Astronomical Journal*, 97: 1485-1495.
- Cao H, Stevenson D J. 2017. Zonal flow magnetic field interaction in the semi-conducting region of giant planets[J]. *Icarus*, 296: 59.
- Cao H, Dougherty M K, Hunt G J, et al. 2020. The landscape of Saturn's internal magnetic field from the Cassini Grand Finale[J]. *Icarus*, 344: 113541.
- Cao H, Bloxham J, Park R S, et al. 2023. Strong resemblance between surface and deep zonal winds inside Jupiter revealed by high-degree gravity moments[J]. *The Astrophysical Journal*, 959(2): 78.
- Celliers P M, Collins G W, Da Silva L B et al. 2000. Shock-induced transformation of liquid deuterium into a metallic fluid[J]. *Physical Review Letters*, 84(24): 5564.
- Celliers P M, Millot M, Brygoo S, et al. 2018. Insulator-metal transition in dense fluid deuterium[J]. *Science*, 361: 677-682.
- Chabrier G, Potekhin A Y. 1998. Equation of state of fully ionized electron ion plasmas[J]. *Physical Review E*, 58(4): 4941.
- Chabrier G, Mazevet S, Soubiran F. 2019. A new equation of state for dense hydrogen-helium mixtures[J]. *The Astrophysical Journal*, 872(1): 51.
- Chabrier G, Debras F. 2021. A new equation of state for dense hydrogen-helium mixtures. II. Taking into account hydrogen-helium interactions[J]. *The Astrophysical Journal*, 917(1): 4.
- Chemke R, Kaspi Y. 2015. The latitudinal dependence of atmospheric jet scales and macroturbulent energy cascades[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 72(10): 3891-3907.
- Conrath B J, Flasar F M, Pirraglia J A, et al. 1981. Thermal structure and dynamics of the Jovian atmosphere 2. Visible cloud features[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 86(A10): 8769-8775.
- Dalladay-Simpson P, Howie R T, Gregoryanz E. 2016. Evidence for a new phase of dense hydrogen above 325 gigapascals[J]. *Nature*, 529: 63-67.
- Datchi F, Loubeyre P, LeToullec R. 2000. Extended and accurate determination of the melting curves of argon, helium, ice (H₂O), and hydrogen (H₂)[J]. *Physical Review B*, 61: 6535-6546.
- Debras F, Chabrier G. 2019. New models of Jupiter in the context of Juno and Galileo[J]. *The Astrophysical Journal*, 872(1): 100.
- Demarcus W C. 1958. The constitution of Jupiter and Saturn[J]. *Astrophysical Journal*, 63: 2.
- Dias R P, Noked O, Silvera I F. 2019. Quantum phase transition in solid hydrogen at high pressure[J]. *Physical Review B*, 100: 184112.
- Dougherty M K, Cao H, Khurana K K, et al. 2018. Saturn's magnetic field revealed by the Cassini Grand Finale[J]. *Science*, 362: eaat5434.
- Dowling T E, Ingersoll A P. 1988. Potential vorticity and layer thickness variations in the flow around Jupiter's Great Red Spot and White Oval BC[J]. *Journal of Atmospheric Sciences*, 45(8): 1380-1396.
- Durante D, Parisi M, Serra D, et al. 2020. Jupiter's gravity field halfway through the Juno mission[J]. *Geophysical Research Letters*, 47(4): e2019GL086572.
- Durante D, Guillot T, Iess L, et al. 2022. Juno spacecraft gravity measurements provide evidence for normal modes of Jupiter[J]. *Nature Communications*, 13(1): 4632.

- Eggert J, Brygoo S, Loubeyre P, et al. 2008. Hugoniot data for helium in the ionization regime[J]. *Physical Review Letters*, 100(12): 124503.
- Fletcher L N, Orton G S, Greathouse T K, et al. 2020. Jupiter's equatorial plumes and hot spots: Spectral map from Gemini/TEXES and Juno/MWR[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 125(8): e2020JE006399.
- Folkner W M, Iess L, Anderson J D, et al. 2017. Jupiter gravity field estimated from the first two Juno orbits[J]. *Geophysical Research Letters*, 44(10): 4694-4700.
- Fortney J J, Nettelmann N. 2010. The interior structure, composition, and evolution of giant planets[J]. *Space Science Reviews*, 152(1): 423-447.
- Fortney J J, Helled R, Nettelmann N, et al. 2018. The Interior of Saturn[M]// *Saturn in the 21st Century*. Cambridge: Cambridge University Press, 20: 44.
- Fortney J J, Militzer B, Mankovich C R, et al. 2023. Saturn's interior after the Cassini Grand Finale[EB/OL]. arXiv preprint, arXiv: 2304.09215. <https://arxiv.org/abs/2304.09215>.
- French R G, Bridges B, Hedman M M, et al. 2021. Kronoseismology V: A panoply of waves in Saturn's C ring driven by high-order internal planetary oscillations[J]. *Icarus*, 370: 114660.
- Galanti E, Kaspi Y. 2016. An adjoint-based method for the inversion of the Juno and Cassini gravity measurements into wind fields[J]. *The Astrophysical Journal*, 820(2): 91.
- Galanti E, Kaspi Y, Miguel Y, et al. 2019. Saturn's deep atmospheric flows revealed by the Cassini grand finale gravity measurements[J]. *Geophysical Research Letters*, 46(2): 616-624.
- Gao H, Liu C, Shi J, et al. 2022. Superionic silica-water and silica-hydrogen compounds in the deep interiors of Uranus and Neptune[J]. *Physical Review Letters*, 128(3): 035702.
- García-Melendo E, Pérez-Hoyos S, Sánchez-Lavega A, et al. 2011. Saturn's zonal wind profile in 2004–2009 from Cassini ISS images and its long-term variability[J]. *Icarus*, 215(1): 62-74.
- Gierasch P J, Conrath B J, Magalha J A. 1986. Zonal mean properties of Jupiter's upper troposphere from Voyager infrared observations[J]. *Icarus*, 67(3): 456-483.
- Gu W D, Wei Y, Yao Z H, et al. 2024. Research on Jupiter's magnetic field: Review and prospect[J]. *Reviews of Geophysics and Planetary Physics*, 55(6): 638-651 (in Chinese).
- Guillot T. 1999a. Interiors of giant planets inside and outside the solar system[J]. *Science*, 286(5437): 72-77.
- Guillot T. 1999b. A comparison of the interiors of Jupiter and Saturn[J]. *Planetary and Space Science*, 47(10-11): 1183-1200.
- Guillot T, Miguel Y, Militzer B, et al. 2018. A suppression of differential rotation in Jupiter's deep interior[J]. *Nature*, 555(7695): 227-230.
- Gupta P, Atreya S K, Steffes P G, et al. 2022. Jupiter's temperature structure: A reassessment of the Voyager radio occultation measurements[J]. *The Planetary Science Journal*, 3(7): 159.
- Hall C F. 1974. Pioneer 10[J]. *Science*, 183(4122): 301-302.
- Hall C F. 1983. The Pioneer 10/11 program: From 1969 to 1994[J]. *IEEE Transactions on Reliability*, 32(5): 414-416.
- Hanel R, Conrath B, Flasar M, et al. 1979. Infrared observations of the Jovian system from Voyager 2[J]. *Science*, 206(4421): 952-956.
- Hanel R, Conrath B, Flasar F M, et al. 1981. Infrared observations of the Saturnian system from Voyager 1[J]. *Science*, 212(4491): 192-200.
- He F, Yao Z H, Wei Y. 2021. Development and prospect of planetary optical remote sensing at Lenghu[J]. *Reviews of Geophysics and Planetary Physics*, 52(4): 361-372 (in Chinese).
- Hedman M M, Nicholson P D, French R G. 2018. Kronoseismology. IV. Six previously unidentified waves in Saturn's middle C ring[J]. *The Astronomical Journal*, 157(1): 18.
- Heimpel M, Gastine T, Wicht J. 2016. Simulation of deep-seated zonal jets and shallow vortices in gas giant atmospheres[J]. *Nature Geoscience*, 9(1): 19-23.
- Helled R, Schubert G, Anderson J D. 2009. Empirical models of pressure and density in Saturn's interior: Implications for the helium concentration, its depth dependence, and Saturn's precession rate[J]. *Icarus*, 199(2): 368-377.
- Helled R, Anderson J D, Schubert G, et al. 2011. Jupiter's moment of inertia: A possible determination by Juno[J]. *Icarus*, 216(2): 440-448.
- Helled R, Bodenheimer P, Podolak M, et al. 2013. Giant planet formation, evolution, and internal structure[EB/OL]. arXiv preprint, arXiv: 1311.1142. <https://arxiv.org/abs/1311.1142>.
- Helled R, Guillot T. 2013. Interior models of Saturn: Including the uncertainties in shape and rotation[J]. *The Astrophysical Journal*, 767(2): 113.
- Helled R, Galanti E, Kaspi Y. 2015. Saturn's fast spin determined from its gravitational field and oblateness[J]. *Nature*, 520(7546): 202-204.
- Helled R, Mazzola G, Redmer R. 2020. Understanding dense hydrogen at planetary conditions[J]. *Nature Reviews Physics*, 2(10): 562-574.
- Helled R, Movshovitz N, Nettelmann N. 2023. The Nature of Gas Giant Planets[M]// Lara L M, Jewitt D. *Planetary Systems Now*. Singapore: World Scientific Publishing Co Pte Ltd: 181-210.
- Helled R, Stevenson D J. 2024. The fuzzy cores of Jupiter and Saturn[J]. *AGU Advances*, 5(2): e2024AV001171.
- Hicks D G, Boehly T R, Celliers P M, et al. 2009. Laser-driven single shock compression of fluid deuterium from 45 to 220 GPa[J]. *Physical Review B—Condensed Matter and Materials Physics*, 79(1): 014112.
- Howard S. 2023. Interiors of giant planets: From Juno to Plato[D]. France: Université Côte d'Azur.
- Howard S, Guillot T, Bazot M, et al. 2023. Jupiter's interior from Juno: Equation-of-state uncertainties and dilute core extent[J]. *Astrophysics & Astrophysics*, 672: A33.
- Hubbard W B, DeWitt H E. 1985. Statistical mechanics of light elements at high pressure. VII-A perturbative free energy for arbitrary mixtures of H and He[J]. *Astrophysical Journal*, 290: 388-393.
- Hubbard W B, Marley M S. 1989. Optimized Jupiter, Saturn, and Uranus interior models[J]. *Icarus*, 78(1): 102-118.
- Hubbard W B. 1999. Gravitational signature of Jupiter's deep zonal flows[J]. *Icarus*, 137(2): 357-359.
- Hubbard W B. 2013. Concentric Maclaurin spheroid models of rotating liquid planets[J]. *The Astrophysical Journal*, 768(1): 43.

- Hubbard W B, Militzer B. 2016. A preliminary Jupiter model[J]. *The Astrophysical Journal*, 820(1): 80.
- Idini B, Stevenson D J. 2021. Dynamical tides in Jupiter as revealed by Juno[J]. *The Planetary Science Journal*, 2(2): 69.
- Idini B, Stevenson D J. 2022. The gravitational imprint of an interior-orbital resonance in Jupiter-Io[J]. *The Planetary Science Journal*, 3(4): 89.
- Iess L, Folkner W M, Durante D, et al. 2018. Measurement of Jupiter's asymmetric gravity field[J]. *Nature*, 555(7695): 220-222.
- Iess L, Militzer B, Kaspi Y, et al. 2019. Measurement and implications of Saturn's gravity field and ring mass[J]. *Science*, 364(6445): eaat2965.
- Ikoma M, Kobayashi H. 2025. Formation of giant planets[J]. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 63: 217-258.
- Ingersoll A P, Orton G S, Münch G, et al. 1980. Pioneer Saturn infrared radiometer: Preliminary results[J]. *Science*, 207(4429): 439-443.
- Ingersoll A P. 2020. Cassini exploration of the planet Saturn: A comprehensive review[J]. *Space Science Reviews*, 216(8): 122.
- Jacobson R A, Antreasian P G, Bordi J J, et al. 2006. The gravity field of the Saturnian system from satellite observations and spacecraft tracking data[J]. *The Astronomical Journal*, 132(6): 2520.
- Jeffreys H. 1924. On the internal constitution of Jupiter and Saturn[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 84: 534.
- Ji C, Li B, Liu W, et al. 2019. Ultrahigh-pressure isostructural electronic transitions in hydrogen[J]. *Nature*, 573(7775): 558-562.
- John C B P, Caroline T. 2006. Planet formation and migration[J]. *Reports on Progress in Physics*, 69: 119-180.
- Kaspi Y, Galanti E, Hubbard W B, et al. 2018. Jupiter's atmospheric jet streams extend thousands of kilometres deep[J]. *Nature*, 555(7695): 223-226.
- Kaspi Y, Galanti E, Showman A P, et al. 2020. Comparison of the deep atmospheric dynamics of Jupiter and Saturn in light of the Juno and Cassini gravity measurements[J]. *Space Science Reviews*, 216(5): 84.
- Knudson M D, Desjarlais M P, Becker A, et al. 2015. Direct observation of an abrupt insulator-to-metal transition in dense liquid deuterium[J]. *Science*, 348: 1455-1460.
- Knudson M D, Desjarlais M P. 2017. High-precision shock wave measurements of deuterium: Evaluation of exchange-correlation functionals at the molecular-to-atomic transition[J]. *Physical Review Letters*, 118(3): 035501.
- Kong D, Zhang K, Schubert G. 2013. On the gravitational fields of Maclaurin spheroid models of rotating fluid planets[J]. *The Astrophysical Journal*, 764(1): 67.
- Kong D, Zhang K, Schubert G. 2016. A fully self-consistent multi-layered model of Jupiter[J]. *The Astrophysical Journal*, 826(2): 127.
- Kong D, Zhang K, Schubert G, et al. 2018. Origin of Jupiter's cloud-level zonal winds remains a puzzle even after Juno[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(34): 8499-8504.
- Lai D. 2021. Jupiter's dynamical Love number[J]. *The Planetary Science Journal*, 2(4): 122.
- Lainey V, Jacobson R A, Tajeddine R, et al. 2017. New constraints on Saturn's interior from Cassini astrometric data[J]. *Icarus*, 281: 286-296.
- Lainey V, Casajus L G, Fuller J, et al. 2020. Resonance locking in giant planets indicated by the rapid orbital expansion of Titan[J]. *Nature Astronomy*, 4(11): 1053-1058.
- Leconte J, Chabrier G. 2012. A new vision of giant planet interiors: Impact of double diffusive convection[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 540: A20.
- Li G J, Gu Y J, Lan Y S, et al. 2023. Compression of gaseous hydrogen into warm dense states up to 95 GPa using multishock compression technique[J]. *Physical Review B*, 107(1): 014309.
- Lin Y. 2023. Dynamical tides in Jupiter and the role of interior structure[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 671: A37.
- Lissauer J J, de Pater I. 2013. *Fundamental Planetary Science: Physics, Chemistry and Habitability*[M]. Cambridge: Cambridge University Press.
- Liu S F, Hori Y, Müller S, et al. 2019. The formation of Jupiter's diluted core by a giant impact[J]. *Nature*, 572: 355.
- Lorenzen W, Holst B, Redmer R. 2009. Demixing of hydrogen and helium at megabar pressures[J]. *Physical Review Letters*, 102(11): 115701.
- Lorenzen W, Holst B, Redmer R. 2011. Metallization in hydrogen-helium mixtures[J]. *Physical Review B—Condensed Matter and Materials Physics*, 84(23): 235109.
- Loubeyre P, Besson J M, Pinceaux J P, et al. 1982. High-pressure melting curve of ^4He [J]. *Physical Review Letters*, 49(16): 1172.
- Loubeyre P, Occelli F, LeToullec R. 2002. Optical studies of solid hydrogen to 320 GPa and evidence for black hydrogen[J]. *Nature*, 416(6881): 613-617.
- Low F J. 1966. Observations of Venus, Jupiter, and Saturn at $\lambda 20 \mu\text{m}$ [J]. *The Astronomical Journal*, 71: 391.
- Mankovich C, Marley M S, Fortney J J, et al. 2019. Cassini ring seismology as a probe of Saturn's interior. I. Rigid rotation[J]. *The Astrophysical Journal*, 871(1): 1.
- Mankovich C R. 2020. Saturn's rings as a seismograph to probe Saturn's internal structure[J]. *AGU Advances*, 1(2): e2019AV000142.
- Mankovich C R, Fuller J. 2021. A diffuse core in Saturn revealed by ring seismology[J]. *Nature Astronomy*, 5(11): 1103-1109.
- Mazevet S, Licari A, Soubiran F. 2022. Benchmarking the ab initio hydrogen equation of state for the interior structure of Jupiter[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 664: A112.
- McMahon J M, Morales M A, Pierleoni C, et al. 2012. The properties of hydrogen and helium under extreme conditions[J]. *Reviews of Modern Physics*, 84(4): 1607-1653.
- Miguel Y, Guillot T, Fayon L. 2016. Jupiter internal structure: The effect of different equations of state[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 596: A114.
- Miguel Y, Bazot M, Guillot T, et al. 2022. Jupiter's inhomogeneous envelope[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 662: A18.
- Militzer B, Hubbard W B. 2013. Ab initio equation of state for hydrogen-helium mixtures with recalibration of the giant-planet mass-radius relation[J]. *The Astrophysical Journal*, 774(2): 148.
- Militzer B, Soubiran F, Wahl S M, et al. 2016. Understanding Jupiter's interior[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 121(9): 1552-1572.

- Militzer B, Wahl S, Hubbard W B. 2019. Models of Saturn's interior constructed with an accelerated concentric Maclaurin spheroid method[J]. *The Astrophysical Journal*, 879(2): 78.
- Militzer B, Hubbard W B, Wahl S, et al. 2022. Juno spacecraft measurements of Jupiter's gravity imply a dilute core[J]. *The Planetary Science Journal*, 3(8): 185.
- Militzer B, Hubbard W B. 2024. Study of Jupiter's interior: Comparison of 2, 3, 4, 5, and 6 layer models[J]. *Icarus*, 411: 115955.
- Moore K M, Yadav R K, Kulowski L, et al. 2018. A complex dynamo inferred from the hemispheric dichotomy of Jupiter's magnetic field[J]. *Nature*, 561: 76.
- Morales M A, Schwegler E, Ceperley D, et al. 2009. Phase separation in hydrogen-helium mixtures at Mbar pressures[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(5): 1324-1329.
- Morales M A, Hamel S, Caspersen K, et al. 2013. Hydrogen-helium demixing from first principles: From diamond anvil cells to planetary interiors[J]. *Physical Review B—Condensed Matter and Materials Physics*, 87(17): 174105.
- Morf L, Müller S, Helled R. 2024. The interior of Uranus—thermal profile, bulk composition, and the distribution of rock, water, and hydrogen and helium[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 690: A105.
- Movshovitz N, Fortney J J, Mankovich C, et al. 2020. Saturn's probable interior: An exploration of Saturn's potential interior density structures[J]. *The Astrophysical Journal*, 891(2): 109.
- Nettelmann N, Holst B, Kietzmann A, et al. 2008. Ab initio equation of state data for hydrogen, helium, and water and the internal structure of Jupiter[J]. *The Astrophysical Journal*, 683(2): 1217.
- Nettelmann N. 2009. Matter under extreme conditions: Modelling giant planets[D]. Rostock: Universität Rostock.
- Nettelmann N, Becker A, Holst B, et al. 2012. Jupiter models with improved ab initio hydrogen equation of state (H-REOS. 2)[J]. *The Astrophysical Journal*, 750(1): 52.
- Nettelmann N, Püstow R, Redmer R. 2013. Saturn layered structure and homogeneous evolution models with different EOSs[J]. *Icarus*, 225(1): 548-557.
- Nettelmann N. 2020. High-order gravity field of differentially rotating Uranus and Neptune models[C]//AGU Fall Meeting Abstracts: P066-0007.
- Nettelmann N, Movshovitz N, Ni D, et al. 2021. Theory of figures to the seventh order and the interiors of Jupiter and Saturn[J]. *The Planetary Science Journal*, 2(6): 241.
- Neuenschwander B A, Helled R. 2022. Empirical structure models of Uranus and Neptune[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 512(3): 3124-3136.
- Ni D. 2018. Empirical models of Jupiter's interior from Juno data-moment of inertia and tidal Love number k_2 [J]. *Astronomy & Astrophysics*, 613: A32.
- Ni D. 2019. Understanding Jupiter's deep interior: The effect of a dilute core[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 632: A76.
- Ni D. 2020a. Understanding Saturn's interior from the Cassini Grand Finale gravity measurements[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 639: A10.
- Ni D. 2020b. Signature of helium rain and dilute cores in Jupiter's interior from empirical equations of state[J]. *Earth and Planetary Physics*, 4(2): 111-119.
- Pan S, Huang T, Vazan A, et al. 2023. Magnesium oxide-water compounds at megabar pressure and implications on planetary interiors[J]. *Nature Communications*, 14(1): 1165.
- Pappalardo R T, Buratti B J, Korth H, et al. 2024. Science overview of the Europa Clipper mission[J]. *Space Science Reviews*, 220(4): 40.
- Peebles P J E. 1964. The structure and composition of Jupiter and Saturn[J]. *Astrophysical Journal*, 140: 328.
- Pfaffenzeller O, Hohl D, Ballone P. 1995. Miscibility of hydrogen and helium under astrophysical conditions[J]. *Physical Review Letters*, 74(13): 2599.
- Porco C C, West R A, McEwen A, et al. 2003. Cassini imaging of Jupiter's atmosphere, satellites, and rings[J]. *Science*, 299(5612): 1541-1547.
- Reuter D C, Simon-Miller A A, Lunsford A, et al. 2007. Jupiter cloud composition, stratification, convection, and wave motion: A view from new horizons[J]. *Science*, 318(5848): 223-225.
- Salpeter E E. 1973. On convection and gravitational layering in Jupiter and in stars of low mass[J]. *Astrophysical Journal*, 181: L83.
- Saumon D, Chabrier G, van Horn H M. 1995. An equation of state for low-mass stars and giant planets[J]. *Astrophysical Journal Supplement*, 99: 713.
- Saumon D, Guillot T. 2004. Shock compression of deuterium and the interiors of Jupiter and Saturn[J]. *The Astrophysical Journal*, 609(2): 1170.
- Schneider A D, Bitsch B. 2021. How drifting and evaporating pebbles shape giant planets. I. Heavy element content and atmospheric C/O[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 654: A71.
- Schöttler M, Redmer R. 2018a. Simulations of H-He mixtures using the van der Waals density functional[J]. *Journal of Plasma Physics*, 84(4): 755840401.
- Schöttler M, Redmer R. 2018b. Ab initio calculation of the miscibility diagram for hydrogen-helium mixtures[J]. *Physical Review Letters*, 120(11): 115703.
- Shibata S, Helled R. 2022. Enrichment of Jupiter's atmosphere by late planetesimal bombardment[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 926: L37.
- Showman A P, Dowling T E. 2000. Nonlinear simulations of Jupiter's 5-micron hot spots[J]. *Science*, 289(5485): 1737-1740.
- Showman A P. 2007. Numerical simulations of forced shallow-water turbulence: Effects of moist convection on the large-scale circulation of Jupiter and Saturn[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 64(9): 3132-3157.
- Smith B A, Soderblom L A, Johnson T V, et al. 1979. The Jupiter system through the eyes of Voyager 1[J]. *Science*, 204(4396): 951-972.
- Smith B A, Soderblom L, Batson R, et al. 1982. A new look at the Saturn system: The Voyager 2 images[J]. *Science*, 215(4532): 504-537.
- Smith E J, Wenzel K P, Page D E. 1992. Ulysses at Jupiter: An overview of the encounter[J]. *Science*, 257(5076): 1503-1507.
- Smoluchowski R. 1967. Internal structure and energy emission of Jupiter[J]. *Nature*, 215(5102): 691-695.
- Song X Y, Yang J, Wei Y. 2025. A look-back to the 50-year exploration

- tion of Jupiter's atmosphere[J]. *Reviews of Geophysics and Planetary Physics*, 56(1): 67-82 (in Chinese).
- Stevenson D J, Salpeter E E. 1977a. The dynamics and helium distribution in hydrogen-helium fluid planets[J]. *Astrophysical Journal Supplement Series*, 35: 239-261.
- Stevenson D J, Salpeter E E. 1977b. The phase diagram and transport properties for hydrogen-helium fluid planets[J]. *Astrophysical Journal Supplement Series*, 35: 221-237.
- Stevenson D J. 1982. Interiors of the giant planets[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 10: 257-295.
- Stevenson D J. 1985. Cosmochemistry and structure of the giant planets and their satellites[J]. *Icarus*, 62(1): 4-15.
- Stevenson D J. 2020. Jupiter's interior as revealed by Juno[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 48(1): 465-489.
- Subramanian N, Goncharov A F, Struzhkin V V, et al. 2011. Bonding changes in hot fluid hydrogen at megabar pressures[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108: 6014-6019.
- Thorngren D P, Fortney J J, Murray-Clay R A, et al. 2016. The mass-metallicity relation for giant planets[J]. *The Astrophysical Journal*, 831: 64.
- Tollefson J, Wong M H, de Pater I, et al. 2017. Changes in Jupiter's zonal wind profile preceding and during the Juno mission[J]. *Icarus*, 296: 163-178.
- Vazan A, Helled R, Guillot T. 2018. Jupiter's evolution with primordial composition gradients[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 610: L14.
- Von Zahn U, Hunten D M, Lehmacher G. 1998. Helium in Jupiter's atmosphere: Results from the Galileo probe helium interferometer experiment[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 103(E10): 22815-22829.
- Wahl S M, Hubbard W B, Militzer B, et al. 2017. Comparing Jupiter interior structure models to Juno gravity measurements and the role of a dilute core[J]. *Geophysical Research Letters*, 44(10): 4649-4659.
- Weir S T, Mitchell A C, Nellis W J. 1996. Metallization of fluid molecular hydrogen at 140 GPa (1.4 Mbar)[J]. *Physical Review Letters*, 76(11): 1860.
- Wicht J, Gastine T, Duarte L D V. 2019. Dynamo action in the steeply decaying conductivity region of Jupiter-like dynamo models[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 124(3): 837-863.
- Wicht J, Christensen U R. 2024. Contributions of Jupiter's deep-reaching surface winds to magnetic field structure and secular variation[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 129: e2023JE007890.
- Wigner E, Huntington H B. 1935. On the possibility of a metallic modification of hydrogen[J]. *The Journal of Chemical Physics*, 3(12): 764-770.
- Wildt R. 1947. The constitution of the planets (Council Report on the progress of astronomy)[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 107: 84.
- Wilson H F, Militzer B. 2012a. Solubility of water ice in metallic hydrogen: Consequences for core erosion in gas giant planets[J]. *The Astrophysical Journal*, 745(1): 54.
- Wilson H F, Militzer B. 2012b. Rocky core solubility in Jupiter and giant exoplanets[J]. *Physical Review Letters*, 108(11): 111101.
- Wisdom J, Hubbard W B. 2016. Differential rotation in Jupiter: A comparison of methods[J]. *Icarus*, 267: 315-322.
- Young R E. 1998. The Galileo probe mission to Jupiter: Science overview[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 103: 22775-22790.
- Zaghoo M, Salamat A, Silvera I F. 2016. Evidence of a first-order phase transition to metallic hydrogen[J]. *Physical Review B*, 93(15): 155128.
- Zha C, Liu H, Tse J S, et al. 2017. Melting and high P - T transitions of hydrogen up to 300 GPa[J]. *Physical Review Letters*, 119: 075302.
- Zharkov V N, Makalkin A B, Trubitsyn V P. 1973. Integration of equations of the theory of planetary figures[J]. *Soviet Astronomy*, 17: 97.
- Zharkov V N, Gudkova T V. 1992. Modern Models of Giant Planets[M]// High-Pressure Research: Application to Earth and Planetary Sciences. Washington D C: American Geophysical Union, 67: 393-401.

附中文参考文献

- 顾炜东, 魏勇, 尧中华, 等. 2024. 木星磁场研究: 回望和展望[J]. *地球与行星物理评论(中英文)*, 55(6): 638-651.
- 何飞, 尧中华, 魏勇. 2021. 冷湖行星光学遥感发展与展望[J]. *地球与行星物理论评*, 52(4): 361-372.
- 宋心仪, 杨军, 魏勇. 2025. 岁星四季—回望木星大气探测 50 年[J]. *地球与行星物理评论(中英文)*, 56(1): 67-82.