

What causes reversals in Earth's magnetic field?

地磁倒转的原因是什么?

李力刚^{①②}^① 中国科学院上海天文台天文地球动力学研究中心, 上海 200030;^② 中国科学院行星科学重点实验室, 上海 200030

E-mail: llg@shao.ac.cn

2015-11-20 收稿, 2016-03-08 修回, 2016-03-10 接受, 2016-04-15 网络版发表

国家自然科学基金(11173047, 11133004)和中国科学院“十二五”科研信息化专项(XXH12503-02-02-2(06))资助

摘要 地磁倒转是地球演化史上的全球性重大事件. 由于对地球内部物质和运动的认识不足, 目前我们尚不清楚地磁倒转的确切原因. 不过, 相关研究也取得了明显的进展, 现在已经知道地磁场是由地球外核的磁流体发电机过程所产生, 数值模拟和实验已能再现一个与地磁场时空特征相似的磁场, 并从中发现了磁场的自发倒转现象. 由于数值模拟和实验的近似程度远未达到地球的真实情况, 地磁倒转的自发性目前还不能予以确认. 近年来的研究发现, 虽然地磁场起源于地球外核, 但其他圈层的物性参数分布和运动, 如下地幔和地核的电导率分布、地幔对流、板块运动、内核生长等因素都影响或控制着地磁倒转的过程和频率, 这些外部因素是否是引起地磁倒转的原因需要进一步的研究. 本文简要介绍了地磁场的时空特征和形成机制, 评述了地磁倒转的研究进展, 并指出在深入探知地球内部信息的基础上, 将地球各圈层的相互作用等因素进行统一考虑, 构建综合性模型, 是未来地磁场及其倒转机制研究的方向.

关键词 地磁倒转, 地球发电机, 磁流体动力学, 地幔对流, 板块运动

自20世纪初法国和日本地球物理学家Brunhes^[1](伯纳德·布容)和Matuyama^[2](松山基范)发现并证实了地磁倒转现象以来, 随着古地磁和空间地磁探测技术的发展, 以及地球发电机(The geodynamo)数值模拟获得的巨大成功, 对地球磁场及其倒转的认识已经取得了显著的进步.

迄今发现最早的地磁记录在35~40亿年前^[3,4], 表明地磁场在地球形成早期就已存在——地球的年龄约为45亿年. 在地磁场形成之后的漫长地质年代里, 每隔10~100万年便会发生一次完全的南北极倒转^[5], 周期不固定. 在发生极性倒转时, 地磁强度将显著降低. 调查发现, 最近2000年来地磁强度一直在减弱^[6], 现今地磁场的强度较1840年已经下降了10%(不间断地磁记录自1840年开始), 平均每百年下降5%. 2013年底, 欧洲太空局发射了新一代地磁卫

星Swarm(共3颗, 组成星座), 其最新观测结果显示, 地磁强度正在加速下降, 速度为以前测算的10倍. 这是否预示着新一轮地磁倒转即将发生? 它对我们的生活会产生什么影响? 这些问题不仅是科学研究的重要问题, 而且也日益成为公众关注的焦点.

要知晓地磁倒转的原因, 需要从根本上了解地磁场的形成和演化机制. 但地磁场起源于地表2900 km以下的地球外核(呈液态, 又称液核), 温度和压强极高, 对该处物质的物理、化学性质和过程, 热状态和边界条件等情况还知之不详. 虽然现在数值模拟已经可以在计算机中再现地磁场的倒转, 但是模拟的近似程度和采用的参数远未达到地球的真实情况, 因此很难说已确切知道地磁倒转的原因^[7], 不过最新的研究成果表明可能已经找到了揭开谜底的线索.

引用格式: 李力刚. 地磁倒转的原因是什么? 科学通报, 2016, 61: 1395-1400

Li L G. What causes geomagnetic reversals? (in Chinese). Chin Sci Bull, 2016, 61: 1395-1400, doi: 10.1360/N972015-01299

1 地磁场的时空特征和形成机制

地磁场是极其复杂的(图1(d), 显示了一个与现在在地磁场方向一致的磁场结构), 为研究方便, 一般将地磁场分解为环型场(Toroidal)和极型场(Poloidal). 在地表观测到的地磁仅为极型场部分, 经过地幔的耗散后, 能量只占整个地磁场的1%, 而环型场被限制在地核内部, 无法直接观测, 这给研究带来了极大的困难. 目前我们并不清楚环型场的强度, 推测应与极型场相当, 不可忽略. 有研究认为, 地磁场如果要维持其稳定性, 环型场强度最高不能超过极型场的10倍^[8].

在空间分布上, 现在的地磁极型场主要由一个偶极场构成——这是地磁场具有南北极的原因. 而整个极型场的强度、倾角和偏角在地表并不随磁纬、磁经规则地分布(磁极与地理极存在11°夹角). 以2015年地表的地磁场为例, 地磁强度在北美、西伯利亚和南极大陆附近达到极大值, 而在中太平洋和南美洲中部存在极小值^[9]. 与地表相比, 核幔边界处的极型场分布更不均匀, 显示出更多的精细结构(因地幔对磁场有低通滤波作用), 局部极值多处出现, 虽仍以偶极场为主, 但南北半球都存在与背景磁场方向相反的局域异常^[10-12], 这些空间分布特点都反映了外核磁流体运动的复杂性. 核幔边界处的极型场可通过模型(World Magnetic Model, WMM 和 International Geomagnetic Reference Field, IGRF)从地表观测向下延拓得到, 并可在一定假设下求得液核顶部的流体运动速度.

地磁场不仅空间分布不均匀, 而且随着时间在不断演化, 按时间尺度可分为慢速变化和快速变化. 慢速变化(又称长期变化)包括地磁在稳定期的强度改变、磁极在地表的移动和磁场西向漂移(westward drift)等现象; 快速变化则主要表现为地磁倒转和漂移(excursion, 指倒转后快速恢复为原极性, 在地磁场长时间的稳定期内, 极性漂移会多次出现). 在地磁倒转时, 地磁强度将大幅度减小, 并且结构变得更为复杂(图1). 距离现在最近的一次地磁倒转发生在78万年前, 称为松山-布容倒转. 一般认为地磁倒转的过程可以在几千年的时间内完成^[5,13], 然而Sagnotti等人^[14]在对松山-布容倒转的古地磁研究中发现, 完成该倒转过程的时间居然小于100年(速度大于2°/a), 这意味着在一个人的有生之年便可见证地磁倒转这种全球性的宏伟过程. 这个结果极大地挑战了地

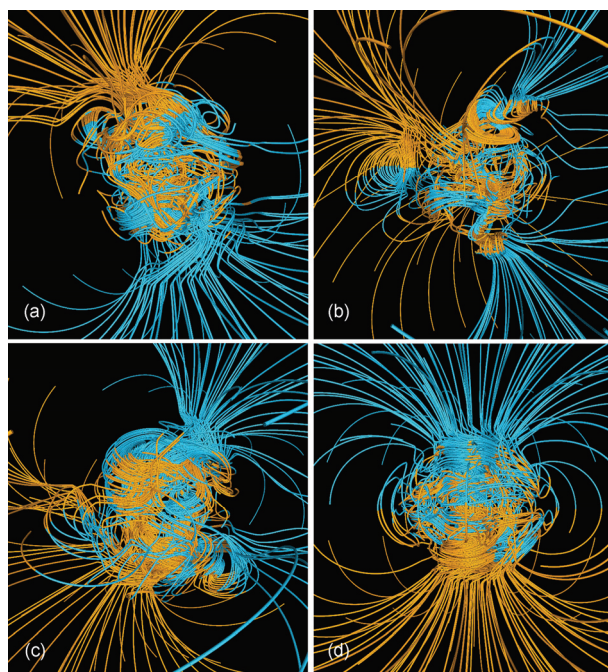


图1 Glatzmaier-Roberts地球发电机模型三维数值模拟展示的地磁场结构和地磁场倒转过程. 蓝色磁力线表示方向向内, 黄色方向向外(感谢Glatzmaier和Roberts许可使用)

Figure 1 The process of a geomagnetic reversal simulated with the Glatzmaier-Roberts geodynamo model. Magnetic field blue lines are directed inward and yellow outward (courtesy of G A Glatzmaier and P H Roberts. Used with permission)

球发电机模型, 至今争议不断.

地磁场由地球外核的磁流体发电机过程所产生, 这个观点最早由英国科学家Larmor^[15]于1919年首次提出, 其基本原理是: 地球外核的导电铁流体受热浮力和组分浮力等因素的驱动, 产生对流运动; 根据电磁感应理论, 导电流体在磁场中的运动将产生电流, 该电流继而激发产生磁场; 由磁场引起的电磁力反过来又影响着流体的运动, 从而形成一个自维持的“发电机”, 称为地球发电机. 天体产生和维持发电机运转必须满足3个条件: (1) 内部存在大体积的导电流体; (2) 驱动流体运动的能量; (3) 较快的自转速度. 这3个条件地球都满足. 由于地球发电机模型能较好地模拟出地磁场的空间形态(偶极场为主, 南北半球分布的局部极值区域等), 并能再现地磁场随机性的倒转和极性漂移, 以及地磁场西向漂移等主要时变特征, 因此已被大多数科学家所接受.

2 地磁倒转的原因

地球发电机模型由一套磁流体动力学方程组描

述, 包含运动方程、温度或组分方程、磁感应方程、连续性方程、状态方程以及磁场无散方程, 并配以相应的边界条件和初始条件. 在这些方程中, 流体的运动速度、温度、磁场强度等变量互相耦合, 科里奥利力、压力、浮力、洛伦兹力和黏滞力相互作用, 表现出强烈的非线性, 理论研究十分困难. 20世纪90年代, 大规模并行计算机技术的发展使得地球发电机模型的三维数值模拟成为可能^[16](二维流动不能形成自维持发电机), Glatzmaier和Roberts^[17]在他们的全三维、自维持发电机数值模型中首次再现了磁场倒转、西向漂移等地磁变化现象, 并发现地磁倒转是在磁流体运动过程中自发产生的. 随后, 来自世界各地的研究团体使用不同的数值方法、近似条件、参数空间和边界条件等, 建立了各自的地球发电机数值模型. 在未对流体速度场、磁场、边界条件等因素进行特殊设定的情况下, 这些数值模拟多次重复了地磁场自发倒转的现象^[18-22]. 不仅如此, 对旋转容器中导电流体进行的实验也发现了这种自发的磁场倒转^[23,24]. 因此, 许多地球物理学家认为, 地磁倒转是液核磁流体动力学过程非线性不稳定性导致的自发行为, 并不需要外界因素触发, 与太阳磁场每11年自发倒转一次类似.

但是问题还没有完全解决. 随着研究的深入, Glatzmaier等人^[25]发现核幔边界热流的分布会影响地磁场的强度和倒转频率; Biggin等人^[26]经过统计发现, 虽然地磁倒转看似随机, 但在非常长的时间尺度上, 地磁倒转会受到地幔对流的控制, 因为地幔对流会改变核幔边界的热流, 从而影响液核的磁流体运动, 进而改变磁场. 地磁倒转时, 虚拟地磁极(virtual geomagnetic pole, VGP)的移动路径更青睐美洲和东亚地区^[27], 这种情况也说明下地幔的热状态对地磁场的控制作用, 因为这两个地区正位于太平洋板块俯冲带, 对应着下地幔的地震波高速区(低温异常区). Amit和Olson^[28]则发现下地幔超级地幔柱的生成会引发地磁场倒转, 原因是超级地幔柱的生成增强了核幔边界的热流及其分布不均匀性; 当超级地幔柱消亡时, 相反的效应将阻止地磁倒转的发生. 另外, Chan等人^[29]也发现, 下地幔电导率分布的不均匀性强烈地影响着核幔边界的径向磁场结构, 下地幔电导层增厚导致的额外磁耗散将可以终止液核的发电机过程. 这些研究引致了一个新的问题——难道地磁倒转有的是自发产生的, 有的则是被触发的? 内外因的主导作用, 需要更深入的研究进行确认.

Pétrellis等人^[30]研究了长时间尺度上板块运动与地磁倒转的关系, 发现当大陆板块在赤道南北呈现更多不对称性时, 地磁倒转的频率高, 原因应该是板块分布的不对称导致了地幔对流结构的不对称, 从而影响液核的发电机过程, 原理与上述核幔边界热流变化引起地磁场变动的理由是相容的.

Yoshida和Hamano^[31]以及Miyagoshi和Hamano^[32]认为, 地球自转速度(日长)的改变也许是另一个触发地磁倒转的原因. 他们发现地球自转速度变化可以影响地磁场的西向漂移, 改变地磁场的强度, 并且地磁场强度的相对变化幅度比自转速度变化更大. Pacca等人^[33]也证实了过去5.1亿年以来地球自转速度变化与地磁倒转频率存在相关性. 不过地球自转速度变化或许是地磁变化的结果, 而不是原因, 因为地磁场变化可以通过地核与地幔的电磁耦合, 引起地幔角动量的改变, 导致地球在10年尺度上的日长异常^[34,35].

关于地磁倒转的原因还存在着一些非主流观点, 其中外星体撞击假说、全球气候突变假说和雪崩假说具有代表性^[36-38]. 这些假说由于缺乏足够证据, 或者已被证伪, 尚不具有重要的科学价值. 比如Schneider等人^[39]就已证明了松山-布容地磁倒转并不是撞击事件或全球气候变化所致.

还有其他一些因素也影响着液核的磁流体发电机过程, 因而也影响着地磁场的倒转, 这些因素包括核幔边界和内外核边界的地形、核幔和内外核的较差自转、内核生长过程、内核与下地幔电导率分布、引潮力和进动驱动的对流等, 对这些因素的研究将使我们更加深入地了解地磁场的变化规律和地磁倒转的原因^[40].

3 展望

地磁场的变化透露了来自地球内部和地外空间的信息, 这提示我们, 研究地磁场或者行星磁场应该从全球乃至太阳系的角度综合考虑. 可以将液核发电机这种快速过程, 放在慢速的地幔对流和板块运动的大背景下进行考察, 以增进对地磁场演化的理解. 另外, 研究的进步不仅依赖于地磁学的发展, 也依赖于其他学科(或分支)的发展, 比如高温高压实验和第一原理计算可以约束地核环境下物质的物性参数范围; 地震学方法可以确定核幔边界和内外核边界的精细地形; 超级计算机软硬件的发展可以提高

数值模拟的分辨率和计算速度;比较行星学的研究也为理解地球磁场起源和演化提供了新的途径.

未来的研究目标是建立一个与真实地球非常接近的地磁场演化模型,并能预报地磁的倒转,这也许

在不远的将来能够实现.不过我们也不能期望太高,因为对地磁倒转的预报只能是短期的(小于100年),要预报具有超长时间间隔的下次倒转则根本不可能^[41],这是由地球发电机过程的强非线性决定的.

致谢 感谢审稿人提出的宝贵意见.

参考文献

- Brunhes B. Recherches sur la direction de l'aimantation des roches volcaniques. *J Phys*, 1906, 5: 705–724
- Matuyama M. On the direction of magnetization of basalts in Japan, Tyosen and Manchuria. In: *Proceedings of the Imperial Academy of Japan*, 1929, 5: 203–205
- Biggin A J, de Wit M J, Langereis C G, et al. Palaeomagnetism of Archaean rocks of the Onverwacht Group, Barberton Greenstone Belt (southern Africa): Evidence for a stable and potentially reversing geomagnetic field at ca. 3.5 Ga. *Earth Planet Sci Lett*, 2011, 302: 314–328
- Tarduno J A, Cottrell R D, Davis W J, et al. A Hadean to Paleoproterozoic geodynamo recorded by single zircon crystals. *Science*, 2015, 349: 521–524
- Merrill R T, McElhinny M W, McFadden P L. *The Magnetic Field of the Earth: Paleomagnetism, the Core and the Deep Mantle*. San Diego: Academic Press, 1996
- Hongre L, Hulot G, Khokhlov A. An analysis of the geomagnetic field over the past 2000 years. *Phys Earth Planet Int*, 1998, 106: 311–335
- Zhang K, Jones C A. The effect of hyperviscosity on geodynamo models. *Geophys Res Lett*, 1997, 24: 2869–2872
- Zhang K, Fearn D R. How strong is the invisible component of the magnetic field in the Earth's core? *Geophys Res Lett*, 1993, 20: 2083–2086
- Chulliat A, Macmillan S, Alken P, et al. *The US/UK World Magnetic Model for 2015–2020*. Technical Report. National Geophysical Data Center, NOAA, 2015
- Gubbins D, Bloxham J. Morphology of the geomagnetic field and implications for the geodynamo. *Nature*, 1987, 325: 509–511
- Hulot G, Eymin C, Langlais B, et al. Small-scale structure of the geodynamo inferred from Oersted and Magsat satellite data. *Nature*, 2002, 416: 620–623
- Christensen U R. Geodynamo models: Tools for understanding properties of Earth's magnetic field. *Phys Earth Planet Int*, 2011, 187: 157–169
- Clement B M. Dependence of the duration of geomagnetic polarity reversals on site latitude. *Nature*, 2004, 428: 637–640
- Sagnotti L, Scardia G, Giaccio B, et al. Extremely rapid directional change during Matuyama-Brunhes geomagnetic polarity reversal. *Geophys J Int*, 2014, 199: 1110–1124
- Larmor J. How could a rotating body such as the Sun become a magnet? *Reports of the British Association*, 1919, 87: 159–160
- Zhang K, Busse F. Convection driven magnetohydrodynamic dynamos in rotating spherical shells. *Geophys Astrophys Fluid Dyn*, 1989, 49: 97–116
- Glatzmaier G A, Roberts P H. A three-dimensional convective dynamo solution with rotating and finitely conducting inner core and mantle. *Phys Earth Planet Int*, 1995, 91: 63–75
- Kuang W, Bloxham J. An Earth-like numerical dynamo model. *Nature*, 1997, 389: 371–374
- Busse F H, Grote E, Tilgner A. On convection driven dynamos in rotating spherical shells. *Studia Geoph Geod*, 1998, 42: 1–6
- Kageyama A, Ochi M, Sato T. Flip-flop transitions of the magnetic intensity and polarity reversals in the magnetohydrodynamic dynamo. *Phys Rev Lett*, 1999, 82: 5409–5412
- Sarson G R, Jones C A. A convection driven dynamo reversal model. *Phys Earth Planet Int*, 1999, 111: 3–20
- Kutzner C, Christensen U R. From stable dipolar towards reversing numerical dynamos. *Phys Earth Planet Int*, 2002, 131: 29–45
- Berhanu M, Monchaux R, Fauve S, et al. Magnetic field reversals in an experimental turbulent dynamo. *Europhys Lett*, 2007, 77: 59001–59005
- Sorriso-Valvo L, Carbone V, Bourgoin M, et al. Statistical analysis of magnetic field reversals in laboratory dynamo and in paleomagnetic measurements. *Int J Mod Phys B*, 2009, 23: 5483

-
- 25 Glatzmaier G A, Coe R S, Hongre L, et al. The role of the Earth's mantle in controlling the frequency of geomagnetic reversals. *Nature*, 1999, 401: 885–890
- 26 Biggin A J, Steinberger B, Aubert J, et al. Possible links between long-term geomagnetic variations and whole-mantle convection processes. *Nat Geosci*, 2012, 5: 526–533
- 27 Laj C, Mazaud A, Weeks R, et al. Geomagnetic reversal paths. *Nature*, 1991, 351: 447
- 28 Amit H, Olson P. Lower mantle superplume growth excites geomagnetic reversals. *Earth Planet Sci Lett*, 2015, 414: 68–76
- 29 Chan K H, Zhang K, Li L, et al. On the effect of an electrically heterogeneous lower mantle on planetary dynamos. *Phys Earth Planet Int*, 2008, 169: 204–210
- 30 Pétrélis F, Besse J, Valet J-P. Plate tectonics may control geomagnetic reversal frequency. *Geophys Res Lett*, 2011, 38: L19303
- 31 Yoshida S, Hamano Y. The westward drift of the geomagnetic field caused by length-of-day variation, and the topography of the core-mantle boundary. *Geophys J Int*, 1993, 114: 696–710
- 32 Miyagoshi T, Hamano Y. Magnetic field variation caused by rotational speed change in a magnetohydrodynamic dynamo. *Phys Rev Lett*, 2013, 111: 124501
- 33 Pacca I G, Frigo E, Harmann G A. Possible relationship between the Earth's rotation variations and geomagnetic field reversals over the past 510 Myr. *Front Earth Sci*, 2015, 3: 14
- 34 Love J J, Bloxham J. Electromagnetic coupling and the toroidal magnetic field at the core-mantle boundary. *Geophys J Int*, 1994, 117: 235–256
- 35 Fu R S, Li L G, Zheng D W, et al. Dynamics of the core-mantle boundary and the decadal fluctuation in the Earth's rotation (in Chinese). *Adv Earth Sci*, 1999, 14: 541–548 [傅容珊, 李力刚, 郑大伟, 等. 核幔边界动力学——地球自转十年尺度波动. *地球科学进展*, 1999, 14: 541–548]
- 36 Muller R A, Morris D E. Geomagnetic reversals from impacts on the Earth. *Geophys Res Lett*, 1986, 13: 1177–1180
- 37 Muller R A, Morris D E. Geomagnetic reversals driven by sudden climate changes. *Eos Trans AGU*, 1989, 70: 276
- 38 Muller R A. Avalanches at the core-mantle boundary. *Geophys Res Lett*, 2002, 29: 41
- 39 Schneider D A, Dennis V K, Mello G A. A detailed chronology of the Australasian impact event, the Brunhes-Matuyama geomagnetic polarity reversal, and global climate change. *Earth Planet Sci Lett*, 1992, 111: 395–405
- 40 Zhang K, Gubbins D. Nonlinear aspects of core-mantle interaction. *Geophys Res Lett*, 1993, 20: 2969–2972
- 41 Hulot G, Lhuillier F, Aubert J. Earth's dynamo limit of predictability. *Geophys Res Lett*, 2010, 37: L06305



李力刚

中国科学院上海天文台研究员。主要从事地球和行星流体动力学及其大规模数值模拟的研究, 在非线形旋转流体动力学研究中有诸多新的发现。因在地球与行星热对流、发电机理论与数值模拟方面的杰出贡献, 2008 年获得国际大地测量与地球物理联合会 (IUGG) 地球深内部研究委员会 (SEDI) 颁发的 Doornbos 纪念奖。

What causes geomagnetic reversals?

LI LiGang^{1,2}

¹ Center for Astro-geodynamics Research, Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China;

² Key Laboratory of Planetary Sciences, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China

Geomagnetic reversal is known as one of the most dramatic changes on Earth in that the north and south poles of the geomagnetic field switch their positions every 0.1–1 million years. Since Bernard Brunhes and Motonori Matuyama identified the geomagnetic reversal in the early 20th century, remarkable progress has been made on understanding the causes that drive the geomagnetic flip-flops through paleomagnetic investigations, space/ground-based observations and theoretical/numerical/laboratory experimental studies. However, based on our limited knowledge of the Earth's deep interior, we are still unable to answer the title question clearly and definitely, but we do have found some clues that could help revealing the underlying mystery. The geomagnetic field is thought to be generated by the fluid convection in the Earth's outer liquid core through magnetohydrodynamic process which is called the geodynamo. This hypothesis was initially proposed by Joseph Larmor in 1919 and now is widely accepted. In 1995, Gray A Glatzmaier and Paul H Roberts accomplished the first numerical self-consistent geodynamo model which maintained an Earth-like magnetic field and produced spontaneous magnetic reversals without special priori setup on fluid motion, magnetic field or boundary conditions. Later, the spontaneous geomagnetic reversals are repeated in many numerical simulations and laboratory experiments by other research groups, but the spontaneity of reversals remains sceptical because the conditions of simulations are far from those of the real Earth. Further studies have shown that heat flux variations across the core-mantle boundary induced by mantle convection or superplumes could control the frequency of geomagnetic reversals through thermal core-mantle coupling. The preference of virtual geomagnetic pole (VGP) paths during reversals for longitudinal bands associated with the subduction zones surrounding the Pacific Ocean supports the hypothesis that geomagnetic reversals are controlled by the thermal structure of the lower mantle. Moreover, the magnetic diffusion effects of the lower mantle can alter the structure of geomagnetic field and change the geodynamo process via magnetoelectric core-mantle coupling. Some studies suggested that the plate tectonics, the distribution asymmetry of the continental plates, and the growth rate of the inner core can also influence geomagnetic reversals. Even the super-rotation of the inner core or the Earth's precession can be a candidate of driving the fluid motion in the outer core instead of thermal or compositional buoyancy force in the classical geodynamo theory and, consequently, affects geomagnetic reversals. This manuscript describes the temporal and spatial features of the geomagnetic field as well as the geodynamo theory, reviews the recent progress in the study of geomagnetic reversals. It points out that the answer to what causes geomagnetic reversals depends on our knowledge of the entire Earth and a comprehensive model that treats the Earth as a whole dynamic system with all relevant spheres taken into account.

geomagnetic reversal, geodynamo, magnetohydrodynamics, mantle convection, plate tectonics

doi: 10.1360/N972015-01299