

地球磁场的物理问题*

徐文耀[†]

(中国科学院地质与地球物理研究所 北京 100029)

摘 要 地磁学的发展经历了两千多年的历史,文章回顾了这一漫长历史的四个主要阶段,对每一阶段研究的基本物理问题和主要进展做了简要概述.地磁场的空间分布、地磁场起源、地磁场长期变化和西向漂移、磁极移动和极性倒转、地磁场与人类生存环境等,是地磁学的基本物理问题.文章还从物理概念、研究现状和地磁学以及相关学科当前存在的问题等几个方面对地磁学未来的发展趋势做了简要的说明.

关键词 地磁场 磁场起源 极性倒转

Physical aspects of geomagnetic field

XU Wen-Yao[†]

(Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract The long history of more than 2000 years of geomagnetism, including 4 periods, is reviewed. The major developments and issues in these periods are briefly summarized. The basic physical aspects in geomagnetism are addressed, including the spatial distribution of the Earth's magnetic field, the origin of its main magnetic field, its secular variation and westward drift, excursion of the magnetic poles, polarity reversal, and the relationship between the Earth's environment and the geomagnetic field. Several long-standing problems and future developments of geomagnetism and related disciplines are discussed from their physical principles and present status quo.

Key words the geomagnetic field, origin of the Earth's magnetic field, polarity reversal

1 地磁学发展的启示

地磁科学发端于测向、定位,成长于航海、探矿.这一“与生俱来”的实用性特点,为地磁学的发展提供了源源不断的强劲动力.与天文学和生物学发展所经历的一波三折相比,地磁学要幸运得多.这里,没有宗教裁判所的阻挠迫害,没有人类之至上主义者的干预,而有的是务实的人群对地磁场知识的渴望与需求,其中,不乏伟大的科学家、实验师、航海家、军事家,甚至方士和风水先生.这或多或少归因于地磁学明显的应用性^[1-3].

从公元前 250 年中国人记载指南针发明,到 1600 年英国人 Gilbert 的奠基性著作《磁学》一书问

世,地磁学走过了一千八百年的初期发展阶段.这一时期,磁偏角和磁倾角的测量以及地磁场实用数据的积累几乎构成了地磁学的全部内容.可以毫不夸张地说,没有指南针,就没有郑和的“七下西洋”,就没有哥伦布的发现新大陆,就没有达·伽马的远航印度,就没有麦哲伦的环球航行.这些“地理大发现”敲响了保守、落后和愚昧的中世纪的丧钟,也为地磁学的发展积累了重要的原始资料.

英国伊丽莎白女王的私人医生 Gilbert 是第一个对地磁现象进行深入理性思考的人.当他把分散

* 国家重点基础研究发展计划(批准号:G2000078406)资助项目
2003-10-13 收到初稿,2004-04-05 修回

[†] E-mail: wxyu@mail.igcas.ac.cn

的、各别点的地磁偏角和倾角测量资料组织在一个统一的框架之下,描绘在一个统一的模型之中的时候,惊喜地发现,地球表面磁场的分布规律竟然与磁石小球周围磁针的排布方向非常相似。这两种看似无关的自然现象一旦被理性的思维联系起来,就迸发出巨大的火花,隐藏在纷繁现象后面的规律被揭示了出来:“地球是一个大磁体”——这就是 Gilbert 的结论,也是第一个关于地磁成因的物理假说,这一论断把地磁学推进到一个新的发展阶段。

这一新阶段最重要的成就是人们找到了测量地磁场强度的方法。如果说磁偏角和磁倾角的发现带有偶然性和自发性,那么,地磁场强度的测量则是完全建立在物理规律之上的理性行为。方向加强度,地磁场这一矢量场才有了完整的信息。用简洁直观而又便于使用的方式把地磁场信息组织和表述出来,就产生了地磁图,这是这一阶段的又一个重要成就。首先是天文学家哈雷于 1701 年编成了大西洋地磁偏角图,一百多年后,地磁场水平分量和总强度的等值线图于 1827 年问世。就这样,人类经过二百多年的努力,完成了从零散的地磁场测量到观测资料的系统组织和地磁图编绘的进步,奠定了现代地磁图和国际参考地磁场的基础,也为地磁学发展的第二次飞跃准备了条件。

大量的地磁资料,丰富的地磁现象强烈地吸引着长于理性思维,爱好寻根问底的数学家、物理学家,其中就有 Gauss、Weber、Chapman、Alfven 等人。1839 年,德国著名数学家 Gauss 把位场理论用于地磁场研究,从而奠定了近代地磁学的数学基础,标志着地磁学进入了它的近代发展阶段,显示出物理和数学理论在科学发展中的巨大作用。Gauss 的计算指出,地磁场主要起源于地球内部。这一结论看起来与三百多年前 Gilbert 的猜想不谋而合,但 Gauss 的结论是建立在严格的位场理论之上的,是对 Gilbert 假说的物理证明。

但是,物理学家不满足于“地磁场起源于地球内部”这一简单论断,他们更感兴趣的是:“地球内部”究竟是什么地方?那里的物质处于怎样的物理状态?发生着怎样的物理过程?人类怎样认知发生在这些不可到达地区的过程?类似的过程是否在其他天体内部也存在?显然,地磁起源的研究已经远远超出了地球的范畴。Gilbert 的“大磁铁”假说已成为过去,各种新的地磁起源假说雨后春笋般地争奇斗妍,凡是物理学中已知的可以产生磁场的机制都在这里尝试过:旋转磁效应、旋转电荷效应、霍尔效

应、压磁效应、磁暴感应……这是地磁起源理论“百家争鸣”的辉煌时代。最后,地球发电机理论几乎是“一枝独秀”地取代了所有其他理论。

“上穷碧落下黄泉”,地磁学家不仅在探索着地磁场的深部起源,而且也在考察着地磁场变化与太阳活动、极光以及其他高空现象之间的联系。早在 1741 年,瑞典科学家就注意到,当天空出现北极光时,磁针的指向出现明显的摆动。人们从地磁活动的 11 年周期变化、太阳耀斑与磁暴的相关性、地磁场对高能宇宙线的影响等观测事实,确信太阳是变化磁场的源。挪威物理学家 Birkerland 是把太阳爆发、极光活动和地磁变化在物理上联系起来的第一个人。所有这些自然界的奥秘激发人们的一种愿望:飞出地球去,从宇宙空间观察和认识地球!

1957 年,苏联第一颗人造地球卫星发射升天,宣告人类进入太空时代,地磁学也步入了它的现代发展阶段。人类终于摆脱了地表的束缚走向太空,可以从地球以外来观测我们居住的星体,对地球周围磁场的分布和变化可以进行现场观测和研究。过去要花费大量人力和几年、十几年,甚至几十年的时间才能完成的全球地磁测量,现在用磁测卫星只须几天就可以得到精度更高、覆盖面更广的结果。过去认为是真空状态的太空,实际上存在着各种各样的物质,发生着极其复杂的物理过程,有些甚至决定着我们的生存环境和命运。空间探测不仅证实了早先地磁观测所预言的电离层电流、场向电流、赤道环电流和磁层的存在,而且发现了地球内外辐射带、等离子体层、太阳风和行星际磁场等一系列重要现象。地磁场向空间的扩展也不像原来设想的那样,以距离立方反比的规律向外减小,而是终止在磁层顶……

在计算机、航天技术等高科技迅速发展的今天,人类把开发利用地球环境的希望寄托于浩瀚的太空。地磁学,作为研究地球电磁场和电磁环境的重要学科,在“太空环境”研究和“太空天气”的监测、诊断和预报中将发挥越来越大的作用。

整个科学在发展,地磁学,这门即古老而又不成熟的学科也在迅速发展,不断成熟。

2 地磁场起源——地学和物理学共同面对的难题

爱因斯坦把地磁场起源问题称做“五大物理学

难题”之一。地磁学家和物理学家对探索地磁场起源怀有浓厚而持久的兴趣,但同时又遇到了巨大的困难。只要看看关于地磁场起源的假说至少有十几种,就可以知道,该问题对人们的吸引力是如何的巨大,而解决起来又是如何的困难。

首先,“地球是永磁体”的假说遇到了居里点温度的严重挑战:二三十公里深度以下,地温已超过地球大多数物质的居里点温度,这里的物质不可能有大的剩磁,而仅靠薄薄二三十公里地壳物质的磁性,远远不够产生观测到的地磁场。其他地磁场起源假说,诸如旋转磁效应、旋转电荷效应、霍尔效应、压磁效应等假说也均因量级太小而先后被扬弃。惟一有希望的地磁场起源理论只有地球发电机理论了。

电磁学理论告诉我们,要维持发电机过程,需有三个基本条件:磁场、导体和运动。于是,地磁学家把目光转向了最有希望的地核。地震学家根据地球外核不能传播横波的观测事实,判断地下2900公里深处的地球外核是流体,物理学家推断,地核温度高达4000℃以上,压力可达200万大气压,实验物理学家告诉我们,这样的高温高压地核物质应该是高电导的等离子体,大地测量、天文学等不同学科的观测和理论计算推测,地核流体的粘滞性比水大不了多少。于是,一个生动的地核摆在了地磁学家的面前:比月球大一倍,像太阳一样热,像融化的铁水一样稀,像超导体一样的高电导。地核内部的热不均匀性和成分不均匀性几乎可以肯定会引起地核对流,如果再有一个“种子磁场”(且不管它是怎么来的),地球外核就是一个发生发电机过程的理想场所。

Bullard 用一个简单的圆盘模型说明了地核自发电机的原理,演示了地磁场自发维持或放大的过程。力武常常把两个圆盘发电机耦合起来,揭示了地核过程的混沌特点和地磁场极性倒转的过程。这些既简单,而又是最基本的原理模型点燃了科学家寻找地球发电机的希望,而地核流体的复杂运动及其与磁场相互作用的动力学和电动力学过程则要用磁流体力学理论来描述,于是就产生了各种各样的运动学发电机模型、磁流体发电机模型、湍流发电机模型。在高电导的地核流体中,人们常常采用“磁场冻结”假设来简化方程。在此假设下,磁场通过流体扩散的效应可以忽略,流体携带着磁力线一起运动,使磁力线发生拉伸、变形、扭绞,反过来,磁力线的变形又影响着流体的流动。在这个流体-磁场相互作用的系统中,由极型磁场可以产生环型磁场(即 ω 效应),由环型磁场也可以产生极型磁场(即 α 效

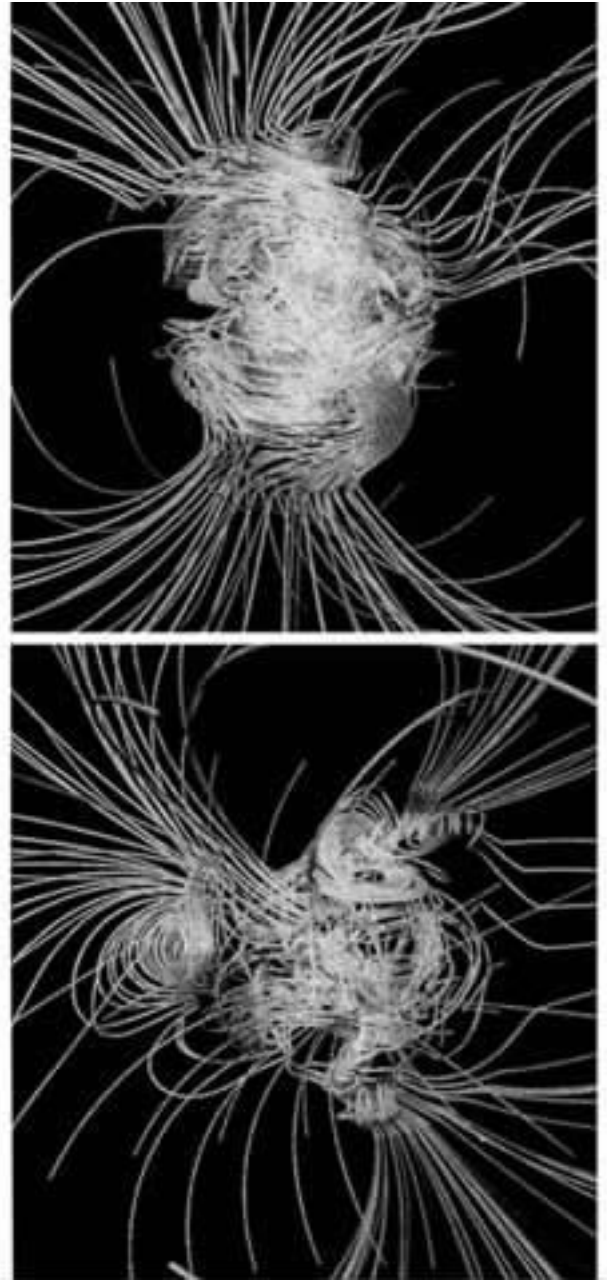


图1 Glatzmair 和 Roberts 对地磁场倒转过程的计算机模拟结果^[4-6]。[上图和下图分别表示倒转前和倒转中磁力线的结构,倒转后磁力线的结构(未在图中画出)与上图相似,但方向相反]

应),由这两种基本效应可以组合出多种发电机模型。

现在,科学家已经可以用大型计算机对地核磁流体方程组进行数值求解,模拟地磁场演化的历史。在一系列重要结果中,最引人注目的是 Glatzmair 和 Roberts 关于地磁场倒转的模拟结果,他们在巨型计算机上花了2000小时,生动地重现了一次地磁场倒转的全过程,以及磁极倒转过程中偶极磁场的衰减、多极磁场的增强和磁极迁移等一系列特点^[4-6]。

图 1 给出他们对地磁场倒转的模拟结果. 由图可以看出, 由于磁场随地核流体中一起运动(即冻结假设), 在地转力的影响下, 磁力线被剧烈缠绕. 还可看出, 在地磁场倒转过程中, 磁场强度减小^[7], 而且可能出现多个磁极.

虽然在地球发电机的数值模拟方面已经取得了巨大进展, 但是, 地磁场起源问题离完全解决还很远, 就连地球内部的性质和状态, 也是间接推论的多, 实际测量的少. 地核的不可到达性使我们只能主要依靠地表附近和空间的观测资料, 利用实验室模拟实验的结果去推断、去猜测地核中的状态和过程. 有一系列问题严重地困扰着地磁学家: 如何折衷处理不同方法估计的地核流体粘性? 地核中环型磁场究竟有多大? 核幔界面的物理和化学状态如何? 它对地核发电机过程有什么影响? 下面的固体内核和上面的地幔对发电机过程, 特别是对磁极倒转有什么影响? 这一系列问题给地球发电机理论带来许多困难. 由观测资料反演物理过程的不确定性造

成了多解的问题, 小尺度实验和行星尺度过程之间可能有本质的区别, 有些问题不是简单的相似性原理可以解决的. 这些问题的最后解决, 有赖于理论、测量、计算技术的进一步发展和有机的配合.

3 地磁场长期变化——磁场能量的转移

地磁场并不是恒定不变的, 它的强度和空间分布形态经历着不断的变化, 地磁场的这种长期变化现象是在反复多次磁测时发现的.

地磁场起源于地下 2900 公里深度以下的地核, 地核与地表之间隔着导电的地幔, 由于趋肤效应, 地核中发生的快速变化很难到达地表, 而能够在地面观测到的地磁场变化只是缓慢的长期变化成分, 其周期通常在 10 年以上, 较显著的变化有 60 年、100 年、500 年等周期成分.

如果把地磁场分解成空间尺度不同的各种成分, 则可以发现, 空间尺度大的磁场成分对应于时间

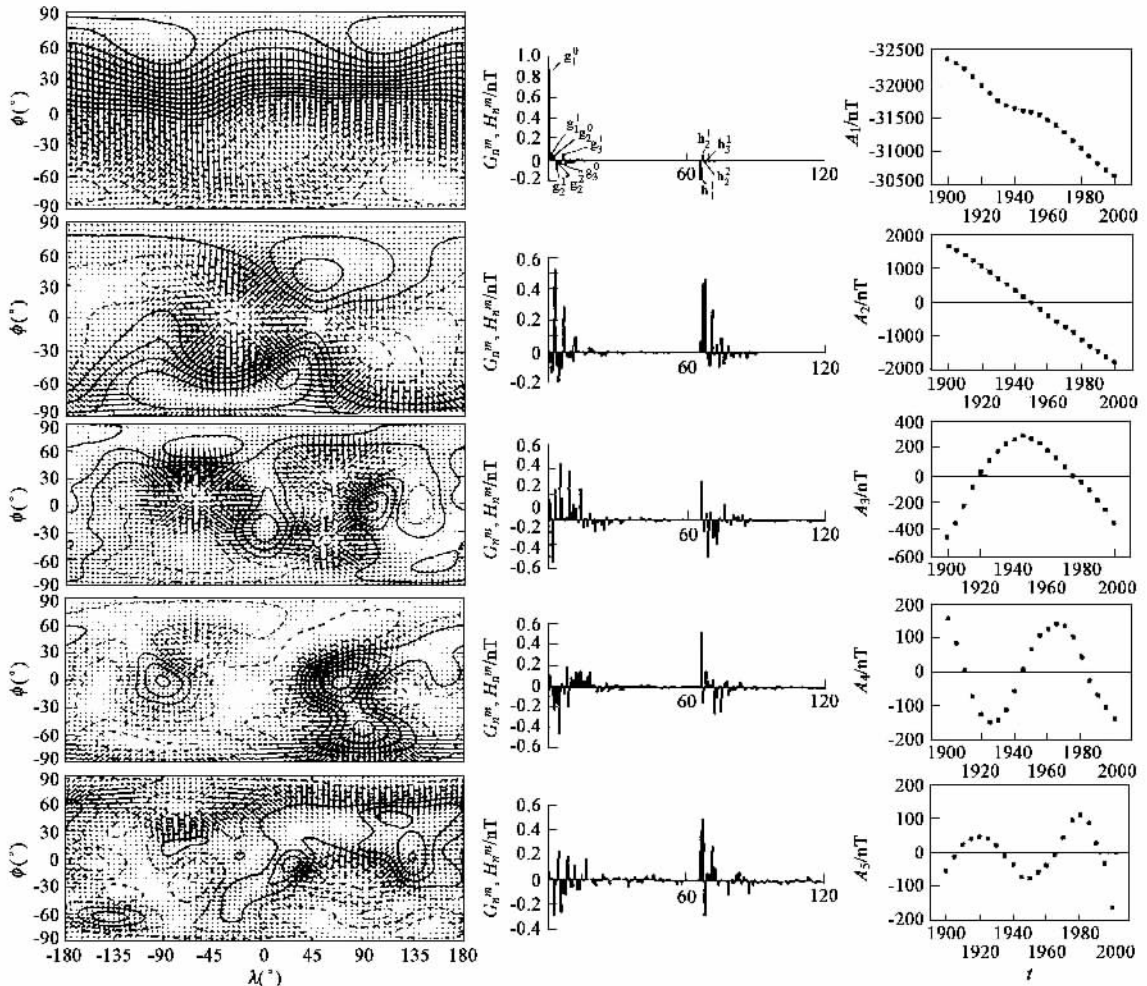


图 2 组成地磁场的几种空间尺度不同的成分(左列图), 各磁场成分的高斯球谐系数(中列图)以及强度的时间变化(右列图)

周期长的变化,而空间尺度小的磁场成分则具有较短周期的变化,这种空间-时间的相关特点是与地核流体动力学过程密切相关的.图2是用自然正交分量法对地磁场分解的结果,左列图从上到下表示空间尺度依次减小的五种主要成分的磁场结构, λ 和 ϕ 分别表示经度和纬度;中列图是各磁场成分的高斯球谐系数;右列图表示各成分强度随时间 t 的变化.由图可以清楚地看出各成分在空间尺度和变化周期之间的对应关系^[8].

地磁场长期变化最明显的特点是偶极磁场的持续衰减.近1000年来,地磁场偶极矩大约减小了25%,其中,17%是近400年来减小的.到了20世纪,地磁场加速衰减,从1900年到2000年100年间,地磁场偶极矩由 $8.32 \times 10^{22} \text{ Am}^2$ 减小到 $7.78 \times 10^{22} \text{ Am}^2$,减小了6.5%而相应的磁场能量减小了12%.如图3中 $n=1$ 的曲线所示,时间 t 的磁场能量 R_n 归一化到1900年的值 R_{n1900} (下同).有人甚至推测,如果地磁场照此速度继续衰减下去,地磁场将会在几千年内消失,或者减小到发生极性倒转的临界值.

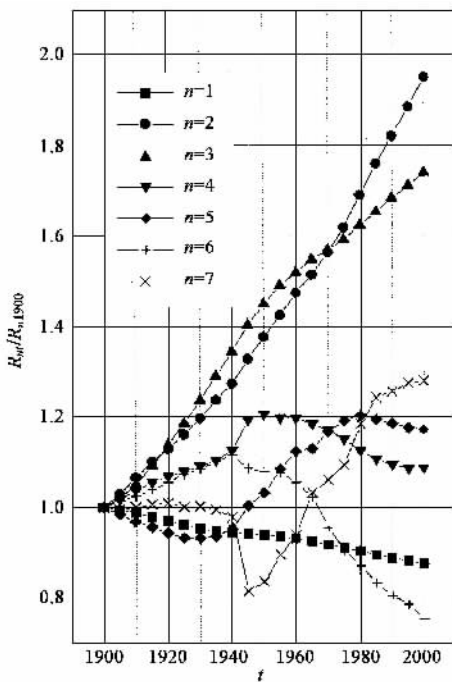


图3 20世纪地磁场偶极子和非偶极子能量的长期变化

在偶极磁场持续衰减的同时,非偶极磁场却在快速增强,在1900—2000年100年期间,四极子(图3中 $n=2$ 的曲线)和八极子(图3中 $n=3$ 的曲线)的能量分别增加了95%和74%,全球四块大尺度地磁异常(欧亚异常、澳大利亚异常、南大西洋异常、非

洲异常)的强度在100年间增加了21%—56%.与此同时,磁心位置(即地磁偶极子在地球内部的位置)向太平洋方向快速移动了200km,使东西两半球的地磁场变化表现出明显的不对称性^[8,9].

所有这些变化表明,地磁场的能量正在从大尺度磁场成分向小尺度成分转移.研究不同深度地磁场的能量密度指出,地磁场的能量正在逐渐向核幔界面集中.这种能量转移和聚集过程的真实性和它的地球动力学意义是值得认真探讨的.

地磁场有一类特殊变化引起了人们极大的兴趣,这就是全球性的“急变(jerk)”,它表现为地磁场年变率的突然转折,在地磁分量的加速度曲线上,“急变”表现为一个阶梯形变化.在已经确认的“急变”事件中,1903年和1969年的急变最为典型.有人认为,地磁场急变与全球性构造活动有关.

4 地磁场西漂——是物质在迁移,还是波在传播?

在地磁场长期变化中,最突出的特点是地磁场整体向西漂移.对比不同年代的地磁图,很容易发现一些特殊的等值线在西移,这就是Halley在300多年前就已经注意到的地磁场西漂现象.目前,人们普遍承认的西漂速度是每年 0.2° .地磁场除了西漂外,还有更缓慢的北漂.

在国际参考地磁场(IGRF)模型系列出现后^[10],人们可以根据更加系统、更加一致的资料,用更精细、更严格的方法确定地磁场的西漂特点,不仅可以考察地磁场整体西漂的特点,还可以深入研究磁场西漂随时间的演变、不同纬度带漂移的差异、不同波长磁场成分的西漂规律.

首先注意到的是地磁场西漂速度随纬度而变化.当人们沿不同纬度圈考察地磁场西漂特点时发现,最快的西漂发生在南纬 15° 附近,其西漂速度可以超过全球平均值的一倍以上,在那里形成了一个明显的快速西漂带.由此带向南和向北,西漂速度逐渐减慢,在南北纬 50° — 60° 处形成了两个慢速西漂带.这种“差动旋转”的图像对我们并不陌生,太阳表面的旋转、木星和土星的旋转都有类似的特点.也许我们可以从宇宙天体差动旋转的普遍性为地磁场起源找到更深刻的物理依据.在这方面,行星磁场的测量和比较行星学的证据为我们提供了从统一的观点去认识行星磁场的起源和变化.也许,其他行星磁场现在的样子正是地球磁场过去曾经经历过的形态.

地磁场西漂的另一个有意义的特点是“频散”,

即不同空间波长的磁场成分有不同的西漂速度. 对 20 世纪地磁场西漂特点的分析表明, 地磁场成分的周向波长越长, 其西漂速度越快.

也有人认为, 地磁场并不总是绕地轴旋转, 而是绕着一个所谓的“优势轴”旋转, 地磁场旋转的“优势轴”在 20 世纪初接近于赤道面, 此后, 逐渐旋转到接近现今地球自转轴的位置.

显然, 地磁场西漂的根源应该在地磁场起源的地核, 但是产生西漂的物理机制至今没有定论. 一种观点是地核流体(至少是地核表层流体)有一个总体平均的向西运动. 由于磁力线与流体冻结在一起, 所以, 地磁场也表现出一种整体西漂的特点. 换句话说, 是地核物质迁移造成了地磁场西漂. 在大多数发电机模型的数值模拟中, 地磁场西漂速度被用作地核流体的典型速度.

Hide 提出另外一种完全不同的观点, 它认为, 地磁场西漂是地核中磁流体波向西传播的一种表象. 他分析了地核物质状态和地核中的磁流体波, 在考虑地球旋转的科里奥利力之后, 得到两个波模, 一个是快速向东传播的惯性模波, 一个是缓慢向西传播的地磁模波. 前者因其变化快速和地幔的趋肤效应而不易被在地面观测到, 后者可以用来解释地磁场西漂. 但是, Hide 理论给出地磁场西漂频散的特征, 正好与上面所述的西漂频散的观测结果相反, 即地磁场成分的波长越长, 其西漂速度越慢. 看来, 要得到更为可信的回答, 应该对原始观测资料、分析处理方法以及地核磁流体模型进行全面深入的检查和思考.

5 地磁场倒转——地球内部的时钟

岩石磁学研究告诉人们, 当岩石形成时, 它会以剩磁的方式“记录”下当时地磁场的方向和强度. 通过测试不同地质年代岩石样品的剩磁, 可以推断当时的地磁场方向和磁极位置. 对全球大量岩石标本的测试和研究表明, 地磁场曾经发生过多次倒转, 不同的大陆板块和海洋板块曾经有过, 并且还在继续进行着大规模的水平漂移运动. 地磁学的这一惊人发现, 终于导致了一场地球科学革命.

20 世纪五六十年代, 在一场重大的地学革命中诞生了描述全球构造的板块理论. 地震学和地磁学的观测事实就是这个新地球观的两个主要支柱. 地磁场的多次倒转, 加上板块离开大洋中脊向两边运动, 形成了海底地磁异常正负相间的条带状分布. 这种条带状磁异常恰似地球动力学过程的一个时间

表, 用地磁场的正反极性标志出一系列地质事件的年代.

地磁场倒转之前和倒转期间, 磁场强度通常发生明显衰减, 磁极会移动到低纬度, 甚至赤道面. 地磁极性倒转没有严格的周期性, 有时倒转间隔仅几万年, 有时可以长达几十到几百万年. 倒转平静期和频繁期与全球构造活动期有一定对应关系^[11].

地磁场极性倒转的发现极大地推动了古地磁学的发展, 在全球广泛开展了对火山岩、沉积岩、海底和湖底沉积的古地磁测量. 黄土沉积的古地磁研究带着我国独有的特色, 为古地磁研究做出了贡献^[12]. 由此产生的“地磁极性年表”为地质学提供了一个独立的时间标尺.

地磁场极性倒转的发现极大地推动了地磁场起源的研究, 但同时也为地磁起源假说增加了新的限制条件. 如果说, 初期的地磁起源假说或理论只需解释地磁场的偶极特性就可以的话, 那么, 现代的地磁场起源假说或理论必须能够解释地磁场西向漂移、偶极场强度变化、地磁极性倒转等一系列长期变化特征.

6 结束语

作为一门发展中的学科, 地磁学还有一系列问题有待深入研究和探讨: 地磁场起源的物理过程几乎是一个永恒的话题, 地核磁场与地壳长波长磁场的分离是一个关系到如何确认地磁场各部分生成机制的关键问题, 地球内部(特别是地幔)的电磁性质是建立观测事实与理论预言之间的关系时必不可少的知识, 地球空间电磁环境正在受到现代人类和高新技术社会严重的关注^[13]; 空间天气监测和预报对卫星的正常工作和宇航员活动有极大关系, 地磁生物学、地磁场与地球系统和全球变化的关系引发了多学科、多部门的交叉综合研究. 地磁场观测(强度和方向)的长期历史资料为这些研究提供了坚实的基础^[14-16].

地磁学将在不断解决新的问题中得到发展, 并造福于人类.

参 考 文 献

- [1] Chapman S, Bartels J. Geomagnetism. London: Oxford University Press, 1940. 606—668
- [2] Langel R A. The main field. In: Jacobs J A ed. Geomagnetism, Vol 1. London: Academic Press, 1987. 249—512
- [3] 徐文耀. 地磁学. 北京: 地震出版社, 2003. 45—63 [Xu W Y. Geomagnetism. Beijing: Earthquake Press, 2003. 45—63 (in Chinese)]
- [4] Glatzmair G A, Roberts P H. Contemporary Phys., 1997, 38: 269

- [5] Glatzmair G A , Roberts P H. Nature , 1995 , 377 : 203
 [6] Kuang W , Bloxham J. Nature , 1997 , 389 : 371
 [7] Guyodo Y , Valet J P. Nature. 1999 , 399 : 249
 [8] Xu Wen - Yao. Geophys. J. Int. , 2003 , 152 : 613
 [9] 安振昌 , 王月华. 地球物理学报. 1999 , 42 : 169 [An Z C , Wang Y H. Chinese J. Geophys. , 1999 , 42 : 169 (in Chinese)]
 [10] IAGA Division 5 , Working Group 8. Geophys. J. Int. , 1996 , 125 : 318

- [11] Merrill R T , McFadden P L. Rev. Geophys. , 1999 , 37 : 201
 [12] Zhu R , Ding Z , Wu H *et al.* J. Geomag. Geoelectr. , 1993 , 45 : 289
 [13] Kan J R , Baumjohann W , Coroniti F V *et al.* EOS. , 1998 , 79 : 329
 [14] Stern D P. Rev. Geophys. 2002 , 40 : 3. 1
 [15] Valet J P. Rev. Geophys. 2003 , 41 : 4. 1
 [16] Jonkers A R T. Rev. Geophys. 2003 , 41 : 2. 1

· 物理新闻和动态 ·

蜘蛛足上的范德瓦耳斯力

瑞士和德国的一个研究组指出,蜘蛛之所以能倒着爬过几乎任何类型的表面是由于它利用了范德瓦耳斯力.这个小组还计算出这些力可以使蜘蛛携带相当于自身重量的 170 倍的物体(A Kesel *et al.* Smart Mater. Struct. , 2004 , 13 : 512). 这一研究结果可用来开发新的粘合剂.

Bremen 技术动物学与仿生学研究所的 Antonia Kesel 与苏黎世大学的同事使用扫描电子显微镜观察一种跳跃科蜘蛛 *E. arcuata* 的足部,它们不靠织网来捕食.科学家发现这种蜘蛛的足部有一簇毛状物,其中每一根毛上又覆盖着几十万根宽度只有几百纳米的小毛.蜘蛛就用这些小毛粘在物体表面上.

研究者使用原子力显微镜测出每一根小毛可以产生 40nN 以上的力.对于质量一般只有 15mg 的蜘蛛来说,这个

力量是极强的.研究人员指出,这种粘着力是小毛中相距只有几纳米的各分子之间的范德瓦耳斯力造成的.蜘蛛八只足上的这些分子间的力合起来形成非常强的力.

研究小组还计算出,如果 60 万个小毛的尖端与一个表面接触的话,一个蜘蛛可产生总共 0.025N 的力.这意味着,它可以携带相当于自身重量 173 倍的物体.此外,这种力不受环境影响,因而,它们可以在潮湿的或光滑的表面行走.

这种蜘蛛的黏着本领超过其他节肢动物,如昆虫和甲壳类动物,它们使用黏液将自己粘在物体表面.而 *E. arcuata* 蜘蛛的行为则和壁虎相似.

Kesel 希望这项基础研究能导致新的技术发明.他说这些研究的一种可能的应用是基于范德瓦耳斯力来开发一种邮寄标志,即使这标志弄湿了或粘上了油污仍然可以粘着在邮件上.还可以想象,利用这种原理,制作一种太空服,使宇航员能粘在太空船的壁上,就像在天花板上的蜘蛛那样.

(树华 编译自 Physics Web News , 20 April 2004)

封面说明

在芽殖酵母(budding yeast *Saccharomyces cerevisiae*)的细胞周期过程中,大约 800 个基因的表达水平有明显的变化.是什么机制保证该过程中大量基因的准确调控,并顺利完成 DNA 复制(S 期)、纺锤体(spindle)的形成定位及有丝分裂(mitosis)的复杂有序的细胞周期过程?

北京大学理论生物学中心汤超教授、欧阳颀教授、李方廷、龙涛和吕莹,从系统生物学水平上研究了酵母细胞分裂过程的蛋白质网络动力学性质,发现细胞的生物学 G_1 定态在动力学意义上是一个全局稳定态,它具有很高的抗干扰能力,细胞分裂的生物学路径是全局稳定的路径,任何偏离该路径的趋势都会被自动加以修正.

虽然酵母细胞周期过程中涉及到 800 多个不同基因的表达,但该过程调控网络中的关键蛋白主要有以下 3 大类: cyclin/Cdc28 复合物(Cln1₂, Clb5₆ 和 Clb1₂), 转录因子(MBF, SBF, Mcm1/SFF 和 Swi5)和 cyclin/Cdc28 复合物的抑制蛋白与降解蛋白(包括 Sic1, Cdh1 和 Cdc20/APC), 加上一些重要的检查点(checkpoints). 细胞周期过程的主要调控网络为图中左下角的相互作用网络,网络中的绿线表示蛋白质间的激发或活化作用,红线表示蛋白质间的抑制或去活化作用,为简化起见,网络中略去了蛋白质的自降解作用.

可以利用简单的离散动力学模型研究该网络的动力学性质,蛋白质只取活化与未活化 2 种状态.图中显示了最终演化到 G_1 基态(图下部的蓝色大圆点)的初始蛋白质状态(图中的绿色圆点)的全部演化路径,可以发现,初始蛋白质状态首先演化(图中用单向箭头表示)到细胞周期路径(中央的蓝色路径)上来,然后沿着细胞周期路径逐步到达稳定态—— G_1 基态.这意味着不仅 G_1 基态是一个全局性的稳定点,而且从 G_1 激发态到 G_1 基态的细胞周期路径同样是一个全局性的稳定的动力学路径,即蛋白质网络通过长期的进化,其动力学性质具有双重稳定性.进一步的研究表明,这些动力学性质对于以下扰动也是基本稳定的: 变换相互作用的性质、变化其强度、删除部分相互作用或在相互作用规则中加入随机项等.而一般的随机网络,出现以上双重稳定性的概率只有 0.0025.

即使在外界和内部扰动下,以上动力学稳定性也能够保证网络对酵母菌细胞周期过程中多基因的准确调控, G_1 期、S 期、 G_2 期和 M 期的顺序完成.这个发现使人们从动力学角度对细胞周期过程有了更深刻的认识.他们的研究工作发表在 2004 年 4 月 6 日的美国国家科学院院刊上(PNAS , 101 : 4781), 简介见《物理》32 卷 678 页.

(北京大学理论生物中心 物理学院 李方廷)