

# 物理学与地球科学

徐美<sup>1</sup> 徐文耀<sup>2,†</sup>

(1 北京科技大学物理系 北京 100083)

(2 中国科学院地质与地球物理研究所 北京 100029)

**摘要** 物理学与地球科学有着直接的亲缘关系,地球既是地球科学家研究的对象,也为物理学家所关心.地球为物理学提供了广阔的研究天地,物理学为地球科学提供了理论基础和实验手段.两个学科互相依存,互相融合,共同发展.

**关键词** 物理学,地球科学,地球物理学,地震波,地磁场

## Physics and geoscience

XU Mei<sup>1</sup> XU Wen-Yao<sup>2,†</sup>

(1 *Department of Physics, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China*)

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

**Abstract** A close relationship exists between physics and geoscience. The Earth is studied by geoscientists, and also by physicists. The Earth opens a wide field for physical studies, and physics, in turn, supplies the theoretical background and experimental tools for geoscience. The two disciplines depend on each other for existence, combine with each other, and develop together.

**Keywords** physics, earth science, geophysics, seismic wave, geomagnetic field

### 1 物理学家兼地球科学家

既是著名的物理学者,又在地球科学上作出了重大贡献,这样的科学家在古今中外科学史上不胜枚举.国外早期有伽利略、吉伯等,近代有韦伯、伯克兰、杰弗瑞斯、布莱克特、布拉德、查普曼、阿尔文等,中国现代有赵九章、傅承义等.

W·吉伯(Williams Gilbert, 1544—1603),英国著名的物理学家,生活在资本主义开始萌芽和近代科学开始发展的时期,与伟大剧作家莎士比亚同时代.他研究领域广泛,既是物理学界公认的磁学奠基人,又是伊丽莎白女皇的御医.1600年,他的《论磁体》一书用拉丁文在英国出版(原书名为拉丁文 *De Magnete*, 英文译名 *On Magnet*)<sup>[1]</sup>,6卷115章,卷帙浩繁,总结了大量磁学实验结果,堪称磁学的经典巨著,被伽利略赞誉为“伟大到令人嫉妒的程度”.这本书虽然比哥白尼的《天体

运行论》(1543年)晚了半个世纪,但是,比牛顿的《自然哲学的数学原理》(1687)、莱伊尔的《地质学原理》(1833)、达尔文的《物种起源》(1859)等经典著作却要早得多.电磁学高斯单位制中的磁位单位“吉伯”就是以他的名字命名的.这本书也是地磁学的经典之作,标志着地磁学由单纯的观测走向理性思辨的新阶段.吉伯把分散地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,描绘在统一的地球模型之中,结果发现,地球表面磁场的分布与位于地心的条形磁铁所产生的磁场非常相似(图1的下图左).根据地磁场分布的这种特征,吉伯又顺理成章地向前走了一步,指出地磁场起源于地球内部的磁性,提出了地磁场起源的第一个科学假说:“地球是一个大磁体”,于是,隐藏在纷繁现象后面的规律被揭示了出来<sup>[2]</sup>.他还首次用磁石

2010-07-12 收到

† 通讯联系人. Email: wyxu@mail.igcas.ac.cn

做成的“小地球”模型演示了磁场倾角分布随纬度的变化。300 多年以后,正是依据这一变化规律,诞生了一门新的学科——古地磁学。为了纪念吉伯奠基性的贡献,古地磁年表中的“吉伯反向期”(距今 340 万年以前的一段地磁极性反向时期)用他的名字来命名<sup>[3]</sup>。

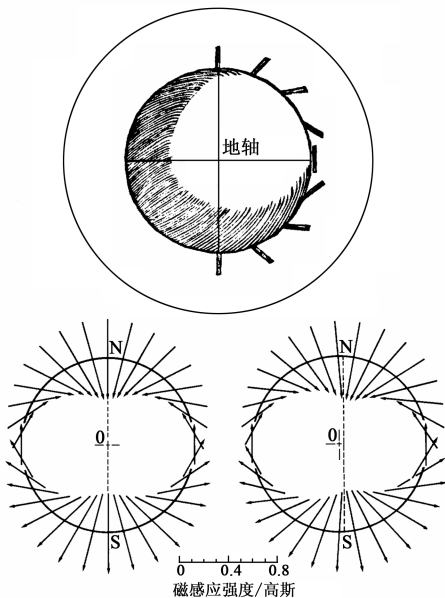


图 1 吉伯“小地球”模型上磁倾角随纬度的变化(上图)和现今地磁场矢量在地表的分布(下图)

K·伯克兰(Kristian Birkeland, 1867—1917),著名的实验物理学家。他生长在地处高纬度地区的挪威,经常可以看到绚丽的北极光,这一自然景观激发了伯克兰浓厚的研究兴趣,他开始系统地观测极光,并发现极光出现时总有地磁扰动相伴随。1908 年,他将“阴极射线”(电子束)射向荧光涂面的磁化小球。他注意到,电子并非直线前进打到赤道地区,而是在磁场中发生偏转,集中流向小球的极区,在极区的荧光涂层上观测到类似于地球极区天然极光的现象(图 2(a))。伯克兰认为,天然极光是太阳发射的电子冲击大气的结果。半个世纪以后,卫星观测完全证实了伯克兰根据实验作出的猜想(图 2(b))。

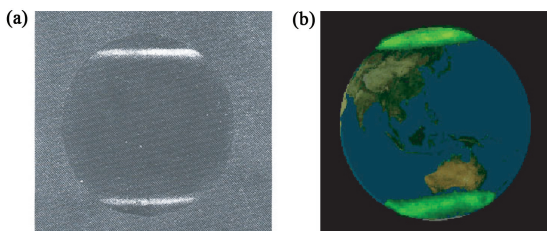


图 2 伯克兰的小地球极光实验 (a) 和现代卫星观测到的极光大带 (b)

在这些实验的基础上,伯克兰进一步提出一个大胆的假设:空间带电粒子可以沿着地磁场磁力线的方向进入高纬度大气层,产生极光,同时电子携带

的电流会引起极区地磁场扰动(现在称之为亚暴)。伯克兰的电流模型与根据卫星观测得到的现代场向电流模型也非常吻合。在数学家庞加莱(Jules Henri Poincaré, 1854—1912)和司笃姆(Carl Störmer)的帮助下,他建立了完整的带电粒子运动和极光电流模型。为了纪念这位伟大的空间物理开创者,现在把场向电流叫做“伯克兰电流”。

英国物理学家 S·查普曼(Sydney Chapman, 1888—1970)创立了求解玻尔兹曼输运方程的 Chapman-Enskog 方法,他的成名之作《非均匀气体的数学理论》(与 T. D. Cowling 合著),是一本不朽的物理学经典名著,先后三版,成为气体动理论的奠基巨著<sup>[4]</sup>。然而,他的主要贡献却是在大气、地磁、空间物理等地球科学的研究上,为此他倾注了大半生的精力,直至去世,是地学界多个领域公认的泰斗级人物<sup>[5]</sup>。他对大气运动和潮汐理论的研究开辟了该领域研究的新方向。20 世纪 30 年代,他以气体动理论为基础,从太阳日冕膨胀的概念出发,预言了太阳风和地球磁层的存在,描述了太阳风与磁层相互作用的物理图像(图 3 左)。20 多年后,这一预言被卫星观测所证实(图 3 右),成为空间物理学最重要的研究基础。他提出的地磁暴理论和空间电流体系经过 80 年的考验,应用至今,并不过时。为了纪念查普曼的卓越贡献,美国大气研究中心主办的“查普曼讨论会”,每年一次,成为国际地球物理界重要的学术论坛。

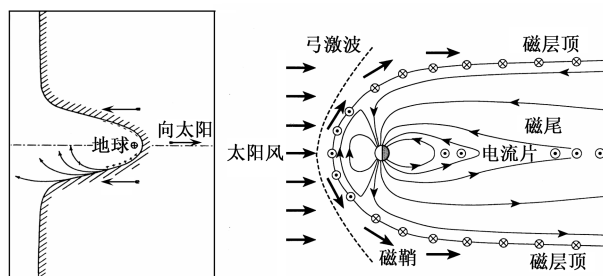


图 3 查普曼磁层构想图(左)和现今常用的磁层示意图(右)

英国剑桥大学卡文迪许实验室是世界著名的物理学研究机构,至今出现过 25 位诺贝尔物理学奖得主,而这里同样有一大批著名的物理学家兼地球科学家:布莱克特、布拉德、舒斯特研究地磁,杰弗瑞斯研究地震,达尔文(进化论创始人 C·达尔文之子)研究地球动力学,维加尔德研究极光,等等<sup>[6]</sup>。

P·布莱克特(Patrick Blackett, 1897—1974),卢瑟福的学生,伟大的物理学家,因在改进 Wilson 云雾室及由此在核物理和宇宙辐射领域取得的发现而获得 1948 年诺贝尔物理学奖。他注意到,地球、太阳和室女座 78 号星的磁矩与转矩之比很接近,于是

提出:由于某个目前还不能解释的物理定律,巨大天体具有与机械转矩成正比的磁矩,以此来说明地球磁场的起源.为了得到实验证明,他专门研制了无定向磁力仪,测量随地球转动的纯金球的微弱磁场.虽然实际测量结果否定了他的假定,但无定向磁力仪却成了古地磁测量的重要仪器.

E·布拉德(Edward“Teddy”Crisp Bullard, 1907—1980),卢瑟福的又一个学生.他受到拉莫尔关于太阳磁场起源假说的启发,从导电流体运动与磁场相互作用的基本物理原理出发,提出了地磁场起源于外地核磁流体发电机作用的假说.经过几十年“百花齐放,百家争鸣”论战,十多种地磁起源假说渐次凋零,而唯有地球发电机假说一枝独秀,成为半个世纪以来地球物理学的主流学说(图4).

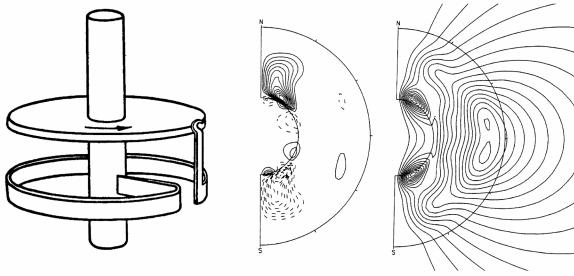


图4 布拉德的地磁发电机原理模型(左)、计算机模拟的地核流体周向速度分布(中)和地磁场线(右)

H·杰弗里斯(Sir Harold Jeffreys, 1891—1989),英国物理学家、天文学家和应用数学家,他的《数学物理方法》(Method of Mathematical Physics)先后发行5版,是一本经典的数学物理著作.同时他也是著名的地球物理学家,他的研究奠定了地震波理论和地球内部结构探测的物理基础.他根据横波不能在流体介质中传播的物理概念,推断2900km以下的地球外核处于流体状态(图5).他与布伦合作编写的地震波走时表是地震波计算的重要依据和标准数据手册.杰弗里斯一生著作等身,完成科学论文300多篇,其中约60篇是关于地震学的研究.

在卡文迪许实验室诸多著名的地球物理学家中,还有鼎鼎大名的C·威耳逊(Charles Thomson Rees Wilson, 1869—1959),他因发明云室而获得1927年诺贝尔物理学奖.其实,威耳逊终生都在研究大气电和雷电问题,直到87岁高龄,还写了《雷云电的理论》的论文呈交英国皇家学会.人们更多地知道他是伟大的物理学家,那只是因为他对物理学贡献的耀眼光辉暗淡了他在地球科学中的成就的缘故.

瑞典物理学家H·阿尔文(Hannes Olof Gosta Alfven, 1908—1995)是等离子体物理学的奠基人,

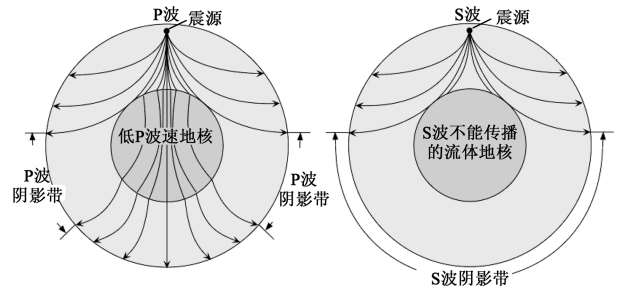


图5 地震波在地球内部的传播.左图是压缩波(P波)射线图,右图是剪切波(S波)射线图.由P波和S波的阴影带可以推测流体地核的存在及其深度

他关于磁流体波(被称作阿尔文波)和冻结磁场理论使他荣获了1970年诺贝尔物理学奖.他提出的磁场中带电粒子运动的“引导中心”概念,为带电粒子复杂运动的描述找到了一种简单而形象的方法.阿尔文的电磁流体理论是当前人们解释太阳风—磁层—电离层耦合等一系列空间现象的基本理论依据,也是磁流体数值模拟的重要理论基础.在讨论介质中信息(或扰动)传播的时候,阿尔文波在空间等离子体中作用就像声波在普通气体中一样重要.阿尔文对地球—月亮系统的起源、地球磁层电流体系、宇宙电动力学和动力学都有非常深入的研究.

我国著名物理学家赵九章先生(1907—1968),1933年毕业于清华大学物理系,在我国率先将数学物理方法引入大气科学,积极推动大气科学的物理研究,是我国动力气象学和天气—气候预报的奠基人<sup>[7]</sup>.他远见卓识,早在上世纪60年代就上书周恩来总理,提出发展我国卫星事业的建议,是我国空间探测的开创者和“两弹一星”元勋.同时,他创建研究室,开设专业课,培养新生力量,开拓了磁暴和空间物理研究,使我国在这个刚刚起步的空间科学领域占有一席之地.现在,空间探测和研究已经成了世界各国科学界、实业界,乃至国防部门竞相角逐的一个热点.

我国著名地球物理学家傅承义先生(1909—2000),1933年毕业于清华大学物理系,在加拿大取得硕士学位后转到美国,师从著名地球物理学家古登堡,古登堡的老师就是鼎鼎大名的世界第一位地球物理学教授维舍特.1942年,傅承义将电磁波传播理论移植于弹性波传播的研究,证明地震波在地球介质传播过程中,沿速度分界面存在一种特定的波——“首波”,为地震波研究和数值模拟奠定了理论基础,他的早期研究论文被国际学术界推崇为地震学经典著作<sup>[8]</sup>.

我们还可以列出一个长长的物理学家兼地球科学家名单.要理解这种现象,必须从物理学与地球科



学之间不可分割的亲缘关系谈起。

## 2 物理学家眼中的地球

追根溯源,物理学家与地球科学家的亲缘关系源于物理学和地学这两门学科在研究对象、研究内容、研究方法以及认识论等方面的共同性。

《中国大百科全书》对物理学有如下定义:“物理学研究宇宙间物质存在的各种主要的基本形式,它们的性质、运动和转化以及内部结构;从而认识这些结构的组元及其相互作用运动和转化的基本规律”,据此我们可以了解物理学的基本内涵。通俗地讲,物理学的“物”是指自然界的物质,“理”是指物质运动变化的规律。中国人早就用“格物致知”来概括西方新学——物理学——的内涵,既达又雅,只是长了一点,又是双重的“动宾结构”,用作学科名字似不习惯。日本人用“物理”一词来标识这门学科,后为中国学术界采用。事实上,中国早就用过“物理”一词,泛指天地之间万事万物之道理,可理解为“大物理”。乾隆皇帝御笔亲书的“物理”对联至今仍保留在北海公园琼岛八角亭里的八角立柱上(图6)。



图6 北海公园琼岛的八角亭内乾隆皇帝亲书的“物理”对联

物理学研究的对象是物质,小到分子、原子、基本粒子,大到地球、太阳、宇宙,还有目前了解甚少的暗物质和暗能量。无论是理论物理学,还是实验物理学,都要对研究对象作或多或少的简化和假设。对待地球同样如此。在物理学家看来,地球和其他研究对象一样,是一个有质量、有能量、有结构、有运动变化的物体。在不同场合,物理学家对地球作不同的近似处理:万有引力定律控制着苹果落地,也控制着地球的绕日运动,在这里,地球被当作质点看待;角动量守恒定律控制着芭蕾舞演员的旋转,同样也控制着地球的自旋运动,在这里,地球被近似当作旋转刚体;弹性理论预言了地震波如何在地球内部传播,如何在速度不同的分界面上反射、折射,在这里,地球被当作弹性介质;

外地核的物质在高温高压条件下,呈高电导率流体状态,可以近似假设为理想磁流体,使阿尔文的“磁冻结”假设基本适用,从而大大简化了地磁发电机理论。而地幔对流、海底扩张、板块理论则要求考虑地球介质的流变特性。至于地球大气和海洋,更是广阔的流体动力学实验室。由此可见,地球为各个领域的物理学家提供了海阔天空的活动舞台,难怪有那么多的物理学家对地球感兴趣,竞相研究。

在物理学家看来,地球还有另外一个不可替代的重要特点,这就是地球磁层提供了一般实验室内无法实现的特殊实验条件:大尺度、高真空、微重力、强辐射等等。等离子体物理的一些实验在空间狭小的实验室内几乎无法进行,而地球磁层空间和行星际空间则提供了理想的大尺度天然实验室。带电粒子的三种寝渐运动(绕磁场线的回旋运动、沿磁场线在两镜点之间往返的反弹运动、绕地磁场轴的周向漂移运动)只有在地磁场这样大的尺度上才可观测(图7);太阳风中的等离子体激波只有在日地之间的行星际这样的大尺度空间才表现得淋漓尽致;在实验室内难以实现的“无碰撞等离子体”状态在地球空间和宇宙空间随处可见。地球空间的真空度要比现在实验室能达到的最好的真空度还要好;而地球辐射带稳定而强大的辐射环境更是地面实验室难以实现的特殊环境。至于微重力环境和失重状态下的物理实验,地球空间也是难得的天然实验室。

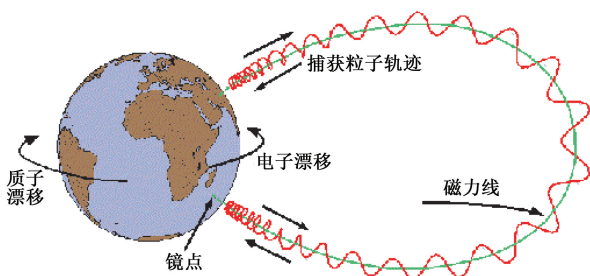


图7 地球辐射带带电粒子的三种寝渐运动

在物理学家看来,地球这个客体还为物质相互作用提供了重要证据。物理学认为,物质的运动变化是物质内部及相互之间有力作用的结果,物理学把自然界的力归结为四种:万有引力、电磁力、强相互作用力和弱相互作用力,这是物理学研究的主要内容,将这些力统一到“粒子交换”这样一种理想图像则是物理学孜孜以求的目标。地球既是显现万有引力和电磁力这样的宏观力作用的场所,又处处体现着强相互作用力和弱相互作用力的结果。

物理学把能量视为一切物质的基本属性,动能、势能、热能、电磁能、化学能等等不同形式的能量决

定着物质运动变化的基本方式和形态,爱因斯坦的质能公式  $E=mc^2$  更为简洁地表达了“万物皆有能”这一普遍属性.而地球的固体圈、水圈、大气圈和更为广袤的地球空间充分演示着各种不同形式能量的转换过程:地震是岩石形变能逐渐积累和突然释放的过程,磁暴是太阳风动能通过磁重联进入磁层转换为电磁能而释放的过程;大气运动是太阳热辐射能驱动的结果;地核深部物质化学能的释放驱动了地核流体运动……丰富无比的能量过程使物理学家特别看重地球这一研究对象.

物理学中的基本原理也就是地球科学中的基本原理,它更是多种多样地球物理探测方法的理论依据.地球的自转、公转与晃动,大气与海洋的潮汐运动,地球重力场(地表的和地球内部的)的分布,都由力学定律控制.人们根据阿基米德浮力定律推测出山脉之下有“山根”,山越高,山根向下延伸得越深.由放射性元素的衰变规律(半衰期),地学家发明了测定岩石年龄的方法.地磁场测量常用的质子旋进磁力仪是根据带电粒子(质子)在磁场中做拉莫尔旋转的物理原理设计的;而光泵磁力仪所依据的物理原理是塞曼效应,即光线通过磁场时发生谱线分裂,分裂的距离正比于磁场强度.电磁感应原理被用来探测地球内部电磁性质和探矿,地震波在地球内传播基本上就是一个弹性波问题.

与古希腊的思辨哲学不同,现代物理学的基石是实验观测,理论思辨必须建立在观测实验基础之上.正是这样,伽利略、牛顿等对运动与力的关系才会有全新的认识.即使是相对论、量子力学这样高度思辨性的命题,最终离不开观测验证.地球科学更是实验科学,检验任何模型真伪与对错的唯一标准是观测事实.

物理学充分应用数学工具,在实验事实的基础上,采用归纳和演绎的方法,用数学公式定量地表达物理学规律.一些卓越的贡献正是在这一追求中产生的.比如,20世纪20年代薛定谔在瑞士苏黎世高工工作时,曾受德拜委托介绍德布罗意物质波的思想,德拜听后并不满意,建议说:既然是波,总得有个波动方程吧.正是这一建议,促使薛定谔建立了波动力学,成为与海森伯矩阵力学等价的另一种量子力学表述.这一理念也逐渐深入地球科学,使原来偏重形态描述的学科逐渐趋近物理学的定量表述.

### 3 地球科学家手中的物理学

地球物理学是用物理学的原理和方法研究地球

的组成、运动和演化规律的科学.这概括了地球物理学的主要内容.地球物理学研究的范围包括固体地球、海洋、大气、地球环境、行星际空间,真可谓“上穷碧落下黄泉”,仅固体地球物理就包括地震、地磁、地电、重力、地热等不同分支学科.

现在公认,地球物理学归属于地球科学.但从发展历史上看,开地球物理研究先河的不是地学家,而是一批已经卓有成就的物理学家.卡文迪许实验室就是这门学科的摇篮.在这一点上,它不同于有着类似名称的其他学科,如生物物理学.

19世纪晚期以前,还没有“地球物理”这个词汇,1898年,德国格廷根大学的维舍特(Emil Wiechert, 1861—1928)成为世界第一位地球物理教授.在卡文迪许实验室,地球物理学在悄然孕育发展,生长成形.在19世纪晚期到20世纪早期的卡文迪许实验室,竟然有那么多的研究人员、访问学者和学生转而研究地球物理,并因此而成名,其中就有前面提到的杰弗瑞斯、布莱克特、布拉德、舒斯特、威耳逊.也许,在他们的眼中,地球这个物体理所当然物理学研究对象,并未想到开创什么新学科.

地球物理学一经出现,立即显示了它强大的生命力和前景,成为地学领域新的重要分支学科.地球物理学有坚实的物理原理为背景,有强大的物理实验技术作工具,有逻辑严密的数学用来推演和表述地球性质与过程,使过去关于地球的很多定性描述得以量化,地球科学家对地球的结构和过程有了新的更深入的理解.

在地球物理学家看来,物理学原理和定律是研究的基础和依据,更是有力的研究工具.如果说物理学家的主要研究目标是提出物理学原理,发现物理定律,则地球物理学家更关注物理原理和定律的实际应用和检验,用物理手段探索地球的未知,证明有关地球的假说.

电磁学的原理和定律经过奥斯特、安培、法拉第等一代又一代先驱们的实验观察和理论思考,最后由麦克斯韦创造性地总结和归纳成麦克斯韦方程组,形式完美和谐,几乎放之四海而皆准.1839年,德国著名数学家高斯(Johann Carl Friedrich Gauss, 1777—1855)根据无源磁场空间标量磁势函数满足拉普拉斯方程的性质,得到磁标势的完全解,这个解可以写成内源磁场和外源磁场两部分之和;内源场是偶极子磁场和多极子磁场之和,外源场也可以写成类似的级数.高斯用当时可以得到的资料计算了内、外源磁场的组分和量值,他发现,地磁场的偶极子分量占绝对优势;他还发现,与



内源场相比,外源场可以忽略不计.这表明,地磁场主要起源于地球内部,而且磁场分布类似于地心磁偶极子产生的磁场.这一结论看起来与三百多年前吉伯的猜想不谋而合,但高斯的结论是建立在严格的电磁场理论之上的,也可以说是对吉伯假说的证明.高斯利用已有的电磁理论,实现了人类对地磁场认识的一次大飞跃,奠定了近代地磁学的数学基础.

地震波传播的研究是力学中弹性波理论应用的一个杰出范例,它把该理论演绎得淋漓尽致.震源发出的弹性波有压缩波和剪切波,它通过非均匀的地球介质传播,在速度分界面上发生反射和折射,形成了多种形式的转换波以及沿地球表面传播的瑞利面波和勒夫面波.这些波以不同速度传播,到达地震台,记录下来,就是一组接一组的波包,叫做震相(参见图5).分析不同台站、不同震相的传播时间(俗称“走时”),就可以确定发震时刻和震中位置,由波动振幅大小可以估计地震的能量(震级).由于波速决定于介质密度和弹性系数,所以由地震波可以推测地球内部密度分布和物性的变化.由地核无横波传播的事实,推测地核处于液态,它不能为横波传播提供恢复力.更进一步,还可以通过地震波的衰减与吸收特性,推测地球的非弹性.此外,由地震波到达地震台时记录到的初始运动方向(初动方向)和其他信息,可以得到震源机制参数(断层的走向、倾角以及断层错动方向).地球深部虽然不可到达,但是,地震波把许多深部信息携带出来.所以,对于地球物理学家来说,地震犹如一盏照亮地球内部的灯.

照亮地球内部的不只是地震,还有地磁场.在这里,地球物理学家应用电磁学理论,收获颇丰.地磁场与地球内部电流有关,而电流又与地球电性和运动状态有关.人们不可能直接看见形成地磁场的地核发电机过程,但是地磁场并不局限在地核内部,而是向上扩展到地球表面以及地表以外的广阔空间,这里正是我们观测台站和卫星火箭可以大展身手的地方.对磁场的连续观测可以持续几年,几十年,甚至几百年,地磁场的长期变化把地核过程间接地显示在我们眼前.地表磁场变化图案是地核流场的映像,所以,由地磁场的变化可以了解地核流动状态的变化和动力学过程.如果说地震波以几秒到几分钟的周期“摇撼”地球,从而揭示地球结构,那么,地磁场则是以几年到几十年的周期“摇撼”着地核,揭示了地核结构<sup>[9]</sup>.此外,地壳磁性岩石会在地表产生磁异常,由此发展出磁法勘探,可用来找矿和了解地下结构;地电流趋向于沿高电导区流过,由此发展出电法勘探的多种技术,在油气和矿产资源

开发中发挥着巨大作用.

照亮地球内部的还有一盏灯,那就是重力场.在这里,地球物理学家应用引力理论,研究重力场分布与地球内部物质密度的关系.

此外,热力学、放射学等物理学方法也在地球科学的研究中发挥着巨大的作用.例如,用地层的上下顺序只能得到相对的地质年龄,而放射性同位素的半衰期则提供了测定岩石绝对年龄的途径.

然而,地学家在应用物理学定律时,并非总是一帆风顺.在处理复杂地球现象的时候,面对的不是可控制和可调节的物理实验室条件,而是多种因素、多种过程混杂在一起且无法分离的大系统,此时,地学家往往很难简单地利用现成的物理定律和现成的数学公式.地学家遇到的另一个困难是观测资料的不足.地球表面并非处处适合于观测,早期的资料尤其匮乏,这就使求解方程时没有合用的边条件和初条件,不完整的边条件会使微分方程求解变成“不稳定性”问题,导致解的不唯一性,即出现多解.而从不同的初条件出发,同样的方程得到不同的解答.现代卫星观测虽然大大改善了观测,但是一颗卫星只能沿固定轨道飞行,难于分离时间变化和空间变化,它所得到的地面图像是“蒙太奇”式的拼轨图,不适用于快速变化的现象.卫星组可以在一定程度上改善这种局面,但其效果十分有限.不得已,人们只好采用一些假设,而这又不可避免地引来假设是否正确有效的质疑.

总而言之,物理和地学相结合,已经和正在产生许多重大的突破.但是,存在的问题还很多,要走的路还很长.知识永无止境,探索也永无止境.

## 参考文献

- [1] Gilbert W. On the Magnet. London: Chiswick Press, 1600
- [2] Chapman S, Bartels J. Geomagnetism. Oxford: Clarendon Press, 1940
- [3] Stern D P, Peredo M. The Exploration of the Earth's Magnetosphere. <http://www-spf.gsf.nasa.gov>
- [4] Chapman S, Cowling T G. The Mathematical Theory of Non-uniform Gases. London: Cambridge University Press, (the first edition 1939, the second edition 1952, the third edition 1970)(中文译本:查普曼 S, 考林 T. G. 著, 刘大有、王伯懿译, 陆志芳校. 非均匀气体的数学理论. 北京: 科学出版社, 1985)
- [5] Kamide Y, Chian A C L. Handbook of the Solar-Terrestrial Environment. Springer, 2007
- [6] Good G A. Physics Today, 2010(7):42
- [7] 叶笃正. 赵九章纪念文集. 北京: 科学出版社, 1997
- [8] 地球物理学会. 纪念傅承义先生诞辰 100 周年文集. 北京: 地震出版社, 2009
- [9] Holme R. Nature, 2009, 459:652