

当代磁学及其若干新进展

李国栋

(中国科学院物理研究所, 北京 100080)

摘要 综合评述了当代磁学(广义磁学)的主要内容及其若干新进展. 当代磁学包括磁学基本物理问题的基础磁学, 磁性材料的分类和多种重要磁特性的材料磁学, 磁性材料、磁性器件和磁技术在高新技术、生产和生活中各种应用的应用磁学, 以及磁学与其他学科互相交叉的边缘磁学, 也称交叉磁学. 介绍的边缘磁学有生物磁学、微观磁学(原子核磁学和基本粒子磁学)及宇观磁学(宇宙磁学).

关键词 基础磁学 材料磁学 应用磁学 生物磁学 微观磁学 宇宙磁学

磁学是一门古老而又年轻的学科. 说它古老, 是因为在遥远的古代, 就有了如磁石吸铁和磁石磁针指示南北方向等物质强磁性的观察和应用, 地球北极光和太阳黑子等自然磁现象的观察和记载. 我国古代在磁学领域中曾有多方面的重要贡献, 例如, 指南针的最早发明和应用, 北极光和太阳黑子的最早最多的观察和记载, 等等^[1]. 说它年轻, 是因为在当代的许多自然科学和高新技术中, 都涉及当代广义磁学的研究和应用^[2]. 这里将以基础磁学、材料磁学、应用磁学和边缘磁学为例介绍当代广义磁学的若干新进展和新应用.

1 基础磁学

磁学的长期发展充分表明, 任何物质都具有或强或弱的磁性, 任何地方都存在或高或低的磁场. 因此包括磁性和磁场的磁现象是普遍存在的, 磁应用十分广泛^[2].

物质磁现象是普遍存在和多种多样的. 从磁性看, 大多数物质仅具有弱磁性, 包括抗磁性、顺磁性和反铁磁性, 而只有较少的物质具有强磁性, 包括铁磁性和亚铁磁性. 长期以来, 研究和应用最多、磁性十分复杂和多样的, 正是强磁性. 从历史发展看, 最早观测、研究和应用的强磁性是铁(Fe)、钴(Co)、镍(Ni)及其合金和化合物的强磁性, 接着发展到铁族元素(3d 电子族元素)的强磁性和序磁性^[3]. 序磁性是指原子磁矩作简单或复杂的有序排列的铁磁性、亚铁磁性和反铁磁性. 后来又发展到稀土族元素(4f 电子族元素)及其合金和化合物的强磁性和序磁性. 这样不但发现了多种的直线型、非直线型、螺旋型和其他型的磁(矩)有序结构, 而且开拓了多种新型(强)磁性材料, 例如几代的高性能的稀土永磁材料和巨磁致伸缩材料的研究和应用^[2,3]. 最近新开展的关于镧(La)族元素(5f 电子族元素)及其合金和化合物的磁性, 特别是其中的磁有序结构的发现和研究更受到注意^[3]. 在该族元素中, 大多是具有放射性和短寿命的人造元素.

当代磁学的一个重要新进展, 是将强磁性和序磁性从无机物扩大到有机物, 还进一步扩大到生物材料. 在 1980 年以前, 强磁性和序磁性都是在无机物质中观测到的. 当时的磁学理论也认为, 强磁性和序磁性产生的必要和充分条件是物质中存在原子磁矩(即原子中存在未抵消的电子自旋磁矩), 及原子磁矩(电子自旋)间存在强的具有量子力学特点的交换作用. 能满足这样条件的一些过渡族元素是一些铁族元素和稀土族元素以及它们的合金和化合物. 但是后来先后在一些过渡族元素如铁的有机物和一些完全不含金属元素的纯有机物如聚三氨基苯、聚 BIPO[聚 1,4-双(2,2,6,6-四甲基-4-羟基-1-氧自由基呱啶)丁二炔]等中观测到具有强磁

性、Curie 温度可高达 300℃或更高的强磁特性,还在 C_{60} 系团簇化合物 C_{60} -TDAE(C_{60} -四-二甲氨基-1,2 亚乙基)中观测到与巡游电子铁磁体相似、Curie 温度约 17~24 K 的强磁现象,表明一些纯有机材料也会具有强磁性.此外,在一些生物体中,也观测到含 Fe_3O_4 强磁物质,和一些蛋白质在低温下出现磁有序现象.这些都既扩大了强磁性和序磁性的领域,也在其产生机制上出现了新情况^[2,4,5].

在当代物质磁性的研究和应用中,除了常见的宏观磁性和微观磁性以外,由于研究的深入和应用的扩大,以及相邻学科和高新技术的发展,还出现了新的介观磁性的研究和应用.顾名思义,介观磁性是介于宏观磁性与微观磁性之间的具有其特点的磁性.介观磁性是介观物性中的一种.介观物性是在物质的尺度等于或小于其相位相干长度而大于原子和分子的尺度情况下出现的,而相位相干长度则是指物质中载(电)流子非弹性散射的平均自由程,其大小与物质的种类、状态和温度等因素有关,一般约为 $1 \sim 10^2$ nm.介观磁性主要包括介观磁效应和纳米(强)磁性材料.已有研究的介观磁效应有介观磁电阻 h/e 周期振荡效应(常称 AB 效应)、介观磁电阻 $h/2e$ 周期振荡效应(常称 AAS 效应)、介观磁电阻涨落效应、介观磁电阻非线性效应和介观量子 Hall 效应等.同介观磁性密切相关的是纳米(强)磁性材料,包括 3 个维度中的一个或二、三个尺度在纳米级的纳米磁膜、纳米磁丝、纳米磁颗粒及由它们构成而保留纳米磁特性的磁性材料,它们是目前功能多样和应用广泛的新磁性材料^[2,6~8].

2 材料磁学

磁学的一个重要分支是材料磁学.一般研究最多、应用最广的是强磁性材料,常简称磁性材料.当代磁性材料种类繁多,新材料更是层出不穷.

在出现和应用都很早的永磁材料和软磁材料中,当代便出现了几代新的稀土永磁材料和性能优越的非晶和纳米软磁材料.永磁材料是经过强磁场磁化以后能长期保留其剩余强磁性的材料,也是历史上最早发现和应用的强磁材料.第一、二、三代稀土永磁材料分别为 $SmCo_5$ 系、 Sm_2Co_{17} 系、Nd-Fe-B 系,其最大磁能积均远超过其他的永磁材料,而且还一代超过一代,“系”是指材料的组元可部分为其他化学元素所替代.我国稀土矿储量约占世界已探明储量的 80%,也是目前生产稀土永磁材料的大国之一^[2,9].软磁材料是现代电力工业和电子工业用量大和用途广的一大类磁性材料.当代新发展的非晶软磁材料和纳米软磁材料,其软磁性能好、损耗低,正在解决大量生产的工艺问题,是对传统软磁材料的一大挑战^[2,10].

信息磁性材料,简称信磁材料,是当前信息时代有着重要和广泛应用的多类磁性材料的统称.信磁材料在当代电子计算机(电脑)、微波和卫星通信以及光通信等高新技术中都有着重要的应用.半个多世纪以来,电子计算机技术发展迅速,但是磁带、磁盘和磁鼓等磁记录材料和磁头材料仍始终获得应用.在不同时期和不同情况下,磁芯和磁膜存储器也有着重要的应用.还有在研究发展中的磁泡存储器、Bloch 磁畴壁存储器、磁光存储器和巨磁电阻存储器等所需要的多种信磁材料,都是当代新磁性材料的研究重点^[2,11,12].在雷达、导航、卫星通信和电子战等高新技术中,具有非互易性的微波磁隔离器和磁环行器所使用的微波磁性材料,由于波段的扩展和用途的增多,使这种信磁材料的种类和特性等有了许多新的发展,如高内场和低内场的微波磁性材料的研究和应用^[2,11,12].为了扩大信息容量,光电子学和光子学技术正在迅速发展.这些新技术所需要的光学非互易器件如光隔离器和光环行器等自然推动了新磁光材料的发展

[2,11,12]

多功能磁性材料和智能磁性材料的研究和应用是适应当代多种高新技术的需要和相关学科的进步而发展起来的. 多功能磁性材料是指同时具有其他物理功能和磁性功能的材料. 智能磁性材料则是指同时具有对外界环境的感知、反馈和响应(或称执行)功能的磁性材料, 因为同时具有这几种功能而类似于人的智能, 所以这种磁性材料被称为智能磁性材料. 目前已观测到多功能磁效应的磁性材料主要有以下几种: (1) 磁场能产生电通密度和电场能产生磁通密度的磁-电材料, 如 GaFeO_3 和 DyAlO_3 等; (2) 具有电矩有序和磁矩有序的铁电-铁磁或序电-序磁材料, 如 BiFeO_3 - $(\text{Ba}, \text{Pb})(\text{Ti}, \text{Zr})\text{O}_3$ 等; (3) 同时具有高载流子迁移率和磁矩有序的超导-强磁材料, 如 EuO 和 ZnCr_2S_4 等; (4) 同时具有透光和磁矩有序的透光-强磁材料, 如 FeBO_3 和 KFeF_3 等; (5) 同时具有超导电性和磁矩有序的超导-强磁或超导-序磁材料, 如 ErRh_4B_4 和 Gd-Ba-Cu-O 系材料等^[2,13]. 已经观测到具有形状记忆的磁性智能材料有 Ni-Ti 和 Ni-Al 等合金, 例如已经利用 Ni-Ti 形状记忆合金研制成可应用于宇宙飞船的大小和形状可改变的无线电通信天线^[14].

3 应用磁学

物质磁性在当代的应用是十分重要和广泛的. 从物理、化学、生物学、地学等基础科学到宇宙演化、生命起源和物质结构等重大科学问题, 从电气化、电子化到信息、能源、材料高新技术都涉及到各种各样的磁应用. 这里仅以当代磁电子学、磁共振和磁谱仪为例来说明当代磁学的若干新应用.

磁电子学是 20 世纪后期才兴起并得到迅速发展和重要应用的新学科. 它是研究和应用磁有序材料中原子磁矩(自旋)的有序排列与电子运动的相互作用和相互影响的科学技术, 有时也称自旋电子学. 目前磁电子学的主要研究内容及其应用有超过一般磁电阻效应的巨磁电阻效应和更高的庞磁电阻效应、有巨磁电阻金属三极管和巨磁电阻半导体三级管、有利用巨磁电阻效应的应用于高速高密度磁记录的小型甚至微型的读出磁头和磁传感器, 以及正在研究的几种自旋阀随机存储器. 这种自旋阀随机存储器具有非易失性、抗辐照、存储密度高和存取时间短等优点, 因而将是对目前广泛应用的半导体随机存储器的重大挑战^[15].

磁共振是当代磁学研究及应用中涉及面广和应用极多的一个方面. 一般说来, 磁共振是物质中磁矩(自旋)系统在一定的恒定磁场和高频磁场同时作用下, 当恒定磁场强度和高频磁场频率满足一定的定量条件时, 这一磁矩系统对高频电磁场产生最大吸收的现象. 这类磁共振包括顺磁共振(又称电子自旋共振)、铁磁共振、亚铁磁共振、反铁磁共振、核磁共振和磁场作用下的 Mössbauer 效应(又称核 γ 共振). 广义磁共振还包括物质中电子电荷和离子电荷在一定的恒定磁场和高频电场同时作用下, 当恒定磁场强度和高频电场频率满足一定的定量关系时, 这一电荷系统对高频电磁场产生最大吸收的现象, 被称为回旋共振或抗磁共振. 这些磁共振不仅是当代研究物质微观结构、动态特性和弛豫过程的重要实验方法, 而且也在微波电子学和磁共振 CT(计算机化断层成像)等高新技术中得到重要的应用. 例如, 目前核磁共振谱仪已能测量近 90 种化学元素的核磁共振, 磁共振 CT 技术已从氢原子核扩大到碳、硫、磷等原子核, 从核磁共振成像扩展到电子自旋(如自由基)共振成像^[2,16,17].

磁谱仪是利用磁场和相关仪器对运动的带电粒子径迹的影响和鉴别来测定各种带电粒子

的电荷符号、电荷量、质量和运动速度等的科学仪器,它在各种高能加速器中有着不可缺少的重要应用.特别是1998年阿尔法(α)磁谱仪(AMS)初次进入空间进行关于反物质和暗物质等的试验性探寻探测,并将在21世纪初再进入空间作较长期(约2003~2007年)的探寻探测.阿尔法磁谱仪是由诺贝尔物理学奖获得者华裔美籍物理学家丁肇中教授领导的一个大型的国际合作科学实验项目,包括美国和中国等10多个国家参加科研工作,中国负责其中由Nd-Fe-B稀土永磁铁构成的大型磁场系统的设计、制造和试验工作以及其他工作.这是人类送入宇宙空间的第1个大型磁谱仪,主要用于探寻反物质和暗物质,也可探测磁单极子等.这些都是宇宙物理、物质结构和宇宙演化中的重大问题^[2,18].磁谱仪和其他强磁场装置都是各种高能加速器中的重要设备,例如我国的北京正负电子对撞机、兰州重离子加速器和合肥同步辐射加速器等都有这方面的应用.因此强磁场的研究、设计、制造和应用也是当代磁学的重要组成部分^[2,19].

4 边缘磁学

当代自然科学和高新技术的发展,为各学科之间的边缘科学的兴起和发展提供了条件;而边缘科学又丰富了自然科学的内涵和高新技术的应用.边缘磁学的兴起和发展也正是这样.

生物磁学虽是一门古老的边缘科学,但是当代生物磁学的发展却大大扩充了它的内容和应用.例如,生物自身产生的微弱磁场(生物磁场)和外磁场(包括外加磁场和环境磁场)对生物的影响(磁场生物效应)的研究和应用,磁技术在生物学和医学上的应用(生物磁技术),都是当代生物磁学的新发展.这些新发展开创了不少重要的新应用.例如,人体组织和生命活动会产生心磁场、脑磁场和肺磁场等,由此可测得心磁图、脑磁图和肺磁图.心磁图、脑磁图比相应的心电图、脑电图具有无接触干扰、交直流均可测量、可作三维测量和分辨率高的优点,因而可提高一些疾病的确诊率.又例如,核磁共振CT技术可检测人体组织的成分浓度分布,生理病理状态和智能活动等,在几种CT技术中具有其独特的优点^[2,20,21].

前面讲到的当代磁学除一处提到介观磁学外,其他均属于宏观磁学.下面将简略介绍微观磁学和宇观磁学的若干新进展.微观磁学这里主要介绍核磁超低温致冷和核磁矩有序,以及若干基本粒子磁性和磁单极子.

原子核由于其质量远比电子质量大,故其磁矩就远比电子磁矩小.核磁性的应用除前面已介绍的核磁共振及其成像外,还有利用同顺磁绝热退磁致冷的相似原理和方法,可使原子核磁矩系统降温到毫开(10^{-3} K)级甚至纳开(10^{-9} K)级的极低温度.例如,已经使固态氦核(^3He)系统温度降低到约 10^{-3} K,使铜原子核(^{63}Cu , ^{65}Cu)系统温度降低到约 10^{-6} K,甚至降低到 2×10^{-9} K.在这样的极低温度下已经观测到 ^3He 原子核和铜原子核的磁矩形成反铁磁型的核磁有序^[2,22].中子虽不带电荷,但却具有磁矩,物质磁有序结构的测定正是利用了中子磁矩.电子磁矩的实验测定和理论计算都达到了很高的精度,其不确定度分别为 $\pm 200 \times 10^{-12}$ 和 $\pm 400 \times 10^{-12}$,而实验测量值和理论计算值的符合已达到8位数字^[2,23].关于磁单极子问题,其实验观测从地面、古老岩石到太空、陨石和月岩,其理论研究应用了多种理论,并涉及宇宙极早期演化和一些基本粒子结构模型,但从30年代初到现在经过数十年的研究仍未得到解决^[2,24,25].

从地球到各类天体和星际空间的宇观世界,当代的多种科学观测和研究表明,宇宙物质是具有磁性的,宇宙空间是存在磁场的.从各地质时代的大陆和海洋岩石磁性的观测和研究

中,已经认识到,地球磁场的起源虽曾经有过多种学说,但只有磁流体发电机模型获得普遍承认.古岩石磁性随地质年代和地区的变化,不但证实了地球磁场的多次改变方向,而且由此证实了大陆漂移、海底扩张和地球板块学说的新地球观,建立了古地磁断代学,由此推定的(古)北京人、(古)元谋人和(古)巫山人的年代同用其他断代法的结果相符合^[2].由阿波罗宇宙飞船登月测得的月球磁场和月岩磁性推定月球内部均为固态岩石^[2,26],由航天器测得的木星较强磁场可以推定木星内部存在金属氢和金属氢的超导电特性^[2,27],由高空 X 射线望远镜测得武仙星座 X-1 脉冲星的 X 射线谱中出现的尖峰,可以推定尖峰是由这一脉冲星(中子星)的电子回旋共振引起的,推得的脉冲星磁场强度约 5×10^8 T,同中子星磁场的理论估计值相符合^[2,28].由天体磁场推定天体内部结构(如月球和木星),以及由天体的电磁波谱推定天体的磁场(如脉冲中子星),都表明当代宇宙磁学在宇宙学中所起的重要作用.

从以上的简略介绍可以看出,包含基础磁学、材料磁学、应用磁学和边缘磁学的当代磁学不但内容丰富广泛,而且各方面的新进展也是不断涌现的.这也正反映了当代自然科学和高新技术的蓬勃发展的态势.

参 考 文 献

- 1 宋德生,李国栋.电磁学发展史(修订版).南宁:广西人民出版社,1996.1~17
- 2 李国栋.当代磁学.合肥:中国科学技术大学出版社,1999
- 3 Wohlfarth E P. Ferromagnetic Materials. Vol 1. Amsterdam: North-Holland Publishing Company, 1980
- 4 Torrance J B, Baque P S, Johannsen I, et al. Ferromagnetic interactions in organic solids: an overview of theory and experiments. J Appl Phys, 1988, 63: 2963
- 5 李国栋.无机、有机和生物磁有序材料.中国稀土永磁,1993,(1): 15~19
- 6 Namba S. Science and Technology of Mesoscopic Structures. Tokyo, New York: Springer-Verlag, 1992
- 7 阎守胜,甘子创.介观物理.北京:北京大学出版社,1995
- 8 张立德,牟季美.纳米材料学.沈阳:辽宁科学技术出版社,1994
- 9 周寿增.稀土永磁材料及其应用.北京:冶金工业出版社,1990
- 10 Chen C W. Magnetism and Metallurgy of Soft Magnetic Materials. Amsterdam: North-Holland Publishing Company, 1991.
- 11 Wohlfarth E P. Ferromagnetic Materials. Vol 2. Amsterdam: North-Holland Publishing Company, 1980
- 12 穆加尼 K, 科埃 J M D. 磁性玻璃.北京:科学出版社,1992
- 13 曾汉民,主编.高技术新材料要览.北京:中国科学技术出版社,1993. 662~676
- 14 姚康德,主编.智能材料——21世纪的新材料.天津:天津大学出版社,1996
- 15 磁电子学讲座.物理.1997,7~11;1998,5~7
- 16 Slichter C P. Principles of Magnetic Resonance. 2nd ed. Berlin: Springer-Verlag, 1978
- 17 Valk J. Basic Principles of Nuclear Magnetic Resonance Imaging, 1985
- 18 Xia P C. China Magnets 98, 1988. Beijing, 1988. 1
- 19 章乃森.粒子物理学,上、下册.北京:科学出版社,1986,1994
- 20 Williamson S J. Biomagnetism: An Interdisciplinary Approach. New York: Plenum, 1983
- 21 李国栋,周万松,郭立文,等.生物磁学——应用、技术、原理.北京:国防工业出版社,1993
- 22 Abragam A, Goldman M. Nuclear Magnetism: Order and Disorder. Oxford: Clarendon Press, 1982
- 23 Calmer J, Narison S, Perrotet M, et al. The anomalous magnetic moment of the moon: a review of the theoretical contributions. Rev Mod Phys, 1977, 49: 21
- 24 李国栋.磁单极子研究的科学意义.物理通报,1999,(3): 1
- 25 Craigie N. Theory and Detection of Magnetic Monopoles in Gauge Theory, 1986
- 26 Strangeway D W, Gose W A, Pearce G W, et al. Magnetism and the history of the moon. AIP Conf Proc, 1973, (10): 1178
- 27 Wolfe J H. Jupiter. Scientific American, 1975, 233(3): 119

28 RGL. Evidence for 10^{12} -gauss field on neutron stars. Phys Today, 1977, 30(6): 19

(1999-11-29 收稿, 2000-02-16 收修改稿)