

# 凝聚态物理：寻找自然美学中的真谛

罗会仟<sup>†</sup>

(中国科学院物理研究所 北京 100190)

2014-07-21 收到

<sup>†</sup> email: hqluo@iphy.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20140807

如果你在校园里遇到一群物理学的研究生，问他们所学专业是什么？其中十有八九你会得到同一个答案——凝聚态物理学。是的，凝聚态物理学作为现代物理研究中最大的分支，据保守估计，世界上有八成以上的物理学家都来自此研究领域，作为科学家们助手的研究生，也一样有如此庞大的队伍。

究竟什么是凝聚态？我们熟知传统物理将物体分为三态：气态、液态和固态。其中气态中分子间距比较大(约为分子直径的10到100倍)，以致于它们之间的电磁相互作用力非常微弱，比如理想气体中分子间就不存在相互作用。然而液态和固态就不同了，它们的分子间距很小，有的甚至是紧密排列在一起的，这导致分子/原子之间是紧紧抱团在一起，把它们分开需要付出一定的能量——这就是凝聚的力量！实际上凝聚态不仅仅包括液态和固态，也包括介于两者之间的状态，如液晶、玻璃、溶胶等状态，对于分子间距较小的稠密气体也属于凝聚态的范畴。毫无疑问，人类生活世界里绝大部分物质都属于凝聚态。如果说物理研究的是“万物之理”，那么凝聚态的研究对象就是“九千物之理”了。研究对象如此包罗万象，研究的科学问题也意味着纷繁复杂，研究队伍也就随之庞大起来。因此，做物理研究的绝大部分都是做凝聚态物理的，这话一点

儿也不假。

既然是研究自然界中的常见物质材料，那么凝聚态物理必定大有用武之地。我们的日常生活和工业生产都离不开各种材料的应用，比如我们穿的衣服，棉毛质的因为隔热好而具有保暖性质，亚麻和涤纶等则因透气性好而显得清凉，而步入信息时代的现代社会，电脑里面大部分是半导体材料做成的电子元器件，液晶和LED显示器更是各种材料的杰作。在一些特殊场合，比如航空航天领域，就需要一些耐高温且延展性好的金属合金材料。而凝聚态物理，实际上就是在不断探索和寻找具有新奇物性的材料，并不断发掘这些新材料的物理特性，一方面从基本物理原理上来解释这些性质的物理起源，为寻找更多的材料提供理论指导，另一方面则试图在原型器件上将这些材料的特性加以应用，为人类生活编织更美好的未来。

凝聚态物理的好玩之处就在于，在不断探索新材料、发现新物性、揭示新机理、试图新应用的过程中，领会大自然中最为原始的奥秘——自然之美。自然之美总是令人叹

为观止的，自然的规律更是不断诱发人类的好奇心。比如，如果问到翩翩起舞的蝴蝶翅膀、婀娜多姿的人类身体和宏伟壮观的故宫建筑有什么共同之处？学凝聚态物理的同学一定能告诉你答案——那就是对称性。对称本身就是一种美，如果某人仅有一只眼睛或者一只耳朵，就一定显得怪异非常，就像电影



图1 凝聚态世界的对称之美——冰晶

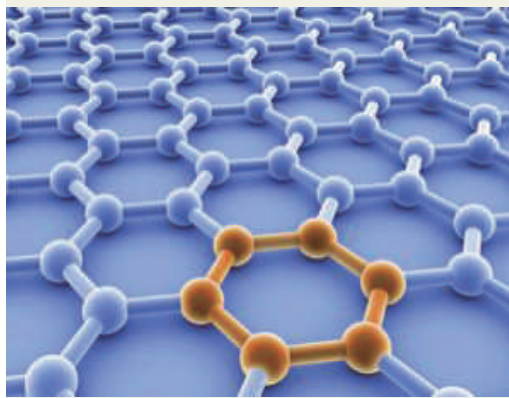


图2 微观尺度上的原子规则排列——石墨烯(取自网站<http://www.morsh.cn/newsDetail.asp?id=75>)

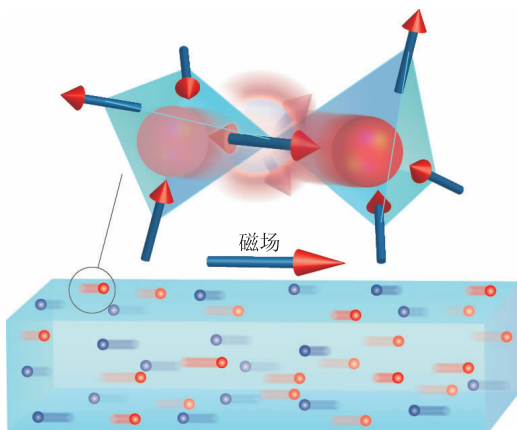


图3 磁场下自旋冰材料中的磁单极子和反磁单极子(取自 *Nature Physics*, 2014, 10: 88)



图4 分数量子霍尔效应中的 Laughlin 态(由 T. Kovacs 和 T. Duff 提供, 取自网站 <http://physics.bnu.edu.cn/application/faculty/kousupeng/06.htm>)

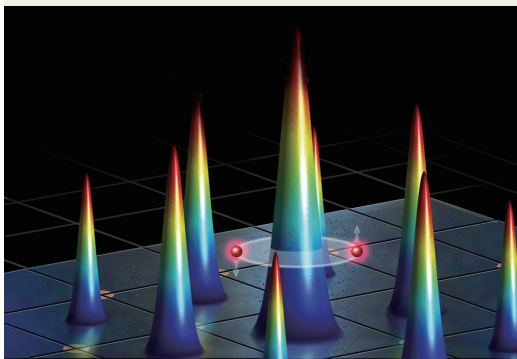


图5 超导材料中的磁通涡旋态与库珀对(图片由 Stephen D. Wilson 提供)

《怪物公司》里面的各种怪物一样。有趣的是，自然在追求对称之美的同时也存在不对称之美。因为氢键的存在导致雪花冰晶有着各种

各样的形状，虽然它们绝大部分都是整体上为六角形，但是细节上却各有不同。正如一句名言道：“世界上不存在两片完全相同的树叶”，即便是一个貌似高度对称的六角冰晶，它也总是在某些地方并不是那么完美对称的(见图1)！对称度的降低在凝聚态物理中叫做对称破缺，正是这种对称破缺给我们生活的世界带来了多样性，男孩的发型有时偏分可能比中分更帅气，而女孩若在一只手上戴上手镯也许更添标致。在凝聚态物质中，对称性的破缺意味着一种新有序态的产生，对应一种相变。如水结成冰，水分子就是从一种相对无序的状态形成了有序的排列。我们常见的白糖、食盐乃至钻石都具有一定的规则几何外形，这正是因为其内部原子存在规则有序排列所致(见图2)。如果加热到熔点以上，这些具有规则外形的晶体就会熔化，恢复到对称性更高的液体，进一步加热液体将会汽化成离散的气体。同样，固体材料中的磁矩/自旋也会因为相互作用而形成规则排列结构，组合成铁磁、反铁磁、顺磁、螺旋磁等各种纷繁的磁性结构(见图3)。

类似地，如果我们只关注固体材料中的电子，那其实它们也存在类似的气、液、固等状态。从这个角度来说，凝聚态物理更像是研究

电子的各种“凝聚状态”，主要关注电荷、自旋和轨道三个自由度。在一些半导体多层膜的界面处，存在一种稀薄的二维电子气(即电子之间的相互作用很弱，近似为自由电子)，这种电子气具有很高的迁移率，在极低温和强磁场情况下会出现整数量子霍尔效应和分数量子霍尔效应等奇异的量子物理特性(见图4)，是未来电子器件可能应用方向之一。在金属材料中，某些情况下也可以近似把其中的巡游电子(即跑得最快的那些电子们)当做自由电子来处理，这样就大致能解释金属材料的热容等物理特性。实际上，金属中的电子间总是存在相互作用的，如果它们之间的库仑相互作用较弱，就可以近似看作电子液体，正是电子液体的本征物性导致材料整体的力、热、光、电等物理性质。如果电子之间的相互作用进一步加强，在凝聚态物理中称之为强关联体系，该领域是物理学研究的前沿之一，至今尚无成熟的理论体系。至于电子能否像原子那样形成规则排列的电子固体，则有待科学的进一步探索和研究。在凝聚态物理中，电子态的对称性破缺会产生一系列有趣的物理现象，例如：电子依靠中间媒介两两配成库珀对后可以凝聚成具有零电阻和完全抗磁性的超导态；电子自旋磁矩取向一致的时候可以形成磁性很强的铁磁态；相邻电子聚拢在一起可以形成电荷密度波态等。由这些电子群体导致的各种量子态又将衍生出一系列新奇物态(见图5)。理论物理学家告诉我们，一种对称性的存在必然对应着一种守恒律，反之，一种守恒律也必然对应一种对称性。在当今凝聚态物理前沿研究中有种材料叫拓扑绝缘体，其内部的电子在能

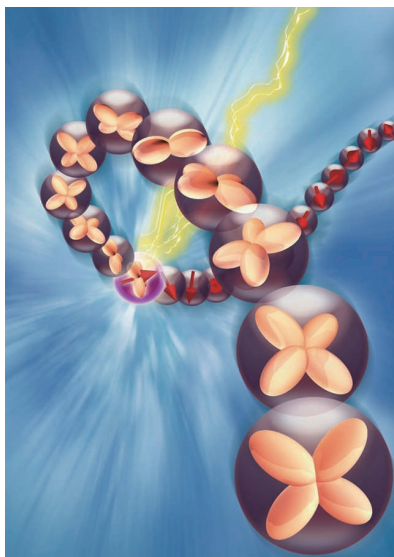


图6 电子可以“分身”成轨道子和自旋子(取自网站<http://phys.org/news/2012-04-electrons.html>)

量—动量分布上受到时间反演对称性的保护,因此存在类似粒子物理学中的宇称守恒,尽管在材料内部是绝缘体,但是在材料表面却是稳定存在的金属性质。最近,中国科学家在该材料上观测到了量子反常霍尔效应,如果应用到未来电子器件,很有可能会出现翻天覆地的新一代信息革命。

至此,估计你大致了解了凝聚态物理学的研究内容:在原子尺度下,研究凝聚状态下材料中的分子/原子/电子分布排列方式和相互作用模式,从而理解材料整体的力、热、光、电、磁等物理特性。也许你会疑惑,在现代物理学大厦中,自然界的四种基本相互作用和基本粒子的标准模型都已经完成,也就是说,我们对原子的个体或电子的个体已经了解很透彻了,为什么还需要费老大力去理解一堆原子组成的凝聚体呢?这恰恰是凝聚态物理的核心观念所在,因为微观粒子遵从的量子力学和宏观物体遵从的经典物理大有区别,在这里 $1+1$ 往往

是大于2的,而 $2-1$ 也未必等于1。事实上,我们知道凝聚态物质里含有的原子数目在 $10^{23}$ (即阿伏伽德罗常数)量级,而这些原子可是存在相互作用的,其中的电子亦是如此,不仅电子和原子核存在相互作用,电子和电子之间也存在相互作用。正所谓“多了就是不一样”,如此之多的微观粒子在一起可不是吃素的,它们之间复杂的相互作用会导致各种各样新奇的物理现象,而不是每个原子简单的累加。例如,许多蛋白质大分子在原子含量甚至是原子排布上都是大同小异的,但是它们的折叠方式不同会导致整个分子的生物功能完全不同。另一方面,如果我们反其道而行之,假如把三维材料限制成近二维(比如薄膜或单原子层材料)、一维甚至零维,也会得到令人神奇的效果,比如单层的石墨原子材料叫做石墨烯(见图2),非常坚硬和牢固,且传导电子非常快,性能上已经大大优于石墨。或者我们可以将这一大堆原子分成一小撮一小撮的原子团簇,那么它们体现的物理性质又将标新立异。

在凝聚态材料这个“大染缸”里,电子实际上已经不再是当初那个自由自在的“单纯”粒子,而是穿着“马甲”带着各种各样相互作用的“准粒子”。利用环境影响,我们甚至可以在凝聚态物质中模拟磁单极子等罕见的物理状态(见图3),而电子自己有时也会“分身术”——劈裂成一个自旋子和一个轨

道子(见图6),这在自由粒子状态下是很难实现的。甚至很多时候“准粒子”并不需要对应一种基本粒子实体,而只是凝聚态物质中的一种“虚构粒子”,例如声子就代表原子构成的晶格振动能量量子。利用准粒子的概念,凝聚态物理研究巧妙地把许多复杂的多体相互作用简化成了准粒子之间的相互作用。从复杂回归到简单,这正是凝聚态物理探寻自然美学真谛的“秘密武器”。

了解凝聚态物理学是什么之后,让我们来看看凝聚态物理研究是如何做的吧。凝聚态物理大致可分为理论计算和实验研究两大块。理论计算就是从原子层面上去分析凝聚物质中原子/电子之间的相互作用,利用量子力学的基本原理去推演其可能出现的微观状态。从数学角度来说,大于3个物体组成的相互作用系统是很难找到严格解的,要知道,凝聚态物质要处理的系统可是 $10^{23}$ 之多的个体!好在物理学家不会太死脑筋,他们聪明地使用“秘密武器”攻击要害之处:一方面材料本身具有对称性——大部分情况下原子实际上是存在规则排列结构的,另一方面解决问题的关键因

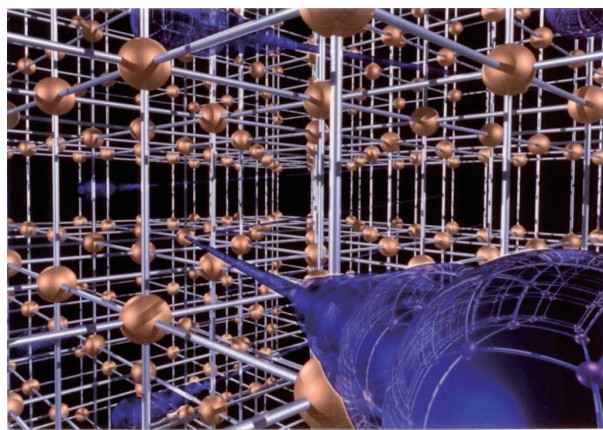
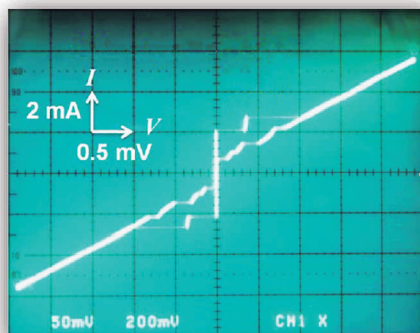


图7 晶体材料的中子衍射(取自英国卢瑟福—阿普尔顿实验室ISIS中子实验站网页<http://www.isis.stfc.ac.uk/>)

## 高温超导约瑟夫森效应演示仪



设备组成：测量仪+样品+测量杆；

测量仪：高温超导约瑟夫森效应演示仪

微波源：固态微波发生器；

频段：10GHz；

最大输出功率：80mW；

衰减器：最大衰减20dB；

样品：高温超导晶界约瑟夫森结

尺寸：10mm×10mm×1mm；

工作温度：77K（液氮沸点温度）

测量杆：采用快速真空接头的漏热式恒温器；

工作温度：300K至77K；

性能指标：能测量、显示高温超导约瑟夫森结和超导体的临界转变温度 $T_c$ 和交直流约瑟夫森效应(约瑟夫森结的 $I-V$ 曲线)。配置一些其它部件还可显示约瑟夫森电流随磁场的变化或用于超导直流超导量子干涉效应的演示和利用该效应开展微弱磁场的测量的扩展实验。



北京西燕超导量子技术有限公司

地址：北京市海淀区中关村北大街116号  
2209室

电话：010-58874105

E-mail: xiyanCD@163.com

素——影响其某种物理特性的起因只有少数几种相互作用有效，加之引入其他近似方法，利用现代先进的计算机组，物理学家们就可以模拟计算出材料的各种物理特性了。物理学的基石在于实验，任何理论都需要经受实验的反复验证才能最终被人们所接受，因此，凝聚态物理学更多的是需要做大量的实验研究。这些实验研究无非是从宏观上研究凝聚物质的力、热、光、电、磁等物理特性，以及从微观上研究其原子排布、电子能量和动量分布以及它们之间的相互作用等(见图7)。话虽说起来简单，但实际做起来绝对不像过家家那么轻松。在凝聚态物理实验研究中，首先第一步需要获得可做实验的样品。样品的质量会直接决定实验的成败，而能否得到好的样品在于不断地重复和探索。当年爱迪生寻找了一千多种材料才找到合适的白炽灯丝，可以毫不夸张地说，这只是在凝聚态物理实验样品制备过程中一个司空见惯的例子而已。有了样品之后，你将需要一台很好的精密仪器，仪器的分辨率、稳定度、工作效率等性能越高就意味着实验的成功就越有希望，很多时候在前沿科学研究中，因为市场太小或造价太贵等因素，商

业化的仪器并不存在，因此好的测量仪器往往需要你亲自搭建起来，这不仅仅需要用到物理学知识，还需要大量关于机械设计和加工、电路设计和搭建、信号采取和微机通信等多方面的工科知识，真的是需要“八仙过海各显神通”。有了样品和仪器，下一步你需要设计一个精巧的实验，从而让你的实验结果能够反映理论的预言或设想。最终实验结果需要能够得以重复，并能确认所采集数据不是来自其他干扰因素，这需要经验也需要判断。有了实验数据结果，下一步就是数据分析和理论解释了，我们需要剔除实验数据中不相关的因素，提取其中能反映物理本质的内容，再和理论预言进行对比，寻找合适的理论解释。至此，我们才从实验和理论的两个不同角度得到了凝聚态物质特性的本质认识。

在中国的哪里可以从事凝聚态物理学的研究？中国的很多高校和科研院所都设有凝聚态物理学专业，几乎任何一个综合性大学都会有该专业。中国的凝聚态物理研究在诸多老一辈科学家的奠基、一大批中年科研主力的极力推进和众多青年科学工作者的热情投入中，正在不断蓬勃发展。近些年来，中国科学家在高温超导、拓扑绝缘体、磁性材料等诸多领域的研究，已经逐渐步入世界一流水平。用美国著名学术期刊《科学》的一句话来说，就是这些研究“将中国凝聚态物理学家推向了世界最前沿”。我们完全有理由相信，未来中国物理研究的世界级学术明星们中，必然大部分来自凝聚态物理学，也许其中一位就是你自己！