

地球磁场超导起源说

刘正荣

ZJL@CS.Stanford.EDU

此内容由人工智能(AI)辅助翻译, 若未达意, 请查阅[原文](#)

摘要

地球的磁场能够有效屏蔽有害的宇宙射线, 为生命提供关键保护, 但其起源仍是未解之谜。虽然目前普遍采用**地核发电机理论(geodynamo theory)**来解释地球磁场的产生, 但该理论在解释其他行星磁场, 尤其是那些内核早已冷却的行星时, 存在明显局限。本研究基于对**超导现象**的新认知, 提出了一种新的假说, 试图建立一个更具普适性的行星磁场起源机制。根据**低温与高温超导统一理论**, 超导态是一种普通的物质形态, 在高压环境下可能广泛存在。在地球深处, 由于极高的压力, 超导材料很可能分布在地幔以下。受地球自转影响, 外核中的超导体可能向赤道方向聚集, 并最终在赤道下方形成一个环状结构。这一超导**环带**为电流提供了无电阻的通道。在太阳磁场的诱导下, 该结构可能通过类似**迈斯纳效应(Meissner effect)**的机制, 产生地球的磁场。环带中持续流动的电流将形成类似磁偶极子的磁场。由于超导体没有电阻, 这些电流可以持续环绕超导带流动, 从而维持一个稳定的磁场。然而, 外核中的热对流可能扰动这一环带, 造成**磁极漂移**, 甚至在某些情况下冲断超导环带, 从而导致地磁场短期异常或消失。当超导材料重新聚集并构成新的闭环时, 磁场会重新建立; 而其磁极方向则可能因地球在不同季节中南北极相对于太阳的倾斜方向不同而造成**地磁反转**。此外, 超导体也可能解释其他行星磁场的来源。随着行星冷却, 部分超导体被封存于其内部。尽管这些行星后来可能经历了剧烈的天体事件, 包括轴向倾斜和轨道变化, 其内部的超导结构仍可能幸存。这一机制有望解释天王星和海王星磁场中, 磁偶极方向与自转轴之间存在显著夹角和偏移的现象。

前言

地球的磁场, 又称地磁场, 从地球内部延伸至高空, 穿越电离层, 向外扩展数万公里, 形成磁层(magnetosphere)。地磁场在地表的强度范围约为0.25至0.65高斯(G)^[1]。尽管随时间会有缓慢波动, 但其整体强度相对稳定。然而, 在过去两个世纪中, 地磁场强度以每百年约6.3%的速率逐渐减弱。

若无地磁场的保护, 来自太阳风和宇宙射线的高能带电粒子将直接到达地球表面, 对生命构成严重威胁。这些粒子在穿越大气或人体组织时, 可能与原子核碰撞, 引发核反应, 从而造成基因损伤。幸运的是, 带电粒子在通过磁场时会受到洛伦兹力的作用, 轨迹发生偏转, 沿磁力线螺旋运动, 最终聚集在地磁北极或南极附近, 有效减弱了其对地表生命的危害。

在极地区域, 大量带电粒子汇聚于高层大气中, 增加了正负电荷之间的相互作用及与气体分子的碰撞概率。此类粒子间的能量交换产生了我们熟知的自然奇观——极光。

地球磁场可近似为一个位于地球中心、与地轴呈约11度倾角的磁偶极子。尽管地磁极大致接近地理极, 但其位置在地质时间尺度上会缓慢变化, 这种现象称为**磁极漂移(polar wandering)**。

地球的磁极偶尔会互换位置, 这一现象被称为**地磁反转(magnetic reversal)**。在这一过程中, 地球磁场在正常极性(方向与现在相同)和反向极性(方向相反)之间交替变化。

地磁反转的历史被清晰地保存在海底地壳中，如图1所示^[2]。当新的海洋地壳在洋中脊生成并向两侧扩展时，冷却岩石中会“冻结”当时地磁场的方向。类似于录音带的工作原理，海底记录了地球磁场变化的完整历史。通过研究古地磁学，科学家得以重建这一变化过程^[3]。

地磁反转发生的时间间隔统计上是随机的，有时一次反转可能仅持续约200年。最近一次短暂的反转发生在大约4.1万年前，持续了约440年。在过去8300万年中，地球共发生了183次地磁反转^[4-6]。

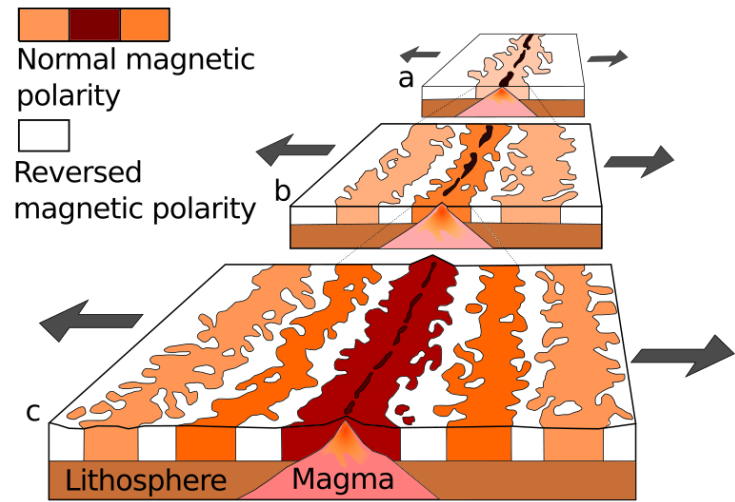


图1: 洋中脊扩张过程中形成的海底岩层中记录的古地磁反转条带。图中(a)、(b)、(c)展示了从古至今不同时期的海底磁性条纹变化。[图源: 维基百科。](#)

许多其他行星及其部分卫星也被观测到存在类似偶极子的磁场，但这些磁场的起源仍不清楚。

地核发电机面临的挑战

地核发电机理论是解释地磁场的广泛认可的理论之一^[7-8]。该理论最早由约瑟夫·拉莫尔 (Joseph Larmor) 于1919年提出，用来解释太阳黑子的形成。随后，理论不断完善，融入了磁流体力学 (MHD) 方程。磁流体力学由汉内斯·阿尔文 (Hannes Alfvén) 开创^[9]，主要解释诸如太阳等离子体中磁场的产生。相比地球外核的对流，太阳的等离子体在速度和黏性上表现出更强的动态特性。

地核发电机机制认为，地球磁场是在由熔融铁组成的液态外核中，通过对流驱动的热交换反馈环不断诱导并维持的。地球自转产生的科里奥利力使这些反馈环扭曲成沿自转轴排列的螺旋线圈，如图2所示^[10]。地磁场主要由外核中的电流产生。当导电流体穿过现有磁场时，依据磁流体力学方程，会感应出电流并产生附加磁场^[9,11]。新产生的磁场强化原有磁场，从而形成一个自我维持的地磁发电机。

然而，地核发电机机制在解释行星磁场起源时存在多重难题。首先，该理论无法解释地球历史上多次出现如图1所示的**地磁反转**现象。

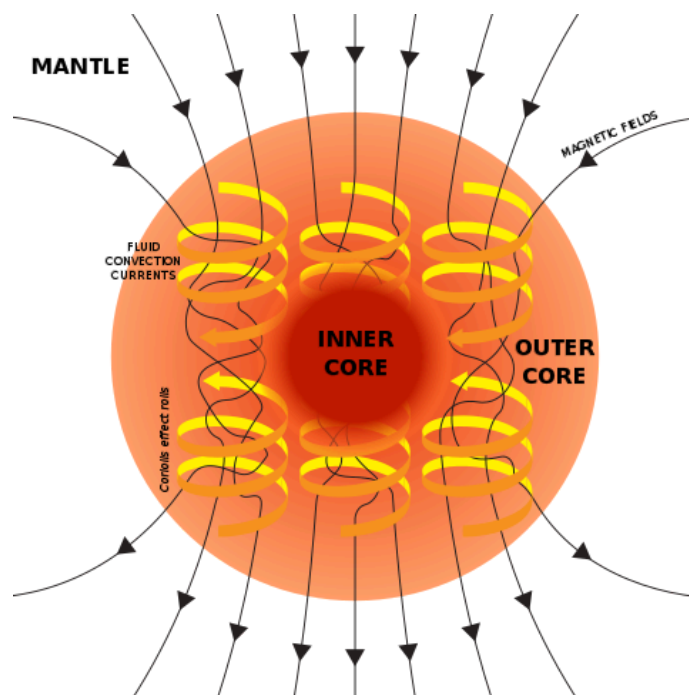


图2:地核发电机制示意图。地球磁场由外核流体受科里奥利力影响形成的螺旋线圈中感应产生^[10]。图源: [维基百科](#)。

其次，地核发电机制无法解释内部已固结的行星磁场，例如水星。水星体积约为地球的14%^[12]，其小尺寸导致核心早已冷却固化。该理论依赖于液态外核的流动，因此不适用于水星。同时，水星自转缓慢，完成一次自转需59天，科里奥利力极弱，进一步限制了地核发电机制的适用性。尽管如此，水星依然保持活跃磁场。

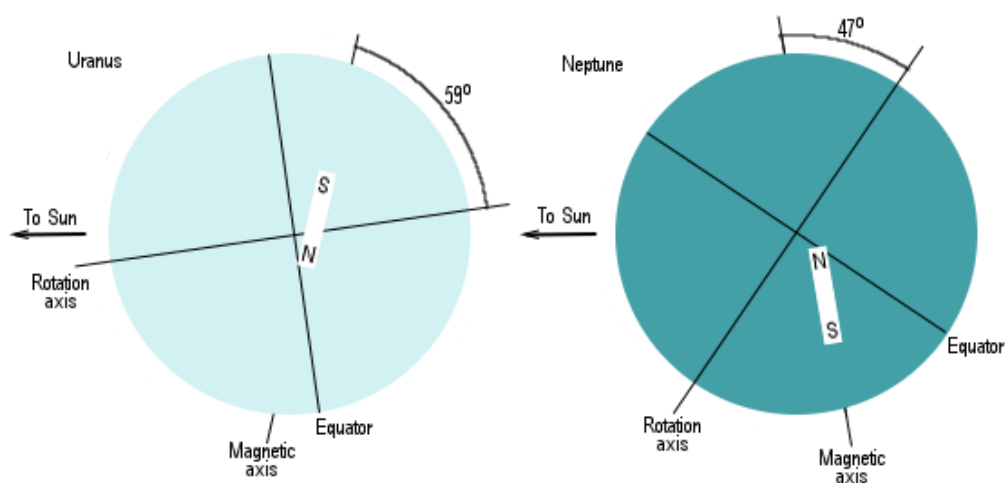


图3:旅行者2号探测器测得的天王星与海王星磁场偏离情况^[13]。

最后，地核发电机制难以解释磁偶极子与自转轴显著倾斜的行星磁场。NASA数据显示，天王星和海王星的磁偶极相对于自转轴分别倾斜59度和47度，如图3所示^[13]。由于地核发电机制中的科里奥利力由行星自转产生，理论上应使磁场方向与自转轴接近一致，因此难以解释这类大角度偏离。

超导地磁场起源

基于近年来对超导现象的新认识, 本文提出一个新的假说, 认为, 超导体在行星磁场的起源起着关键作用。《[低温与高温超导统一理论](#)》^[14]系统解释了超导现象, 并将超导体与普通导体的电阻机制纳入统一框架。该理论认为, 超导是物质在高压环境下的一种常见状态。如图4的物质相变图所示, 超导现象多见于高压低温条件。早期超导体主要在低温下发现的, 而近期研究则发现了更多在高压环境下的高温超导体^[15-16]。地球表面超导体稀少, 主要因其低压高温环境不利于超导态的形成。

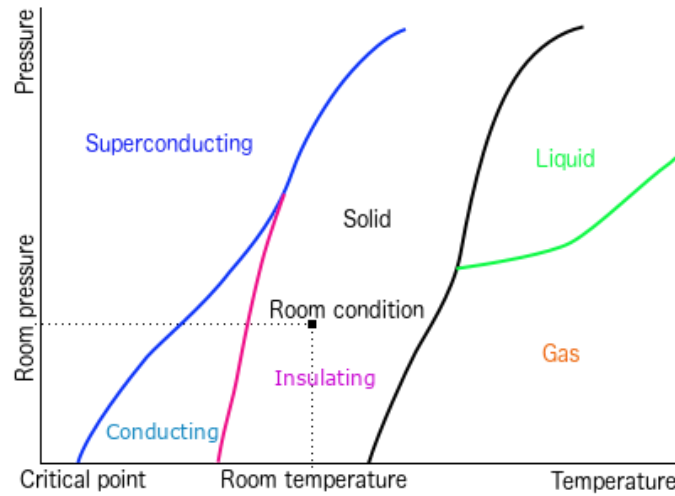


图4: 物质状态示意图显示超导为一种常见状态, 在高压条件下尤为普遍^[14]。

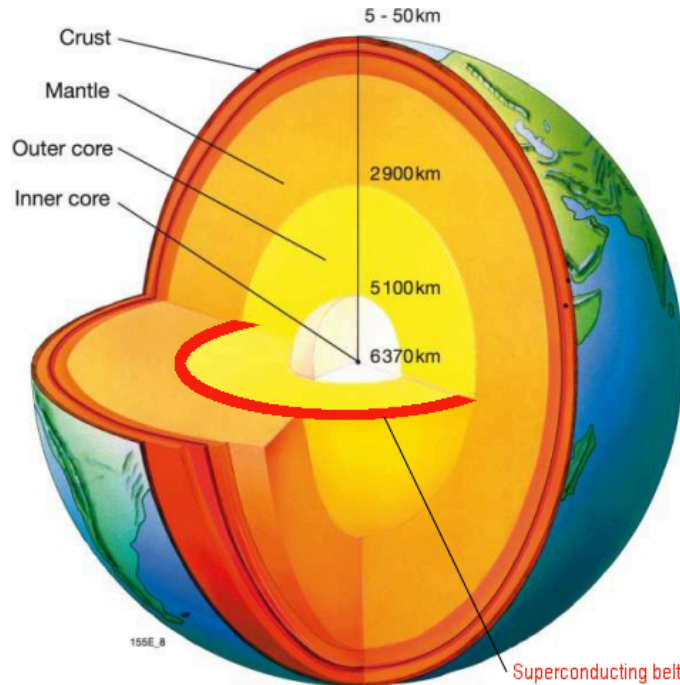


图5: 受地球自转影响, 超导体在外核赤道区域聚集并形成超导环带。图示改编自 [Weebly Geology](#) 来源。

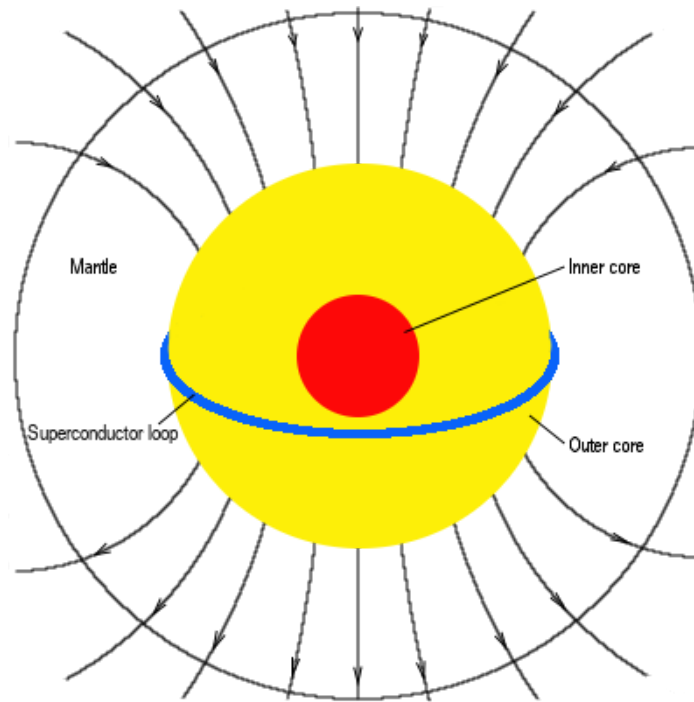


图6:地磁场由沿外核赤道超导环带循环的稳定电流维持。

下地幔与外核之间的压力范围为136至360吉帕(GPa)^[17-19]。根据高低超导统一理论,这样的高压条件下,地幔下方很可能存在超导体。这些超导材料可能漂浮于外核表面,并在地球自转作用下逐渐向赤道区域聚集,最终在外核赤道处形成一个闭合的超导环带,如图5与6所示。由于超导体不具电阻,电流可在环带中持续循环,从而稳定并维持地磁场。

行星磁场起源

我们认为,行星磁场可能由超导体在太阳磁场中产生的类似迈斯纳效应所感应形成。迈斯纳效应指超导体在转变为超导状态时,会排斥外部磁场的现象^[20]。根据法拉第电磁感应定律^[21],感应磁场的产生通常需要磁通量的变化。然而,迈斯纳效应发生在超导体转变过程中,即使磁通量保持不变,超导体仍会排斥磁场,表现出对磁场的感应。

迈斯纳效应的机制在超导统一理论中得以阐明^[14]。该理论指出,超导体内电子的自然流动会产生电流。这些电流通常形成的磁场相互抵消,因此难以观测到。然而,当外部磁场存在时,电子会受到洛伦兹力的作用^[22-24],使其在磁场方向上被偏转并顺时针循环。这些电流会产生一个磁场,抵消超导体内部的外加磁场,同时增强超导体外部的磁场。最终效果就表现为内部磁场被排斥出超导体之外。

在外核的超导体尚未在赤道附近形成环带之前,每个超导体片段通过迈斯纳效应局部排斥太阳磁场,增强了超导体周围的磁力线密度,使地核内部的磁通量密度高于太阳的初始磁场。但这种磁场较不稳定,容易受地球轨道和太阳磁场变化的影响。

当超导体形成闭合环带后,环带内的磁场成为一个磁偶极子。磁偶极场的任何变化都会在超导环带中感应出电流,抵消这些变化,使磁场稳定在超导环带形成时的强度。此后,超导环带中的电流有效抵御地球轨道和太阳磁场的变化,维持了地磁场的稳定,如图6和图7所示。

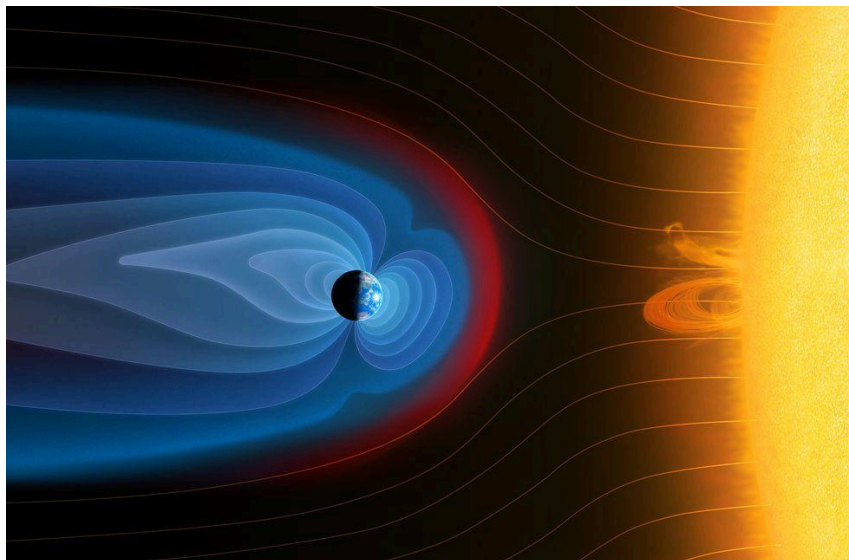


图7: 地磁场在太阳磁场中感应形成, 并由超导环带中的电流持续维持。[图源: Popular Mechanics。](#)

磁极漂移与地磁反转

超导环带并非完美沿赤道均匀分布, 而只是在其附近。该环带维持的有效磁偶极子因此会略微偏离地球自转轴, 解释了地磁偶极子与自转轴不完全重合的现象。外核的对流运动不断扰动环带, 持续改变其位置, 从而影响磁偶极子的方向, 导致磁极漂移现象。

在某些情况下, 外核中的强烈对流会破坏超导环带的连续性, 导致环带电流暂时中断。为维持既有的偶极磁场, 电流可能会尝试经由铁核中的普通导体绕过断裂点, 但由于电阻存在, 这些电流很快衰减。若超导环带无法及时修复, 并重新闭合, 环带电流最终将消失, 进而导致全球地磁场消退。这种磁场紊乱和中断的时期, 被称为古地磁不连续期。

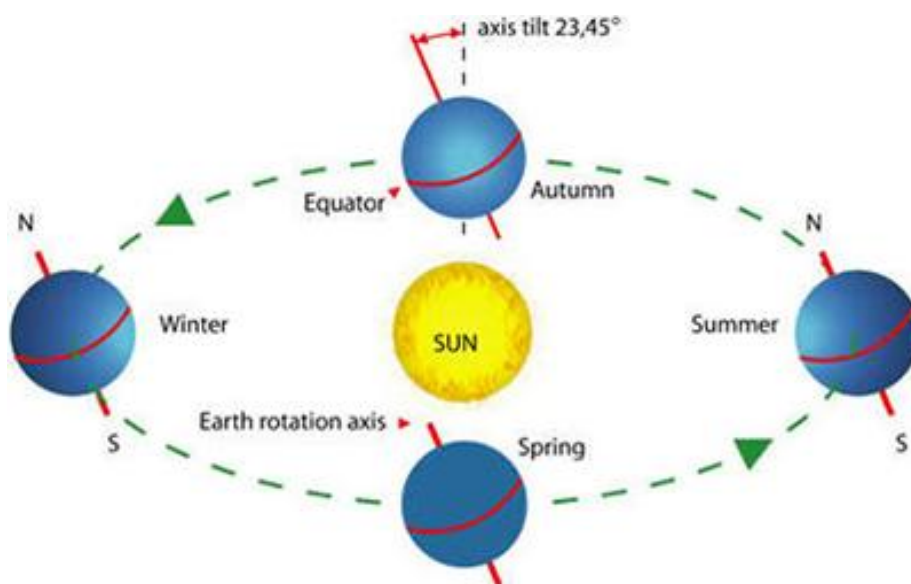


图8: 地磁场反转可能与地球轨道倾角在初始阶段的季节性变化有关。[图源: Utah Education Network。](#)

最终，地球自转将使超导体重新排列并连接成新的闭合环带，地磁场也随之恢复。然而，新形成的磁场在强度和极性上可能与原先不同。由于地球自转轴相对于轨道平面存在倾角，北极在一年中的不同时间会朝向或背离太阳，如图8所示。

因此，太阳磁场相对于超导环带的方向随季节而变化。这一季节性变化可能导致重新恢复的地磁场极性方向不同于破坏前的方向，导致地磁反转。新的磁场强度也可能不同，取决于磁场恢复时的太阳感应磁场的强弱。

行星磁场

类似的偶极磁场不仅存在于地球，也出现在许多其他行星及其部分卫星上。然而，地核发电机机制难以解释天王星和海王星的磁场特征。两者的有效磁偶极中心分别偏离其行星半径的33%和55%，如图3所示^[13,25]。天王星的磁偶极从中心偏向南半球，偏移距离达行星半径的三分之一，海王星的偏移则更为明显。此外，天王星和海王星的磁偶极轴分别相对于其自转轴倾斜了59度和47度^[13]。

天王星和海王星体积较大，拥有同心的内部结构^[26-29]。若其磁场由对流电流驱动，磁偶极应该类似地球磁场与自转轴基本一致。但两者磁偶极的显著偏移和倾斜，给基于地核发电机机制的解释带来了难题。

然而，超导磁场起源理论却很容易解释这些现象。天王星和海王星的磁场可能最初由超导起源与自转轴基本一致。随着行星逐渐冷却，内部的超导体逐步固化。由于它们远离木星、土星等大型保护行星，更易受到小行星或彗星的撞击。这些撞击可能改变了行星的自转、轨道，甚至内部结构，导致磁偶极偏离原先方向，进而解释了天王星和海王星磁场相对于自转轴的显著倾斜和偏移。

类似的解释也适用于水星。它的磁场可能与其他行星的形成过程相似。随着水星冷却，超导环带在其内部逐渐固化并得以保存。作为内行星，水星受外层行星保护，相对较少受到天体撞击的影响。

结论

行星磁场普遍存在，但传统地核发电机机制难以全面解释其起源。超导起源假说为行星磁场提供了新的视角，更有效地解释了观测现象。未来持续的研究和探索，将有助于验证和完善该假说，深化我们对行星磁性的理解。

版本更新

- [06/28/2019: 本文在斯坦福初始发布](#)
- [11/02/2025: 在Zenodo上发表](#)
- [12/18/2025: 增加相关文章摘要连接](#)

相关文章摘要链接

- <https://cs.stanford.edu/people/zjl/abstractc.html>, [PDF](#)

- <https://sites.google.com/view/zjlc/>, PDF
- <https://xenon.stanford.edu/~zjl/abstractc.html>, PDF
- <https://doi.org/10.5281/zenodo.17972005>, PDF

相关文献

- [热力学中的错误概念 \(PDF: DOI\) \(中文: DOI\)](#)
- [克鲁克斯辐射计旋转的驱动机制 \(PDF: DOI\) \(中文: DOI\)](#)
- [布朗运动的原动力 \(PDF: DOI\) \(中文: DOI\)](#)
- [温度是分子平均动能的标志吗? \(PDF: DOI\) \(中文: DOI\)](#)
- [绝对零度的本质 \(PDF: DOI\) \(中文: DOI\)](#)
- [能量转换三角 \(PDF: DOI\) \(中文: DOI\)](#)
- [热膨胀是由于粒子振动引起的吗? \(PDF: DOI\) \(中文: DOI\)](#)
- [超流体不是流体 \(PDF: DOI\) \(中文: DOI\)](#)
- [为什么相变温度保持恒定 \(PDF: DOI\) \(中文: DOI\)](#)
- [摩擦为何会产生热量? \(PDF: DOI\) \(中文: DOI\)](#)
- [简明熵概念 \(PDF: DOI\) \(中文: DOI\)](#)
- [熵可以减少 \(PDF: DOI\) \(中文: DOI\)](#)
- [回归原理 \(PDF: DOI\) \(中文: DOI\)](#)
- [金属中是否存在自由电子海? \(PDF: DOI\) \(中文: DOI\)](#)
- [电子通道: 导体超导统一论 \(PDF: DOI\) \(中文: DOI\)](#)
- [低温和高温超导统一理论 \(PDF: DOI\) \(中文: DOI\)](#)
- [LK-99的局限和意义 \(PDF: DOI\) \(中文: DOI\)](#)
- [地球磁场超导起源说 \(PDF: DOI\) \(中文: DOI\)](#)
- [关于质量的本质问题 \(PDF: DOI\) \(中文: DOI\)](#)
- [从万有引力定律到广义相对论的演化 \(PDF: DOI\) \(中文: DOI\)](#)
- [爱因斯坦质能方程的最简单推导 \(PDF: DOI\) \(中文: DOI\)](#)
- [如何理解相对论 \(PDF: DOI\) \(中文: DOI\)](#)
- [数学并非科学 \(PDF: DOI\) \(中文: DOI\)](#)
- [潮汐能并非可再生能源 \(PDF: DOI\) \(中文: DOI\)](#)
- [AI 知识污染 \(PDF\) \(中文\)](#)
- [DeepSeek pk ChatGPT \(PDF\) \(中文\)](#)

参考文献

1. Finlay, C. C.; et al. (2010). "[International Geomagnetic Reference Field: the eleventh generation](#)". Geophysical Journal International. 183 (3).
2. USGS, (1999). "[Magnetic striping and polar reversals](#)", United States Geological Survey.
3. McElhinney, T.N.W.; Senanayake, W.E. (1980). "Paleomagnetic Evidence for the Existence of the Geomagnetic Field 3.5 Ga Ago". Journal of Geophysical Research. **85** (B7): 3523. doi:[10.1029/JB085iB07p03523](#).

4. Sagnotti L.; et al. (2014). "Extremely rapid directional change during Matuyama-Brunhes geomagnetic polarity reversal". *Geophys. J. Int.* **199** (2): 1110–1124. doi:[10.1093/gji/ggu287](https://doi.org/10.1093/gji/ggu287).
5. Clement, B.M. (2004). "[Dependence of the duration of geomagnetic polarity reversals on site latitude](#)". *Nature*. **428** (6983): 637–640. doi:[10.1038/nature02459](https://doi.org/10.1038/nature02459).
6. Glatzmaier, G.A.; Coe, R.S. (2015). "[Magnetic Polarity Reversals in the Core](#)", *Treatise on Geophysics*, Elsevier, pp. 279–295, doi:[10.1016/b978-0-444-53802-4.00146-9](https://doi.org/10.1016/b978-0-444-53802-4.00146-9).
7. Larmor, J. (1919). "Possible rotational origin of magnetic fields of sun and earth". *Electrical Review*. **85**: 412ff. Reprinted in *Engineering*, vol. 108, pages 461ff.
8. Buffett, B.A. (2000). "Earth's Core and the Geodynamo". *Science*. **288** (5473): 2007–2012. doi:[10.1126/science.288.5473.2007](https://doi.org/10.1126/science.288.5473.2007).
9. Alfvén, H. (1942). "Existence of electromagnetic-hydrodynamic waves". *Nature*. **150** (3805): 405–406. doi:[10.1038/150405d0](https://doi.org/10.1038/150405d0).
10. USGS; (2013). "[How does the Earth's core generate a magnetic field?](#)". United States Geological Survey. Archived from the original on 18 January 2015.
11. Glatzmaier, G.A. and Roberts, P.H. (1995). "A three-dimensional self-consistent computer simulation of a geomagnetic field reversal," *Nature*. 377, 203-209.
12. Vočadlo, L.; Stixrude, L. (2011). "[Mercury: its composition, internal structure and magnetic field](#)". UCL Earth Sciences.
13. Nellis, W.J. (2018). "[The Magnetic Fields of Uranus and Neptune](#)".
14. Liu, J.Z. (2019), "[Unified Theory of Low and High-Temperature Superconductivity](#)", Stanford University, doi:[10.5281/zenodo.17507669](https://doi.org/10.5281/zenodo.17507669)
15. Timmer, J. (2011). "[25 years on, the search for higher-temp superconductors continues](#)". *Ars Technica*.
16. Bednorz, J.G.; Müller, K.A. (1986). "Possible high T_c superconductivity in the Ba-La-Cu-O system". *Zeitschrift für Physik B*. **64** (2): 189–193. doi:[10.1007/BF01303701](https://doi.org/10.1007/BF01303701).
17. Zhang, L.; et al. (2014). "Disproportionation of (Mg, Fe)SiO₃ perovskite in Earth's deep lower mantle". *Science*, 23 May 2014: Vol. 344 No. 6186 pp. 877-882 doi: [10.1126/science.1250274](https://doi.org/10.1126/science.1250274)
18. Jordan, T.H. (1979). "[Structural Geology of the Earth's Interior](#)". *Proceedings of the National Academy of Sciences*. **76**(9): 4192–4200. doi:[10.1073/pnas.76.9.4192](https://doi.org/10.1073/pnas.76.9.4192).
19. Alfè D.; et al. (2007): "Temperature and composition of the Earth's core". *Contemporary Physics*, volume 48, issue 2, pages 63–80. doi:[10.1080/00107510701529653](https://doi.org/10.1080/00107510701529653)
20. Hirsch, J.E. (2012). "The origin of the Meissner effect in new and old superconductors". *Physica Scripta*. **85** (3): 035704. arXiv:[1201.0139](https://arxiv.org/abs/1201.0139). doi:[10.1088/0031-8949/85/03/035704](https://doi.org/10.1088/0031-8949/85/03/035704).
21. Faraday, M.; Day, P. (1999). "The philosopher's tree: a selection of Michael Faraday's writings". CRC Press. p. 71.
22. Huray, P.G. (2010). "[Maxwell's Equations](#)". Wiley-IEEE. p. 22.
23. Lorentz, H.A. (1895). "Versuch einer Theorie der elektrischen und optischen Erscheinungen in bewegten Körpern".
24. Chow, T.L. (2006). "[Electromagnetic theory](#)". Sudbury, MA: Jones and Bartlett. p. 395.
25. Hubbard, W.B.; MacFarlane, J.J. (1980). "Structure and Evolution of Uranus and Neptune". *Journal of Geophysical Research*, **85**, 225-234.
26. Williams, D.; David, R. (2005). "[Uranus Fact Sheet](#)". NASA.
27. Jacobson, R.A.; et al. (1992). "The masses of Uranus and its major satellites from Voyager tracking data and Earth-based Uranian satellite data". *The Astronomical Journal*. **103** (6): 2068–2078. doi:[10.1086/116211](https://doi.org/10.1086/116211).
28. Hamilton, C.J. (2001). "[Neptune](#)". *Views of the Solar System*. Retrieved 13 August 2007.
29. Williams, D.R. (2004). "[Neptune Fact Sheet](#)". NASA.