

行星的磁场与测量

汪毓明^{1*,2}, 盛东¹, 迟雨田^{2,3}, 刘凯^{1,2}, 郝传鹏^{2,3}, 翟晨曦¹

1. 中国科学技术大学地球和空间科学学院, 合肥 230026

2. 深空探测重点实验室, 合肥 230000

3. 深空探测实验室, 深空科学研究院, 合肥 230088

* 通讯作者, E-mail: ymwang@ustc.edu.cn

摘要 行星磁场是刻画天体内部结构、动力学过程及其空间环境的关键参数。地外磁场的探测始于二十世纪初对太阳黑子的塞曼效应观测, 随后空间原位测量的实现极大地拓展了我们对太阳系磁场系统的认知。地球作为一个拥有内禀磁场的开放系统, 其磁层与行星际磁场相连, 构成了物质和能量输运的纽带。太阳系各行星磁场独具特色, 从水星的偏移偶极场到木星的超强磁场, 再到天王星和海王星的极端倾斜磁轴, 其多样性反映了行星形成与演化路径的多样性。本文从理解行星磁场的起源与演化、搜寻潜在的地下海洋、了解离子逃逸和大气演变规律、预测空间天气过程和效应等四个方面, 详细阐述了行星磁场探测的重要科学意义。在此基础上, 回顾了空间磁场原位测量的主流技术, 展示了在空间磁场测量中面临平台干扰挑战的技术创新, 以及面向太阳系边际探测等未来任务, 亟需发展的如光泵磁力仪等更高精度的微弱磁场测量技术。最后, 展望了未来可能的发展方向。特别针对原位测量在时空覆盖上的局限性, 我们认为发展行星磁场的精细遥感测量(如将塞曼效应应用于木星)或成为未来的一个重要方向, 将有望实现对行星磁场三维结构及其动态演化的全局性刻画, 推动行星科学的跨越式发展。

关键词 行星磁场, 空间磁场探测技术, 弱磁测量技术

项目资助 国家自然科学基金重点项目(批准号: 42130204), 国家自然科学基金基础中心项目(批准号: 42188101), 国家自然科学基金面上项目(批准号: 42474204)。

1 引言

行星磁场泛指天体内部、表面及邻近空间存在的磁场，是表征行星内部结构和动力学过程、空间环境状态及其变化的核心物理参量，也是了解行星形成演化历史的重要窗口^[1]。精确测量行星磁场对于了解行星演化过程、反演行星内部结构、解析太阳风-磁层耦合机制等具有不可替代的作用^[2,3]。

人类对行星磁场的理解经历了漫长的过程，地球磁场是这一认知历程的起点。早在战国时期，我国便可利用“司南”作为磁性指向装置，尽管当时尚未触及物理本质，但表明对地球磁场已有了初步认知。直至 1600 年，英国物理学家 Gilbert 在《De Magnete》中首次提出地球等效磁偶极子模型，将磁学与地球内部联系起来^[4]。德国数学家 Gauss 在 1832 年发明了磁强计原型，实现了磁场强度的绝对标定，标志着地磁场研究从定性描述进入定量化测量阶段^[5]。

在对地球磁场形成基础认知后，地外行星磁场环境逐渐成为新的探索的方向。1908 年，美国天文学家 Hale 基于塞曼效应测得太阳黑子磁场强度，实现了人类首次对地外磁场的测量，证实了恒星磁活动的普适性^[6]。1955 年，美国科学家 Burke 与 Franklin 通过地面射电望远镜捕获了来自木星的非热辐射，首次确认其他行星同样拥有磁场^[7]。1958 年，前苏联发射的 Sputnik 3 卫星搭载磁强计，实现了首次空间磁场的原位测量^[8,9]。自此，人类开启了地外行星磁场探索的新里程，进入空间磁测时代。此后的大多数行星探测器（如水手 4 号、旅行者 1 号&2 号、卡西尼号等）均搭载了磁强计，表明磁场探测对于揭示行星本征属性和演化历史的重要性。

在进入空间磁测时代后的近七十年中，探测手段和技术持续发展，实现了从地基光谱观测到空间原位探测，从绝对总强度到三分量测量，从低精度到高精度，从散点测量到全球测绘。探测的范围也不断拓展，人类的航天器几乎造访了太阳系中的每一个大型天体及其个别卫星，实现了从地球到太阳、月球、行星乃至太阳系边际的广泛探测。

磁场作为行星的内禀属性，太阳系的八大行星各具特色，呈现出多样性。地球是目前人类研究最为深入的行星，其显著的内禀磁场及由此形成的磁层空间，长期以来都是地球物理学和空间物理学的重要探测和研究对象。研究人员在研究其他行星磁场时，往往与地球进行比较。在类地行星中，金星与地球体积和质量相近，因此早期曾被期望具有类似地球的磁场特征^[2,3,10]。但是“水手 2 号”和“金星快车”都表明金星并不存在全球性内禀磁场^[11,12]。当前普遍认为，金星极其缓慢的逆行自转可能抑制了其内部发电机机制的运行^[2]，其表面的磁场

强度可能仅为地球的约 1/430 或者更少。地球的另一个近邻——火星，虽然和金星一样不具有全球磁场，但其地壳岩石保留的强剩磁表明早期曾存在全球性发电机，但可能在大约 41.3 亿年前便已停止^[13,14]。火星磁场的消失，导致这颗行星失去了类似地球磁层的“保护伞”，被认为是火星大气逃逸并失去宜居性的一个重要原因。水星体积最小、质量最轻，且自转缓慢，在进行首次探测前研究人员一度猜测它可能已经完全固化^[15]。但“水手 10 号”与“信使号”探测任务均确认其拥有全球性的偶极磁场^[16~19]。这可能是太阳系中已知的具有最弱本征磁场的天体，强度约为地球的 1%^[1]。

相比之下，气态巨行星普遍拥有较强的全球性磁场。木星是太阳系中磁偶极矩最强的行星^[20]，其强度大约是地球的 2 万倍，早在 1955 年就通过射电望远镜探测到带电粒子在磁场中运动产生的非热辐射，成为继地球之后首次被确认存在磁场的行星。近期 Juno 卫星的探测结果表明，木星表面和空间磁场有着丰富的拓扑结构^[21]。与地球以偶极场为主、相对对称的磁场分布不同，木星整体磁场呈现显著的南北半球磁场差异以及赤道附近的磁异常区^[22]。加上此外木星具有周期不超过 10 个小时的快速自转，使木星空间形成了与地球空间显著不同的物理过程。太阳系的行星中，土星在体积和质量上位列第二，它的磁场虽然不如木星强，但是土星磁轴与自转轴高度重合，在各行星中是独一无二的^[23]。

作为冰巨星的天王星与海王星成分和大小相近且同样拥有内禀磁场。它们的独特之处是，磁偶极轴与自转轴之间存在极大的夹角（天王星约为 59°，海王星约为 47°）^[2]，且磁心明显偏离行星几何中心，这导致在其周围形成了非常复杂的磁场拓扑结构^[3]。到目前为止，对它们磁场的唯一实地观测仅来自“旅行者 2 号”^[24]。

行星的磁场结构的差异及其在太阳系中的位置，共同塑造了各自独特的空间环境演化路径。太阳风作为从日冕持续流出的高电导率磁化等离子体携带太阳磁场，在传播过程中会与太阳系的天体之间发生复杂的相互作用^[25]，从而形成开放的系统，影响磁层动力学和大气逃逸等过程^[26,27]。

具有内禀磁场的行星（如水星、地球、木星、土星、天王星和海王星）与太阳风相互作用会形成弓激波-磁鞘-磁层的三层结构^[28]（如图 1a 所示）。其中，磁层是行星磁场主导的腔体。以地球为例，当太阳风撞击磁层顶边界时，若地球磁场与行星际磁场满足反平行条件，便会发生磁场重联，地球磁场同行星际磁场连接，形成开放磁力线^[29]，使得地球成为一个开放的行星系统。太阳风带动开放的地球磁场从向阳侧向背阳侧流动，太阳风粒子通过开放的极尖区注入磁层，驱动磁暴、极光等空间天气事件^[30,31]。随着与太阳距离的增加，磁重联的效率逐渐降低。在木星和土星处，太阳风和磁层的相互作用黏性增强，边界更易出现 K-H 不

稳定性^[32]，取代磁重联成为巨行星磁层外部物质和能量进入磁层的主要渠道^[32~34]。

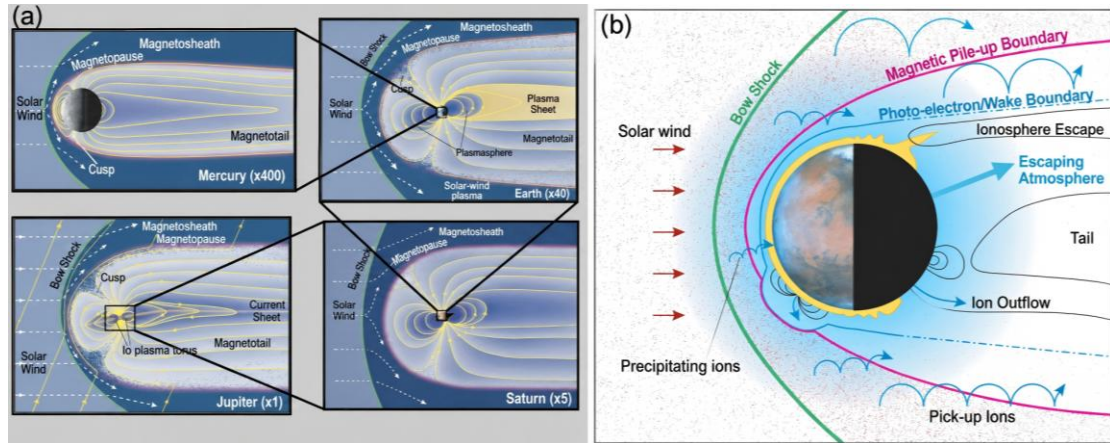


图 1（网络版彩图）行星磁层比较。(a) 对比水星（左上）、地球（右上）、土星（右下）和木星磁层（左下），空间尺度上由小到大；(b) 太阳风与火星大气、电离层、剩磁的相互作用（Fran Bagenal and Steve Bartlett）

(<https://lasp.colorado.edu/mop/resources/graphics/>)

Figure 1 (Color online) Comparison of planetary magnetospheres. (a) Comparison of the magnetospheres of Mercury (upper left), Earth (upper right), Saturn (lower right), and Jupiter (lower left), arranged in order of increasing spatial scale. (b) Interaction of the solar wind with the Martian atmosphere, ionosphere, and crustal magnetic fields.

金星和火星缺少全球内禀磁场，太阳风直接与其电离层相互作用，行星际磁场在跨越火星电离层的时候发生褶皱堆积，形成感应磁层，并导致显著的离子逃逸现象^[12,27,35,36]。火星地壳中广泛分布着强烈的局域化剩余磁场，这些磁场可与反平行的行星际磁场发生合并或重联^[37,38]，进而与行星际磁场形成相互连接的开放系统（如图 1b 所示）。

由此可见，每一个行星的磁场都不是孤立的系统，行星际磁场与行星磁场动态连接，使太阳跟各个行星乃至到太阳系边际形成了物质、能量以及磁通量的有效输运。尽管我们现在对太阳系各行星磁场的基本性质已有初步认知，但是还不够完善。有关行星发电机的理解仍有许多不足，许多关键问题尚未解答。且目前的探测任务在某些方面仍有许多限制：如水星的高温环境、木星土星的强辐射带，以及冰巨星探测的长期空白等。要在未来有效拓展对行星磁场环境的理解，亟需在太阳系范围内完成更系统、精细的磁场测量。

2 行星磁场探测的科学意义

行星磁场的探测具有重要的科学意义，主要体现在：（1）揭示行星内部动力学过程，从而深化对行星磁场起源与长期演化规律的认识；（2）反演天体尤其是冰卫星的内部结构，搜寻潜在的地下海洋；（3）了解离子逃逸机制及大气演变过程，评估行星环境长期演化的稳定性；（4）解析太阳风—磁场相互作用机理，提升对空间天气过程及其效应的预测能力。

2.1 理解行星磁场的起源与演化

理解行星磁场的起源与演化是行星磁场探测的核心科学目标之一。行星内禀磁场蕴含了其内部结构和动力学演化的关键信息。行星表面可观测的全球性磁场及其长期变化是存在行星发电机的强有力证据^[39]。行星发电机理论认为，导电流体在行星核内的对流运动会切割磁力线，产生感应电动势和电流，维持行星磁场，其本质是将流体运动的动能转化为磁能^[40]。

在太阳系中，地球、水星和木卫三（Ganymede）是仅有的已知拥有活跃发电机的类地天体^[41]。地球的发电机已持续运行了超过 34 亿年^[42]，产生了一个以偶极子为主且相对较强的全球磁场^[43,44]。目前研究中经常被提及的三种驱动机制包括对流、（自转轴）进动以及潮汐作用^[45]（如图 2 所示，a 为地球内部的三层结构；b 为由地核冷却和内核生长驱动的对流；c 为由轻氧化物（MgO 或 SiO₂）析出驱动的对流；d 为（自转轴）进动使液体沿一个与地幔自转轴（红色）不同的轴（蓝色）旋转，由于形状非球形，会诱导出次级环流（青绿色箭头）；e 为潮汐在液态地核内部引起的一种大约以一天为周期旋转的形变，从而诱导再循环流动）。自转轴进动驱动的流动强度可能不足以单独驱动地球发电机，而潮汐作用对流动和磁场的具体影响尚不清晰。目前由地核冷却与内核生长驱动的对流^[46~48]，辅以轻元素的析出^[49~51]，仍然是最有可能维持地球发电机运转的机制^[45]。尽管如此，地球内部发电机过程的具体细节和动力学过程仍需未来探测以提供更精确的约束。

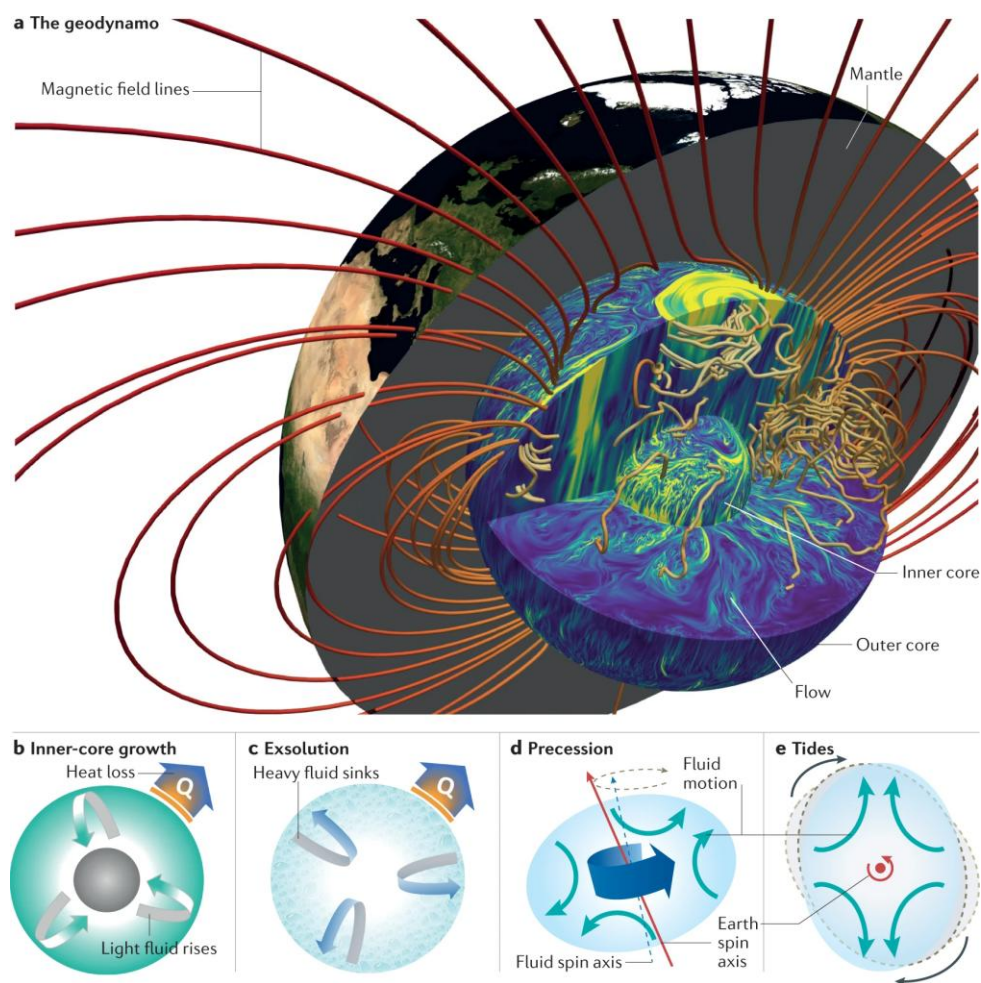


图 2 （网络版彩图） 地球发动机模型及可能机制示意图^[45]

Figure 2 (Color online) Geodynamo Model and Candidate mechanisms for driving the geodynamo within Earth's outer core^[45]

通过过去六十多年的深空探测，我们对其他行星的磁场起源也形成了基本认知。观测表明，具有内禀磁场的行星（及木卫三）的磁矩与行星质量之间存在显著的相关性^[52]（如图 3 所示）。值得注意的是，这些磁场的起源机制呈现出明显的多样性。水星尽管体积小、冷却快，但其富含轻元素的液态外核仍支撑着活跃的发电机，现有模型表明其可能由“铁雪”（Iron snow）沉降驱动底部上升式对流维持^[53]。木星的强磁场可能源于金属氢层中的快速旋转热对流驱动的自发电机过程，其内部可能存在“稀释核心”，导致发电区呈现非均匀壳层结构^[54]。“卡西尼号”的观测证实土星内部磁场具有极端轴对称性^[55]。然而根据考林定理，完全轴对称的磁场无法由纯粹发电机过程维持，这意味着土星深层发电机周围可能存在强大的纬向气流和稳定的分层结构^[56]。天王星和海王星是太阳系中仅有的由发电机效应产生非偶极磁场主导的行星^[57]，这种独特的磁场形态表明其发电机过程可能源于内部对流与自转之间的解耦。

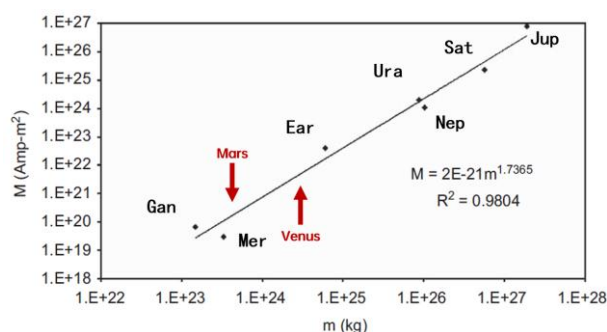


图 3（网络版彩图） 具有全球内禀磁场的太阳系天体偶极磁矩与质量之间的关系，无内禀磁场的火星和金星在对应的质量处由箭头标出^[52]（改编自 Durand-Manterola H J, 2009）

Figure 3 (Color online) Relationships between the planetary dipole magnetic moment and the mass for seven solar system bodies with intrinsic magnetic fields. Mars and Venus, which lack intrinsic magnetic fields, are indicated by arrows at their respective planetary masses^[52](adapted from Durand-Manterola, 2009)

金星和火星现今缺乏内禀磁场的原因一直是行星科学中的重要问题。金星缺乏全球磁场的主要原因是其内部没有活跃的发电机过程，且目前尚未观测到显著的地壳剩余磁化^[41]。对此存在两种主流理论解释：其一是金星缓慢的冷却速率和缺乏板块构造运动阻碍了核心对流的启动^[58]；其二是金星核心内轻元素稳定分层，难以形成有效的热化学对流^[59]。火星大气与挥发物演化探测器（Mars Atmosphere and Volatile Evolution, MAVEN）的数据表明，火星发电机在约 45 亿到 37 亿年前曾比较活跃^[60]。然而，火星发电机在不同时期的强度、方向和形态特征，以及其最终熄灭的具体原因仍存在诸多未解之谜。“火星全球探勘者号”（Mars Global Surveyor, MGS）的探测数据显示火星南半球 Terra Sirenum 地区的磁场强度可能超过 1500 纳特，说明火星存在显著的地壳剩余磁场^[61]。但为何这些剩余磁场主要保存在南半球地壳中，其成因和分布机制仍需深入研究。

2.2 搜寻潜在地下海洋

液态水被广泛认为是生命存在不可或缺的基本要素之一，因此探测地外液态水，对于评估其宜居性具有重大科学意义^[62]。除了关注天体表面的液态水之外，磁场的探测揭示在个别木卫和土卫的表面之下，可能存在全球性海洋^[63-66]，这为地外液态水乃至潜在生命痕迹的探寻，打开了新的窗口。

地下海洋探测的一个重要手段是电磁感应探测技术，其物理基础是法拉第电磁感应定律和安培定律。当处于时变外磁场中时，导体内会激发感应电流，这些感应电流自身会产生一个次级磁场，叠加在外磁场上，从而能够被磁强计探测到^[64,67]。通过精确测量目标天体附近的总磁场（包含行星背景场、等离子体电流产生的场以及潜在的感应磁场），并与理论模型

进行对比,即可推断其内部是否含有导电层^[68]。这种手段对于冰层之下液态水的探测更具优势,因为冰和液态盐水的密度差异微小,重力测量等手段难以有效区分。然而,两者的电导率相差数个数量级,因此基于电磁感应的探测技术成为搜寻冰卫星地下海洋的关键手段^[69]。

NASA 的“伽利略号”探测器对木星及其卫星进行了深入探测^[65]。其中,木卫二(Europa)是目前地外天体里,电磁感应效应相关研究开展得最为全面和深入的天体^[64,65,69~71]。它没有内禀磁场,然而当它穿越木星强大的时变磁场时,被探测到显著的感应磁场信号。对此最合理的解释是其表面冰壳以下存在导电性良好且厚度约十公里的全球性液态海洋^[63~65,67]。此外,木卫二表面活跃的地质特征也为其存在液态水提供了地质学支持^[69,72,73]。木卫四(Callisto)一直被认为是一个地质古老、遍布撞击坑、活动性极低的卫星,但其附近的磁场测量数据也显示出与内部导电层感应相关的特征^[64,65,67],这一现象表明部分分化的古老天体内部也可能维持液态水层。对于木卫三,“伽利略号”磁强计数据也探测到了感应磁场的迹象,但由于其具有全球内禀磁场,情况更为复杂,尚需进一步确认^[74]。而在火山活动极其活跃的本卫一(Io)上,并未观测到明确的感应磁场特征^[69]。

此外,“卡西尼号”任务在土卫二(Enceladus)上发现了水羽和地下海洋^[66,75,76]。基于旅行者 2 号的探测数据以及热演化和内部模型推断,天王星最内侧轨道的天卫五(Miranda)、天卫一(Ariel)和天卫二(Umbriel)三颗卫星,由于体积足够大、且所处磁场环境随天王星自转呈显著周期性变化,也被认为可能存在潜在的地下海洋^[77]。如果未来有机会对其进行探测,有望通过飞掠任务确定其是否存在地下海洋^[78,79]。

地下海洋的存在对理解这些天体的轨道动力学与潮汐演化、内部热化学过程、地质活动以及潜在宜居性都具有重要意义^[62]。未来仍需要更深入的探测任务和更精细的数据分析,来最终确认或排除更多天体地下海洋的存在。对于木星系,NASA 的“欧罗巴快船”(Europa Clipper)和 ESA 的“木星冰卫星探测器”(JUICE)已经在飞往木星的征途上,预计分别在 2030 和 2031 年到达并开始科学探测任务^[80~82]。它们携带了更先进的磁场探测设备,将有助于我们更加深入理解木卫的磁场环境和内部结构。我国天问四号任务也将进行木星系探测,预计在 2030 年前后发射,2036 年左右到达,开启我国的木星探测使命。

2.3 了解离子逃逸和大气演变规律

正如先前所述,太阳风在传播过程中会与各天体发生复杂的相互作用,构成开放的行星系统。行星是否拥有强大的全球内禀磁场,决定了其与太阳风相互作用的模式及大气长期演化的路径^[83]。大气逃逸包括中性逃逸、离子逃逸、热逃逸和非热逃逸等多种机制,其中非热

离子逃逸过程，在类地行星的宜居性演化中扮演着至关重要的角色^[84]。数值模拟研究评估了多种影响非热离子逃逸率的行星参数和太阳风参数，其中太阳活动水平^[85]、太阳风动压、行星际磁场方向与强度，以及行星自身的磁场（如火星的局域地壳磁场）等^[86]，均会影响离子逃逸速率。强大的重力场和内禀磁场是保护行星高层大气免受太阳风粒子直接轰击的屏障。地球磁场向阳侧可形成延伸至约 10 个地球半径的磁层，有效偏转太阳风。然而火星和金星缺乏这种全球性保护，使得太阳风能够直接与电离层相互作用。因此火星和金星比地球更易受外部环境侵蚀，大气中的粒子更易通过热逃逸和非热逃逸机制逐步损失^[85]。

火星大气的演化历程，为揭示行星内禀磁场缺失引发的大气逃逸过程，提供了典型范例。轨道卫星观测和就位探测研究表明，约 30~40 亿年前，火星可能拥有较稳定的液态水、稠密的大气和潜在宜居环境，甚至可能存在生命^[87-90]。随着其全球发电机活动停止导致内禀磁场消失，大气逃逸过程加剧，表面长期暴露于强烈的太阳活动和宇宙辐射下，液态水无法稳定存在，最终演变为现今寒冷干燥的模样^[86,90]。模拟结果表明，与完全无磁场状态相比，内禀磁场的存在可使火星总逃逸率降低约六倍^[91]。此外，火星局域性地壳磁场对离子逃逸过程也具有显著影响，它会改变全球离子逃逸分布^[92,93]。然而，磁场强度与大气保护效率之间并非简单的线性对应关系^[94,95]。观测和模拟结果一致表明，磁场对大气逃逸的调控作用具有高度复杂性：在弱磁场条件下，反而可能促进逃逸过程，只有当磁场强度达到足够水平，才具备显著抑制大气损失的能力^[95]。

在太阳风参数中，太阳活动水平与太阳风动压是影响离子逃逸最重要的两个因素^[85,96]。太阳极紫外辐射通量的增加，能够影响火星高层大气的温度和结构，进而显著增强离子逃逸通量^[97-99]。此外，剧烈的空间天气事件如日冕物质抛射和共转相互作用区，能极大提升太阳风动压并扰动行星际磁场，从而显著增强离子逃逸率^[100-102]（如图 4 所示）。行星际磁场的结构和方向对离子逃逸也具有重要影响。行星际磁场的锥角^[103]与钟角角度能调控不同离子种类的逃逸通量^[86]，当行星际磁场与太阳风速度方向平时逃逸效率最大，垂直时则最小。在小锥角情况下，火星的感应磁层会退化，日侧不再形成常规的磁压堆积和弓激波，从而导致太阳风-电离层的直接耦合，可能提升离子逃逸率并影响大气演化^[103]。

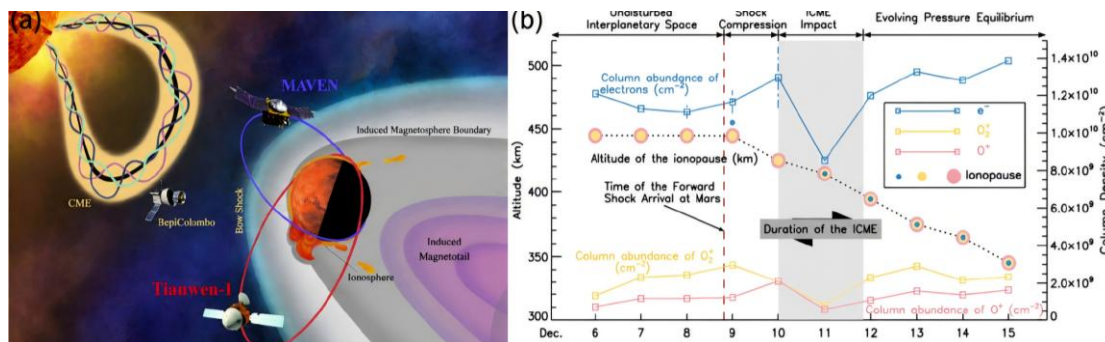


图4（网络版彩图）太阳爆发活动对火星空间的扰动会造成更为显著的离子逃逸。(a) 天问一号和美国 MAVEN 卫星环绕火星探测的示意图；(b) 太阳爆发活动到达火星后，观测到的夜侧电离层存在明显耗竭，离子密度的显著下降（Copyright©2023. 出版单位：美国物理学会 American Physical Society）^[101]

Figure 4 (Color online) Solar eruptive activity drive disturbances in the Martian space environment, leading to significantly enhanced ion escape. (a) Schematic illustration of the Tianwen-1 orbiter and MAVEN spacecraft in orbit around Mars. (b) An apparent depletion of the observed nightside ionosphere with a significant decrease in ion densities at the time of the ICME passage ^[101].

由此可见，为深入理解行星大气的演化规律及其对宜居性的制约，不仅需要对行星本征磁场的空间分布与强度进行精确探测，还需结合对上游太阳风的持续监测，以刻画外部驱动与内部响应之间的耦合过程。只有同时把握磁场屏蔽效应与太阳风扰动特征，才能全面揭示大气逃逸的调控机制及其对行星宜居潜力的深远影响。

2.4 预测空间天气过程和效应

相对于上一节气候尺度的演化，空间天气过程的时间尺度要短得多。其主要受太阳活动的驱动，可能会对卫星等高技术系统和生命安全造成显著影响^[104,105]。太阳表面的磁场演化是引发太阳耀斑、日冕物质抛射、太阳高能粒子流（SEP，Solar Energetic Particles）等灾害性空间天气活动的主要驱动^[106]。目前，太阳磁场的观测主要基于塞曼效应，且主要集中在光球层^[107]。光球之上的太阳大气，尤其是最外层的日冕，磁场强度显著减弱，难以直接观测。目前通常依赖于由光球磁场建立的磁流体力学（MHD，MagnetoHydroDynamics）模型、磁流体静力学（MHS，MagnetoHydroStatics）模型、无力场模型（NLFFF，Non-Linear Force-Free Field）、势场模型（PFSS，Potential Field Source Surface）来估算日冕磁场^[108]。然而，这些方法受到模型假设和边界条件的限制，且精度相对较低，难以完全反映日冕磁场的复杂结构。近期，Yang 等人提出的基于日冕中普遍存在的磁流体横波来测量日冕磁场的新方法^[109]，为实现日冕磁场的常规测量提供了理论基础。

准确的日冕磁场测量对于理解和预测太阳耀斑及日冕物质抛射的爆发具有重要意义。这些扰动是地球空间天气的主要驱动源，并同样在其他行星环境中影响磁层与大气过程。

剧烈的太阳耀斑和日冕物质抛射到达地球附近会引发极端的空间天气事件，如地磁暴、极光现象等，从而导致电路中断、导航失效、卫星损坏以及通信故障等^[110~112]。例如 1859 年的“卡林顿事件”（Carrington Event），引发了异常强烈的地磁扰动和全球极光现象^[113~118]，甚至导致欧洲与北美的电报系统大范围瘫痪^[117, 119]。2024 年 5 月，一系列朝向地球的太阳耀斑和日冕物质抛射引发了一场持续超过 40 小时的强地磁暴，Kp 指数（Kp index，国际 3 h 磁情指数，反映地球地磁活动强度）超过 8 持续了 24 小时以上^[120]。这是自 2003 年“万圣节事件”^[121]以来最强的一次地磁暴，导致极光在包括加那利群岛、印度拉达克和美国南佛罗里达州等低纬度地区可见。

日冕物质抛射携带的磁场，尤其是其南向磁场分量（ $B_z < 0$ ），是引起地磁暴的关键参数之一^[122, 123]。当南向磁场与地球磁场相互作用时，会导致地球磁层发生重联事件，从而有效地将能量从太阳风注入地球磁层，引起强烈地磁活动^[31]。已有统计分析显示，南向磁场强度与 Dst 指数（Disturbance Storm Time Index，地磁暴时扰动指数）呈明显的负相关（相关系数为 -0.82）^[124]，即南向磁场越强，地磁暴越强。日冕物质抛射内部磁场的强度不仅由其爆发源区的磁能储存与释放过程决定，也会受到其在行星际空间传播过程中的动力学演化影响^[125]。在传播过程中，日冕物质抛射可能与前方或后续的其他日冕物质抛射相互作用，形成多重磁云结构^[126]。由于相互作用产生的压缩和重叠效应，多重磁云内部的磁场（特别是南向分量）会异常增强，从而显著提高其触发强地磁暴的能力。对相互作用的日冕物质抛射进行进一步研究表明，当激波进入前一个日冕物质抛射内部时，会对其内部的磁场产生压缩作用，导致内部磁场显著增强^[127]。这类激波 - 行星际日冕物质抛射相互作用事件更易引发强地磁暴，是理解极端空间天气事件成因的关键^[128, 129]。

在空间天气监测与预报中，位于 L1 点的 Wind 和 ACE 卫星提供的高时间分辨率磁场观测数据，对于实时监测行星际日冕物质抛射（Interplanetary Coronal Mass Ejection, ICME）内部磁场的强度和方向变化，以及预报其可能引起的地磁暴强度至关重要。这些数据能够在日冕物质抛射抵达地球前约 30~60 分钟提供预警。若要实现更早的预警，则需要结合位于内日球层的 Solar Orbiter、Parker Solar Probe 等卫星的磁强计探测数据。通过多点联合观测与数据反演，更深入地揭示日冕物质抛射磁场结构的演化规律^[127, 130, 131]，从而实现了对日冕物质抛射磁场特征及其地磁效应的提前预报。综上所述，精准的磁场测量不仅

是理解太阳 - 地球系统能量耦合过程的核心，也是构建空间天气早期预警体系、保障航天器安全运行与地面电网稳定的重要基础。

3 空间磁场的原位测量技术

3.1 主流测量技术的发展

20 世纪 30 年代，随着半导体技术和电子技术的发展，基于物质各种磁效应（主要是电磁感应效应）的磁场测量方法取得重大进步，各种磁强计应运而生，例如磁通门磁强计^[132,133]、霍尔效应磁强计^[134,135]、磁阻效应磁强计^[136,137]等。

霍尔效应磁强计的工作原理基于带电粒子在磁场中受洛伦兹力偏转的物理机制。电流垂直于外磁场流经半导体时，载流子向垂直于电流与磁场的方向偏移，在器件两端形成霍尔电压，通过对霍尔电压的精准检测与定量分析，可实现对外部磁场强度的间接测量，且在一定范围内，霍尔电压与外磁场强度呈线性关系，为磁场测量提供了明确的量化依据。

磁通门磁强计以软磁材料在磁场中磁导率的非线性变化特性为核心工作原理。高磁导率铁芯在交变磁场下周期性饱和，调制环境待测磁场，使感应线圈产生关联感应信号，解调信号可获磁场的强度与方向。通过对感应信号的幅度、相位等特征参数进行解调和数据处理，能够精确反演得到待测磁场的强度与方向信息。

磁阻效应磁强计的工作原理建立在磁阻效应基础上，即导体或半导体材料的电阻值会在外加磁场作用下发生显著变化的物理现象。磁场与电流平行时电阻低、垂直时电阻高，通过检测电阻变化量，可反演得到磁场强度。基于这一特性，定量测量材料在外加磁场下的电阻变化量，即可间接获取待测磁场的强度。

同时，随着对原子等微观粒子行为理解的深入，实验室内基于量子精密测量的新型磁测技术得到迅猛发展^[138]（图 5 所示），其中包括超导量子干涉仪（Super-conducting QUantum Interference Devices, SQUIDs）^[139,140]、光泵原子磁力仪^[138,141,142]等。SQUIDs 通过双约瑟夫森结闭合超导环，利用超导电流的量子干涉效应，将外部磁通量的变化转化为可测量的电流或电压周期性波动，从而实现对磁通量的超高灵敏度探测。而光泵原子磁力仪则利用在外磁场中原子受泵浦光调制后的极化特性实现对外磁场的测量。这些磁场测量技术的出现，使得探测的灵敏度不断提升，极大地推进了磁场测量技术的发展。表 1 列出了不同测量技术具体性能指标的典型值。

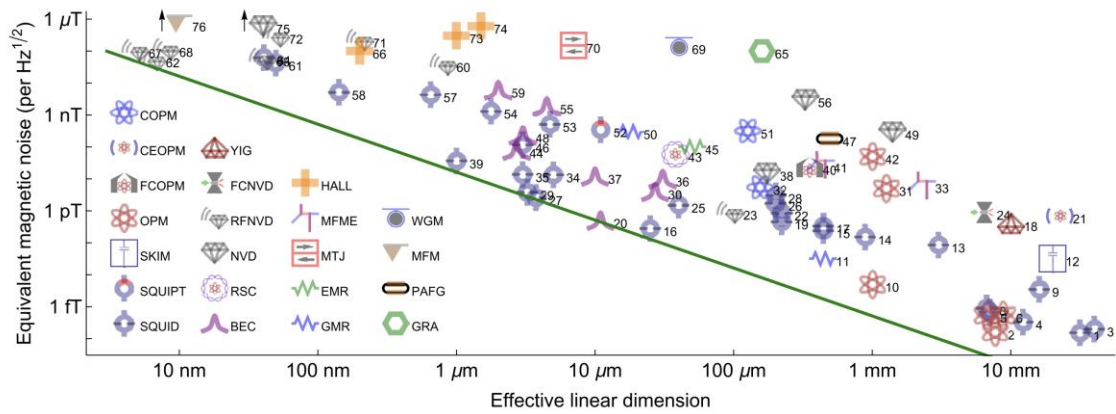


图 5（网络版彩图）不同磁场测量技术中空间分辨率与灵敏度的关系
（Copyright©2020，出版单位：美国物理学会 American Physical Society）^[138]

Figure 5 (Color online) Relationship between spatial resolution and sensitivity among different magnetic field measurement techniques^[138]

表 1 几种常用行星磁场测量技术的主要性能参数（所列参数均为典型值）

Table 1 Key parameters of several commonly used planetary magnetic field measurement techniques (all listed parameters are typical values)

磁力仪类型	原子磁力仪	SQUID	NV 色心	磁通门	磁阻效应
典型尺寸	1 mm~5 cm	0.1 mm~10cm	0.1 μm~0.1 mm	~5 cm	~1 mm
典型灵敏度 ($T/Hz^{1/2}$)	$10^{-16} \sim 10^{-12}$	$10^{-16} \sim 10^{-12}$	$10^{-11} \sim 10^{-9}$	$10^{-12} \sim 10^{-11}$	$\sim 10^{-10}$

行星磁场测量要求传感器能够适应真空、高低温、强辐射等极端环境，同时还需兼顾体积、重量、功耗及经济成本等约束。通过对各类磁场测量技术的系统研究，目前主流的空间磁场传感器主要包括磁通门磁强计、磁阻效应磁强计和原子磁力仪等^[143]，各类传感器在体积、重量、功耗、测量范围及灵敏度等关键指标上具有不同特点^[144~147]。前苏联搭载铁芯磁通门磁强计的“斯普特尼克 3 号”（SPUTNIK-3）卫星成功升空，成为人类航天史上第一颗探测空间磁场的卫星^[9]。1961 年首个碱金属原子磁力仪随美国国家航空航天局（NASA）发射的“探险者 10 号”（Explorer 10）卫星一同进入太空^[148]，开启了该类仪器的太空应用。

磁通门磁强计在 nT 至 μT 量级的磁场测量中展现出显著优势。相较于原子磁力仪，其体积更小、功耗更低，但噪声水平一般在 10 pT，难以满足 pT 及更高精度测量的需求。原子磁力仪作为世界上灵敏度最高的磁力仪之一，无需低温制冷，设备体积与重量远小于 SQUIDs，且器件结构相对简单，具备小型化大规模应用的潜力。考虑到行星磁场的强度范

围及其变化特性，磁通门磁强计在体积、重量、可靠性、分辨率及精度方面具备综合优势，是目前应用最为广泛的磁场测量载荷。然而，其性能受限于自身噪声水平，难以对微弱磁场进行精准测量。同时，因零位和正交度存在长期漂移现象，需进行定期校准，这在一定程度上增加了后期数据校准的难度。相比之下，原子磁力仪具有长期绝对精度高、灵敏度优异的突出特点。若将原子磁力仪与磁通门磁强计配合使用，通过数据融合可有效弥补各自性能短板，实现行星磁场的高精度测量。

在各类原子磁力仪中，氦原子磁力仪使用 ^4He 原子作为工作介质，在原理上不受非线性塞曼效应影响，能够在极端空间环境下保证高精度磁场测量^[149,150]，是目前承担任务类型最为丰富的原子磁力仪^[151]。但是，在实际应用中探测光的光频移效应仍然可以引起氦原子磁力仪的指向误差。相较于氦原子磁力仪，碱金属原子磁力仪结构简单、成本更低，在特定模式下灵敏度极高。随着微机电系统（MEMS, Micro-Electro-Mechanical System）工艺和激光技术的发展，其成本、体积及功耗有望进一步降低^[152]，同时理论上的探索使其在测量精度上也达到了空间磁场探测的需求。

与上述使用气态原子的磁力仪系统不同，金刚石色心（NV-diamond）属于凝聚态体系^[153]。其核心优势在于具备纳米级的空间分辨率^[138]以及更容易实现矢量磁场测量，但其在磁场探测灵敏度方面不及前述两种原子磁力仪。

总体而言，磁通门传感器兼具高精度与稳定性，且环境适应性强、功耗低、重量轻、长期运行可靠性高，这些特点使其成为行星磁场测量的首选。而霍尔、磁阻等磁强计更多作为辅助或低成本替代方案，原子磁力仪则适用于高灵敏度和高准确度的磁场测量场景，尤其是深远空间的微弱磁场测量。

3.2 无磁控平台的弱磁测量技术

除了测量技术本身，测量环境对磁场测量精度的影响同样至关重要。要获得高精度的磁场观测数据，首先需要了解被测磁场的形成机制及其组成成分。以地球为例，地磁场主要由两部分组成：其一是准静态磁场，来源于地核及地幔内部导电流体的对流运动，我们在地表实测到的约 6 万纳特的地球主磁场。准静态磁场演化缓慢，时间尺度可达百万年，但古地磁学研究显示，地磁场在显生宙期间曾发生数百次极性反转^[154]。其二是扰动磁场，其来源为地表及近地空间的各类动态过程，例如地震、洋流、太阳爆发事件引发的磁暴，以及电离层与磁层的活动等^[155]。这些扰动场叠加在主场之上，形成了地磁场的年际变化、日变化及小时变化，其变化幅度从百纳特、十纳特到小于一纳特不等。

上述各种自然过程形成的磁场还都是客观存在的环境磁场，而真正的干扰来自磁测设备自身以及搭载磁测设备的平台。对于空间磁测，不可避免的就是卫星平台带来的干扰。由于卫星平台上存在电路、电机、螺线管等电子器部件，它们在运行过程中会产生复杂的磁场信号，严重影响磁强计的测量结果^[156]。为减小这种影响，通常需采用“磁控”或“磁洁净”技术，即在卫星设计阶段通过选用低磁材料、优化布线结构、增加补偿线圈、加装伸杆等方式，最大限度地降低平台剩磁的影响^[157]。但即便如此，仍难以完全消除磁场干扰。

这些干扰对磁场实测数据质量的影响，因环境不同而不同。举例而言，若卫星平台在伸杆顶端约两米处产生 100 纳特的干扰磁场，在近地轨道（约 500 公里高度）处，地球空间磁场强度约为 1 万纳特，此时平台干扰仅占被测磁场的 1%，高精度测量相对容易实现；在地球同步轨道（约 36000 公里高度）处，环境磁场降为约 100 纳特，若平台磁场未得到充分抑制，干扰强度将与信号相当，信噪比接近 1:1。进一步，在地球附近的行星际空间，日地系统第一拉格朗日点处的平均磁场强度仅为 10 纳特左右^[158]，此时干扰信号就已是目标信号的几十倍；而在火星轨道处，实际太阳风中磁场强度仅有几纳特^[159]，平台干扰相当于真实信号的近百倍，在如此高强度的干扰背景下，要准确提取占比仅 1% 的真实磁场信号，这对行星际磁场测量而言是一项巨大的技术挑战。

我国首次火星探测任务“天问一号”即面临这样的挑战。该任务于 2020 年 7 月成功发射，2021 年 2 月顺利进入火星轨道，环绕器上的磁强计于同年 11 月正式开机，开始执行常规的火星空间磁场测量任务^[160]。由于磁强计安装于未进行磁控设计的环绕器卫星平台，测得的原始磁场数据不可避免地受到平台自身磁场及机载电子设备工作时产生的电磁干扰影响，导致观测结果难以直接反映火星周边真实的空间磁场环境。为在后期数据处理中能有效消除干扰，磁强计采用伸杆加内外双探头设计，伸杆长 3.19 米，内外探头分别安装在距离卫星本体约 2.29 米和 3.19 米的位置处。内探头受平台干扰较强，测得的磁场强度在百纳特量级；外探头受干扰相对较小，测量结果约为几十纳特，而火星附近真实的空间磁场强度仅有几纳特左右（图 6 所示）。除此之外，由于卫星平台各类电器设备的开关机和操作运行等动作，每一轨道在实测数据上还叠加了上百次的跳变^[161]。

针对这一复杂干扰背景，天问一号的磁强计团队研发并应用了一系列定标与去干扰算法，对原始数据进行了系统的校正和优化，包括聚类分析、梯度分析、Alfven 特性分析等^[161,162]，最终获得了高质量、可用于科学分析的 Level2 级别数据产品^[160]。目前，天问一号火星磁强

计数据正持续稳定发布，为国内外学者研究火星空间环境提供了重要的观测数据¹，标志着我国首次实现了对火星空间磁场的高精度原位测量，显著提升了我国在行星空间物理领域的国际影响力与学术话语权。

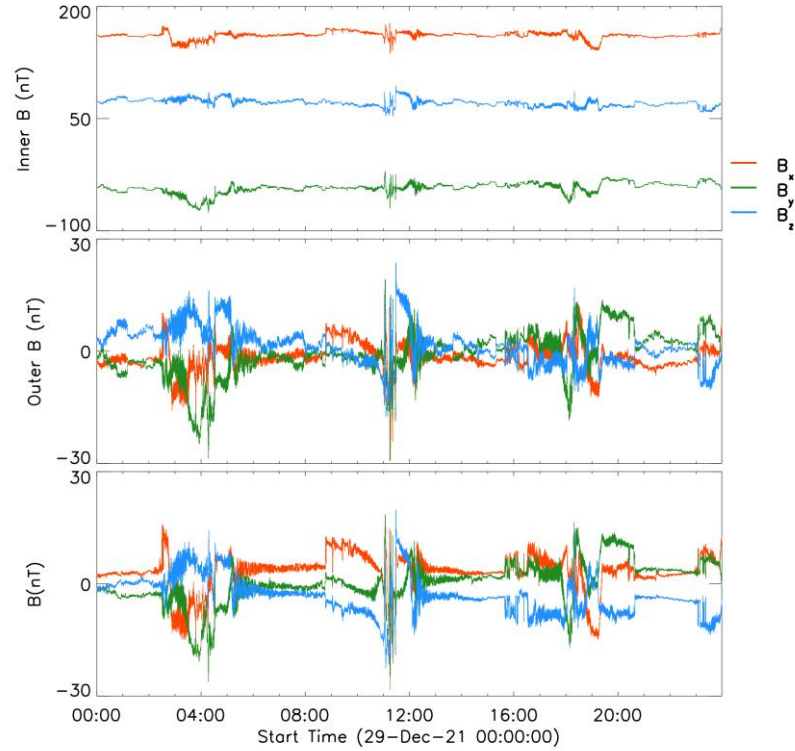


图 6 （网络版彩图） 天问一号磁强计探测数据。上图和中图为内外探头探测到的去除快速跳变干扰后的原始磁场数据，下图为定标后的磁场探测数据。

Figure 6 (Color online) Magnetic field measurements from the Tianwen-1 magnetometer. The upper and middle panels show the raw magnetic field data from the inner and outer sensors after removal of rapid spike-like disturbances, respectively. The lower panel presents the calibrated magnetic field data.

3.3 空间极弱磁场的测量技术与挑战

深远空间的磁场强度随着与磁场源中心的距离增加而显著减弱，到太阳系边际处（约 100 AU），磁场强度降至 1 纳特左右^[163]。其测量技术的核心问题是精度需求与环境限制的博弈，这种博弈推动了磁场测量技术的关键迭代^[145]。除上节所述消除平台干扰的技术外，测量设备本身所能达到的精度也显得非常关键。

磁通门磁强计作为当前空间磁场探测的主力载荷，其关键缺陷在于探头的零位漂移特性。在深空探测任务中，即使微小的系统漂移量也可能与待测的极弱磁场强度相当，因此需要依

¹ https://space.ustc.edu.cn/dreams/tw1_momag/

赖其他传感器进行校准^[147]或类似天问一号任务的方法进行在轨标定。此外，受限于其灵敏度水平（通常在 10 pT 量级），磁通门磁强计在探测极弱磁场时存在固有局限性^[2]。基于量子精密测量技术的原子磁力仪有效突破了传统磁强计的精度瓶颈^[148,164~166]，将测量精度推进至皮特乃至飞特量级。

原子磁力仪的核心组成部分精密复杂，包括光学元件、原子气室、激光器及电子元器件等，因此其空间应用面临众多挑战。空间环境中的极端温度、强辐射、发射冲击、轨道机动振动等极端条件均可能影响其灵敏度、稳定性及长期工作能力。以激光器为例，尽管原子磁力仪的激光器可放置于舱内辐射环境相对安全的区域，但仍需承受发射阶段的剧烈振动与冲击，这些力学环境可能破坏组件定位精度甚至导致结构失效。激光器的波长和输出功率等参数会随温度变化导致读数漂移，然而深空探测任务的能源供给和散热条件严格受限，过高功耗可能导致真空环境下散热困难，引发组件温度失控。此外，深空探测要求激光器稳定工作数年乃至数十年，长期寿命成为制约其应用拓展的关键瓶颈^[167~169]。

对于原子气室来说，不同的原子对温控的需求不一样。碱金属原子气室需配备主动加热装置，因为空间环境温差可达数百摄氏度，温度变化会影响原子数密度导致信号突变。低温时需要加热来维持原子数密度稳定，但极端高温还可能引发原子气室结构软化变形，破坏内壁涂层并影响原子弛豫速率。除主动温控外，还需采用多层隔热膜等被动防护手段缓解温度波动。此外，银河宇宙线、太阳高能粒子辐射及行星辐射带高能粒子可能导致原子气室产生不可逆的损伤。辐射作用下光学镀膜层可能脱落，降低光极化效率；当累积辐射剂量达 3.6 Mrad 时，高能粒子撞击玻璃晶格产生色心缺陷，可使光学透过率衰减超 50%^[170]。现有防护措施包括采用铅合金屏蔽层进行被动防护，以及通过实时监测辐射剂量动态调整信号放大增益的主动补偿策略。

深远空间微弱磁场测量技术追求更高精度与更高灵敏度，这为原子磁力仪提供了广阔应用前景。在攻克上述技术挑战的同时，还要顺应航天器载荷小型化需求，通过 MEMS 工艺等技术途径减小体积、降低重量与功耗，实现性能与复杂度的最优平衡。

4 未来展望

综上所述，当前行星磁场的探测主要依赖于航天器的原位测量，其能力受限于探测器的可达性与任务周期。2025 年 5 月 29 日，天问二号的成功发射，标志着我国首次近地小行星探测、取样返回以及主带彗星 311P 的环绕探测正式开启，迈出了我国行星与小天体综合探测的重要一步。在此基础上，我国行星探测工程还将陆续实施天问三号火星取样返回以及天

问四号木星系环绕探测任务，逐步构建覆盖类地行星、巨行星及小天体的系统性探测体系。在上述任务中，磁场探测是认识行星及小天体内部结构、形成演化及其与太阳风相互作用过程的关键观测手段之一。

面向未来，行星磁场测量技术将沿着两个主要方向演进：一是持续提升原位测量的精度与可靠性；二是大力发展磁场的精细遥感测量技术，类似太阳表面磁场的观测（图 7 所示），使得磁场的测量不再局限于一个点，而是能够拓展到一个面。在某些场景，比如在全球磁场建模和演化研究方面，后者具有独特的优势和巨大的潜力，现有原位测量手段（如环绕探测）需通过长期数据积累来实现。

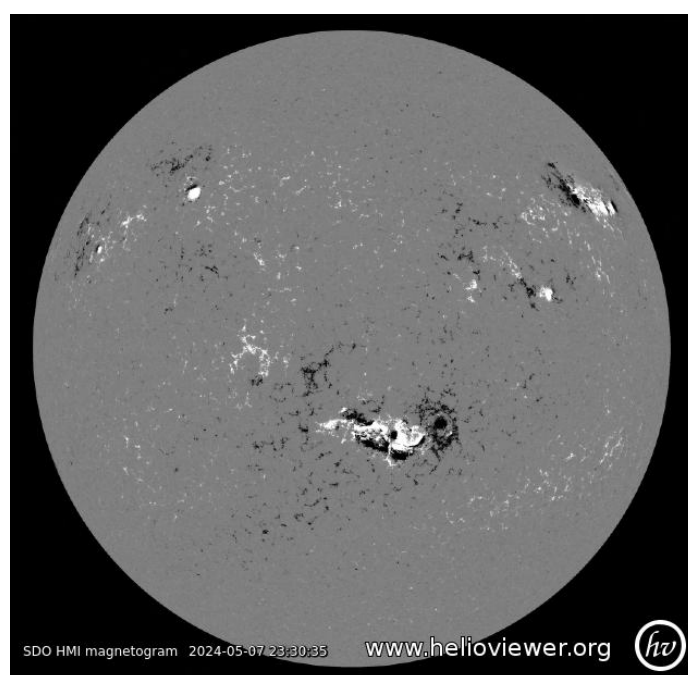


图 7 2024 年 5 月 7 日的 SDO/HMI 观测的全日面磁图（图来自 helioviewer.org）

Figure 7 Full-disk magnetogram observed by SDO/HMI on 7 May 2024 (image credit: helioviewer.org)

以木星探测为例，“朱诺号”探测器耗时约一年半（9 个轨道）才初步建立 JRM09 模型（10 阶球谐系数），而更精确的 JRM33 模型（13 阶球谐系数）则需累积长达五年的观测数据^[22]。这种基于长时间序列的模型多为静态模型，难以捕捉磁场的动态演化过程。若要同步获取大范围、高时空分辨的磁场信息，遥感测量是目前最具可行性的技术路径。

磁场遥感测量可基于多种原理实现，包括塞曼效应、法拉第旋转效应、射电辐射机制以及冕震学等。然而，多数方法仅能提供粗略的磁场信息，难以同时满足高精度、高空间分辨率及完整矢量测量的需求。法拉第旋转效应擅长探测视线方向磁场分量，但结果受限于等离子体分布的先验知识与积分路径的模糊性；射电辐射机制（如回旋辐射）对磁场方向敏感，

但通常仅适用于太阳等强射电源的局部区域^[171]；而冕震学等磁流体力学方法虽可反演大尺度磁场结构，却严重依赖波动识别与模型假设，不确定性较高。

目前，地外磁场遥感测量中最为成熟精细的技术当属塞曼效应。塞曼效应的核心是磁场对原子能级的分裂作用——当处于磁场中的原子吸收或发射光子时，谱线会分裂为偏振特性不同的多条支线，支线间距与磁场强度成正比，偏振方向则与磁场方向相关。这一物理机制为遥感探测提供了“光谱探针”：通过分析目标行星大气中特定原子（如氢、氦、金属元素）的塞曼分裂谱线，可反推磁场的强度、方向及空间分布。自1908年 Hale 首次利用该技术探测太阳黑子磁场以来，塞曼效应已成为太阳光球层磁场观测的常规手段，实现了相当于在太阳表面部署千万个磁强计的探测能力^[6]。这些数据为了解太阳磁场分布、内部结构、活动周起源及爆发过程中的磁能释放提供了关键约束。

将遥感测量应用于行星磁场探测具有显著价值。尽管地球表面磁场（约6万纳特）较太阳表面磁场（十至千高斯，即 10^6 – 10^8 纳特）低约两个量级，但木星作为太阳系中磁场最强的行星，其表面磁场可达数十高斯（数百万纳特），与太阳宁静区磁场强度相当。因此，利用塞曼效应对木星开展精细遥感测量具有重要探索意义。美国团队基于“朱诺号”数据对木星磁场的高精度测绘已取得里程碑式发现，揭示了其磁场的局部复杂性与半球不对称性^[22]，颠覆了传统均匀发电机模型的认识。这些发现表明，木星磁场精细遥感测量能够为理解其深部金属氢流体的运动、发电机过程的区域差异以及磁层-大气耦合机制提供关键约束^[172]，不仅深化了对巨行星内部动力学的认知，也为系外行星磁场与宜居性研究提供了重要参考。

塞曼效应遥感并非局限于木星，其应用场景可覆盖太阳系内所有强磁场天体及部分系外行星，形成“梯度化探测体系”：其一，太阳系内强磁场行星，除木星外，土星（表面磁场约0.2–0.8高斯）、天王星（磁场轴与自转轴夹角近 59° ，结构特殊）、海王星（磁场强度约1高斯）均具备探测潜力。其中，土星环区域存在稀薄大气和等离子体，塞曼效应可用于探测环系磁场与行星本体磁场的耦合；天王星和海王星的“异常磁场”（非轴对称、多极子占比高），若能通过遥感实现全局观测，有望揭示冰巨行星“冰-岩石核”与“金属水”层的发电机机制，填补当前巨行星研究的空白。其二，系外行星，对于公转轨道较近、磁场强度可能较高的系外巨行星（如“热木星”），当它们从宿主恒星前方掠过时（凌日现象），其大气的塞曼分裂谱线可能被恒星光谱叠加捕捉。通过分析凌日光谱中的偏振信号和谱线分裂特征，可间接探测系外行星的磁场强度——这为评估系外行星的磁层保护能力（抵御恒星风侵蚀，保护大气）、进而判断其宜居性提供了全新维度。

我们相信行星磁场的精细遥感测量代表未来的一个重要发展方向。若能在木星等强磁场

行星上实现塞曼效应的遥感探测,将有望突破传统原位探测在空间覆盖和时间连续性方面的限制,实现对行星磁场结构及其时空演化的全局刻画,必将推动行星科学研究的跨越式发展。

致谢 感谢基金委重点项目 42130204, 基金委基础中心项目 42188101, 基金委面上项目 42474204 等项目的资助。

参考文献

- 1 Schubert G, Soderlund K M. Planetary magnetic fields: Observations and models. *Phys Earth Planet Inter*, 2011, 187(3-4): 92-108
- 2 Balogh A. Planetary magnetic field measurements: missions and instrumentation. *Space Sci Rev*, 2010, 152(1): 23—97
- 3 Glassmeier K H, Heyner D. Planetary magnetic fields. In: *Magnetospheres in the Solar System*. 2021. 365—389
- 4 Gilbert W. *De Magnete, Magneticisque Corporibus, et de Magno Magnete Tellure Physiologia Nova, Plurimis et Argumentis, et Experimentis Demonstrata*. London: Petrus Short, 1600
- 5 Gauss C F. *Intensitas vis magneticae terrestris ad mensuram absolutam revocata*. Göttingen: Sumtibus Dieterichianis, 1833
- 6 Hale G E. On the probable existence of a magnetic field in sun-spots. *Astrophys J*, 1908, 28: 315
- 7 Burke B F, Franklin K L. Observations of a variable radio source associated with the planet Jupiter. *J Geophys Res*, 1955, 60(2): 213—217
- 8 Vestine E H. The survey of the geomagnetic field in space. *Eos Trans AGU*, 1960, 41(1): 4—21
- 9 Dolginov S Sh, Zhuzgov L N, Seliutin V A. Magnetometric equipment of the third soviet artificial Earth satellite. *ARS J*, 1961, 31(9): 1329—1341
- 10 Houtgast J. Indication of a magnetic field of the planet Venus. *Nature*, 1955, 175(4459): 678—679
- 11 Smith E J, Coleman P J, Davis L, et al. Mariner II: preliminary reports on measurements of Venus: magnetic field. *Science*, 1963, 139(3558): 909—910
- 12 Zhang T L, Baumjohann W, Delva M, et al. Magnetic field investigation of the Venus plasma

environment: Expected new results from Venus Express. *Planet Space Sci*, 2006, 54(13-14): 1336-1343

13 Lillis R J, Frey H V, Manga M. Rapid decrease in Martian crustal magnetization in the Noachian era: Implications for the dynamo and climate of early Mars. *Geophys Res Lett*, 2008, 35(14): L14203

14 Vervelidou F, Lesur V, Grott M, et al. Constraining the date of the Martian dynamo shutdown by means of crater magnetization signatures. *J Geophys Res-Planets*, 2017, 122(11): 2294-2311

15 Stevenson D. Planetary magnetism. *Icarus*, 1974, 22(4): 403—415

16 Ness N F. Mercury: magnetic field and interior. *Space Sci Rev*, 1978, 21(5): 527—553

17 Anderson B J, Acuña M H, Korth H, et al. The structure of Mercury's magnetic field from MESSENGER's first flyby. *Science*, 2008, 321(5885): 82-85

18 Slavin J A, Acuña M H, Anderson B J, et al. MESSENGER observations of magnetic reconnection in Mercury's magnetosphere. *Science*, 2009, 324(5927): 606-610

19 Anderson B J, Acuña M H, Korth H, et al. The magnetic field of Mercury. *Space Sci Rev*, 2010, 152(1): 307-339

20 Russell C T, Dougherty M K. Magnetic fields of the outer planets. *Space Sci Rev*, 2010, 152(1): 251—269

21 Connerney J E P, Kotsiaros S, Oliverson R J, et al. A new model of Jupiter's magnetic field from Juno's first nine orbits. *Geophys Res Lett*, 2018, 45(6): 2590-2596

22 Connerney J E P, Timmins S, Oliverson R J, et al. A new model of Jupiter's magnetic field at the completion of Juno's prime mission. *J Geophys Res-Planets*, 2022, 127(2): e2021JE007055

23 Connerney J E P. Planetary magnetism. In: Schubert G, ed. *Treatise on Geophysics*, Vol 10. Amsterdam: Elsevier, 2007. 243-280

24 Donaldson K, Olsen A J, Paty C S, et al. Characterizing the solar wind-magnetosphere viscous interaction at Uranus and Neptune. *J Geophys Res-Space Phys*, 2024, 129(8): e2024JA032518

25 Parker E N. Dynamics of the interplanetary gas and magnetic fields. *Astrophys J*, 1958, 128: 664

26 Dungey J W. Interplanetary magnetic field and the auroral zones. *Phys Rev Lett*, 1961, 6(2): 47-48

- 27 Dubinin E, Fraenz M, Fedorov A, et al. Ion energization and escape on Mars and Venus. *Space Sci Rev*, 2011, 162(1): 173-211
- 28 Lepping R P. A comparative review of bow shocks and magnetopauses. NASA Tech Memo, 1984
- 29 Sonnerup B U Ö. Magnetopause reconnection rate. *J Geophys Res*, 1974, 79(10): 1546-1549
- 30 Akasofu S-I. The development of the auroral substorm. *Planet Space Sci*, 1964, 12(4): 273-282
- 31 Gonzalez W D, Joselyn J A, Kamide Y, et al. What is a geomagnetic storm? *J Geophys Res-Space Phys*, 1994, 99(A4): 5771-5792
- 32 Masters A. A more viscous-like solar wind interaction with all the giant planets. *Geophys Res Lett*, 2018, 45(15): 7320-7329
- 33 Delamere P A, Ng C S, Damiano P A, et al. Kelvin-Helmholtz-related turbulent heating at Saturn's magnetopause boundary. *J Geophys Res-Space Phys*, 2021, 126(2): e2020JA028479
- 34 Olsen A J. Characterizing the solar wind-magnetosphere viscous interaction in the outer solar system: analytical assessment of the probability of the Kelvin Helmholtz instability growth at Uranus and Neptune. Dissertation for the Master Degree. Eugene: University of Oregon, 2021
- 35 Luhmann J G, Brace L H. Near-Mars space. *Rev Geophys*, 1991, 29(2): 121-140
- 36 Halekas J S, Brain D A, Luhmann J G, et al. Flows, fields, and forces in the Mars-solar wind interaction. *J Geophys Res-Space Phys*, 2017, 122(11): 11320-11332
- 37 涂传诒. 日地空间物理学：日球层物理（上册）. 北京：科学出版社，2020（Tu, C. Y. Solar-terrestrial space physics: Heliospheric physics (Vol. 1). Science Press, Beijing, 2020. [In Chinese]）
- 38 Bowers C F, DiBraccio G A, Slavin J A, et al. Exploring the solar wind-planetary interaction at Mars: Implication for magnetic reconnection. *J Geophys Res-Space Phys*, 2023, 128(2): e2022JA030989
- 39 Lowes F J. Spatial power spectrum of the main geomagnetic field, and extrapolation to the core. *Geophys J Int*, 1974, 36(3): 717-730
- 40 Stevenson D J. Planetary magnetic fields. *Rep Prog Phys*, 1983, 46(5): 555-620
- 41 Soderlund K M, Stanley S, Cao H, et al. Puzzles in planetary dynamos: Implications for

planetary interiors. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 2025, 53

42 Tarduno J A, Cottrell R D, Watkeys M K, et al. Geodynamo, solar wind, and magnetopause 3.4 to 3.45 billion years ago. *Science*, 2010, 327(5970): 1238-1240

43 Smirnov A V, Tarduno J A, Evans D A. Evolving core conditions ca. 2 billion years ago detected by paleosecular variation. *Phys Earth Planet Inter*, 2011, 187(3-4): 225-231

44 Biggin A J, Piispa E J, Pesonen L J, et al. Palaeomagnetic field intensity variations suggest Mesoproterozoic inner-core nucleation. *Nature*, 2015, 526(7572): 245-248

45 Landeau M, Fournier A, Nataf H C, et al. Sustaining Earth's magnetic dynamo. *Nat Rev Earth Environ*, 2022, 3(4): 255-269

46 Gubbins D. Energetics of the Earth's core. *J Geophys*, 1977, 43(1): 453-464

47 Olson P. A simple physical model for the terrestrial dynamo. *J Geophys Res-Solid Earth*, 1981, 86(B11): 10875-10882

48 Braginsky S I, Roberts P H. Equations governing convection in Earth's core and the geodynamo. *Geophys Astrophys Fluid Dyn*, 1995, 79(1-4): 1-97

49 Buffett B A, Garnero E J, Jeanloz R. Sediments at the top of Earth's core. *Science*, 2000, 290(5495): 1338-1342

50 Badro J, Siebert J, Nimmo F. An early geodynamo driven by exsolution of mantle components from Earth's core. *Nature*, 2016, 536(7616): 326-328

51 O'Rourke J G, Stevenson D J. Powering Earth's dynamo with magnesium precipitation from the core. *Nature*, 2016, 529(7586): 387-389

52 Durand-Manterola H J. Dipolar magnetic moment of the bodies of the solar system and the Hot Jupiters. *Planet Space Sci*, 2009, 57(12): 1405-1411

53 Chen B, Li J, Hauck S A. Non-ideal liquidus curve in the Fe-S system and Mercury's snowing core[J]. *Geophys Res Lett*, 2008, 35(7).

54 Militzer B, Hubbard W B, Wahl S, et al. Juno spacecraft measurements of Jupiter's gravity imply a dilute core. *Planet Sci J*, 2022, 3(8): 185

55 Dougherty M K, Cao H, Khurana K K, et al. Saturn's magnetic field revealed by the Cassini Grand Finale. *Science*, 2018, 362(6410): eaat5434

56 Cao H, Russell C T, Wicht J, et al. Saturn's high degree magnetic moments: Evidence for a unique planetary dynamo. *Icarus*, 2012, 221(1): 388-394

- 57 Soderlund K M, Stanley S. The underexplored frontier of ice giant dynamos. *Phil Trans R Soc A*, 2020, 378(2187): 20190479
- 58 Nimmo F. Why does Venus lack a magnetic field? *Geology*, 2002, 30(11): 987-990
- 59 Jacobson S A, Rubie D C, Hernlund J, et al. Formation, stratification, and mixing of the cores of Earth and Venus. *Earth Planet Sci Lett*, 2017, 474: 375-386
- 60 Mittelholz A, Johnson C L, Feinberg J M, et al. Timing of the martian dynamo: New constraints for a core field 4.5 and 3.7 Ga ago. *Sci Adv*, 2020, 6(18): eaba0513
- 61 Acuña M H, Connerney J E P, Ness N F, et al. Global distribution of crustal magnetization discovered by the Mars Global Surveyor MAG/ER experiment. *Science*, 1999, 284(5415): 790-793
- 62 Hussmann H, Sohl F, Spohn T. Subsurface oceans and deep interiors of medium-sized outer planet satellites and large trans-neptunian objects. *Icarus*, 2006, 185(1): 258-273
- 63 Khurana K K, Kivelson M G, Stevenson D J, et al. Induced magnetic fields as evidence for subsurface oceans in Europa and Callisto. *Nature*, 1998, 395(6704): 777-780
- 64 Kivelson M G, Khurana K K, Stevenson D J, et al. Europa and Callisto: Induced or intrinsic fields in a periodically varying plasma environment. *J Geophys Res-Space Phys*, 1999, 104(A3): 4609-4625
- 65 Kivelson M G, Khurana K K, Russell C T, et al. Galileo magnetometer measurements: A stronger case for a subsurface ocean at Europa. *Science*, 2000, 289(5483): 1340-1343
- 66 Postberg F, Schmidt J, Hillier J, et al. A salt-water reservoir as the source of a compositionally stratified plume on Enceladus. *Nature*, 2011, 474(7353): 620-622
- 67 Zimmer C, Khurana K K, Kivelson M G. Subsurface oceans on Europa and Callisto: Constraints from Galileo magnetometer observations. *Icarus*, 2000, 147(2): 329-347
- 68 Colburn D S, Reynolds R T. Electrolytic currents in Europa. *Icarus*, 1985, 63(1): 39-44
- 69 Saur J, Neubauer F M, Glassmeier K H. Induced magnetic fields in solar system bodies. *Space Sci Rev*, 2010, 152(1): 391-421
- 70 Schilling N, Neubauer F M, Saur J. Time-varying interaction of Europa with the jovian magnetosphere: Constraints on the conductivity of Europa's subsurface ocean. *Icarus*, 2007, 192(1): 41-55
- 71 Schilling N, Neubauer F M, Saur J. Influence of the internally induced magnetic field on the plasma interaction of Europa. *J Geophys Res-Space Phys*, 2008, 113(A3)

- 72 Carr M H, Belton M J S, Chapman C R, et al. Evidence for a subsurface ocean on Europa. *Nature*, 1998, 391(6665): 363-365
- 73 Pappalardo R T, Belton M J S, Breneman H H, et al. Does Europa have a subsurface ocean? Evaluation of the geological evidence. *J Geophys Res-Planets*, 1999, 104(E10): 24015-24055
- 74 Kivelson M G, Khurana K K, Volwerk M. The permanent and inductive magnetic moments of Ganymede. *Icarus*, 2002, 157(2): 507-522
- 75 Dougherty M K, Khurana K K, Neubauer F M, et al. Identification of a dynamic atmosphere at Enceladus with the Cassini magnetometer. *Science*, 2006, 311(5766): 1406-1409
- 76 Thomas P C, Tajeddine R, Tiscareno M S, et al. Enceladus's measured physical libration requires a global subsurface ocean. *Icarus*, 2016, 264: 37-47
- 77 Castillo-Rogez J, Weiss B, Beddingfield C, et al. Compositions and interior structures of the large moons of Uranus and implications for future spacecraft observations. *J Geophys Res-Planets*, 2023, 128(1): e2022JE007432
- 78 Weiss B P, Biersteker J B, Colicci V, et al. Searching for subsurface oceans on the moons of Uranus using magnetic induction. *Geophys Res Lett*, 2021, 48(19): e2021GL094758
- 79 Cochrane C J, Vance S D, Nordheim T A, et al. In search of subsurface oceans within the Uranian moons. *J Geophys Res-Planets*, 2021, 126(12): e2021JE006956
- 80 Roberts J H, McKinnon W B, Elder C M, et al. (Interior Thematic Working Group). Exploring the interior of Europa with the Europa Clipper. *Space Sci Rev*, 2023, 219(6): 46
- 81 Boutonnet A, Langevin Y, Erd C. Designing the JUICE trajectory. *Space Sci Rev*, 2024, 220(6): 67
- 82 Van Hoolst T, Tobie G, Vallat C, et al. Geophysical characterization of the interiors of Ganymede, Callisto and Europa by ESA's JUpiter ICy moons Explorer. *Space Sci Rev*, 2024, 220(5): 54
- 83 Gupta S, Basak A, Nandy D. Impact of changing stellar and planetary magnetic fields on (exo)planetary environments and atmospheric mass loss. *Astrophys J*, 2023, 953(1): 70
- 84 Luo J, He H Q, Tong G S, et al. Quantifying the key factors affecting the escape of planetary atmospheres. *Astrophys J*, 2023, 951(2): 136
- 85 Lundin R, Lammer H, Ribas I. Planetary magnetic fields and solar forcing: Implications for atmospheric evolution. *Space Sci Rev*, 2007, 129(1-3): 245-278

- 86 Wang M, Guan Z, Xie L, et al. The effect of the interplanetary magnetic field clock angle and the latitude location of the intense crustal magnetic field on the ion escape at Mars: An MHD simulation study. *J Geophys Res-Space Phys*, 2024, 129(8): e2024JA032806
- 87 Carr M H. Mars: A water-rich planet? *Icarus*, 1986, 68(2): 187-216
- 88 McKay C P, Stoker C R. The early environment and its evolution on Mars: Implication for life. *Rev Geophys*, 1989, 27(2): 189-214
- 89 McKay C P. The search for life on Mars. *Orig Life Evol Biosph*, 1997, 27(1-3): 263-289
- 90 Jakosky B M, Phillips R J. Mars' volatile and climate history. *Nature*, 2001, 412(6843): 237-244
- 91 Sakata R, Seki K, Terada N, et al. Effects of an intrinsic magnetic field on ion escape from ancient Mars based on MAESTRO multifluid MHD simulations. *J Geophys Res-Space Phys*, 2024, 129(5): e2023JA032320
- 92 Li L, Zhang Y, Feng Y, et al. Oxygen ion precipitation in the Martian atmosphere and its relation with the crustal magnetic fields. *J Geophys Res-Space Phys*, 2011, 116(A8)
- 93 Ramstad R, Barabash S, Futaana Y, et al. Effects of the crustal magnetic fields on the Martian atmospheric ion escape rate. *Geophys Res Lett*, 2016, 43(20): 10574-10580
- 94 Gunell H, Maggiolo R, Nilsson H, et al. Why an intrinsic magnetic field does not protect a planet against atmospheric escape. *Astron Astrophys*, 2018, 614: L3
- 95 Egan H, Jarvinen R, Ma Y, et al. Planetary magnetic field control of ion escape from weakly magnetized planets. *Mon Not R Astron Soc*, 2019, 488(2): 2108-2120
- 96 Wei Y, Fraenz M, Dubinin E, et al. Enhanced atmospheric oxygen outflow on Earth and Mars driven by a corotating interaction region. *J Geophys Res-Space Phys*, 2012, 117(A3)
- 97 Lammer H, Selsis F, Ribas I, et al. Atmospheric loss of exoplanets resulting from stellar X-ray and extreme-ultraviolet heating. *Astrophys J Lett*, 2003, 598(2): L121-L124
- 98 Murray-Clay R A, Chiang E I, Murray N. Atmospheric escape from hot Jupiters. *Astrophys J*, 2009, 693(1): 23-42
- 99 Airapetian V S, Gloer A, Khazanov G V, et al. How hospitable are space weather affected habitable zones? The role of ion escape. *Astrophys J Lett*, 2017, 836(1): L3
- 100 Dubinin E, Fraenz M, Woch J, et al. Ionospheric storms on Mars: Impact of the corotating interaction region. *Geophys Res Lett*, 2009, 36(1)

- 101 Yu B, Chi Y, Owens M, et al. Tianwen-1 and MAVEN observations of the response of Mars to an interplanetary coronal mass ejection. *Astrophys J*, 2023, 953(1): 105
- 102 Hazra G, Vidotto A A, Carolan S, et al. Magnetic interaction of stellar coronal mass ejections with close-in exoplanets: implication on planetary mass-loss and Ly α transits. *Mon Not R Astron Soc*, 2025, 536(2): 1089-1103
- 103 Zhang Q, Barabash S, Holmstrom M, et al. Mars's induced magnetosphere can degenerate. *Nature*, 2024, 634(8032): 45-47
- 104 Schwenn R. Space weather: The solar perspective. *Living Rev Sol Phys*, 2006, 3(1): 1-72
- 105 Bothmer V, Daglis I A, eds. Space weather: physics and effects. Berlin: Springer, 2007
- 106 Wiegmann T, Thalmann J K, Solanki S K. The magnetic field in the solar atmosphere. *Astron Astrophys Rev*, 2014, 22(1): 78
- 107 Bellot Rubio L, Orozco Suárez D. Quiet Sun magnetic fields: an observational view. *Living Rev Sol Phys*, 2019, 16(1): 1
- 108 Wiegmann T, Petrie G J, Riley P. Coronal magnetic field models. *Space Sci Rev*, 2017, 210(1-4): 249-274
- 109 Yang Z, Bethge C, Tian H, et al. Global maps of the magnetic field in the solar corona. *Science*, 2020, 369(6504): 694-697
- 110 Lanzerotti L J. Space weather effects on technologies. In: Song P, Singer H J, Siscoe G L, eds. *Space Weather*. Geophys Monogr Ser, Vol 125. Washington DC: AGU, 2001. 11—22
- 111 Baker D N. How to cope with space weather. *Science*, 2002, 297(5586): 1486—1487
- 112 Hapgood M A. Towards a scientific understanding of the risk from extreme space weather. *Adv Space Res*, 2011, 47(12): 2059—2072
- 113 Carrington R C. Description of a singular appearance seen in the Sun on September 1, 1859. *Mon Not R Astron Soc*, 1859, 20: 13—15
- 114 Hodgson R. On a curious appearance seen in the Sun. *Mon Not R Astron Soc*, 1859, 20: 15—16
- 115 Tsurutani B T, Gonzalez W D, Lakhina G S, et al. The extreme magnetic storm of 1—2 September 1859. *J Geophys Res Space Phys*, 2003, 108(A7)
- 116 Cliver E W, Svalgaard L. The 1859 solar-terrestrial disturbance and the current limits of extreme space weather activity. *Sol Phys*, 2004, 224(1): 407—422

- 117 Boteler D H. The super storms of August/September 1859 and their effects on the telegraph system. *Adv Space Res*, 2006, 38(2): 159—172
- 118 Cliver E W, Dietrich W F. The 1859 space weather event revisited: limits of extreme activity. *J Space Weather Space Clim*, 2013, 3: A31
- 119 Muller C. The Carrington solar flares of 1859: consequences on life. *Orig Life Evol Biosph*, 2014, 44(3): 185-195
- 120 Elvidge S, Themens D R. The probability of the May 2024 geomagnetic superstorm. *Space Weather*, 2025, 23(1): e2024SW004113
- 121 Gopalswamy N, Barbieri L, Cliver E W, et al. Introduction to violent Sun-Earth connection events of October-November 2003. *J Geophys Res-Space Phys*, 2005, 110(A9)
- 122 Gonzalez W D, Echer E. A study on the peak Dst and peak negative Bz relationship during intense geomagnetic storms. *Geophys Res Lett*, 2005, 32(18)
- 123 Shen C, Chi Y, Xu M, et al. Origin of extremely intense southward component of magnetic field (Bs) in ICMEs. *Front Phys*, 2021, 9: 762488
- 124 Shen C, Chi Y, Wang Y, et al. Statistical comparison of the ICME's geoeffectiveness of different types and different solar phases from 1995 to 2014. *J Geophys Res-Space Phys*, 2017, 122(6): 5931-5948
- 125 Manchester W B IV, Kilpua E K J, Liu Y D, et al. The physical processes of CME/ICME evolution. *Space Sci Rev*, 2017, 212(3-4): 1159-1219
- 126 Wang Y M, Ye P Z, Wang S. Multiple magnetic clouds: Several examples during March-April 2001. *J Geophys Res-Space Phys*, 2003, 108(A10)
- 127 Chi Y, Shen C, Zhang Z, et al. Direct observations of a shock traversing preceding two coronal mass ejections: Insights from Solar Orbiter, Wind, and STEREO observations. *Astrophys J Lett*, 2024, 975(2): L25
- 128 Shen C, Xu M, Wang Y, et al. Why the shock-ICME complex structure is important: Learning from the early 2017 September CMEs. *Astrophys J*, 2018, 861(1): 28
- 129 Xu M, Shen C, Wang Y, et al. Importance of shock compression in enhancing ICME's geoeffectiveness. *Astrophys J Lett*, 2019, 884(2): L30
- 130 Chi Y, Scott C, Shen C, et al. Using the "ghost front" to predict the arrival time and speed of CMEs at Venus and Earth. *Astrophys J*, 2020, 899(2): 143

- 131 Zhang Z, Shen C, Chi Y, et al. Studying the evolution of ICMEs in the heliosphere through multipoint observations. *J Geophys Res-Space Phys*, 2025, 130(7): e2025JA034094
- 132 Aschenbrenner H. Eine Anordnung zur Registrierung rauscher magnetischer Storungen. *Hochfrequenztech Elektroakust*, 1936, 47(6): 177-181
- 133 Musmann G, ed. Fluxgate magnetometers for space research. Norderstedt: BoD – Books on Demand, 2010
- 134 Hall E H. On a new action of the magnet on electric currents. *Am J Math*, 1879, 2(3): 287-292
- 135 Klitzing K v, Dorda G, Pepper M. New method for high-accuracy determination of the fine-structure constant based on quantized Hall resistance. *Phys Rev Lett*, 1980, 45(6): 494-497
- 136 Regoli L H, Moldwin M B, Pellioni M, et al. Investigation of a low-cost magneto-inductive magnetometer for space science applications. *Geosci Instrum Method Data Syst*, 2018, 7(1): 129-142
- 137 Kim H, Witten D, Madey J, et al. Citizen science: Development of a low-cost magnetometer system for a coordinated space weather monitoring. *HardwareX*, 2024, 20: e00580
- 138 Mitchell M W, Palacios Alvarez S. Colloquium: Quantum limits to the energy resolution of magnetic field sensors. *Rev Mod Phys*, 2020, 92(2): 021001
- 139 Jaklevic R C, Lambe J, Silver A H, et al. Quantum interference effects in Josephson tunneling. *Phys Rev Lett*, 1964, 12(7): 159-160
- 140 Clarke J. Principles and applications of SQUIDs. *Proc IEEE*, 1989, 77(8): 1208-1223
- 141 Dehmelt H G. Modulation of a light beam by precessing absorbing atoms. *Phys Rev*, 1957, 105(6): 1924-1925
- 142 Budker D, Romalis M. Optical magnetometry. *Nat Phys*, 2007, 3(4): 227-234
- 143 Acuña M H. Space-based magnetometers. *Rev Sci Instrum*, 2002, 73(11): 3717-3736
- 144 Robbes D. Highly sensitive magnetometers—a review. *Sens Actuator A-Phys*, 2006, 129(1-2): 86-93
- 145 Díaz-Michelena M. Small magnetic sensors for space applications. *Sensors*, 2009, 9(4): 2271-2288
- 146 Grosz A, Haji-Sheikh M J, Mukhopadhyay S C, eds. High sensitivity magnetometers. Switzerland: Springer, 2017

- 147 Ripka P, ed. Magnetic sensors and magnetometers. 2nd ed. Norwood: Artech House, 2021
- 148 Ruddock K A. Optically pumped rubidium vapor magnetometer for space experiments. In: van de Hulst H C, de Jager C, Moore A F, eds. Space Research II: Proceedings of the Second International Space Science Symposium. Amsterdam: North-Holland, 1961. 692
- 149 Franken P A, Colegrove F D. Alignment of metastable helium atoms by unpolarized resonance radiation. Phys Rev Lett, 1958, 1(9): 316-318
- 150 Gentile T R, Nacher P J, Saam B, et al. Optically polarized ^3He . Rev Mod Phys, 2017, 89(4): 045004
- 151 Patton B, Brown A, Slocum R, et al. Space magnetometry. In: Budker D, Jackson Kimball D F, eds. Optical Magnetometry. Cambridge: Cambridge University Press, 2013. 285
- 152 Kitching J. Chip-scale atomic devices. Appl Phys Rev, 2018, 5(3): 031302
- 153 Maze J R, Stanwix P L, Hodges J S, et al. Nanoscale magnetic sensing with an individual electronic spin in diamond. Nature, 2008, 455(7213): 644-647
- 154 Pan Y X, Li J H. On the biospheric effects of geomagnetic reversals. Natl Sci Rev, 2023, 10(6): nwad070
- 155 Ebihara Y. Simulation study of near-Earth space disturbances: 1. magnetic storms. Prog Earth Planet Sci, 2019, 6(1): 16
- 156 Hoffmann A P, Moldwin M B. Separation of spacecraft noise from geomagnetic field observations through density-based cluster analysis and compressive sensing. J Geophys Res-Space Phys, 2022, 127(9): e2022JA030757
- 157 Matsushima M, Tsunakawa H, Iijima Y, et al. Magnetic cleanliness program under control of electromagnetic compatibility for the SELENE (Kaguya) spacecraft. Space Sci Rev, 2010, 154(1-4): 253-264
- 158 Russell C T. Solar wind and interplanetary magnetic field: a tutorial. In: Song P, Singer H J, Siscoe G L, eds. Space Weather. Geophys Monogr Ser, Vol 125. Washington DC: AGU, 2001. 73-90
- 159 Liu D, Rong Z, Gao J, et al. Statistical properties of solar wind upstream of Mars: MAVEN observations. Astrophys J, 2021, 911(2): 113
- 160 Wang Y, Zhang T, Wang G, et al. The Mars orbiter magnetometer of Tianwen-1: in-flight performance and first science results. Earth Planet Phys, 2023, 7(2): 216–228

- 161 Zou Z, Wang Y, Zhang T, et al. In-flight calibration of the magnetometer on the Mars orbiter of Tianwen-1. *Sci China Technol Sci*, 2023, 66(8): 2396-2405
- 162 Wang G, Xiao S, Wu M, et al. Calibration of the zero offset of the fluxgate magnetometer on board the Tianwen-1 orbiter in the Martian magnetosheath. *J Geophys Res-Space Phys*, 2024, 129(1): e2023JA031757
- 163 Burlaga L F, Ness N F, Berdichevsky D B, et al. Magnetic field and particle measurements made by Voyager 2 at and near the heliopause[J]. *Nat Astron*, 2019, 3(11): 1007-1012
- 164 Korth H, Strohbehn K, Tejada F, et al. Miniature atomic scalar magnetometer for space based on the rubidium isotope ^{87}Rb . *J Geophys Res-Space Phys*, 2016, 121(8): 7870-7880
- 165 Zhou B, Yang Y, Zhang Y, et al. Magnetic field data processing methods of the China Seismo-Electromagnetic Satellite. *Earth Planet Phys*, 2018, 2(6): 455-461
- 166 Bennett J S, Vyhnalek B E, Greenall H, et al. Precision magnetometers for aerospace applications: A review. *Sensors*, 2021, 21(16): 5568
- 167 Luvsandamdin E, Mura G, Wicht A, et al. Hybrid-integrated ECDL for precision Rubidium spectroscopy in space. In: *Proceedings of 2011 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe and 12th European Quantum Electronics Conference (CLEO EUROPE/EQEC)*. Munich: IEEE, 2011. 1
- 168 Luvsandamdin E, Kürbis C, Sahm A, et al. Narrow linewidth, micro-integrated extended cavity diode laser for precision potassium atom interferometry in micro-gravity environment. In: *Proceedings of The European Conference on Lasers and Electro-Optics*. Munich: Optica Publishing Group, 2013. CB_P_1
- 169 Arar B, Bawamia A, Kürbis C, et al. Micro-integrated narrow and ultra-narrow linewidth diode lasers for QIST applications. In: *Proceedings of Quantum 2.0*. Washington DC: Optica Publishing Group, 2020. QTu8B-2
- 170 Buffington B. Trajectory design concept for the proposed Europa Clipper mission. In: *Proceedings of AIAA/AAS Astrodynamics Specialist Conference*. San Diego: AIAA/AAS, 2014
- 171 Dulk G A. Radio emission from the sun and stars. *Annu Rev Astron Astrophys*, 1985, 23: 169-224
- 172 Priest E. *Magnetohydrodynamics of the Sun*. Cambridge: Cambridge University Press, 2014

缺少对应的英文标题, 作者, 单位, 以及摘要和关键词, 具体可参见期刊已出版文章的格式, 谢谢

Planetary Magnetic Fields and Magnetometer Measurements

WANG Yuming^{1,2}, SHENG Dong¹, CHI Yutian^{2,3}, LIU Kai^{1,2}, HAO Chuanpeng^{2,3} & ZHAI Chenxi¹

1. School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei, 230026, Anhui, China.

2. National Key Laboratory of Deep Space Exploration, Hefei, 230000, Anhui, China.

3. Institute of Deep Space Sciences, Deep Space Exploration Laboratory, Hefei, 230088, Anhui, China.

Planetary magnetic fields are key physical parameters for characterizing the internal structure, dynamical processes, and space environments. The exploration of extraterrestrial magnetic fields began in the early twentieth century with observations of the Zeeman effect in sunspots, while the subsequent development of in-situ measurements greatly expanded our understanding of magnetic field systems throughout the solar system. Earth possesses a strong intrinsic dipolar magnetic field, and its magnetosphere is connected to the interplanetary magnetic field, forming an important channel for the transport of mass and energy. The magnetic fields of solar system planets exhibit remarkable diversity, ranging from Mercury's offset dipole field and Jupiter's extremely strong magnetic field to the highly tilted magnetic axes of Uranus and Neptune. Such diversity reflects the different formation and evolutionary pathways of planets. This paper systematically discusses the scientific significance of planetary magnetic field exploration from four perspectives: understanding the origin and evolution of planetary magnetic fields, searching for potential subsurface oceans, investigating ion escape and atmospheric evolution processes, and predicting space weather phenomena and their effects. On this basis, the paper reviews the mainstream techniques used for in-situ space magnetic field measurements, highlights technological innovations developed to mitigate spacecraft-

generated magnetic interference, and discusses the urgent need for next-generation high-precision weak-field measurement technologies, such as optically pumped magnetometers, for future missions including heliospheric boundary exploration. Finally, future development directions are discussed. In particular, considering the intrinsic limitations of in-situ measurements in spatial and temporal coverage, we propose that the development of high-resolution remote sensing techniques for planetary magnetic fields—such as applying the Zeeman effect to observations of Jupiter—may become an important future direction. Such approaches could enable global characterization of the three-dimensional structure and dynamic evolution of planetary magnetic fields, thereby promoting major advances in planetary science.

Planetary magnetic fields; space magnetic field measurements; weak magnetic field measurement techniques