物理概念与实验演示

冯　端

（南京大学物理系；固体微结构物理国家重点实验室，南京　210008）

实验演示指证了物理概念与自然现象的密切联系，以当代凝聚态物理学中若干事例对此主题进行了论述，强调了实验演示在物理学发展中的重要性.

Abstract

Experimental demonstrations testify the close connection between physical concepts and natural phenomena. In this paper this theme is illustrated by some examples drawn from contemporary condensed matter physics, and emphasis will be put on the importance of experimental demonstrations in the development of physics.

物理学是一门以实验为基础的自然科学，物理学中各种理论之所以有价值无非是由于它们能够反映自然现象中的一些基本规律. 众多的物理概念植根于现实世界的沃土之中，而且始终和它保持紧密的联系，而实际演示乃是体现这种联系的一根纽带. 这样，实验演示不仅在物理教学中占有重要地位，在课堂教学之外，它还能促使物理概念的扩展与深化，从而成为实验物理学研究的一个部分. 下面我们从当代物理学中选择若干事例，稍加阐述. 从这些事例看来，尽管只使用了简单的仪器设备，却取得了很有意义的结果，有的甚至于还可以在当今物理学发展的前沿据有一席之地. 这也从一个侧面表明法拉第与卢瑟福的传统，并不因为时代的变迁而消声匿迹. 当然，谁也不能否定实验设备和实验技术在当代物理学研究中的重要性，但实验设备和实验技术还是需要人来掌握的. 没有物理上的洞见性，实验设备和实验技术还是很难充分发挥其作用的.

一、能带——电子能带到光子能带

固体物理学的核心概念，一言以蔽之，无非是周期结构中波的传播. 基于德布罗意波在周期结构中传播的固体中电子能带理论的提出，是固体物理学作为一门成熟学科出现的标志. 按照布洛赫(F. Bloch)的回忆[1]，他于 1927 年秋到莱比锡大学师事海森伯教授做博士论文. 当时正处于新生的量子力学业已在原子物理中取得巨大成功之后，海森伯正在考虑利用量子力学来解决固体物理学的基本问题. 他向布洛赫提出了两个问题：一是铁磁性的问题，另一是金属导电的问题. 前者海森伯已经抓住了问题的关键在于电子间的交换相互作用，因而布洛赫更加倾向于承担更具有挑战性的后一课题. 不管是经典的特鲁德(Drude)和洛伦兹(H. A. Lorentz)的理论，还是基于费米统计的泡利(W. Pauli)与索末菲(A. Sommerfeld)理论，都无法解释金属中电子的平均自由程远远大于原子间距的量级. 根据后来布洛赫的回忆："从开始我就相信，答案，如果有的话，将从电子的波动性质中找到，特别是在海特勒(Heitler)与伦敦(London)和洪德(F. Hund)已经揭示了分子中的价电子并不局限于一个原子. 启发我认识到周期结构乃是至关紧要的则是由于回忆起普通物理学中的一个演示实验：横杆上等间地距悬挂了许多同样的摆，以同样方式耦合起来，这样，其中一个动了起来，就显出有运动在沿横杆传播."随后通过解周期场中的薛定谔方程，就奠定了固体中电子的能带理论的雏型. 1946 年

法国物理学家布里渊(L. Brillouin)在一本《周期结构中波的传播》的小书[2]中,阐明了不同类型的波在周期结构中的传播具有共性,不管是经典的电磁波还是量子力学中的德布罗意波.这样,滤波器的截止频段就和能带的带隙具有共同的物理根源,都是波在周期结构中传播的结果.这一观点就将固体物理学的几支主要理论——能带理论、晶格动力学理论和晶格中X射线衍射理论,统统纳入统一的理论框架之内.固体物理学的许多进展即在于对这一理论框架予以充实和添补.既然德布罗意波在周期结构中的传播导致能隙的出现,那么电磁波在三维周期结构中的传播也应产生类似的效应.这一问题长期未受人们重视,迟至1987年雅布隆诺维奇(E. Jablonovitch)方开始探讨所谓光子能带(photonic bands)的问题.起始的工作类似于一个演示实验[3]:他在一叠高折射率的介质板上钻许多同样的孔构成列阵,再将这些板叠合起来,形成了空心球列阵所形成的三维周期结构,然后利用可调频的微波源向此人工晶体发射微波,测量其透射系数,再通过不同折射率板材的选择,调整孔径大小等纯爱迪生式的摸索试验,终于获得了相应的能带图,验证了能隙的存在.这一演示引起了学术界的重视,引发了有关光子能带的理论计算[4-7].由于电磁波是矢量波,就应采用矢量波来进行计算,这增加了问题的复杂性.对于面心立方晶体进行光子能带的计算结果,表明在某些对称点上能带发生简并,导致能隙的消失,和实验结果产生分歧.进一步对于金刚石结构以及计及散射体各向异性效应的面心立方晶体的理论计算,又表明,确实有能隙存在.这样,通过实验与理论的相互对比、修正补充,导致了科学的进展.

二、局域化——安德森局域化到经典波局域化

能带理论的建立、发展和多方面的应用构成了固体物理学的主流.它是建立在周期结构的基础上的.如果舍弃了周期结构,情况将是如何呢?安德森(P. W. Anderson)于1958年发表的著名论文《在无规点阵中扩散的缺席》给出了解答[8]:无序导致波的局域化.安德森这篇论文并不好懂,结论是否正确也引起人们的疑虑.正如论文著者自己所说的,该文经常被引证,却很少人去读它,连作者自己也有些信心不足.到60年代后期,莫特(N. F. Mott)对这篇论文的内涵作出了物理的解释,并和非晶半导体的一些实验结果加以对照后,方始受到学术界的重视.安德森与莫特于1977年获得诺贝尔奖金物理学奖,特别提到了他们对无序系统电子理论的贡献.1986年何善进与梅纳德(J. D. Maynard)发表了一篇关于安德森局域化的声学模拟的论文[9],实质上是布洛赫所想起的演示的现代化的翻版和推广,不仅可用以模拟周期结构,也可以模拟无序结构.这一实验采用了一根15m长的钢丝,并可将一系列等重量的铅块固定在钢丝上.在钢丝一端采用压电驱动器,激发钢丝作不同频率的机械振动.如果铅块作周期排列,钢丝的另一端所接受到的振动谱,将按照能带的方式排列,出现明显的带隙.如果铅块的排列偏离了周期性,能隙就消失了.从钢丝上的位移图象,也可以明显看出由布洛赫波的扩展态转变为局域态.这一结果表明波的局域化实质上是无规散射体所散射的波产生干涉效应的结果.这样,安德森局域化就成为从直观上很容易接受的物理概念.

三、彭罗斯拼砌与准周期结构

处于周期结构与完全无序的非周期结构之间的准周期结构在近十年内得到学术界的深切关注.但在1984年准晶发现之前却经过了一条迂回曲折的道路,并不是众所周知的.早在1937年电子计算机理论的先驱图林(A. Turing)提出可计算性的问题,判定有些问题是一台理想的计算机也不可解的.到60年代初数理逻辑学家王浩将计算机可解的问题与骨牌(各边具有不同颜色的方块)周期性拼砌平面相对应[10].因而,找到只能作非周期拼砌的一组

骨牌就对应于计算机不可解的问题. 最初有人找到一组两万多骨牌只能作非周期拼砌,随后随着研究的进展拼块数逐渐减少. 后来又将骨牌的拼砌转换为不同形状的多边形的拼砌,兴趣转为趣味几何学的问题[11]. 到 1974 年牛津大学教授彭罗斯(R. Penrose)发现两种拼块即可实现非周期拼砌[12]. 最简单的两种拼块,即胖瘦两种等边菱形. 胖的菱形,夹角分别为 72° 及 108°;瘦的菱形,夹角分别为 36°和 144°. 彭罗斯拼砌具有局域同构性及五重对称性,引起了数学家的兴趣. 荷兰数学家特布吕恩(N. G. de Bruijn)对它进行了认真的分析[13],揭示了这种图象的数学规律,表明它具有准周期性并和五维空间周期结构的投影相对应. 以上基本上是数学家的工作. 1982 年晶体学家马凯(A. L. Mackay)用光学衍射仪得出了彭罗斯拼砌的衍射花样[14],呈现明锐的衍射斑点,并显示明确的五重对称性. 明锐的衍射斑点是准周期函数具有 δ 函数式的傅里叶变换的必然后果,而五重对称性则是与经典晶体学规律不相容的. 此结果预示了准周期结构可能为晶体学开拓新的领域,这一演示不啻架设了一座桥梁,将数学游戏和物理世界联系起来了. 随后,1984 年谢赫特曼(D. Shechtman)等在急冷 Al-Mn 合金中发现了衍射花样具有 20 面体对称性[15],莱文(D. Levine)与斯坦恩哈特(P. J. Steinhardt)就认为是三维彭罗斯拼砌的结果,定名为准晶[16].

上述的一连串事实,从图林的理想计算机到准晶的发现,一环套了一环,但并不是按照科学规划的蓝图在进行的. 这令人想起了英国天文学家爱丁顿(A. Eddington)的耐人寻味的一段话:"科学发现就好象在一个巨大拼图游戏中把各个拼块拼在一起;一次科学革命并不意味那些已经安排好,连接好的拼块必须打乱;它意味我们拼上新拼块的同时,还不得不改变我们对于拼图将是什么样子的印象. 一天你问一位科学家他的进展如何,他回答说:'很好,我已经差不多拼好了那片蓝天',另一天你再去问蓝天拼得怎么样了,他就会告诉你,'我又加拼了不少拼块,不过拼出的是大海而不是天空;在它上面还飘浮着一只船'. 可能下一次拼的图像已经变成一只倒过来的阳伞;但我们的朋友仍然为他所取得的进展而兴高采烈."(引自爱丁顿的《物理世界的本质》). 但将数学问题转变为物理问题,马凯的简单的实验演示却扮演了重要的角色.

四、逾　渗

1954 年在英国煤利用协会工作的布洛班特(S. R. Broadbent)正致力于研究煤矿工人用的防毒面具. 在这类面具中存在有多孔性的碳,其中的空隙构成细小的通道,使气体可以渗透过去,如果孔隙太小,连通性不够,气体就不能透过,这样就存在一个临界阈值,超过它方能产生气体的渗透. 这样的现象被称为逾渗(percolation). 它和扩散是有差别的. 在扩散中无规性集中在流体之内,而在逾渗中,无规性却集中在固体骨架之内. 布洛特班参加一次关于蒙特卡罗(Monte Carlo)方法的讨论会,听到数学家哈默斯莱(S. M. Hamersley)所作蒙特卡罗计算方法的报告,这样就启发他对逾渗点阵模型的设想[17]:可将点阵中坐位或键分为两类,相应地有坐位逾渗和键逾渗,逾渗点阵模型建立之后,有关的理论计算也大量展开. 因而,需要有实验结果来对理论进行检验. 拉斯脱(B. J. Last)与邵勒斯(D. J. Thouless)于 1971 年首先利用导电纸上打了一系列小孔来模拟逾渗点阵[18],更加巧妙的是华生(B. P. Watson)与利恩(P. L. Leath)的工作[19],是采用剪刀无规剪截一块金属窗纱(大小为 1/4 英寸,包含 137×137 个网孔)来实现. 这样通过测量电导 σ 和切去的网点数(或切断的键数)p,就可以测定逾渗阈值 p_c. 对于两维正方网格的键逾渗阈值为 $p_c=0.5$;坐位逾渗阈值为 $p_c=0.51$. 在 $p \gg p_c$ 处,电导与 p 成线性关系,但在 p_c 附近,实验就明确显示了和线性关系的偏离的临界区域,电导 σ 与 p 满足关系式

$$\sigma = (p - p_c)^t.$$

在华生与利思的实验中测出 $t=1.38$. 在这一临界区域内的一系列物理性能(如电导、弹性模量、扩散系数等),又构成了需要理论来解释的问题. 为了处理逾渗点阵上的扩散问题,法国物理学家德燃纳,提出了迷宫中蚂蚁的有趣概念[20]. 设想将一个蚂蚁放在逾渗点阵上的某处,蚂蚁只能沿通道作无规行走. 在 $p>p_c$ 时,无限长的通道已不存在,蚂蚁偏离原点位移 R 的均方值 $<R^2(T)>$(这里 T 为时间),将随 $T\to\infty$,而趋近一有限的饱和值;而在 $p<p_c$ 的情况下,存在有无限长的通道,则当 $T\to\infty$, $<R^2(T)>\to\infty$,因而

$$<R^2(T)>=ST=2DT,$$

这里的 D 为扩散系数,S 为步长. 利用爱因斯坦关系,也可求出电导 σ 与 $<R^2(T)>$ 之间的关系. 在这里,通过现象—理论—实验—理论—……,不断的循环,大大加深了我们对于逾渗的认识.

五、沙堆与自组织的临界性

1979 年德燃纳在论述凝聚态物理学的研究主题的转移及众多的研究层次时[21],谈到对于无序状态体系的兴趣日益增长. 他指出:"人们不是在谈论着原子层次的无序(比如在玻璃中的无序状态),就是在思考着更大得多层次中的目标. 而诸如我看来似乎是统计力学的沙堆问题,沙堆平衡时的倾角以及崩塌时的动力学,却无人问津. 近几年来我们必须劝说研究者们:一个沙堆与银河系或原子核同样可以作为一个漂亮的研究课题."以他特有的物理洞察力,强调了沙堆问题的重要性. 但物理学界的响应却姗姗来迟. 一直到 1987 年伯克(P. Bak)、汤超与魏森菲尔德(K. Wiesenfeld)方始提出模拟沙堆的理论模型[22].

我们不妨在一水平表面上添加沙粒,来建造一个沙堆. 沙粒的大小和重力加速度确定了它的倾角. 继续添加沙粒,将导致沙粒的滑脱,从而建立具有动态平衡的统计定态——临界态. 处于临界态的沙堆对于添加沙粒的响应是难以预期,它可以引起少量沙粒的流失或触发大范围的崩塌. 因而这种定态和二级相变的临界现象十分相似,崩塌的尺度从小到大,延伸得极广,当然随崩塌尺寸的增大,出现的几率相应将减小,崩塌动力学在空间形态具有自相似性,在时率行为上与 $1/f$ 噪音类似. 但是,要观测到平衡相变的临界现象,必须将温度微调到临界温度附近. 而沙堆的崩塌则是自然而然演化到临界态,所以伯克等称之为自组织临界性(self-organized criticality).

自组织临界性的理论模型被提出之后,引起了科学界的广泛重视. 它提供了一个能用处理带有局域相互作用和广延空间自由度的耗散动力学系统的具有普适性的理论模型,成功地解释了地震的古登堡-里希脱(Gutenberg-Richter)规律,也应用于生命游戏、畴结构演化等不同方面的问题.

但是人们不禁要问沙堆的真实行为和自组织临界性的理论模型是否一致? 这就需要用实验来回答. 于是有关沙堆的实验应运而生. 科学家在实验室中制造沙堆,并通过天平测重或电容测量来测定其崩塌动力学行为. 实验结果不尽一致. 赫尔德(G. A. Held)发现小尺寸沙堆行为与临界性理论吻合[23],但尺寸一大,就有差异. 那格尔(S. R. Nagel)等的实验却显示沙堆崩塌动力学不符合临界性理论,倒是接近于一级相变的行为[24]. 实验和理论的吻合和差异都是值得注意的. 实际沙堆实验的否定结果,也不能据以否定自组织临界性理论模型. 因为理论模型忽略了实际沙堆的若干细节,使之不能很好地反映沙堆的实际行为,但作为一个简化具有普遍意义的理论模型,还是有其存在的价值的. 但无论如何,理论与实验的相互参照对比,乃至于修正和调整,无疑将进一步推动这一领域的发展.

[1] F. Bloch, *Proc. Roy. Soc, London A*, **371**, (1980), 24.

[2] L. Brillouin, Wave Propagation in Periodic Structure, Wiley, (1946).

[3] E. Jablonovitch and J. J. Gemitter, *Phys. Rev. Lett.*,

63(1989),1950.
[4] K. M. Leung and Y. F. Liu, *Phys. Rev. Lett.*, **65** (1990),2645.
[5] Z. Zhang and S. Satpathy, *Phys. Rev. Lett.*, **65** (1990),2650.
[6] K. M. Ho, *Phys. Rev. Lett.*, **65**(1990),3152.
[7] E. Jablonovitch and J. J. Gemitter, *Phys. Rev. Lett.*, **67**(1991),2295.
[8] P. W. Anderson, *Phys. Rev.*, **109**(1958),1492.
[9] Shanjin He and J. D. Maynard, *Phys. Rev. Lett.*, **57** (1986),3171.
[10] Hao Wang, *Sci. Amer.*, No. 11(1965),110.
[11] M. Gardiner, *Sci. Amer.*, No. 1(1977),110.
[12] R. Penrose, *Bull. Inst. Math. Appl.*, **10**(1974), 110.
[13] N. G. de Bruijn, *Net. Akad. Weten. Proc. A*, **43** (1981),53.
[14] A. Mackay, Physica, **A144**(1982),609.
[15] D. Shechtman et al., *Phys. Rev. Lett.*, **53**(1984), 1951.
[16] D. Levine and P. J. Steinhardt, *Phys. Rev. Lett.*, **53** (1984),2477.
[17] J. M. Hammersley, in Percolation Structures and Processes (eds. G. Deutcher, R. Zallen and J. Adler) Adam Hilger, (1983),47.
[18] B. J. Last and D. J. Thouless, *Phys. Rev. Lett.*, **27** (1971),1719.
[19] B. P. Watson and P. L. Leath, *Phys. Rev. B*, **9** (1974),4893.
[20] P. G. de Gennes, *Recherche*, **7**(1976),919.
[21] P. G. de Gennes, 世界科学,No. 12(1979),30.
[22] P. Bak, C. Tang and K. Wiesenfeld, *Phys. Rev. Lett.*, **59**(1987),381; *Phys. Rev. A*, **38**(1988),364.
[23] G. A. Held et al., *Phys. Rev. Lett.*, **65**(1990), 1120.
[24] S. R. Nagel, *Rev. Mod. Phys.*, **64**(1992),321.

光 子 学

于荣金
(中国科学院长春物理研究所,长春 130021)

光子学(photonics)是一门与电子学(electronics)平行的科学.简述电子学和光子学的诞生和发展,重点介绍光纤通信、光纤、光计算、光盘和集成光路的状况、作用和发展前景,强调了光子学的战略地位.

Abstract

Photonics is a science parallel to electronics. In this paper, the birth and progress of photonics and electronics are reviewed briefly. Especially, the status, significance and prospects of optical fiber communication, optical fibers, optical computing, optical disks and integrated optical circuits are introduced, with the emphasis on the strategic position of photonics.

一、电子学

电子学是研究并应用电子运动的,包括其产生的方法,支配着它的规律以及为实际应用而控制它的方法[1]. 电子学诞生于 1883 年, Thomas Edison 发现在加热的灯丝和冷的金属电极之间的真空中有一股弱电流流过;其后 John Ambrose Fleming 发明了把交流变为直流的真空二极管整流器;1906 年,Lee DeForest 发明了真空三极管,构成了第一个电子放大器. 从本世纪 20 年代开始,随着广播事业的发展,形成了电子工业. 真空电子管器件曾经是这个工业的心脏,并推动了无线电、雷达、电视、电信、电子控制设备、电子信息处理等迅速发展. 1948 年,贝尔电话实验室的 William Shockley, Walter H. Brattain 和 John Bardeen 发明晶体管,使以晶体管为基础的固体电子学得到大发