强磁场下的科学问题

匡光力*, 皮雳

中国科学院强磁场科学中心, 合肥 230031

* 联系人, E-mail: kuang_gl@ipp.ac.cn

2015-10-23 收稿, 2015-12-17 修回, 2015-12-18 接受, 2016-03-22 网络版发表

摘要 强磁场是支持多学科前沿探索的重要研究条件, 能够为多学科的发展提供重大机遇. 强磁场下科学研究涉及的学科范围广泛, 科学问题众多, 是当前非常活跃的科学研究领域. 本文梳理了物理、化学、材料科学、生命科学、地球科学等多学科在强磁场下的前沿科学问题, 并简要介绍了我国强磁场实验装置的基本情况和已取得的成果. 我国强磁场实验装置的投入使用, 将给我国多学科的前沿研究提供有力的支撑, 为我国重大原创性成果的产出创造有利条件.

关键词 强磁场, 实验装置, 科学问题

在传统科学日臻完善的今天, 继续利用常规实验条件取得新的突破越来越困难, 而极端实验条件为发现新现象, 揭示新规律, 并为多学科的交叉研究提供了更多的机遇. 强磁场正是一种重要的极端实验条件, 处在其中的物质结构及其转变过程都可能发生变化, 这为物理、化学、材料和生物等学科的研究提供了新的途径, 开辟了新的空间.

首先, 强磁场在发现新现象和认识新现象方面具有重要作用. 强磁场可以非常有效地诱导原子核外电子的自旋、轨道有序, 并改变电子能态和原子、分子间的相互作用, 使之出现全新的物质状态, 呈现多种多样新的物理、化学现象和效应. 例如: 在强磁场条件下发现的量子霍尔效应和分数量子霍尔效应(这两种新现象的发现者分别获得1985年和1998年的诺贝尔物理学奖). 强磁场还可以抑制一些因素, 突显另外一些效应, 从而使原来很复杂, 甚至混乱的过程变得较为简单, 易于直接了解其物理实质. 其次, 强磁场在探索和制备新材料方面可以发挥不可替代的作用. 材料是现代物质文明的基础, 它支撑着其他新技术的发展, 已成为经济发展的重要支柱之一. 新

材料的研制往往依赖于极端技术条件, 如强磁场、极低温、极高温、超高压、超高真空等, 其中, 强磁场技术在新材料研制中的重要作用正在显现. 另外, 强磁场在开发新器件和催化新技术方面也有重要应用. 强磁场霍尔效应和磁光效应是研究多层或低维半导体材料中电学输运性质的强大工具, 它可以更好地得到半导体内载流子的信息, 在此基础上开发出新型半导体器件和功能元件. 此外, 强磁场还可催化出新的重大应用技术: 例如, 强磁场作用下的电磁冶金技术、化学反应合成以及脑功能成像技术等. 因此, 强磁场被国际上称之为21世纪科学、工程和技术, 强磁场作用下的物理学、化学、生物学、材料科学、磁共振技术等研究也已经成为新的学科方向.

依托强磁场条件开展的科学研究工作非常活跃, 自1913年以来, 与强磁场相关的成果共获得诺贝尔奖19项, 近20年有8项. 研究工作涉及物理学、化学、材料科学、地球科学、生命科学与医学等众多学科, 以美国强磁场实验室为例(图1), 2012~2014年共发表论文1358篇, 其中综合类66篇, 物理537篇, 化学251篇, 生物与医学233篇, 工程技术(含材料科学、地球

引用格式: 匡光力, 皮雳. 强磁场下的科学问题. 科学通报, 2016, 61: 1940–1951

Kuang G L, Pi L. Scientific issues under high magnetic field (in Chinese). Chin Sci Bull, 2016, 61: 1940–1951, doi: 10.1360/N972015-01189

图1 (网络版彩色)美国强磁场实验室2012~2014年发表论文学科分布
Figure 1 (Color online) Subject distribution of the publications at 2012~2014 by the high magnetic field laboratory of United States

科学等)271篇,包括*Science*, *Nature*及其子刊, *Physical Review Letters*, *Journal of the American Chemical Society*等I区论文308篇(其中*Nature*, *Science*论文13篇). 特别是在高温超导、量子临界材料、半导体和有机固体等领域,在强磁场条件下的研究中频频有重要的新发现.

1 强磁场下的科学问题

从以往国际上依托强磁场实验装置产出的科研成果以及当前强磁场下科学研究的热点方向来看,强磁场下的科学研究工作主要集中在以下学科领域开展.

1.1 凝聚态物理学

(i) 半导体物理. 半导体不仅是当代电子工业的基础,而且对基础科学有着巨大的推动作用. 在半导体能带结构研究以及元激发及其相互作用研究中,磁场有着特别重要的作用,因为磁场是唯一在保持晶体结构不变的情况下改变动量空间对称性的物理因素;而且在强磁场下回旋共振能可以接近甚至超过半导体材料的费米能以及载流子间库仑相互作用等半导体中的各种固有能量,因此磁场一直是研究半导体材料强有力的工具,例如20世纪80年代,人们利用强磁场技术,在半导体二维电子气中发现了整数和分数量子霍尔效应,为凝聚态物理的发展开辟了全新的领域. 而近年来以石墨烯为代表的狄拉克费米子体系中的非常规量子霍尔效应研究,以及黑磷、拓扑绝缘体等半导体的研究中,也离不开强磁场的实验环境.

(1) 石墨烯在强磁场中的量子输运. 石墨烯是在过去的十余年里国际凝聚态研究一个持续的亮点.

自从2004年单层石墨烯被成功分离以来,石墨烯各种奇异的物理性质吸引了很多的关注. 石墨烯是由一层碳原子以共价键连接在一起形成的一个二维的蜂窝状的晶体,每个碳原子有4个价电子,其中3个被束缚在相邻原子形成的共价键中,剩下的电子就可以在整个石墨烯平面上巡游. 正是由于这个巡游电子,石墨烯的导带和价带相交于一点,而且在这一点附近呈现出线性色散关系. 这就决定了石墨烯中的电子无论能量高低,总是以一个恒定的速度运动,其速度就是石墨烯中的等效光速($v_F \sim c/300$). 由于这个速度远小于实际的光速,相对论的效应在石墨烯中被等效放大了300倍,使得某些原本在高能物理中的一些理论预言在低能量的桌上型试验中就可能显现出来而且被检验.

2004年,英国的Geim实验室成功利用“胶带粘贴法”从石墨上揭出单层石墨烯^[1]. 2005年,美国的Philip Kim实验室和Geim实验室同时在高质量的石墨烯样品里发现了半整数量子霍尔效应^[2,3]. 两个实验室紧接着发现,石墨烯中的反常量子霍尔效应甚至在室温下都可以清楚地观测到,更进一步演示了石墨烯样品的高质量 and 狄拉克费米子的特殊朗道量子化. 而在更强的磁场中,Philip Kim实验室观测到石墨烯中狄拉克费米子(准自旋以及自旋)的简并度被一一打开,并在最近和Rutgers大学的Eva Andrei实验室同一时间首次观察到了分数量子霍尔效应^[4](图2).

石墨烯中的狄拉克费米子提供了线性色散和准自旋这两个其他二维电子系统所没有的独特性质. 以Philip Kim组为首的一些实验室利用微纳加工的手段,用石墨烯和六方氮化硼的异质结构造进一步提

图2 (网络版彩色)石墨烯中的分数量子霍尔效应
Figure 2 (Color online) The fractional quantum hall effect in graphene

高了石墨烯的质量,从而在强磁场下观察到了一系列的分数量子霍尔态. 石墨烯的准自旋对石墨烯中电子-电子相互作用有重要的影响. 这些影响反映在这些分数量子霍尔态中,是当前石墨烯研究一个重要的前沿课题.

(2) 黑磷. 二维晶体是由几层单原子层堆叠而成的纳米厚度的平面晶体,例如石墨烯. 但是石墨烯没有半导体带隙,难以完成导体和绝缘体之间的转换,不能实现数字电路的逻辑开与关. 而同样由单原子层堆叠而成的黑磷,则具有一个半导体带隙. 最近中国科学技术大学的陈仙辉教授和复旦大学张远波教授^[5]通过解理黑磷晶体,得到纳米厚度的二维晶体后,发现它在室温下具有良好的电子迁移率($\sim 1000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$),还有非常高的漏电流调制率(是石墨烯的10000倍),与电子线路的传统材料硅类似,同时具有优异的光学性能. 深入了解黑磷原子晶体中的电子性质对其实际应用具有重要的意义.

最近复旦大学张远波课题组^[6]结合电场调控技术,在强磁场下对在黑磷二维原子晶体器件的输运行为进行了研究,观察到了二维电子气导致的量子

振荡效应(图3). 这些量子振荡行为给出了黑磷二维原子晶体中很多关键的信息,包括电子有效质量、弛豫时间等. 这些结果对深入了解黑磷体系以及未来的器件开发提供了重要的实验基础.

(3) 拓扑绝缘体. 拓扑绝缘体是近年来发现的一个新物质态,其内部是有能隙的绝缘体,在其表面却存在着受时间反演对称性保护的表面态,该表面态来源于强烈的自旋-轨道耦合诱导的导带与价带间的能带反转,而且其表面态电子的动量与自旋相耦合,使其自旋方向永远与动量正交,成为具有无质量的Dirac费米子特征的手性电子. 理论研究发现:破坏拓扑绝缘体表面态的时间反演对称性,将展现出丰富多彩的物理特性,这些奇异性质导致拓扑绝缘体材料在量子信息和量子计算等方面具有极大的潜在应用前景,成为凝聚态物理研究中的热点和前沿.

2010年Qu等人^[7]首次通过电输运的方式在 Bi_2Te_3 单晶中观察到了二维Shubnikov-de Haas(SdH)量子振荡效应,给出 Bi_2Te_3 中存在二维金属表面态的实验证据. 同时Analytis等人^[8]通过强磁场的量子振荡行为测试,首次给出了 Bi_2Se_3 中存在二维金属表面

图3 黑磷纳米片中的量子振荡

Figure 3 The quantum oscillations in black phosphorus nano-plate

态的电输运证据(图4).

(4) Dirac半金属. 晶体材料按照其电子结构的不同可以划分为金属和绝缘体两大类. 最近这些年对拓扑绝缘体的研究表明绝缘体可以进一步细分为一般绝缘体和拓扑绝缘体. 那么对于金属态, 也可以把金属也划分为“一般金属”和“拓扑金属”两大类, 且拓扑金属也会具有与一般金属不一样的新奇量子现象. 拓扑金属具有特殊的能带结构, 它包含一些能带结构的奇点. 与二维空间(例如: 石墨烯)完全不同, 在三维动量空间中, 这样的能带交叉点是一种非常稳定的拓扑结构, 无法引入质量项, 就是说无法通过微扰打开能隙, 因此非常稳定. 这样的拓扑半金属态会呈现出奇妙的物性, 例如: 其表面态具有Fermi arcs, 其体态具有动量空间中的磁单极, 独特的输运性质、磁性等等.

最近的理论工作中, 发现了四种非磁性的Weyl半金属材料, TaAs, TaP, NbAs和NbP. 在实验工作中, 除了利用角分辨光电子能谱(ARPES)给出重要的信息外, 利用强磁场下的输运性质测量也起到了重要的作用.

例如Shekhar等人^[9]在强磁场下对NbP的电输运性质进行了测量, 观察到巨大的磁电阻效应, 在1.85 K

下的磁电阻达到850000%, 迁移率高达 $5 \times 10^6 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$, 同时观察到了非常强的SdH量子振荡行为, 给出了NbP为Weyl半金属的输运证据(图5).

(ii) 超导. 在超导研究中, 磁场是一种调控超导态的有效手段, 不但可以帮助人们了解不同超导态自身的特性, 还能揭示隐藏在超导态之下的“正常态”或“竞争态”等相关物理性质, 甚至可以诱导新奇

图4 拓扑绝缘体 Bi_2Se_3 中的量子振荡. (a) 电阻与磁场关系; (b) 霍尔电阻与磁场关系

Figure 4 The quantum oscillations in topological insulator Bi_2Se_3 . (a) Resistance as a function of magnetic field; (b) Hall resistance as a function of magnetic field

图5 NbP在强磁场下的输运行为. (a) 磁阻; (b) 减去9 T背景数据后的电阻率与磁场倒数的关系; (c) 减去30 T背景数据后的电阻率与磁场倒数的关系

Figure 5 The transport properties of NbP in high magnetic field. (a) Magnetoresistance as a function of magnetic field; (b) SdH oscillations after subtracting the background from the 9 T ρ_{xx} measurements; (c) SdH oscillations after subtracting the background from the 30 T ρ_{xx} measurements

的超导态,是探索超导现象和机理的重要手段之一.近年来,随着磁体技术的不断发展,强磁场在超导研究领域的作用也越来越重要.近些年,在强磁场的帮助下,超导材料及超导机理研究方面取得了很多进展,举例如下:

(1) 强磁场下输运行为揭示非常规超导体的费米面结构与行为.如图6所示,2007年Doiron-Leyraud等人^[10]在欠掺杂铜氧化物超导体中观察到明显的SdH振荡行为,通过分析明确给出了铜氧化物超导体中存在费米面的实验证据.随后,Sebastian等人^[11]通过另外一种强磁场下磁性量子振荡de Hass-van Alphen效应进一步对该体系进行了表征,获得了更加完备的费米面信息.

(2) 强磁场下超导临界场研究.磁场可以破坏超导态.当超导体表面的磁场强度达到某个磁场强度 H_c 时,超导态即转变为正常态;此 H_c 即称为临界磁场强度.另外,大电流也能破坏超导态.通过超导材料的电流达到一定数值时也会使超导态破坏而转变为正常态,单位截面积所承载的最大电流称为临界电流密度(J_c). H_c 与 J_c 是表征超导体的两个重要临界参量.强磁场下 H_c 与 J_c 以及相关磁通动力学研究可以获得相干长度和各向异性等许多超导相的物性,并为应用提供基础.在铁基超导发现的第二年,Hunte等人^[12]利用强磁场输运测量,首次明确给出了铁基超导上临界场,如图7所示.

(3) 非常规超导体非费米液体行为研究.随着超导研究的进展,人们发现非常规超导体往往表现出

一种普适的非费米液体行为,而且越来越多的人认为对非费米液体行为的理解将为超导机理的探索提供重要依据.然而,由于赝能隙的出现,使得对于非费米液体行为的研究在低温下受阻.实验表明,在最佳掺杂处(T_c 最高处),由于赝能隙的消失,将会是研究非费米液体行为的最佳选择.但由于该区域超导转变温度较高,对非费米液体态的研究往往需要强磁场来抑制超导电性从而获得非费米液体态.通过开展强磁场下的非常规超导体研究,可以获得更多关于非费米液体态的信息,从而帮助人们进一步理解高温超导电性与非费米液体态之间的关联.

(4) 非常规超导体中竞争序在强磁场下的研究.

图6 (网络版彩色)高温超导材料 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.5}$ 中的量子振荡
Figure 6 (Color online) The quantum oscillations of high T_c superconductor $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.5}$

图7 (网络版彩色)铁基超导体 $\text{LaFeAsO}_{0.89}\text{F}_{0.11}$ 的上临界磁场. (a) 上临界磁场与温度的关系; (b) 上临界磁场与 T/T_c 的关系
Figure 7 (Color online) The upper critical field of Fe-based superconductor $\text{LaFeAsO}_{0.89}\text{F}_{0.11}$. (a) The upper critical field plotted as functions of the temperature; (b) the upper critical field plotted as functions of T/T_c .

由于关联效应,非常规超导体中的超导态通常会与多种电子有序相存在竞争共存现象,通过研究超导态与这些有序相之间的关系,将会帮助人们更好地理解非常规超导电性的物理机制.除了常见的磁有序,在超导区间还可以存在其他多种形式的有序化现象,例如铜氧化物超导体中的电荷有序和铁基超导体中的轨道有序.这些有序化现象的出现对于理解非常规超导体中超导态的物理机制都具有非常重要的意义,特别是与超导态存在相互竞争的有序化现象.利用强磁场,可以有效地调控超导态与各种有序相之间的相互作用,从而研究其相互作用规律.并且,强磁场对于超导态的抑制作用可以将其相互竞争的有序相放大,特别是隐藏在超导区间的竞争有序相.

(5) 磁场诱导的新超导态.强磁场不但可以抑制超导态,而且还可以诱导出一些新奇的超导态.在低维非常规超导体中,当泡利拆对效应所决定的上临界磁场(H_p)高于轨道效应产生的上临界磁场时,高于 H_p 的强磁场将有可能诱导出超导能隙空间分布不均匀的新奇超导相,该类超导态是在理论上最早提出,称为FFLO态.最近,人们在二维有机 λ -(BETS) $_2$ FeCl $_4$ 中发现了磁场诱导的反铁磁-金属-超导转变^[13,14],如图8所示.目前,关于FFLO态的存在还存在很大程度上的争议,亟须相关的强磁场实验来给出更多的实验证据.通过开展强磁场下的热导,核磁共振以及STM等实验,可以研究非常规超导体在磁场强度高于 H_p 的超导相,通过测量其低能激发以及超导能隙的空间分布等获取FFLO态的相关信息.

(6) 实用高温超导体.水冷强磁场的获得要求非

常高的电功率,例如20 T水冷磁体就需要20 MW电源,而这样高的电功率大部分为欧姆热损耗掉.由于超导体无欧姆损耗,所以20 T以下的强磁场大都利用超导磁体获得.高温超导出现后,不仅超导临界温度得到提高,其临界磁场也非常高, $H_{c2}(0\text{ K})$ 甚至都在100 T以上,这就意味着有可能将混合磁体中的Bitter线圈用高温超导带材代替.实用化高温超导材料研究需要测试材料的 $J_c\sim H$ 关系,强磁场实验条件必不可少,反过来,实用超导材料性能的提高也有望应用到高场磁体上.

(iii) 磁性材料.磁学是一门非常古老的学科,是研究物质磁性起源及其在外界因素(如磁场、温度、压力、光场、电场等)作用下各种宏观和微观磁性的变化规律,并利用这些规律来为人类服务(应用磁学)的一门学科.它不仅蕴含了丰富的科学问题,也具有广泛的应用背景.强磁场对于磁学的发展起着举足轻重的作用.下面将举例说明强磁场在磁性材料研究中的重要价值.

(1) 丰富磁性材料的相图.磁场强度的增加可以为磁性材料在高场下的磁相关行为给出大范围的表达,不仅能丰富现有的相图,还能发现一些在低场下不能出现的磁化量子效应.比如最近Wang等人^[15]采用高场磁性测量方式,对一种Kagome材料Ni $_3$ V $_2$ O $_8$ 进行了详尽的研究.他们发现,该材料不仅表现为多铁性,而且在高场下表现出非常复杂的高场磁相图.高场磁性显示,在高于15 T的磁场激发下,材料出现了1/2, 2/3, 3/4, 8/9的量子磁化平台(图9).

(2) 强磁场诱导的变磁性.外加磁场与原子的磁

图8 二维有机 λ -(BETS) $_2$ FeCl $_4$ 中的反铁磁-金属-超导转变. (a) 电阻磁场曲线; (b) 电阻温度曲线; (c) 温度磁场相图

Figure 8 The antiferromagnetism-metal-superconductor transition of 2D organics λ -(BETS) $_2$ FeCl $_4$. (a) Resistance as a function of magnetic field; (b) resistance as a function of temperature; (c) temperature-magnetic field phase diagram

图9 (网络版彩色) $\text{Ni}_3\text{V}_2\text{O}_8$ 中的量子磁化平台

Figure 9 (Color online) The quantum magnetization plateau of $\text{Ni}_3\text{V}_2\text{O}_8$

矩相互作用产生塞曼能, 其与交换作用、各向异性、晶体场、电子关联等内在作用发生竞争, 当塞曼能足够大的时候, 可以导致磁结构或原子磁矩的改变, 表现为磁化强度的剧烈变化. 这种由磁场诱导的磁性转变被称为变磁性(metamagnetism)或者变磁转变(metamagnetic transition). 变磁转变往往伴随着大的磁熵变或者形变, 因而可用于磁制冷或形状记忆材料. 在汗紫(Han purple)磁绝缘体 $\text{BaCuSi}_2\text{O}_6$ 中, 观察到强磁场诱导3D量子顺磁到2D反铁磁相变^[16](图10).

(3) 强磁场下低维磁性材料的量子效应. 在具有强量子涨落的一维自旋链中, 理论预言磁化强度随外加磁场增加会发生拓扑量子化, 出现磁化强度平台, 类似于二维电子气在强磁场下的量子霍尔效应. 这一预言在一维自旋链体系 $\text{Cu}_3(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$ 中得到了验证. 在1.5 K, 其磁化强度在16~26 T之间出现了对应于1/3饱和和磁化强度的平台(图11)^[17]. 这是强磁场诱导新奇

图10 (网络版彩色) $\text{BaCuSi}_2\text{O}_6$ 中3D量子顺磁-2D反铁磁相变

Figure 10 (Color online) The 3D quantum paramagnetism to 2D anti-ferromagnetism transition in $\text{BaCuSi}_2\text{O}_6$

物态的一个典型例子. 准一维自旋链体系 LiCuVO_4 中具有非公度螺旋反铁磁结构, 理论预言其在强磁场下将出现量子自旋向列序(nematic phase)^[18]. 最近通过强磁场下的磁测量证实了该理论预言^[19](图12).

(4) 强磁场下阻挫磁材料研究. 一个自旋磁矩与磁场作用产生的塞曼能级差为 $2\mu_B H$, 在1 T磁场下, 这一能量仅相当于1.3 K的热能, 远低于常规磁性材料的有序温度 T_c . 但是, 低维、阻挫和量子零点运动都可以促进自旋涨落从而大大抑制磁有序. 这些因素不仅可以有效降低磁有序的临界温度 T_c , 而且可能产生全新的物质状态和奇特的元激发, 如自旋冰、自旋液体、磁单极子、自旋孤子、磁涡旋等. 此时, 强磁场产生的塞曼能已经足以和交换作用、热涨落或量子涨落竞争, 因而成为驱动和调控新奇物态的有力工具.

1.2 化学

采用强磁场诱发新化学反应并合成新材料, 将

图11 $\text{Cu}_3(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$ 的高场磁化曲线. (a) 磁场平行于 b ; (b) 磁场垂直于 b

Figure 11 The high magnetic field magnetization curves of $\text{Cu}_3(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$. (a) Magnetic field parallel to the b axis; (b) magnetic field perpendicular to the b axis

图 12 (网络版彩色)量子自旋向列序的理论预言(a)和实验证实(b)

Figure 12 (Color online) Theoretical prediction (a) and experimental proof (b) of quantum spin nematic phase

极大丰富化学的内涵,是人们关注的课题. 磁场对化学反应存在量子力学、热力学和经典力学三个层次的影响, 通过影响具有未成对电子的反应中间体, 或改变化学势从而影响化学平衡常数, 能够改变反应动力学和产率, 使反应选择性提高, 获得一系列原来无法制备的新材料和新化合物. 例如, 由于强磁场对自由基有很大的影响, 与常规方法相比, 在强磁场下聚合不仅转化率高, 而且所制得高分子具有力学强度高和热稳定性强等特点. 在强磁场或强电场与其他手段(如辐射化学)结合条件下, 一些单体能进行有序排列和组装, 这样聚合可制得具有特殊的光、电、磁效应与功能的高分子材料或高分子复合材料; 强磁场下的聚合与常规聚合在机理上有很大的差别, 借助强磁场, 可探索新的聚合方法, 如新型活性自由基聚合、新型活性离子聚合等. 如今, 强磁场下的化学反应路径调控、反应动力学、单分子磁体合成、手性合成、纳米催化等方向已成为当前和未来的研究热点.

1.3 材料科学

众所周知, 磁场同温度、压力一样是一个具有基本重要性的热力学量. 在材料的结晶凝固、固态相变及烧结过程中, 利用不同组成相磁性能的差异, 强磁场有可能改变相变的温度和程度, 以及改变相组织的形态和大小, 并显著地影响生成物的形核长大过程; 对于具有磁各向异性的晶粒, 强磁场还可以表现为对晶体的排列和生长方向的约束, 因为各向异性

晶体沿不同晶轴方向的磁化率不同, 所以受磁场的作用能也不同, 因此只要改变磁场 H 的方向和强度就会影响材料的组织结构和晶粒取向. 近20年, 随着强磁体技术的快速发展, 大口径强磁体实现商业化生产, 人们很容易获得10 T以上的强磁场, 这大大推动了强磁场材料科学的研究进展. 涉及的材料十分广泛, 从钢铁、铝合金、陶瓷、半导体、超导材料、碳材料到有机高分子, 从铸坯到纳米材料, 几乎涵盖了所有的材料制备方法. 因此, 强磁场材料科学作为一门新兴的交叉学科已经引起了人们广泛的关注.

强磁场下的材料制备研究已经引起了国际上发达国家的广泛重视. 日本科学技术协会制定了“强磁场下新型材料研制”的专项研究计划, 在高温超导材料、稀土永磁材料、金属间化合物、金属基复合材料等多个材料工程领域开展了广泛的研究工作. 美国佛罗里达国家强磁场实验室开展了强磁场下的高温超导材料、先进铝合金、树脂基复合材料、低碳合金钢等材料研究工作. 英国、德国、法国等也正在积极开展强磁场下新材料的研制工作.

1.4 微重力

微重力下的晶体生长、细胞分裂等研究一直是人们期待的. 在地面上是否能创造这些环境呢? 目前, 已发现大多数普通材料, 如水、木头、塑料、聚合物和活的组织——象青蛙、蝗虫等对磁场有抗磁力, 并可以抵消其重力而悬浮. 利用强磁场可以在地球上

开展以往只能在太空中进行的微重力实验,如:

(1) 微重力下晶体生长研究——在完美的平衡态条件下由饱和溶液生长晶体.

(2) 植物生长的方向性研究——植物重力感知机理的研究现在比较热门,与该研究直接相关的是:长期太空飞行需在太空种植植物以获得食物和氧气,还需找到补偿失重效应的方法.

(3) 微重力下细胞分裂的研究.

1.5 生命科学

强磁场在生物学中的应用,最重要的是磁共振技术在生物学中的应用.核磁共振(NMR)是电磁波(无线电波)与原子核自旋相互作用的一种基本物理现象.在所有的已发现的共振现象中,NMR波谱学具有最高的频率分辨率.NMR是一种非常独特的和强有力的物质科学的研究手段.由于核磁共振探测灵敏度与磁场强度的 $3/2$ 次方成正比,而分辨率则与磁场强度成正比关系,因此,核磁共振与强磁场从来都是捆绑在一起发展的,核磁共振是强磁场的一部分.

核磁共振波谱在生物学中的应用,主要包括核磁共振波谱在结构生物学与结构基因组研究中的应用;核磁共振成像在医学及脑功能、认知科学及动物成像中的应用.除此之外,磁场的生物学效应也越来越受到人们的关注.

(i) 核磁共振在生物学中的应用.

(1) 核磁共振波谱在结构生物学与结构基因组研究中的应用,用于生物大分子的三维结构测定与功能研究.我们知道,蛋白质是生命活动的主要承担者.蛋白质的功能与其三维结构有着紧密的联系,人体内蛋白质分子结构和功能的异常是疾病的发生和发展的主要原因.蛋白质及其复合物、组装体三维结构与功能的研究是开展药物设计的重要基础.核磁共振波谱与X-射线晶体衍射方法,电子显微镜三维重构方法同是结构生物学与结构基因组研究主要的手段.NMR实验可在溶液情况下进行,无需要对蛋白质样品结晶.目前高质量的利用NMR方法解出的蛋白质三维结构的精度相当于 $2.0\sim 2.5$ Å分辨率,过去NMR只适合研究小的蛋白质,但近年用NMR已能研究GROEL-GROES这样分子量达8万的复合物的结构.

(2) 核磁共振波谱研究蛋白质-蛋白质、蛋白质-核酸、蛋白质-小分子化合物的相互作用.在细胞中,许多弱的蛋白质-蛋白质相互作用($K_D > 10^{-6}$ M)用X-射

线晶体衍射方法是不适合的.近年来用NMR可以研究细胞中弱的蛋白质-蛋白质相互作用.

(3) NMR研究蛋白质的运动性和动力学特性.蛋白质的柔性和运动性在抗原-抗体识别、酶和底物、抑制剂相互作用等方面都十分重要.

(4) NMR研究蛋白质的折叠与去折叠.可以检测到非常少量的折叠中间态.

(5) NMR用于药物设计与筛选.

(6) NMR技术目前已与质谱同为代谢组学的主要研究手段.

(ii) 磁共振成像(MRI)研究. MRI在医学、脑科学等生物学领域方面有着重要的应用.与核磁共振波谱一样,磁场越高,其分辨率越好.因此,强磁场是其不可或缺的必要条件.

(iii) 磁场的生物学效应. 近年来高场MRI和NMR等技术广泛应用了高达 $7\sim 20$ T的稳态强磁场,而在这样高的磁场条件下,其相关生物学效应的研究却非常缺乏,深入的机制探索并不多.与此同时,从20世纪70年代开始,磁场就被应用于肿瘤等疾病的辅助治疗中,然而其作用机制并不清楚,也缺乏相关理论依据的指导.因此,深入探讨磁场对生物体细胞的影响及其分子机制具有重要的理论和现实意义.在这些研究当中,强磁场极端条件必不可少.

1.6 地球科学

(i) 熔体结构的基础研究. 通过研究熔体的核磁共振波谱特征来推测硅酸盐和铝硅酸盐熔体的结构特性,对熔体结构的深入研究不仅可以获得硅酸盐熔体转变成硅酸盐矿物这一重要地质过程发生的机理及控制因素的基础信息,而且对于研究和开发硅酸盐材料具有理论指导的意义.

(ii) 矿物表面性质和吸附性的研究. 例如通过研究 ^{17}O 的核磁共振谱,发现处于沸石表面不同结构中的O与外界水中所含的O具有不同的交换速率.这不仅是稳定同位素基础研究中的重要发现,而且为陶瓷材料的表面催化和防腐研究提供了新的思路.

通过核磁共振谱结合红外光谱、X射线衍射和分子动力学模拟还可以研究层状羟基类矿物和黏土类矿物中层间核素的结构和动力学特征.

上述对矿物结构的研究不仅是矿物学学科认识上的丰富,同时也有助于利用天然材料的特性,研究和开发新的材料.

(iii) 水体所含重金属和营养物质的监测。自然界水体中溶解有机物(dissolved organic matter, DOM)的络合是决定生物活性的主要因素,通过电子顺磁共振(EPR)来确定与金属离子键合的官能团。这样就能对DOM和它在水中的行为有一个独特的认识,从而监测水体的质量状况并设法寻找消除重金属和富营养化的方法。

随着质谱和核磁共振技术对核素测定灵敏度的提高,将有望对更多的重金属和有机物进行更精确的含量和结构的测定,这将有助于人们加深对污染物的认识,解决人类社会所面临的“环境危机”。

2 我国的强磁场实验装置

从上述各学科在强磁场下的研究可以看出,强磁场下的科学研究十分活跃,强磁场极端条件对于多个学科的前沿研究都至关重要。而在我国,由于过去没有完善的强磁场条件,在科学研究上失去很多机遇,我国科学家一些原始性想法不是被搁置就是到国外与别人合作。为了给我国众多学科的基础研究提供强磁场这一重要支撑条件,提升我国前沿基础学科的自主创新能力,国家发改委于2007年批准立项了“强磁场实验装置国家重大科技基础设施项目”,其中稳态强磁场实验装置由合肥物质科学研究院承建,中国科学技术大学共建,脉冲强磁场实验装置由华中科技大学承建。目前该项目已基本完成,稳态强磁场实验装置创造了国际公认的三项世界纪录:32 mm室温孔径水冷磁体WM1产生了最高38.5 T稳态磁场,32 mm室温孔径水冷磁体WM4在10 MW功率下产生了27.5 T稳态磁场,50 mm室温孔径水冷磁体WM5产生了最高35 T稳态磁场,均为国际同类磁体的最高水平;脉冲强磁场实验装置实现了90.6 T的峰值磁场,被国内外权威专家评为国际先进水平。围绕磁体装置还建立了一系列国际水平的、有特色的、

有自主知识产权的科学测试设备,例如:集扫描隧道显微镜、原子力显微镜、磁力显微镜为一体的组合显微系统、综合了超高压(最高200 GPa)、强磁场(最高35 T)和低温(1.8 K)三种极端条件的超高压物性测量系统、 ^3He 极低温输运测量系统、25 T电子磁共振系统等。

强磁场实验装置在立项时已定下了“边建边开放”的指导思想,现已取得一批具有国际水平的成果。国内外用户利用稳态强磁场实验装置从2008~2014年共发表影响因子大于3的SCI论文149篇(稳态强磁场实验装置依托单位中国科学院强磁场科学中心为第一单位的54篇),其中I区论文36篇,包括*Nature* 2篇,*Nature*子刊5篇,*Physical Review Letters* 5篇,*Journal of the American Chemical Society* 2篇,*Nano Letters* 2篇,*ACS NANO* 2篇,德国应用化学*Angewandte Chemie- International Edition* 3篇。因此,我国不但已具备了开展强磁场条件下的物理、材料、化学、生命科学及新技术新方法研究的装置条件,还已具备了开展强磁场下科学研究的队伍和能力。

3 总结

强磁场是支持多学科前沿探索的重要研究条件,在发现新现象、认识新现象以及催化重大应用技术方面有着十分重要的作用,能够为多学科的发展提供重大机遇。强磁场下科学研究涉及的学科范围广泛,科学问题众多,是当前非常活跃的科学研究领域。我国已基本建成强磁场实验装置,拥有了世界领先的磁体和高水平的实验测量系统,并已面向国内外科学界全面开放、发挥作用,依托我国的稳态强磁场实验装置已产出了一批具有国际水平的成果。可以预见,我国的强磁场实验装置必能给我国多学科的前沿研究提供有力的支撑,为我国重大原创性成果的产出创造有利条件。

参考文献

- 1 Novoselov K S, Geim A K, Morozov S V, et al. Electric field effect in atomically thin carbon films. *Science*, 2004, 306: 666–669
- 2 Zhang Y B, Tan Y W, Stormer H L, et al. Experimental observation of the quantum Hall effect and Berry's phase in graphene. *Nature*, 2005, 438: 201–204
- 3 Novoselov K S, Geim A K, Morozov S V, et al. Two-dimensional gas of massless Dirac fermions in graphene. *Nature*, 2005, 438: 197–200
- 4 Maher P, Wang L, Gao Y D, et al. Tunable fractional quantum Hall phases in bilayer graphene. *Science*, 2014, 345: 61–64
- 5 Li L K, Yu Y J, Ye G J, et al. Black phosphorus field-effect transistors. *Nat Nanotech*, 2014, 9: 372–377

- 6 Li L K, Ye G J, Tran V, et al. Quantum oscillations in a two-dimensional electron gas in black phosphorus thin films. *Nat Nanotech*, 2015, 10: 608–613
- 7 Qu D X, Hor Y S, Xiong J, et al. Quantum oscillations and hall anomaly of surface states in the topological insulator Bi_2Te_3 . *Science*, 2010, 329: 821–824
- 8 Analytis J G, McDonald R D, Riggs S C, et al. Two-dimensional surface state in the quantum limit of a topological insulator. *Nat Phys*, 2010, 6: 960–964
- 9 Shekhar C, Nayak A K, Sun Y, et al. Extremely large magnetoresistance and ultrahigh mobility in the topological Weyl semimetal candidate NbP. *Nat Phys*, 2015, 11: 645–649
- 10 Doiron-Leyraud N, Proust C, LeBoeuf D, et al. Quantum oscillations and the Fermi surface in an underdoped high- T_c superconductor. *Nature*, 2007, 447: 565–568
- 11 Sebastian S E, Harrison N, Palm E, et al. A multi-component Fermi surface in the vortex state of an underdoped high- T_c superconductor. *Nature*, 2008, 454: 200–203
- 12 Hunte F, Jaroszynski J, Gurevich A, et al. Two-band superconductivity in $\text{LaFeAsO}_{0.89}\text{F}_{0.11}$ at very high magnetic fields. *Nature*, 2008, 453: 903–905
- 13 Balicas L, Brooks J S, Storr K, et al. Superconductivity in an organic insulator at very high magnetic fields. *Phys Rev Lett*, 2001, 87: 067002
- 14 Uji S, Shinagawa H, Terashima T, et al. Magnetic-field-induced superconductivity in a two-dimensional organic conductor. *Nature*, 2001, 410: 908–910
- 15 Wang J F, Tokunaga M, He Z Z, et al. High magnetic field induced phases and half-magnetization plateau in the $S=1$ kagome compound $\text{Ni}_3\text{V}_2\text{O}_8$. *Phys Rev B*, 2011, 84: 220407
- 16 Sebastian S E, Harrison N, Batista C D, et al. Dimensional reduction at a quantum critical point. *Nature*, 2006, 441: 617–620
- 17 Kikuchi H, Fujii Y, Chiba M, et al. Experimental observation of the $1/3$ magnetization plateau in the diamond-chain compound $\text{Cu}_3(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$. *Phys Rev Lett*, 2005, 94: 227201
- 18 Zhitomirsky M E, Tsunetsugu H. Magnon pairing in quantum spin nematic. *Europhys Lett*, 2010, 92: 37001
- 19 Svistov L E, Fujita T, Yamaguchi H, et al. New high magnetic field phase of the frustrated $S=1/2$ chain compound LiCuVO_4 . *JETP Lett*, 2011, 93: 21–25

Scientific issues under high magnetic field

KUANG GuangLi & PI Li

High Magnetic Field Laboratory, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China

High magnetic field is an important research condition which can provide great opportunities for the development of many subjects. Since 1913, there are 19 Nobel Prizes which are related to high magnetic field. Scientific research under high magnetic field involves a large amount of subjects and various scientific issues. In many research areas such as the quantum transport in semiconductors, Fermi surface measurements, the study of the upper critical field of high temperature superconductors, nuclear magnetic resonance study etc., high magnetic field is an essential condition. Therefore, the scientific research under high magnetic field is always the frontier. In this review, the cutting-edge scientific issues under high magnetic field are presented. The issues in physics include the fractional quantum Hall effect in graphene, the quantum oscillations in black phosphorus, the topological insulator Bi_2Se_3 , the Weyl semimetal NbP, the quantum ordering in non-conventional superconductor, the magnetic field induced new superconducting phase, the magnetic field induced metamagnetism transition, the quantum effect of low dimensional materials, the spin frustration, etc. In chemistry and material science, the focuses are magnetic field induced new chemical reaction, control of reaction routes, the reaction kinetics, synthesis of single molecular magnet and chiral materials, nano-catalysis, etc. Issues related to nuclear magnetic resonance are also mentioned, including the protein structure determination, magnetic resonance imaging for medical science, the structure of melt, geosciences and environmental sciences, etc. Moreover, the present condition and achievement of the high magnetic field facility in China are shown in the following part. Three water-cooled magnets have created three world records. The water-cooled magnet WM1 with a 32 mm bore can generate a steady magnetic field of 38.5 Tesla, which has exceeded the previous record 37.5 Tesla. The water-cooled magnet WM5 with a 50 mm bore has produced a magnetic field of 35 Tesla, which is also the highest for the same type of magnets. The water-cooled magnet WM4 with a 32 mm bore has generated a magnetic field of 27.5 Tesla when inputting 10 MW power. All the magnets have corresponding experimental systems. For example, WM1 has a ^3He extreme low temperature experiment dewar installed providing a temperature region from 325 mK to 70 K, which is mainly used for transport measurement. The high-homogeneity water-cooled magnet WM2 has a high field high frequency (82 to 690 GHz) electron magnetic resonance continuous wave system installed. WM5 can cooperate with a Fourier transform infrared spectroscopy (18000 to 4000 cm^{-1}), a vibrating sample magnetometer for magnetization measurement, and a high pressure experiment system (0–200 GPa). The service of the high magnetic field facilities in China will provide strong support for various cutting-edge research and create advantage for significant original achievement.

high magnetic field, experimental facility, scientific issue

doi: 10.1360/N972015-01189