

# 强磁场下的科学研究

张裕恒<sup>†</sup>

(中国科学技术大学 中国科学院强磁场科学中心 合肥 230026)

**摘要** 文章介绍了强磁场在半导体物理、低维物理、高温超导体、重费米子、磁学、原子分子物理、化学、有机化合物、材料科学、微重力、核磁共振等领域中的重要作用。

**关键词** 强磁场 科学研究

## Scientific applications of high magnetic fields

ZHANG Yu-Heng<sup>†</sup>

(University of Science and Technology of China, High Magnetic Field Laboratory, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230026, China)

**Abstract** We present a brief review of the applications of high magnetic fields in various areas, including semiconductor physics, low-dimensional physics, high temperature superconductivity, heavy fermions, magnetism, atomic and molecular physics, chemistry, organic materials, material sciences, microgravity, nuclear magnetic resonance, etc.

**Keywords** high magnetic field, scientific research

随着近代科学与技术的飞速发展,强磁场作为一种极端条件愈来愈显露它的重要作用。(1)发现新现象:强磁场可非常有效地诱导自旋、轨道有序,并改变电子结构和原子、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,例如整数和分数量子霍尔效应的发现就是被强磁场揭示出的,并分获1985年和1998年的诺贝尔物理奖。(2)认识新现象:强磁场可以抑制一些因素,而突出一些效应,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。(3)催化出一系列新的重大应用技术:例如强磁场作用下的电磁冶金技术,化学反应合成,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、磁共振技术和磁悬浮微重力技术等研究已经成为新的学科方向。

## 1 凝聚态物理学

凝聚态物理的每一新进展往往孕育着高新技术

的诞生,它也是当代科学中最活跃和产生诺贝尔奖最多的领域,强磁场环境又给它以新的生命。

### 1.1 强磁场中的半导体物理

半导体是当代电子工业的基础,目前研究方向是开拓多种高新技术应用和寻求新功能半导体材料。

#### 1.1.1 磁光谱和半导体的微结构

在磁场下半导体的导带和价带都分裂成一系列的朗道能级(见图1),电子从导带的朗道能级跃迁到价带的朗道能级,就会发出荧光。测量荧光光谱随磁场的变化,就能对半导体的电子态、激子态等有深入的了解。在强磁场下,量子阱、量子线、量子点中的电子或激子同时受到磁场和量子限制的强相互作用,它将呈现出一系列新的物理特性。不论从实验或理论的角度,都是有待研究的课题,而且为新的量子器件的诞生提供物理基础。

由于半导体生长技术和刻蚀技术的发展,已经制成了各种半导体的微材料和微结构,如自组织生

2008-12-12 收到

<sup>†</sup> Email: zhangyh@ustc.edu.cn

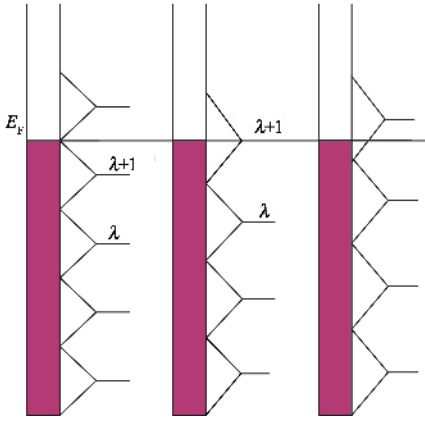


图1 在磁场中连续的导带和价带劈裂成孤立能级,即朗道能级

$$E_n = (n + 1/2) \hbar \omega_c \quad \omega_c = qB/m$$

长量子点、量子线、化学方法生长的纳米晶线和纳米晶粒、刻蚀方法制成的各种微结构等。这些半导体微材料和微结构将成为下一代微电子和光电子器件的基础。对半导体的微结构,由于量子限制效应,产生一系列量子能级,它们与半导体材料的形状、应变和外场(电场和磁场)状况有很大的关系。磁光谱是研究这些半导体微材料和微结构电子态性质的最有力的工具之一。

### 1.1.2 回旋共振

回旋共振是精确测定半导体中电子和空穴有效质量的有力工具。磁光谱是研究电子在导带和价带朗道能级之间的跃迁过程,而回旋共振则是电子在同一个带(导带或价带)的朗道能级之间的跃迁过程。它已经有几十年的历史,早期回旋共振用的磁场强度低,因此回旋共振吸收的电磁波频率在微波范围,实验要求在低温下进行。用强磁场可以将共振电磁波频率提高到红外波段,实验可以在室温下进行。现在回旋共振除了可以确定有效质量以外,和磁光谱一样,主要用于研究各种异质结构、超晶格、量子阱中电子或空穴的能带结构。

### 1.1.3 磁输运、整数和分数量子霍尔(Hall)效应

磁输运还包括电阻随磁场而振荡的现象,称为 Shubnikov-de Haas 振荡(见图2),这个效应能够直接测到材料的费米面(见图3)。整数量子霍尔效应(见图4)和分数量子霍尔效应(见图5),即在低温下,随磁场增加,霍尔电阻  $R_{xy}$  呈量子化台阶变化。Shubnikov-de Haas 振荡和  $R_{xy}$  量子化台阶是同一个物理起源。随着磁场增加,电子的费米能级依次通过各朗道能级,电阻随磁场振荡的分辨率直接决定于磁场,一般磁场要高于 20 T 才能清楚地分辨出,而且磁场愈高分辨率愈好。

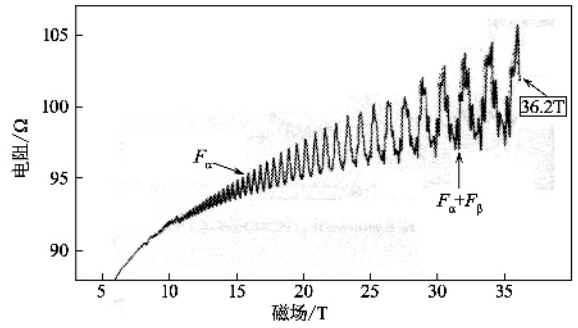


图2 电阻随磁场的振荡, Shubnikov-de Haas 效应

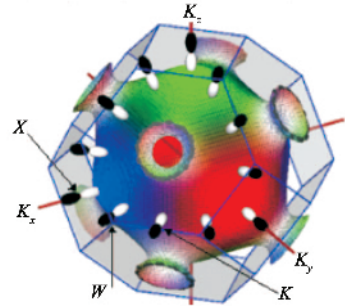


图3 Cu 的费米面

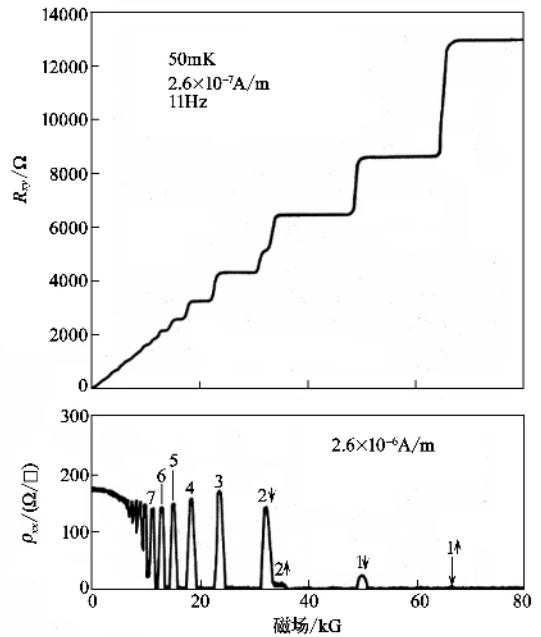


图4 整数量子霍尔效应. 上图为霍尔电阻  $R_{xy}$  与磁场关系, 下图是正常输运的电阻率  $\rho_{xx}$  与磁场关系

半导体平面结构在磁场下的介观输运。利用半导体的刻蚀技术可以在二维电子气上刻蚀出各种微小尺度(nm量级)的金属栅极,在栅极上加负电压,则将耗尽栅极下方二维电子气中的电子,使得二维电子气中形成一定的电子通道,如量子点、量子环、

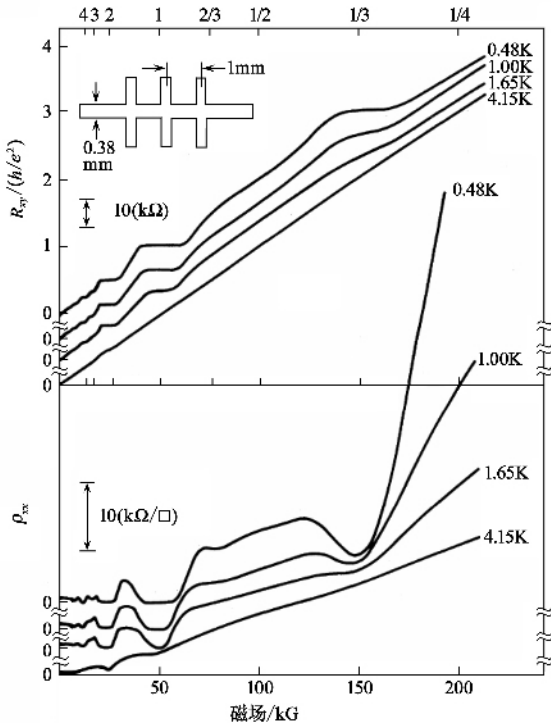


图5 分数量子霍尔效应. 上图为霍尔电阻  $R_{Hy}$  与磁场关系, 下图是正常运输的电阻率  $\rho_{xx}$  与磁场关系

平面栅结构等. 由于这些平面结构的尺寸很小, 电子在其中的运输不受到散射. 这种运输行为是服从于量子力学的波导运输或弹道运输, 具有与一般的经典运输完全不同的性质, 称为介观运输. 在强磁场下的介观运输更具有特别的意义, 如: A-B 环在磁场下的电导率振荡、位相振荡、平面量子点的共振隧穿等.

### 1.1.4 稀磁半导体和自旋电子学

稀磁半导体中的磁性离子与载流子的相互作用, 使得磁性半导体具有一系列独特的性质, 如电子、空穴能带的巨磁分裂、高的居里温度等. 利用这些性质可以在半导体中产生自旋极化电子, 除了用电荷传递信息以外, 还增加了用自旋传递信息的一种新的手段. 实验证明, 自旋弛豫时间很长, 可以达到 ns 的量级, 因此产生了“自旋电子学”这一新的学科. 在这里应该强调指出, 稀磁半导体的概念应该是在自旋弛豫时间以内的行为, 因为磁性粒子中自旋电子(例如  $d$  电子)注入半导体(半导体是  $s$  电子)在大于其弛豫时间后将失去其局域性, 而成为自由电子. 在强磁场下研究稀磁半导体和自旋电子的一些基本性质是非常重要的, 特别是自旋电子的产生、运输和退相干的问题.

### 1.1.5 新型磁性半导体

真正磁性半导体是存在的, 近年发现的 LaSrMnO 和 CeSrMnO 等庞磁电阻材料就分别是  $p$  型和  $n$  型磁性半导体, 而且半导体性既可在顺磁区也可在铁磁区.

常规半导体器件的微型化在不久的将来将达到极限, 这是由半导体自身的属性决定的. 而目前发展起来的 CMR 材料其电阻率比常规半导体低两到三个量级, 这就预示着空穴、电子型掺杂的 CMR 材料可做成新型的远未达到微型极限的半导体器件.

### 1.2 低维物理

标志强磁场的一个是磁长度  $l = (\hbar/eB)^{1/2}$ . 当  $B = 100T$  时,  $l = 2.56nm$ , 达到了纳米的尺度, 因此是在纳米尺度上研究凝聚态物质性质的有用的工具.

#### 1.2.1 强磁场下纳米结构体系中的物理问题

随着制备技术的发展, 已获得了多种纳米结构量子受限体系, 如二维量子阱、超晶格、一维纳米线、纳米管、准零维的各种量子点等. 在强磁场下对上述体系开展研究, 则为验证新理论、探索新现象提供新的手段与途径. 以纳米碳管为例, 在强磁场下, 纳米碳管可以在金属与半导体之间相互转换. 由于量子受限效应, 利用强磁场可以改变纳米管的电子结构, 从而改变了材料的运输性质. 我们知道, 纳米碳管的导电性取决于自身的属性, 但是通过磁场也可以改变其特性. 由此可见, 纳米碳管的特性不仅可以通过分子自身重构来调控, 还可以通过强磁场移动其能级来调控. 此外, 强磁场还使纳米颗粒中的电流可以不受界面散射影响, 这将有利于了解纳米材料的本征行为, 见图 6.

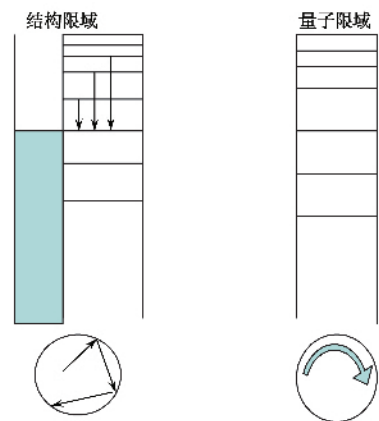


图6 结构限域和量子限域

通过强磁场对纳米结构体系能带及能带精细结构、元激发等物性与输运行为研究,认识各种新量子现象的物理机制,这将为设计新型光电、电子和自旋电子器件提供依据。

### 1.2.2 二维电子气的强关联相互作用

二维电子气是一个强相互作用的体系,电子之间的库仑相互作用将使磁光谱有很大的修正。例如费米边奇点的增强效应,在费米能量上荧光峰强度随磁场的振荡行为等。特别是它可以研究二维电子气的光学性质与整数、分数量子霍尔效应之间的关系,研究组合费米子的性质。

整数和分数量子霍尔效应激发了研究二维电子气在磁场下物理性质的热潮。整数霍尔效应的物理基础已建立,它可用非相互作用电子解释,但仍有许多问题有待解决,如磁场中的态密度,局域态和非局域态的状况等。广泛地在 35 T 强磁场下测量比热、磁化热导率和热功率,对解决这些问题是必需的。

而分数量子霍尔效应则是由相互作用电子的强关联态引起的。最近发现,分数量子霍尔效应能用一类新的粒子——组合费米子来解释,它是一个电子和多体量子力学波函数的涡旋(vortices)形成的束缚态,即可看成是由一个电子和附着它的两根磁通线构成。在这个物理图象下,半满填充(一般在 16T 的磁场下)的正常电子可以看成是零等效磁场下的一个新的费米子。组合费米子的一个重要性质是它所感受到的磁场与外磁场不同,从而解释了分数量子霍尔效应。证明这一概念的一种方法是证明这些新粒子具有新的尺度上的几何共振,但很难得到清楚的相关数据。在 35 T 磁场下情况相对简单些。另外  $\frac{1}{4}$  根磁通线附着一个电子的状况还很少研究过,因磁场强度不够。一般来说,在很高的磁场下,可以对更高的电子态密度和对应的强库化相互作用进行研究。

二维电子气研究的问题有:

(1) 二维电子气的磁能带结构和电子的填充情况。

(2) 二维电子气中电子的强关联性质,包括:组合费米子的性质、在填充因子  $\nu = 1/5$  附近量子霍尔液体中绝缘相的性质、Wigner 晶格的实现和它的性质等。

## 1.3 高温超导体

### 1.3.1 高温超导电性机制

高温超导电性迄今不清,强磁场有可能给人们

提供这个机遇,因为超导体是配对电子发生量子凝聚以后的产物,但是,是什么作用导致配对,一直未被人们了解。在新发现的非常规超导体中,超导与自旋  $1/2$  的反铁磁相密切相关。尽管有关超导电性起源的模型很多,但到目前为止,Anderson 的反铁磁共振价键态(RVB)模型(见图 7(a))仍然是为人们接受的一类。所谓共振价键,如图 7(b)的苯环,虚线和邻近的实线形成共价键,但它不是固定的,而是和苯环的六个键都有形成共价键的机会,因此称为共振价键。图 7(a)是反铁磁排列自旋作用形成共价键,它不受是否是近邻的限制,某一个时刻在虚线框 1 中形成反铁磁共价键,而下一个时刻这个反铁磁共价键在虚线框 2 中形成,故称为 RVB 态。要想了解它必须破坏它。显然强磁场能提供研究它的环境。强磁场下可得到低能准粒子的激发,强磁场可造成自旋单态系统的拆对效应;在氧化物超导体和一些二维超导体中,超导配对和它们的凝聚可以不是同时发生,凝聚过程发生在较低的温度。对于这样的系统,加强磁场时,超导的长程位相相干先被破坏,而往往库珀对仍然存在。这样一种类似于玻色-爱因斯坦凝聚型的超导转变过程,给超导物理带来崭新的课题。

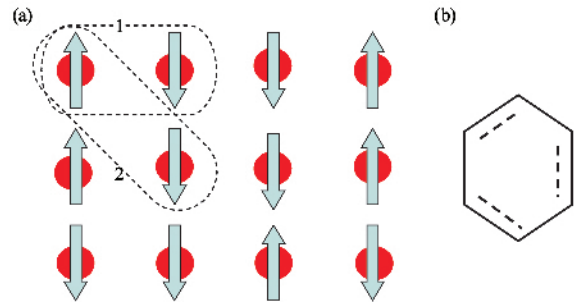


图 7 反铁磁共振价键态(RVB)模型示意图

高温超导体和近年发现的钉系、钴系等新型超导体可能拥有非费米液体行为的基态。因此当超导被破坏后,出现具有奇异特性的基态,例如高温超导体正常态显现非常奇异的赝能隙的行为。到目前为止,赝能隙的机理仍然不清楚,它可能来自于自旋隙、预配对、电荷有序或反铁磁涨落等等。这个赝能隙是在超导的“抛物线”覆盖区域消失,还是在过掺杂区域随着超导一起消失,仍然是一个谜,需要利用强磁场将超导压制后才能判断。另外正是这种反常的正常态特性决定了其超导机理的复杂性。通过强磁场来压制超导电性,使得基态显露出来,研究这些基态的性质,为超导机理提供重要信息。这种基态相

变在强关联电子材料中表现出非常丰富的研究内容,是今后一段时间凝聚态物理研究的重要前沿。

### 1.3.2 实用高温超导体对强磁场应用的前景

水冷强磁场的获得要求非常高的能量,例如 20 T 水冷磁体就需要 20 MW 电源,而能量这样高的能源大部分为欧姆热损耗掉。由于超导体无欧姆损耗,所以强磁场大都利用超导磁体获得。高温超导出现后,人们渴望高温超导线、带材能在液氮温度下使用。迄今的结论是它们的临界磁场非常高 ( $H_c(0K)$ ) 甚至都在 100T 以上,但在磁场中  $j_c$  迅速降低。这是由于高温超导的相关长度很短,因此阻止磁通运动的钉扎中心要求很小,人们还在不断努力解决这个问题,但值得庆幸的是,它们在低温(例如小于 20K)下有非常理想的  $j_c \sim H$  关系,Bi 系线带材料在 10T 下  $j_c$  几乎不变,这就意味着有可能将混合磁体中的 Bitter 线圈用高温超导线材代替。这是当前国际的动向,虽然尚未实现,但人们一直在努力提高  $j_c \sim H$  的性能,就是为实现这个目标去努力的。我国建立高磁场国家实验室无疑会促进实用超导材料的进展,反过来,使用超导材料性能的提高也有望应用到高磁体上。

### 1.4 重费米子

重费米子材料主要有:铈(Ce)化合物,如  $CeAl_3$ ,  $CeCu_2Si_2$ , 铀(U)化合物,如  $UBe_{13}$ ,  $UPt_3$ , 其特征是具有大的电子有效质量,电子比热非寻常地明显增加,这是由于在费米面附近存在  $f$  电子的局域窄能带。局域的  $f$  电子是有磁性的,可以用磁场来调制。

$CeCu_2Si_2$ ,  $UBe_{13}$ ,  $UPt_3$ ,  $URu_2Si_2$  有非常规的超导电性,类似于 mK 下观察到的三重态超流<sup>3</sup>He。 $CeCu_2Si_2$ ,  $UBe_{13}$ ,  $UPt_3$  的  $B_c(T)$  曲线显示异常温度关系。这些材料在 1—10 K 形成的费米液体,被认为是 Kondo 点阵互作用的结果,它是不稳定的,这与超导低能抗铁磁态的形成有关。强磁场下的电阻、比热、磁化率和超声衰减的测量提供了这些材料电子结构方面的重要信息。

对重费米子化合物  $URu_2Si_2$  的研究表明,存在两个相关的能量尺度:它显示反铁磁序,Néel 温度  $T_N = 17.5$  K,临界场为 14.5 T,在平行于  $c$  轴的方向加上 40 T 左右的磁场,由于自旋的取向排列而发生相变。这个相变在磁化和磁电阻数据上都有反映,在  $T_0 = 17.5$  K 时存在磁电阻反常,这与部分费米面上的带隙打开有关, $T_0$  温度下的临界场为 40 T,与

反铁磁转变温度  $T_N$  的临界场不同,要弄清楚其物理内涵,需要在接近 40 T 的磁场下对比热和磁电阻进行仔细的研究。

## 1.5 磁学

许多新的磁现象和自旋相关效应不断出现,磁学仍然是当今凝聚态物理中最为活跃的学科之一。与此同时,磁性材料的研究、开发和应用,对电机、电子、仪表、自动化、计算机、汽车、医疗、家电,超高密度磁存储、超高灵敏度磁传感器和磁随机存储器等行业起着重大的作用,在国民经济、高科技领域中占据越来越重要的地位。

### 1.5.1 强磁场下的磁性材料

对于磁性材料的研究,强磁场显得尤为重要。在磁性材料中,磁性原(离)子间的不同类型交换作用是导致丰富磁结构和磁性多样性的直接原因,深入研究各种交换作用是磁学研究最重要的课题之一。但目前一般实验室所能达到的磁场(低于 20 T)远远低于磁性材料中由于交换作用所对应的内磁场,使磁性材料的研究受到很大的限制。例如,对于稀土磁性材料,稀土原子与过渡族原子的交换作用所对应的内磁场一般在 30 T 以上。因此,磁性材料研究的深入程度完全依赖于磁场的大小。利用强磁场研究整个磁化过程可以得到磁性体系中的磁结构与交换相互作用等非常重要的信息,对深入研究磁现象和新型磁性功能材料的开发具有重要意义。

### 1.5.2 自旋电子材料

近年来氧化物钙钛矿庞磁电阻(CMR)的发现,揭开了自旋电子的面纱,出现一系列过去人们很少见到的输运行为(自旋极性选择导电、极化子和可变频跃迁),带来新的自由度(电荷序、轨道序和自旋序)。这些新的概念将会带来新的原理。强磁场是控制超大磁电阻等自旋电子材料的电荷、自旋和轨道有序度及其相互作用的至关重要的手段。

## 2 原子分子物理

强磁场中的原子分子过程的研究不仅对如量子混沌等基本物理问题的认识,也对化学反应的调控等实际问题的理解起到非常关键的作用,具有重大意义。强场下的科学问题有:

(1)强磁场中的高激发原子,量子混沌实验研究;

(2)磁场中分子的电离与解离过程,磁场对分



子反应动力学的调控；

(3) 磁场下高次谐波产生 (HHG), 磁场对超快过程的影响；

(4) 原子分子气体的非线性磁光效应。

### 3 化学

采用强磁场诱发新化学反应并合成新材料, 将极大丰富化学的内涵, 是人们关注的课题。强磁场对化学反应物质电子自旋和核自旋的作用, 可导致相应化学键的松弛和新键生成, 使反应物活化, 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。在这一领域里, 主要开展溶剂的磁化及机理研究, 磁场下的溶液合成化学的研究和强磁场诱发新化学反应研究。

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。

可开展的研究工作有：

- (1) 水和有机溶剂的磁化及机理研究；
- (2) 强磁场诱发新化学反应研究；
- (3) 强磁场下的生物模拟矿化与仿生合成；
- (4) 强磁场下的溶液合成化学的研究；
- (5) 强磁场下的高分子材料合成。

### 4 有机化合物

随着有机化合物导电特性的深入研究, 人们不仅打破了有机化合物是绝缘体的传统观念, 而且还发现有机导电材料具有广泛的应用前景。

长期以来都认为超导电性和磁性是两个相互矛盾的性质, 有机导体由于其特殊的结构特点, 有可能提供在一个存在局域磁矩的体系中实现超导电性, 因为在诸如基于 BEDT-TT 这样的电子给体的电荷转移复合盐中, 有机的阳离子和无机的阴离子是空间上相分隔的交替层状结构, 因此它们可以被看成是一个“有机-无机分子的复合物”或“化学结合的多层结构”。正因为这种有机-无机组成的分立结

构, 使人们有望合成出新的分子材料。

通过近年来的研究工作, 已经取得了一些重要进展, 如发现了铁磁性有机导体 [BETS]<sub>x</sub>[MnCr(ox)<sub>3</sub>](CH<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub>)<sub>x</sub> (x ≈ 3), 含有磁性金属元素的有机超导体 (BEDT-TTF)<sub>4</sub>[H<sub>2</sub>O · Fe(C<sub>2</sub>O<sub>4</sub>)<sub>3</sub>] · PhCN, 反铁磁性有机超导体 κ-(BETS)<sub>2</sub>FeBr<sub>4</sub>, λ-(BETS)<sub>2</sub>FeCl<sub>4</sub> 具有强磁场导致超导相变的现象等。这些结果对人们开展有机晶体中的导电电子和局域电子的相互作用的研究, 具有重要的科学意义。研究工作中要求强磁场能达 20 T。

### 5 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 *B* 的方向和强度就会影响材料的组织结构和晶粒取向。

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、法国等也积极开展强磁场下新材料的研制工作。

为了能使我国在材料物理研究领域做出一批在国际上有一定显示度的创新性研究成果, 开展强磁场下材料制备研究是十分必要的。我们的特色研究是拟自制磁场下的扫描隧道显微镜 (STM), 观察磁场下材料生长过程。磁场下 STM 国际上尚无。

可开展的研究内容有：

- (1) 强磁场纳米材料合成, 如纳米结构单元的自组织规律与原理；
- (2) 强磁场下的极性材料、磁性材料的生长规律与晶化过程；
- (3) 强磁场下的特殊结构纳米材料的物性研究；

(4) 高分子材料强磁场下的性能及应用. 强磁场下高分子的取向行为、热效应、磁响应特性、固化成型过程、力学性能等;

(5) 强磁场下材料凝固理论与技术研究.

## 6 微重力——磁悬浮

微重力下的晶体生长、细胞分裂等研究一直是人们期待的. 我国已在卫星上在太空中进行了这些尝试. 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(如青蛙、蝗虫等)对磁场有抗磁力, 并可以抵消其重力而悬浮. 图 8 给出活体青蛙在 18T 磁场中的悬浮. 这样便可在地球上开展微重力实验, 而这些实验通常是要在太空中进行的. 利用强磁场可做如下微重力研究:

(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.



图 8 强磁场中悬浮的青蛙

## 7 核磁共振(NMR)研究

### 7.1 核磁共振在科学上的重要性

核磁共振(nuclear magnetic resonance, 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.

科学上, NMR 波谱学能提供物质的以下两类信息:

(1) 原子分子水平的有关物质(分子)结构和动态的信息 (a)位置的判定和区分: 分子中不等价原子的位置可以由 NMR 谱的参数化学位移、自旋耦合常数以及谱的相对强度来判定. (b)分子中不等价原子的位置的相互关系: 这包括键长、键角及原子团簇的信息. (c)动力学信息: NMR 可以研究分子及分子内从纳秒到秒级的运动.

(2) 宏观的 NMR 图像信息: NMR 成像技术可以提供分子和 NMR 参数的空间图像, 例如自旋密度、化学位移、弛豫时间、扩散系数图像等.

基于此, NMR 波谱学已经成为物理学、化学以及生命科学等多学科研究物质成分、分子结构和动力学的有力手段, 广泛应用于科学研究的前沿. 用 NMR 可以表征多种样品, 包括从固体到液体, 从介于固体和液体之间的液晶和非晶相物质到纯净和混合样品等, 从材料到土壤和石油物探, 从解剖和生理学到结构生物学和蛋白质组学, 从高产育种到食品加工, 可以说没有哪一种谱学比 NMR 波谱学有如此广泛的应用.

NMR 波谱学在科学上具有特别重要的作用, 至今已经有 5 次诺贝尔奖授予 NMR 的研究工作, 包括两次物理学奖(1944, 1952)、两次化学奖(1991, 2002)和一次生理或医学奖(2003). 这 5 次诺贝尔奖标志了从物理学上 NMR 现象的发现、NMR 原理和实验方法的建立到广泛的化学及生物医学应用(即从物理到化学再到生物、医学)的三大里程碑式的发展, 也说明了 NMR 具有典型的多学科交叉特性.

7.2 核磁共振研究强烈地依赖强磁场. 核磁共振是发展强磁场的巨大推动力. 核磁共振是强磁体最量大面广的应用领域.

没有强磁场就没有核磁共振. 核磁共振现象的发现离不开强磁场. 因为核磁共振振动频率正比于磁场强度. 核磁共振的发展不断地追求更高探测灵敏度和分辨率, 从而持续地要求更强的磁场. 见表 1.

表 1 磁场强度与 NMR 性能参数的关系

NMR 性能参数	11.75T	21T	25T
空间分辨率	1.0	1.8	2.1
灵敏度	1.0	2.4	3.1
测量时间减少	1.0	5.8	9.3

实际上, 核磁共振是开发极端强磁场和追求稳定、均匀磁体的直接推动力, 而且核磁共振对强磁场的追求现在看来是没有止境的, 例如, 当前正在开发

1000MHz( 23.5T )的 NMR 超导磁体.

7.3 在发展和研制强磁体过程中提供技术支持 ,核磁共振研究是强磁场项目的有机组成部分 没有强磁场就没有核磁共振 ,从来核磁共振就是和强磁场捆绑在一起发展的. 反过来 ,核磁共振技术因此对强磁体的研制也提供了技术支持 ,例如核磁共振技术提供的磁场的精密测量技术 ,非均匀磁

场的匀场技术 ,不稳定磁场的稳场技术等 在各类强磁体的研制过程中是必不可少的技术.

致谢 本文素材由夏建白、沈学础、朱道本、叶朝辉、施蕴渝、闻海虎、蔡伟平、孙玉平、陆轻铀、周江宁、朱长飞、王晖、王冠中等诸位教授提供 ,在此一并表示感谢 !



· 物理新闻和动态 ·

### 沙漠力学

巨大的沙丘群形成自然界最令人震撼的景观 ,但是长期以来它们形成的机制却是个谜. 最近由阿尔及利亚、美国和法国的科学家组成的小组提出 ,这些沙漠的地貌是由上面大气层的厚度决定的. 其过程与河床上沙丘的形成类似. 研究者认为 ,这一发现可以作为建立沙漠环境长期演变模型的出发点. 在对阿尔及利亚的 erg 沙海进行考察后 ,研究人员结合实地测量与空气动力学计算 ,建立了沙漠地面与大气层相互作用的模型. 他们发现 ,沙丘之间的距离与其上面大气边界层( ABL )的高度之间存在着关联. 有关论文发表在 Nature 2009 ,457 :1120 上.

河流中 ,沿着河床均匀分布的沙丘是粗糙的河床面造成的. 高低不平的河床使河水产生涡流 ,在河水表面引起波浪 ,这些波浪又反过来使河水在河床中变得稳定. 其结果是河中的泥沙形成重复的波形 ,波的长度正比于河的深度.

研究者的计算表明 ,在沙漠环境下发生着类似的过程. 这里沙漠上面的大气层对波浪一样的沙丘起着稳定作用. 沙漠上面的大气层越厚 ,相邻的沙丘间的距离越大.

研究人员将世界上沙漠中的沙丘间隔距离与沙漠上面大气层的厚度作比较 ,说明了为什么近海沙漠中沙丘的平均间隔为 300m ,而内陆沙漠中沙丘的平均间隔为 3.5km. 他们还发现 ,与以前的理论相反 ,巨型沙丘并不是平稳地不断增长的 ,而是因小的沙丘之间的非线性相互作用而增大的. 研究人员计划对特定的沙丘群做进一步详细的研究.

( 树华 编译自 Physics World News ,25 February 2009 )





## 北京欧普特科技有限公司

光学元件库—欧普特科技 欢迎访问: [www.goldway.com.cn](http://www.goldway.com.cn)

北京欧普特科技有限公司严格参照国际通常规格及技术指标 ,备有完整系列的精密光学零部件( 备有产品样本供参考 ) 供国内各大专院校 ,科研机构 ,试验室随时选用 ,我公司同时可为您的应用提供技术咨询. 我公司可以提供美国及欧洲产的优质红外光学材料 ,如硒化锌 ,硫化锌 ,多光谱硫化锌等.



- 光学透镜 :平凸、双凸、平凹、双凹、消色差胶合透镜等.
- 光学棱镜 :各种规格直角棱镜 ,及其他常用棱镜.
- 光学反射镜 :各种尺寸规格的镀铝 ,镀银 ,镀金 ,及介质反射镜. 直径 5mm—200mm.
- 光学窗口 :各种尺寸规格 ,材料的光学平面窗口 ,平晶. 直径 5mm—200mm.
- 紫外石英光纤 :进口紫外石英光纤 ,SMA 接口光纤探头 ,紫外石英聚焦探头.
- 国产滤光片 :规格为直径 5mm—200mm.( 紫外 ,可见 ,红外 ) 及窄带干涉滤片.
- 进口光学滤光片 :长波通滤光片 / 短波通滤光片 ,波长 :400—1000nm ,窄带干涉滤光片

地址 :北京市海淀区知春路 49 号希格玛大厦 B 座#306 室 电话 010 - 88096218/88096217 传真 010 - 88096216  
 网址 :[www.goldway.com.cn](http://www.goldway.com.cn) E-mail :[kevinchen@goldway.com.cn](mailto:kevinchen@goldway.com.cn) [shinan@goldway.com.cn](mailto:shinan@goldway.com.cn) [zengan@goldway.com.cn](mailto:zengan@goldway.com.cn)  
 联系人 :陈钢先生 ,施楠小姐 ,曾安小姐 ,郑海龙先生