

凝聚态物理与量子力学*

冯端¹ 冯少彤²

(1 南京大学物理系 固体微结构物理国家重点实验室 南京 210093)

(2 南京师范大学物理系 南京 210024)

摘要 文章扼要地回顾了量子力学在奠定凝聚态物理基础中所起的关键作用,并讨论了当今凝聚态物理发展的主要动向,进而阐明了为何凝聚态物理,不论在基础研究,还是促进技术发展,抑或推动学科交叉方面,尚大有可为。

关键词 量子力学,凝聚态物理

CONDENSED MATTER PHYSICS AND QUANTUM MECHANICS

FENG Duan¹ FENG Shao-Tong²

(1 Department of Physics, National Laboratory of Solid State Microstructures, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

(2 Department of Physics, Nanjing Normal University, Nanjing 210024, China)

Abstract A brief survey is presented of the pivotal role played by quantum mechanics in the development of condensed matter physics, and the main areas of contemporary condensed matter physics are outlined. The reason why the latter is still full of vitality is discussed in connection with fundamental physics research. The potential technological applications of condensed matter physics and its penetration into cross-disciplinary areas are also discussed.

Key words quantum mechanics, condensed matter physics

凝聚态物理学是当今物理学中从业人员最多,内容最繁复,成果最丰硕的分支学科。为了约略地评估各分支学科近年来学术创新的业绩,不妨回顾一下近30年来(1971—2000年)诺贝尔物理奖的授予情况:凝聚态物理学以获奖12次(24人)高居榜首,学科的优势十分明显;再加上有些凝聚态物理学家获得了诺贝尔化学奖,如A. J. Heeger由于导电聚合物的工作(2000年),W. Kohn由于密度泛函的理论(1998年),还有诺贝尔化学奖也授予和凝聚态物理学相交叉的领域工作的科学家,如发现 C_{60} 的R. F. Curl, H. W. Kroto与R. E. Smalley(1996年),这些事实说明了凝聚态物理学在跨学科的影响上也是非同寻常的。从技术的角度来看,凝聚态物理学的贡献更加突出:从晶体管到集成电路,已经成为当代高技术的主流,影响到社会经济的方方面面,进入了千家万户;从激光器到光纤通信,亦复如此。2000年的诺贝尔物理奖授予对集成电路和半导体异质结有突出贡献的科学家J. S. Kilby, Z. J. Alferov与H. Kroemer,也反映了凝聚态物理学的工作对技术有很强烈的冲击。

1 历史回顾

我们来看一下量子力学在凝聚态物理建立和发

展过程中所起的关键作用。我们首先回顾一下在量子力学建立以前凝聚态物理的研究情况^[1]。

首先是对晶体学的研究,历史漫长。早在1611年开普勒就有等径球体密堆成晶体的具有超前性的猜想,但缺乏佐证。17—18世纪晶体学的研究得出了有理指数定律,为晶体具有周期结构给予了间接的支持。到19世纪,晶体对称性理论得到了发展,布拉维(Bravais)提出晶格理论, Fedorov和Schoenflies提出空间群理论,他们得出的这些周期结构的基本规律,到现在还在应用。到1912年,劳厄发现晶体对X射线的衍射,证实晶体的确具有以前这类理论的设想的周期结构。布拉格父子发展了结构分析方法,广泛用来测定晶体结构。30—40年代之后,电子衍射与中子也被用来补充X射线衍射不足之处。这样一来,固体的基本特征,即晶体具有周期结构,可以说是搞得一清二楚了。这些工作为固体物理学的发展铺平了道路。

在19世纪(沿续到20世纪初),关于固体物性的研究就已开始,并找出了一些规律:譬如维德曼(Wiedemann)与夫兰兹(Franz)发现了金属导电性与导热性的关系;Mathieson发现了金属中杂质的剩余

* 2001-02-06收到

电阻,法拉第发现 AgS 电阻的温度系数是负的,也就是随温度上升而电阻下降,体现了半导体的特征,有别于一般的金属;居里、朗之万和外斯对物质磁性(顺磁性、铁磁性)的规律进行了研究,开尔文发现了磁电阻的现象,即磁场下金属电阻有了变化,杜隆与珀蒂对固体的比热理论进行了探索;关于固体弹性的研究也有很多。所以说在 19 世纪科学家已经对固体的物理性质进行了初步的研究。

真正的要建立固体物理的理论,需要量子论和量子力学。1908 年,爱因斯坦首先将量子论用于固体比热问题,他采用了独立振子模型,每个晶格上的每个原子相互独立地振动。这个理论解决了一个重要的问题:固体比热在绝对零度时应趋于零(这是实验发现的事实,而杜隆与珀蒂的经典理论认为它是个不随温度而变的常数)。但爱因斯坦的理论对固体比热和温度的关系的实验结果吻合得并不好,所以后来就有人对这个理论进行改进。比如,1915 年,德拜就提出一个连续介质的振动模型,得出的比热和温度的关系是符合实验结果的。不久,玻恩与冯卡门(von Karmen)建立了格波在周期结构中的传播的量子理论,后来构成晶格动力学的基础,在固体物理学中占有重要地位。在量子力学建立之后,量子化的格波,也被认为应具有波粒二象性,被称为声子,成为相互作用系统中的准粒子(元激发)家族中的第一个成员。五六十年代之后,中子及光子非弹性散射技术相继问世,为探测声子和其他元激发提供了有效的实验工具。

固体物理的一个重要问题是关于金属电导的理论。经典的电导理论可以说是一个不成功的理论,因为它无从解释为何金属中电子的平均自由程远大于原子间距。所以到 1924 年,泡利与索末菲就提出了基于量子统计的金属电子理论,初步解释了金属的顺磁性与导电性。当然这个理论还是初步的,因为它没有考虑电子和晶格的相互作用问题。在 1927 年,布洛赫(F. Bloch)作海森伯的研究生。当时海森伯参与建立的量子力学已取得了很大的成功,并在一两年之内解决了原子物理的许多关键性的问题。所以海森伯认为,量子力学在原子物理已经获得的巨大成功可能会在其他领域里重演,因而开始关注固体中的关键性的物理问题。所以当布洛赫作为研究生找导师谈话时,海森伯讲,我这里有两个问题,你可以选择一个作为你论文的题目。一个问题是铁磁性的量子力学理论,因为过去铁磁性无法从经典物理取得任何实质性的理解,而具有自旋的电子间的交

换相互作用(量子力学的交换),可能是解决问题的关键。另外一个问题,他建议用量子力学解释金属的导电理论。当时布洛赫初出茅庐,刚刚作研究生,他考虑海森伯把第一个问题的基本思路都给出来了,可以说是完全跟他的思路做。而第二个问题海森伯没有讲出思路来,对布洛赫来说更有挑战性,所以他选择了第二个问题。布洛赫有一天晚上忽然想起他在上大学时看过的一个普通物理演示实验:一连串的摆连在一起,一端动了,那么波动就沿着一串摆传过去。他想到量子力学中的电子是德布罗意波,而波在周期结构中的传播应该有类似的现象,可以在一定情况下无阻尼地传播。于是他从这样一个概念出发建立了由晶格给出一个周期势场,一个电子(德布罗意波)在周期势场中传播的理论。这一理论表明:完整金属晶体在绝对零度下电阻应为零。金属电阻的物理根源在于晶格振动和杂质缺陷对电子的散射。威耳逊与布里渊将之推广为固体的能带理论。周期势场对波的传播产生所谓“禁带”和“导带”,有些频率范围是可以通过的就是所谓“导带”,有的频率范围是不能通过的就是“禁带”,应用它可以理解为何有的材料是金属导体,有的是绝缘体,而能隙小的绝缘体就是半导体(参看图 1)。也可以从另一途径来理解能带的形成:相邻原子中电子波函数的交叠,使原来原子中的能级扩展为固体中的能带(参看图 2)。半导体的电导可以通过对高纯晶体有意识地掺杂来控制。能带理论得到了实验的证实,并且为半导体晶体管和以后的集成电路的发明奠定了科学基础。这也是量子力学应用到固体物理(或者用现在的名称,凝聚态物理)上的巨大成功。

能带理论是建立在独立电子近似上的,将电子与电子间相互作用忽略不计,但实际上电子与电子间必然存在相互作用,考虑这些作用就使得固体物理(或凝聚态物理)的理论就更加丰富了。在这里一个重要的理论物理成果就是前两年得诺贝尔化学奖的 Kohn 等建立的所谓密度泛函理论。现在要计算材料的电子结构,可以利用密度泛函理论从头算起。朗道提出的费米液体理论,表明电子间虽然存在相互作用,但它的元激发基本和自由电子是十分近似的,只是穿衣戴帽稍有差异,从而得到更成熟的金属理论。海森伯自己提出的局域化的交换相互作用理论奠定了绝缘体中铁磁性理论的基础。金属中的铁磁性涉及巡游电子对磁性的贡献,是相当复杂的问题,构成了固体理论的重要篇章。电子和电子间的相互作用,总的说来,库仑斥力占主导地位。但电子体系

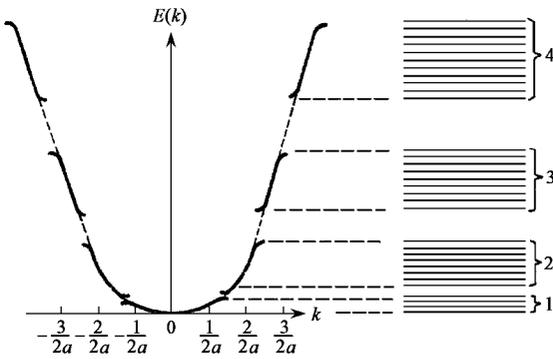
2 理论方法 :量子力学 还是经典物理 ?

固体的能带理论是一种典型的凝聚态理论,它采用了量子力学的方法来处理电子系统的问题,而将离子(或原子核)看为经典粒子,具有确切的位置,形成周期势场.在这里不仅将两种粒子系统分别处理,而且采用了截然不同的理论方法,需要适当的理论判据为这一做法提供依据^[2].按照量子力学,粒子具有波粒二象性,它的位置 q 与动量 p 应满足海森伯的测不准原理,即 $\Delta q \cdot \Delta p \geq h/4\pi$,这里的 h 是普朗克常数,与有确定的位置和动量的经典粒子完全不同.在这里考虑众多全同粒子所构成的体系.根据量子力学,所有粒子均具有二象性,即粒子与波.而粒子具有波动性乃是使量子力学异于经典物理学的主要依据.但是特定粒子的德布罗意波长 λ 是和动量 $p = mv$ 成反比的,即 $\lambda = h/mv$, m 为粒子质量, v 为速度.热平衡态的粒子速度和温度的根号成正比,即德布罗意波长与其所处温度的根号成反比(对于任何粒子).当粒子的波长能和粒子的平均间距 a 相比拟时,波动性就会突出的呈现出来.因而轻的粒子或较低的温度将有利于显示出量子力学的效应.设粒子系统处于热平衡态,粒子的平均动能 $mv^2/2$ 将等于 $3k_B T/\chi$ (k_B 为玻尔兹曼常数),根据 $\lambda = a$,可以粗略地估计出量子简并温度为

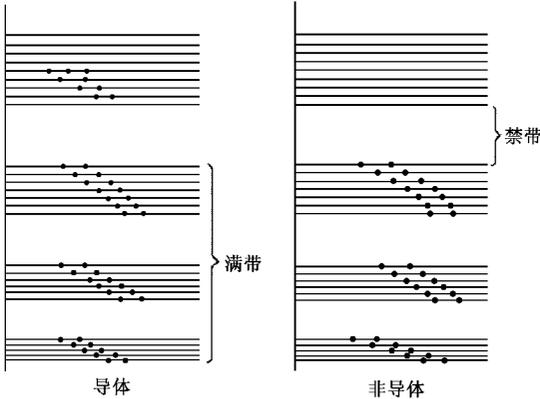
$$T_0 \approx \frac{h^2}{3mk_B a^2}$$

即当 $T \gg T_0$ 时,粒子系统中的波动性可以完全忽略不计,因而可以心安理得地采用经典物理学来处理其中的问题;反之,当 $T < T_0$,波动性将占主导地位,因而必须采用量子物理或量子统计的方法来处理问题.当然,我们也可以从其他的途径来推导 T_0 的值,如从量子统计向经典统计的过渡,结果也大体相同.

面对特定粒子系统,估计量子简并温度的数值可以帮助我们判断应该采取哪一种理论方法(量子还是经典)来处理问题.对于通常的固体和液体而言,原子的平均间距为 $0.2-0.3\text{nm}$.如果存在离域的价电子,则可以分化两个子系统,其一为电子系统,另一为离子系统.两者电性中和,从而可以保持平衡.对于电子系统而言,由于其质量轻, $m = 1.6 \times 10^{-27}\text{g}$,故简并温度高, T_0 约 10^5K ,因而在常温下总能满足量子简并条件.而对于离子(或原子)系统,粒子质量约为 $m = 1.6 \times 10^{-24}\text{g}$ 乘以原子质量数 A ,因



(a)



(b)

图 1

- (a) 能量(波数)的曲线(显示能隙的形成);
(b) 金属与非金属的能带模型

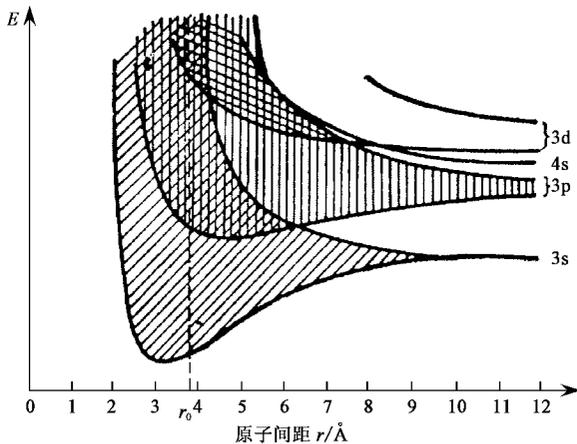


图 2 钠的能级与能带(横坐标为原子间距)

与晶格振动耦合起来可以在电子间产生微弱的吸引力,导致正负自旋电子配对,这就是 Bardeen, Cooper 与 Schrieffer 在 1957 年提出的 BCS 超导理论,可以说是解决了自 1926 年建立量子力学以来长期悬而未决的疑难问题,倍受学术界的重视.

而粗略的, T_0 约(50/A) K. 故离子系统需要冷却到低温方能呈现其波动性, 而且限于最轻的元素, 如氦或氢. 因而除了上述少数例外, 涉及原子或离子的问题, 一般可以采用经典图像来进行理论描述, 仅当处理微小能量转移时需要考虑量子化问题. 这样涉及凝聚态物质的理论通常采用两分法的办法, 对于原子(或离子)系统, 以经典处理为主(包括一些半经典的量子处理); 对于电子系统, 则必须应用量子力学来处理. 对混合的系统, 这种两分法仍然有效, 经典粒子与量子力学的波的描述常并存不悖. 例如处理晶格中的电子系统, 晶格上离子可视为经典离子, 具有确定的坐标和动量, 提供周期势场作为电子运动的背景, 而我们一定要用量子力学来描述电子的行为. 当然在离子间的相互作用之中, 电子总扮演了主要角色, 因而有关这些相互作用认真而细致的处理还是离不开量子力学. 例如, 在 Car - Parinello 方法中就采用经典的分子动力学方法. 虽则在有些场合, 采用经验式或半经验式的势函数, 如伦纳德 - 琼斯(Lennard - Jones)势, 莫尔斯(Morse)势, Stillinger - Weber 势等经典近似, 也颇有用. 上述的两分法同样适用于分子这一电子和原子核(或离子)混合的系统, 成为量子化学的主导理论方法.

粒子间距由于其平方反比关系也在 T_0 中起重要作用. 对气体而言, 由于原子间距 a 的数值较大, 因而 T_0 甚小, 要达到其 T_0 值, 实施上有相当难度, 此困难直到 20 世纪末方被克服. 反之, 原子核中的质子与中子由于平均间距异常小($\sim 10^{-14}$ m), 而导致 T_0 特别高($\sim 10^{10}$ K), 高密度的中子星也有类似情况.

凝聚现象是众所熟知的. 气体可凝结成液体或固体. 液体不同于固体主要在于它具有流动性, 就宏观而言, 其切变弹性模量为零, 就微观而言, 液体中的原子是离域的, 可在体内漫游. 而液体区别于气体在于具有明确的表面, 分开密度较高的液体和密度较低的气体. 在临界点, 两者趋同而界面消失. 有时对有机物质分化固体或液体会遇到困难, 存在有一大堆介乎其间的中介相, 如液体、复杂流体、凝胶、聚合物与生物聚合物等.

从统计物理的观点来看问题, 凝聚现象的本质在于相空间的分隔化(compartmentalization). 首先考虑位形空间, 其分隔化体现在自由表面的出现, 将位形空间一分为二. 表面附近存在明确的势垒, 使得在热平衡状态下越过表面粒子流的净量为零, 从而保持了表面两侧的密度差. 当液体凝固之后, 位形空间

的分隔化也进一步发展, 更细地划分为大量的元胞, 将粒子(原子或离子)拘囿于元胞之内.

相空间的分隔化既然能在位形空间中实现, 能否设想它也能在动量空间中实现呢? 答案是肯定的. 动量空间的分隔化对应于粒子在动量空间中的凝聚现象. 这种现象呈现于波动性占主导地位的量子体系.

在量子力学中粒子具有不可分辨性. 这些粒子可以分化为两大类型: 具有整数(包括零)自旋的玻色子和具有半整数(或奇数倍)的费米子. 前者波函数是对称的, 容许不同粒子占据同一状态, 遵循玻色 - 爱因斯坦统计; 后者波函数是反对称的, 不容许不同粒子占据同一状态(泡利不相容原理), 遵循费米 - 狄拉克统计. 电子、质子和中子为自旋等于 $1/2$ 的费米子, 光子则为自旋为 1 的玻色子. 有多个粒子构成的复合粒子, 其自旋为各组成粒子的总和. 以氦的两种同位素为例, ^3He 原子有 2 个质子, 1 个中子和 2 个电子, 因而是费米子; ^4He 原子有 2 个质子, 2 个中子和 2 个电子, 因而是玻色子.

在玻色子构成的系统中, 容许不止一个粒子占有同一量子态基态, 因而在 $T = 0$ 时, 所有粒子将趋向于占有最低动量态, 亦为最低能量态, 这样就形成了动量(或波矢)空间的凝聚体. 早在 1924 年, 爱因斯坦从理论上预言, 理想玻色气体在降温过程中达到一临界温度 T_B 时, 宏观数量的粒子将占有基态, 即发生玻色 - 爱因斯坦凝聚. 1938 年, 伦敦(F. London)将 ^4He 于 2.17K 转变为超流态解释为相互作用玻色系统的玻色 - 爱因斯坦凝聚. 1995 年, E. A. Cornell 与 C. F. Wieman 等采用激光冷却再加上蒸发冷却技术首次将 ^{87}Rb 气体冷却到 100nK 的量级, 观测到了玻色 - 爱因斯坦凝聚. 随后又有人在 Na, Li 和 H 原子气体中观察到类似的现象. 这些实验中原子间相互作用甚弱, 因而比较接近于爱因斯坦理论预言的理想玻色 - 爱因斯坦凝聚.

对于费米子系统, 泡利不相容原理排除了 1 个以上的粒子占有同一量子态的可能性, 因而处于 $T = 0$ 的理想费米气体, 从能量为零的能级, 直到费米能级一一被占, 在动量空间形成了一个费米球面, 区分被占的量子态和未被占的量子态. 这和位形空间中的液滴十分相似, 因而也可以比拟为一种动量空间的凝聚体, 虽则在费米子系统中并不存在类似于玻色 - 爱因斯坦凝聚那样确切的临界温度. 金属中的电子, 正常的 ^3He 流体和最近在极低温下的 ^4He 气体中都观察到类似的现象. 如果费米子之间存在

某种相互吸引的作用 将使费米子配对成为玻色子,再凝聚为宏观量子态,这就是金属超导体与³He超流体的情形.

3 学科发展的主要动向

应该说我们对常规材料的物性已经基本理解了.比如,对Cu,Ag,Al...的导电性质应该说是清清楚楚,Si,Ge,GaAs,InP...这一类的半导体的性质也是清楚的,Nb,Sn等金属,乃至超导合金的超导性质也是清楚的.关于材料的铁磁性也基本上是清楚的,虽然过渡金属的磁性还有一点疑问.对于BaTiO₃,LiNbO₃,KDP等的铁电性和非线性光学性质也是清楚的.所以可以说,许多物性的问题从大体上来说,已经解决了,而且目前计算材料科学得到了发展,已经可以进行所谓“从头计算”(ab initio calculation),根据物质结构的基本数据来计算出材料的物理性质.

下面进一步的发展主要反映在材料的复杂化上.大体上有三个途径:

(1)简单结构的材料通过微结构化获得不同尺度(特别是纳米尺度,约1—100nm)的复合结构.这个问题的基本观念,著名的理论物理学家费恩曼(R. Feynman)在1957年就讲过:“如果我们得以在细微尺度上控制事物的话,毫无疑问,这将使得材料所具有的物性范围大为扩充.”这就是近年来非常热门的所谓纳米结构的基本构想:就是拿不同的常规材料组合起来构成了具有特征长度为纳米量级(约1—100nm)的复合结构.纳米结构的关键在于引入有物理意义的特征长度.

量子力学早就说明了粒子可以翻越势垒而呈现隧道效应.可应用这一原理制出隧道结,两导电层间夹有绝缘层,其厚度应小于电子的隧穿长度.早在50年代,Esaki就据此发明了半导体隧道二极管,60年代初,Giever发明了单电子超导隧道结,都获得了诺贝尔奖.值得注意,1975年Julliere发现了与自旋有关的电子隧道效应,但未受学术界的重视.一直到90年代科学家重新研究了这一问题,制出了具有巨隧道磁电阻的器件,可能发展为新型的不可擦除的磁随机存储(MRAM)技术.

另外有一类宏观的隧道现象,60年代初超导体的约瑟夫森(Josephson)效应的被理论预言、实验证实和技术应用就是最早的例证.这里涉及的特征长度是超导体的相干长度,在这种情形下作隧穿的粒

子是库珀对.显然超流体中也可能有约瑟夫森效应,问题是如何实现它?⁴He超流体的相干长度太短(约0.1nm),制备相应结构困难,迄今尚未实现;而³He超流体的相干长度约50nm,其约瑟夫森效应已于1997年演示.1995年,陷阱中的碱金属原子气体在极低温下实现了玻色-爱因斯坦凝聚,从而建立了一种新的由宏观波函数控制的系统.随后,科学家也在其中演示了约瑟夫森效应.

如果结构的尺寸进入电子费米波长的范围,就会呈现另一类的量子力学现象,即量子限制效应.量子阱体现了一维的限制效应,量子线体现了二维的限制效应,量子点体现了三维的限制效应(如图3).半导体中电子浓度小,费米波长较长,达到100nm的量级,因而在技术上遥遥领先.半导体量子阱已经用作快速晶体管和高效激光器.半导体量子点,不论电荷还是能量都是量子化的,可以类比为人工原子,有不少实验已演示了这一特征.配上了电极,显示了库仑阻塞效应,可以演示单电子隧穿现象.演示量子线的首选为纳米碳管,这一方面已经有了不少漂亮的工作.

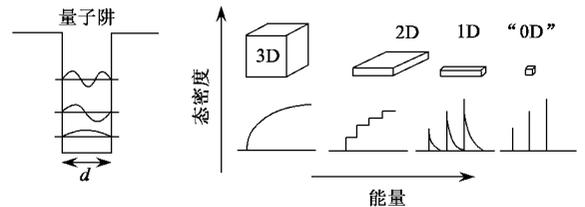


图3 量子限制效应的能量(波数)图

1988年,Fert等在金属多层膜中发现了巨磁电阻效应,体现了自旋极化电子在量子限制体系中的特殊行为.这一效应很快地进入实用化,也开拓了磁电子学(或自旋电子学)这一新领域.

(2)另一复杂化的途径在于将电子结构复杂化.首先为增强电子间的关联相互作用.我们知道电子和电子存在库仑相互作用,即关联作用.电子间的库仑能是随距离一次方成反比,而电子动能却是随距离平方成反比.因而电子浓度愈高,间距愈小,动能就占优势,相互作用可以忽略不计或是仅引起微小的修正.对低浓度的电子系统,相互作用所导致势能的比重就提高了.这样一来,一些常用的理论就可能失效.这类材料往往是不良导体,介乎金属和绝缘体之间,呈现许多新的物理性质.观测到量子霍尔效应的二维电子气就是强关联电子系统的一个实例.这一系统十分干净,但新的效应几乎层出不穷.整数量

子霍尔效应、分数量子霍尔效应、分数电荷准粒子、复合费米子、量子霍尔铁磁体... 对它的研究已经获得了两次诺贝尔奖,但新的物理问题仍在不断涌现,足以说明强关联体系的丰富多彩。

另一条复杂化的途径在于引入参与导电或与导电电子有强相互作用的 d (或 f) 壳层的电子,使电子结构乃至化学性质复杂化。这涉及一批含有过渡金属的合金和化合物。早先由实验发现的含磁性杂质贵金属合金电阻对温度曲线上有一极小值,60年代近藤(Kondo)从理论上解释为磁性原子对传导电子的散射的结果,被称为近藤(Kondo)效应。后来又发现一些稀土与铜系合金具有十分异常的电子性质,其有效质量为自由电子的数十至数百倍,被称为重电子(或重费米子)合金,采用近藤点阵理论来解释。有些重电子合金在低温下进入磁有序态和非常规超导态。最近在 UGe 合金中发现了铁磁态与超导态共存的有趣现象,理论上可解释为 p 波的重三重态配对。

过渡金属氧化物也包含不少强关联的材料。早在 30 年代末,科学家遇到一个奇怪的问题:CoO, MnO, NiO 等氧化物,按能带理论,晶胞中含有奇数的电子,应具有金属性,但实测出来却是绝缘体。莫特(Mott)认为是电子关联效应打开了能隙,被称莫特绝缘体,莫特绝缘体具有反铁磁性,而电子关联造成的金属-绝缘体相变被称为莫特相变。长期以来,莫特绝缘体与相变的研究属于冷门课题,到 80 年代中情况有了突变。氧化物高温超导体的问世,轰动全球,这些多组元钙钛矿结构的铜氧化物的奇特的性能引起学术界的关注。La-Sr-Cu-O, Y-Ba-Cu-O, Bi-Sr-Ca-Cu-O, Tl-Ba-Cu-O, Hg-Ba-Ca-Cu-O 相继被发现,超导转变温度高达 150K。值得注意,这些铜氧化物的原型相都是绝缘体,掺杂的莫特绝缘体成为导体,乃至高温超导体。由于化学的和物理的复杂性掺杂在一起,造成重重困难,不易求解。大量的研究所取得的共识仅为:在其超导态,是 d 波配对,而其能隙延伸到正常态成为赝能隙,在正常态电子行为十分异常,明显不同于费米液体。

到 90 年代,科学家又发现在另一类掺杂莫特绝缘体(锰氧化物,如 La-Ca-Mn-O 系, La-Sr-Mn-O 系)加磁场后电阻的变化十分可观,比巨磁电阻效应还大,被称为庞(colossal)磁电阻效应。庞磁电阻出现的温度接近铁磁性的居里点和金属-非金属转变。显而易见,这种异常物理性质将会得到技术上的

应用。应该指出,我们对于强关联电子体系的科学认识尚不完备,无论是实验上还是理论上都有待深入。从材料研究的角度来看,多元复杂结构的氧化物是尚待探测的“富矿区”。

(3)另一方面,有机材料也具有很大潜力。这几年,有机材料电子过程的研究也取得一些很重要的结果。现在,有机材料(有机发光管、有机场效应管等)已经逐步在技术上走向实用化。从基础理论来看,这方面的研究也极富有潜力。最近有一些报道,譬如在有机半导体中,在低温下观测到分数量子霍尔效应。这一信息表明,分数量子霍尔效应要求的高迁移率的样品在许多无机材料中也是很难做的,而现在有机单晶体可以做出量子霍尔效应来。这说明对有机半导体性质的研究有许多新的可能性。比如最近有一个报道, C_{60} 分子的单晶体掺杂到一定的浓度获得了超导体,转变温度达 52K,这是目前除了氧化物超导体外报道的最高的超导转变温度,而且估计还可能更高些。另外,生物学、化学研究的也是有机软物质,所以说在这一方面,更复杂的物质的物性对凝聚态物理是一个很重要的挑战。

4 学科具有生命力的根源

下面就三个问题强调一下作为总结。

(1)由于新结构、新现象和新机制层出不穷,对人类的智力构成强有力的挑战。也就是说,表面上看来凝聚态物理的基本问题似乎都已解决了,因为它所涉及的无非是大量电子与离子所构成的系统,而且能量不高,但实际上不然,问题在于“大量”二字,多了就跟少的不一样。量子力学的多体问题似乎含有层出不穷的新花样。作为物理学家,我们往往会犯还原论的错误,认为整体无非是部分的总和,搞清楚各个部分,整体也就了如指掌了。但世界是复杂的,实际问题并不如还原论者设想的那样简单。这表明我们要多一点辩证的态度来对待这个丰富多彩的世界。凝聚态物理学的发展孕育了一种新的观点,就是更辩证地来看待各个层次当中的科学问题。这里引用著名的凝聚态物理学安德森(P. W. Anderson)的一段话来阐述这一观点。他说:“将一切事物还原成简单的基本规律的能力,并不意味着我们有能力从这些规律来重建宇宙,当面对尺度与复杂性的双重困难时,构筑论的假设就被破坏了。大量的基本粒子构成了复杂聚集体,其行为并不能由几个粒子性质作简单外推就能理解。取而代之的是,在每一复杂性的

层次上出现了全新的性质,而理解这种新性质需要极其基本的基础研究。”为了将问题说透,不妨再引一段另一位凝聚态物理学者 L. P. Kadanoff 的话:“我在这里要反对还原论的偏见,我认为已经有相当的经验表明物质结构有不同的层次,而这些不同层次构成了不同群落的科学家研究的领域,由一些人研究夸克,另外一些人研究原子核,还有的研究原子、分子生物学,遗传学,在这个清单中,后面的部分是由前面部分构成的,每一个层次可以看成比它前面的好像低一些,但每一个层次都有新的、激动人心的、有效的、普遍的规律,这些规律往往不能从所谓更基本规律推导出来.从最不基本问题的问题向后推,我们可以看到一些重要的科学成果,像孟德尔遗传律与双螺旋结构,量子力学与核裂变,谁是最基本的?谁推导谁?要将科学上的层次分高低的话,往往是愚蠢的,在每一层次上都拥有的普遍原则中都会展现宏伟的概念。”大量粒子、大量电子等原子核的系统构成的凝聚态物质不断有新的丰富的内容有

待探索.应当说,世纪之交,凝聚态物理还是一个充满生机的科学领域.

(2)当今的凝聚态物理无疑将是 21 世纪高新技术的科学基础.关于这一点,提供一个最近看到的材料^[3].美国科学院和美国工程院召集了一些专家对凝聚态物理和材料物理进行了一个全面的综述,展望未来,提出一张表(见图 4):变革的时代.从这张表中可以明确地感受到凝聚态物理的成果对现代社会和经济的冲击.从成果而言,其中首屈一指的是半导体晶体管与集成电路的发明.照安德森(P. W. Anderson)的说法,对基础研究投资的效益可表达为零乘无穷大,这是说具体的研究项目获益的几率几乎为零,而一旦获益,就难以估量.但毫无疑问,这项研究的效益接近于无穷大.类似的是半导体激光器和光纤技术,而近年来与巨磁电阻有关的技术也有很好的发展的势头,在电子学的技术中加上了自旋这一维度.这些都是与信息技术的主流有关.

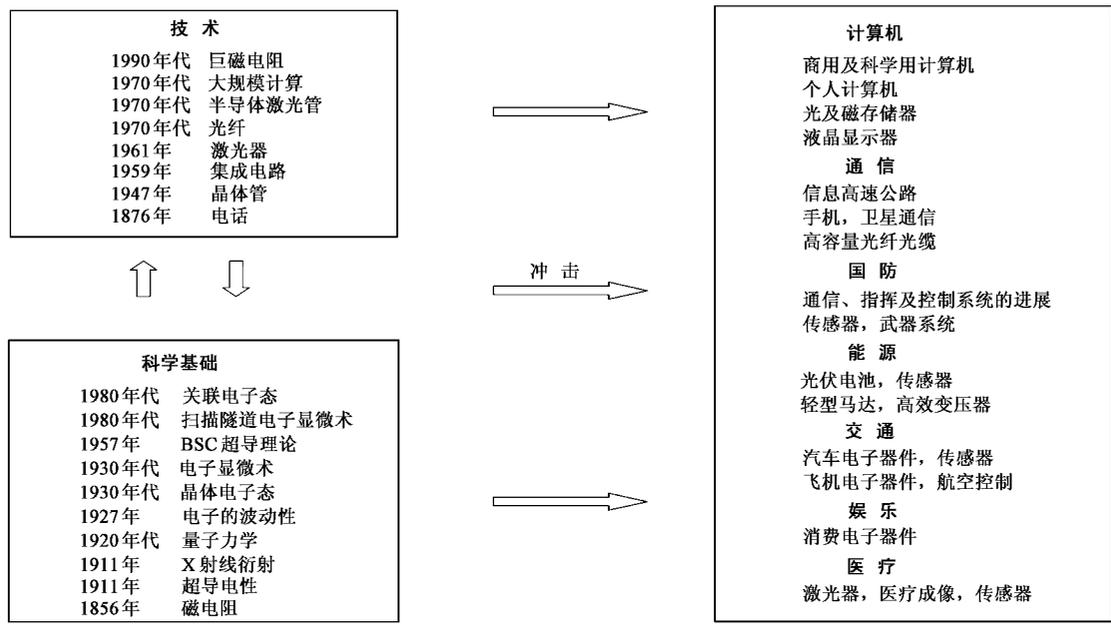


图 4 变革的时代

下面讨论一下 21 世纪面临的问题.大家知道计算机芯片的集成密度是随年代而呈指数式的增长,服从一经验规律,被称为摩尔(Moore)定律(见图 5).应该注意,从 60 年代起,芯片的发展的路线是单一的:即缩小集成电路.但从图上可以看出,到了 2015 年左右,集成电路的尺寸将达到其物理极限,芯片厂的投资量也会超出了社会的承担能力(参看图 6).必须改弦易辙,另觅途径,这也对凝聚态物理学研究提出了重大的挑战和无上的机遇.除此而外,光纤通信的容

量,磁存储的容量也都是随年代作指数上升(见图 7 与图 8),也对凝聚态物理学的研究提供机会和挑战.凝聚态物理学一直是材料科学的基础,材料物理学可以说就是略向材料倾斜的凝聚态物理学.因而在研制和开发新材料方面,凝聚态物理学家也大有可为.

(3)跨学科的渗透.凝聚态物理学在跨学科领域渗透中发挥了关键作用而显得生气勃勃.凝聚态物理和化学密切相关,而且其基础都是植根在量子力学中的.化学家特别关注分子这一层次.著名化学家 Her-

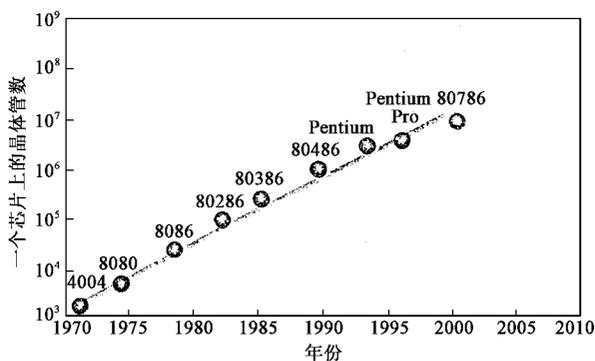


图5 芯片发展年代曲线

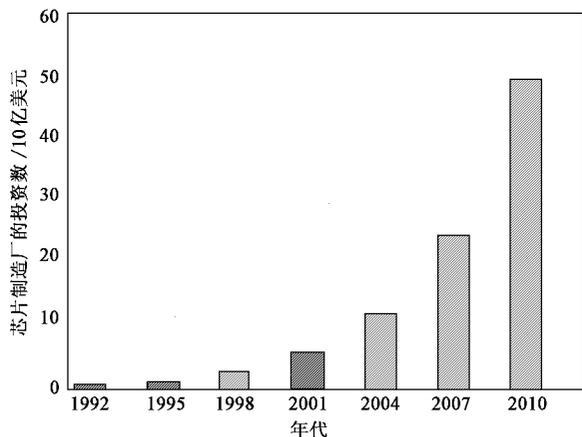


图6 芯片厂投资的年代趋势

schbach 指出了“典型的化学家高于一切的愿望是想理解为何一种物质和其他物质的行为不同,而物理学家通常冀望找出超出特定物质的规律”。这样,物理学与化学,在对物质世界的研究上正好是互补的,特别是研究领域开拓到愈来愈复杂的物质(诸如氧化物、聚合物、复杂流体等)时,两者的相互配合就是不可缺少的。进一步就是生物学科。我们知道,物理学家一直关心生物科学的发展。在20世纪40年代,薛定谔就写过一本产生广泛影响的书——《什么是生命》。后来 J. Watson 与 F. Crick 发现 DNA 分子的结构就受到这本书的影响。近年来,生物物理学的工作更加突出了。在这里我引证一段生物学家 S. W. Gilbert (诺贝尔奖获得者)的话“传统生物学解决问题的方式是完全实验的,而正在建立的方式是基于全部基因都将知晓,并以电子技术和操作的方式驻留在数据库中。生物研究的出发点应该是理论的,一个科学家将从理论推测出假定,然后再回到实验室去追踪和验证这些理论假定”。这说明物理学家还可以在和生物学家的合作中做出重要的工作。看来,在跨学科领域中,凝聚态物理学家也大有可为。

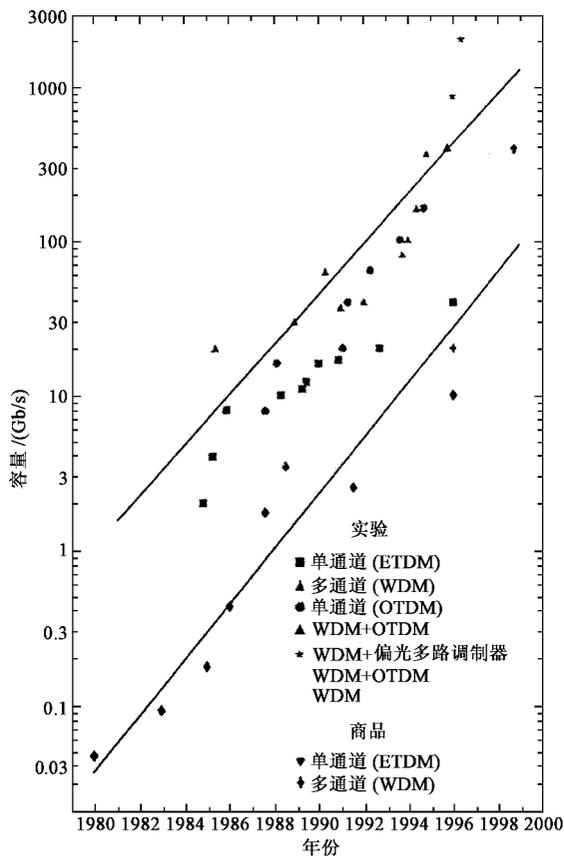


图7 光纤通信容量发展的年代表

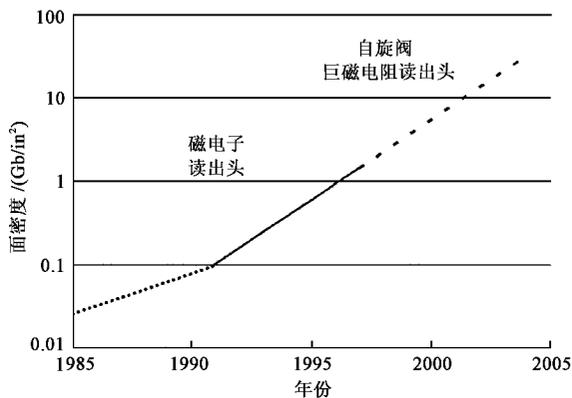


图8 磁存储容量发展的年代表

参考文献

- [1] 冯端,金国钧.凝聚态物理学新论.上海:上海科技出版社,1991 [FENG Duan, JIN Guo-Jun. New Perspective on Condensed Matter Physics. Shanghai: Science and Technology Publisher, 1992 (in Chinese)]
- [2] 冯端,金国钧.物理学进展,2000,20(1): [FENG Duan, JIN Guo-Jun. Progress in Physics, 2000, 20(1):] (in Chinese)]
- [3] Committee on Condensed-Matter and Materials Physics. National Research Council, Condensed Matter and Materials Physics. Washington D. C. : National Academic Press, 1999