

# 固体量子振荡的发现和费米面的研究

何豫生

(清华大学现代应用物理系)

罗胜

(北京钢铁学院应用物理系)

一

自从1911年荷兰著名物理学家 Onnes 发现了金属的超导电性以后, 固体在低温下的物理特性引起了人们的广泛重视。由于第一次世界大战而不得不中断的研究工作, 在二十年代初很快就恢复了起来。由 Onnes 一手创建的莱顿大学低温实验室, 成为当时世界上最著名的低温实验中心。

1926年, 25岁的苏联学者列宁格勒工学院毕业生舒伯尼科夫来到了莱顿, 在著名的德哈斯教授指导下工作。德哈斯十分赏识他过去在生长单晶方面显示出的才干, 让他在实验室里负责高纯度铋单晶样品的制作。经过几年的努力, 他们终于得到了高质量的样品, 纯度高, 缺陷少。于是, 在德哈斯的指导下, 他开始研究这

些单晶样品在低温下的电学性质。出乎意料的是, 在磁场中铋单晶的电阻(磁致电阻)并不是如前人观察到的那样平滑地变化, 而是呈现一种如图1所示的反常的振荡特性。1930年10月出版的《自然》杂志, 刊登了他和德哈斯的文章: 《铋单晶电阻在磁场中变化的一个新现象》<sup>[1]</sup>, 第一次正式报告了固体中的量子振荡现象。这就是现在人们所说的舒伯尼科夫-德哈斯(简称为 SdH) 效应。

无独有偶, 就在发现铋单晶样品的磁致电阻振荡现象不久, 德哈斯和范阿耳芬又对这些铋单晶样品在低温下的磁化率进行了研究, 发现在磁场变化的情况下, 铋单晶的磁化率也呈现一种类似的振荡特性, 如图2所示<sup>[2]</sup>。这就是著名的德哈斯-范阿耳芬(简称为 dHvA) 效应。

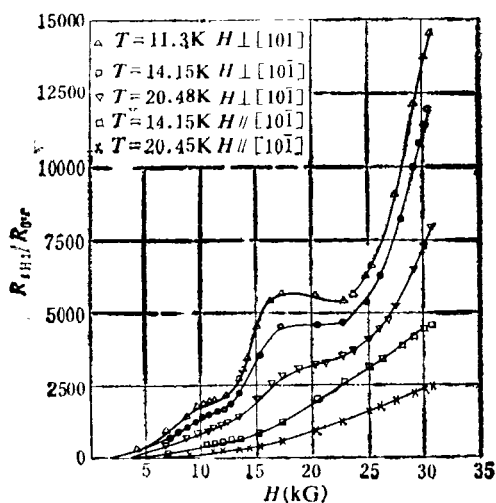


图1 舒伯尼科夫和德哈斯观察到的磁场中铋单晶磁致电阻的振荡现象  $R_H$  为低温下的磁致电阻,  $R_0$  为无磁场情况下  $0^\circ\text{C}$  时的电阻

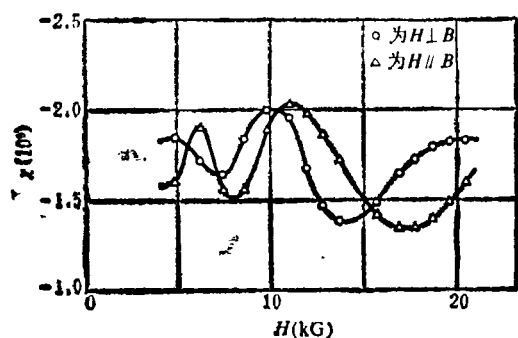


图2 德哈斯和范阿耳芬观察到的铋单晶样品在  $4.2\text{K}$  时磁化率 ( $\chi = M/H$ ) 随磁场变化而振荡的现象

历史的安排竟如此巧妙: 也就是在同一年(1930年), 苏联著名理论物理学家、诺贝尔奖金获得者朗道提出了在磁场中固体电子能量量子化的理论<sup>[3]</sup>, 即所谓朗道能级理论, 预言了在自由电子系统中这种量子振荡的存在(虽然他

当时并不知道上述实验结果，甚至还认为观测这种振荡所需要的高度均匀的磁场，很可能难以实现)。正如朗道理论所指出的那样，铋单晶样品表现出的这两种振荡，都是纯量子效应，都是由于导电电子的能量在外部磁场作用下出现量子化的直接结果。这两种振荡都以磁场的倒数为周期，显示了其间的本质联系：根源都是来自电子态密度在磁场中的周期振荡(自然，作为非平衡现象，磁致电阻的振荡还和电子散射的奇异有关)。

但是，在当时历史条件下，人们还不可能充分认识量子振荡的深刻含意，更没有马上意识到这一发现给予了人们一个强有力的武器，去探索固体内部的电子结构——费米面的奥秘。

## 二

就在固体量子振荡发现的前后，“费米面”的概念在固体物理学界便已逐渐形成了。对“费米面”的概念，诺贝尔奖金获得者、英国著名的物理学家莫脱曾作过这样的解释：“据我所知，费米本人并没有在这个领域内工作过。人们所以称之为“费米面”，是因为它反映了遵从费米-狄喇克统计的粒子(电子)的性质”<sup>[4]</sup>。费米面是在波矢(或动量)空间的一个等能面，根据费米-狄喇克统计，在  $T = 0\text{K}$  时，它将电子占据的状态和未占据的状态分开。确定这个“表面”的形状，对于了解金属、半导体及各种合金的能带结构具有十分重要的意义。正因如此，几十年来，费米面的研究在固体物理学史上留下了深深的印记。追根溯源，这个问题还应当从本世纪初叶讲起。

1900年，即汤姆孙发现电子后的第三年，Drude 提出了无相互作用的理想电子气统计理论，其后又由洛伦兹进一步深化。这一模型相当成功地描绘了金属中输运过程的经典物理图象，特别是在计算随温度变化的热导与电导比值上(维德曼-夫兰兹定律)，给出了很好的结果。但是这种建立在经典统计基础上的电子气模型，却无法解释金属热导或电导各自随温

物理

度变化的规律，以及电子对固体比热的微小贡献。

1925年以后，泡利提出了不相容原理，在此基础上又出现了费米-狄喇克量子统计，人们才终于意识到，只有那些处于“费米分布”顶部附近的电子才有可能对热、电、磁等性质作出贡献。1927年，索末菲利用上述新的量子统计，改造了 Drude 模型，提出了他的半经典理论，半定性、半定量地解答了经典理论遇到的难题。

第一个真正全部用量子理论进行计算，解决了在周期势场中，遵从费米-狄喇克统计分布的带电粒子随温度变化的电导问题的，是年轻的博士生布洛赫(1928年)。又经过许多物理学家，特别是佩尔斯和布里渊的努力，将其发展成为完整的理论——著名的布洛赫理论。其中最重要的结论就是提出了固体中存在着能带。这样，固体的导电特性主要取决于能带是否被电子完全填满，因此费米能级的位置愈发显得举足轻重。

1933年，索末菲和 Bethe 第一次发表了晶体费米面的理想模型<sup>[5]</sup>(见图3)，当时他们称之为“波数空间的等能面”。

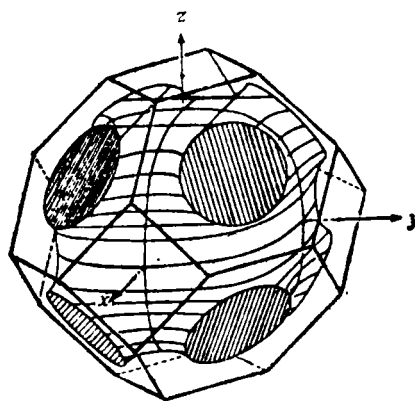


图3 索末菲和 Bethe 发表的面心立方结构晶体的“波数空间等能面”

为“波数空间的等能面”。尽管它是在忽略了电子间相互作用情况下计算出来的，但却抓住了本质特征，与二十多年后发表的铜的费米面相比较，人们不能不叹服能带理论的惊人力量！就在这时，Bethe 等人已开始意识到这一等能面“形状”的重要性，特别是在磁致电阻实验中反映出来的各向异性，引起了许多人的重视，于

是开始进行了在简单色散关系下的磁致电阻计算。在这些工作中，特别有意思的是琼斯和曾纳在1934年发表的文章<sup>[6]</sup>。文章的前半部他们使用的是“费米分布表面”说法，而到后面就直接提出了“费米面”一词。这种提法上的变化是颇为耐人寻味的。如果说前者突出的是数学上的一种分布关系，那么后者强调的则是一种“真实存在”的物理实体——一个由等能面构成的、反映了固体的确定物理性质的面。可惜的是在当时，人们还不可能去精确地计算它。大多数人还想不到，利用刚刚发现的量子振荡效应作为手段，可以实际地测量它。

### 三

最先利用固体中的量子振荡效应去实际测量费米面的，是英国物理学家 Shoenberg 和苏联理论物理学家朗道。

1932年，年轻的研究生 Shoenberg 来到了剑桥的 Mond 实验室<sup>[7]</sup>。这个实验室是英国皇家学会专门为其主持人卡皮查（1978年诺贝尔奖金物理学奖获得者）修建的。早在卢瑟福时代（1921年前后），年轻的卡皮查从苏联来到剑桥，以其在低温和强磁场方面的杰出成就，为开创剑桥的固体物理研究作出了贡献。特别是他关于横向和纵向磁致电阻的开拓性研究<sup>[8]</sup>（1928年，当时称为卡皮查效应），使他成为费米面探索研究的先驱。大概因为同是俄国血统的缘故，师生一见如故。在卡皮查指导下，Shoenberg 先是研究铋样品的磁致伸缩效应，但他很快就被铋的神奇的磁化率振荡效应（dHvA）所吸引，并开始进行研究。当时使用的实验方法，是直接测量铋样品在磁场中受到的作用力。这一方法要求磁场具有非常高的均匀度，这在当时是很难做到的，因此深入研究铋的振荡特性受到很大限制。后来，他从一位到剑桥访问的印度学者 Krishnan 那里移植了测量磁晶各向异性的转矩法，将其应用到量子振荡研究上去，成功地解决了由于磁场均匀度不够高而带来的困难。

1936年，Shoenberg 应邀访问苏联，讨论翻译朗道《统计物理》一书事宜。卡皮查（已于1934年返回苏联）趁机挽留他的学生留下工作两年。次年，Shoenberg 来到莫斯科，马上开始了研究工作。据他自己回忆，有两点十分幸运：其一，只用几个星期，仪器安装调试全部就绪，很快就得到了漂亮的振荡曲线（图4），转矩法

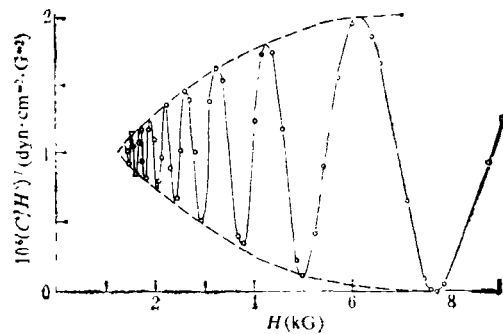


图4 Shoenberg 用转矩法在 4.2K 测量的铋单晶样品的 dHvA 振荡 C 为磁场中单位体积的转矩

立刻显示出它的强大威力。新方法的成功不仅仅在于提供了许多低场下的振荡信息，更重要的是使得细致地研究在不同温度、不同晶轴取向下的振荡特性成为可能。其二，非常凑巧，杰出的理论物理学家朗道（那时还不到三十岁），恰好也来到这个研究所工作，恰好又刚刚完成了关于铋的量子振荡的理论计算。这是在佩尔斯 1933 年<sup>[9]</sup>的半定量处理基础上的进一步数学展开，给出了明确的公式，可以和实验结果直接比较。朗道在一个信封背面，写下了他刚刚得出的公式，交给了 Shoenberg 说：“试试看，符不符合你的实验结果。”几个月后，Shoenberg 终于运用朗道的“三椭球模型”成功地解释了铋的 dHvA 实验结果。历史上第一次用实验测定了固体（铋）的费米面<sup>[10]</sup>。

### 四

1947年，美国物理学家在锌样品上发现了 dHvA 振荡<sup>[11]</sup>，揭开了第二次世界大战后继续探索的序幕。

在此之前的近二十年时间里，人们只能在铋样品中观察到固体的量子振荡，以致许多人错误地认为量子振荡只是铋这个“怪物”独有的特性。其实这只不过是因为铋的费米面非常小，最容易观察而已。

第二次世界大战一结束，Shoenberg 也急忙重新安装好仪器，进行实验。他发现，“放进转矩仪中的几乎每一种金属单晶样品，都出现了令人迷惑不解的形状各异的振荡”<sup>[7]</sup>。实际上，金属、特别是多价金属的费米面是非常复杂的，远不是早年佩尔-朗道的简单、粗糙的模型能够概括的。新的研究成果使费米面的探索工作面临着一场突破：它要求更普遍的理论模型，揭示费米面和量子振荡之间更深刻的本质联系；它要求更成熟的实验方法，从不同角度提供更全面、更细致的有关费米面的信息。在这个转折的关头，以 Onsager, Lifshits, Shoenberg 和 Pippard 为代表的一批理论和实验物理学家，挑起了这个历史的重担。

1950 年，美籍挪威量子化学家 Onsager 以访问学者身分来到 Shoenberg 的 Mond 实验室工作一年。他仔细研究了有关 dHvA 振荡的理论，提出了 dHvA 振荡频率正比于费米面垂直于磁场的极值截面面积的著名论断<sup>[12]</sup>。几乎就在同一时间，Lifshits 在基辅召开的苏联（乌克兰共和国）科学院的学术会议上宣读的一篇论文中，也独立地提出了这一理论（未发表）。在其后的一系列论文中，Lifshits 逐步完善了这一理论，不仅对 dHvA 振荡的频率做出了圆满的解释，而且对其振幅也给出了定量的描述，这就是所谓的 L-K 理论（Lifshits-Kosevich, 1957）<sup>[13]</sup>，也是目前公认的 dHvA 效应的精确理论。关于 SdH 的理论描述，最后也在 1959 年由美国物理学家 Adams 和 Holstein 完成了，这就是所谓 A-H 理论<sup>[14]</sup>。

正如许多深刻的理论所遭遇的曲折一样，人们并不是在一开始就充分认识到这一理论的价值。即使象 Shoenberg 那样的先驱者，在一开始也不能完全理解 Onsager 写给他的那篇仅三页纸的论文中包含着的崭新的物理思想。

实验工作者们依旧围绕着朗道的椭球模型探索着。终于，一个年轻人 Pippard 打破了这种沉闷的局面，闯出了一条新路。

作为 Shoenberg 第二次世界大战后的研究生，Pippard 选择了在低温下铜的反常趋肤效应作为自己的研究方向。经过几乎长达十年的潜心研究，他发现经过一系列计算之后，几乎所有的和反常趋肤效应有关的参数全可以消去，唯一剩下来的正好是费米面的曲率。这就指出了又一条研究费米面的道路。1955—1956 年，他应邀到美国芝加哥大学工作，利用那里的优越技术条件，他终于得出了铜的费米面（见图 5），这是几十年来对费米面研究的又一个重大的突破。

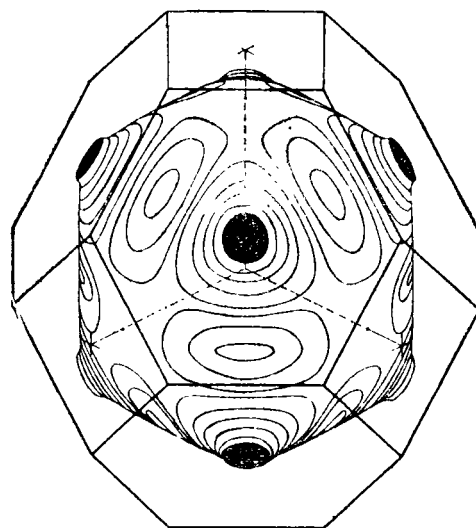


图 5 Pippard 提出的铜的费米面模型（1957 年）<sup>[15]</sup>

随后，Pippard 回到剑桥，找到 Shoenberg。新的突破使他们认识到，不能再被传统的椭球模型束缚住思想，必须重新认识 Onsager 的理论，用这种全新的思想来指导 dHvA 实验。与此同时，Shoenberg 又用卡皮查的脉冲场技术解决了提高磁场强度的困难，使他们有可能观察到长期以来一直无法观察到的反映金属费米面主体的高频振荡。终于在 1958 年底，在铜的 dHvA 振荡中，观察到了 Pippard 根据反常趋肤效应实验结果预言的“颈轨道”。Shoenberg 回忆说，那一天（12 月 18 日），他是如此兴奋，刚

吃完午饭就又赶回来,想重复一下刚才的结果。不料一个失误,电容器短路,“嘭”的一声巨响,几乎把他的耳朵完全震聋……<sup>[7]</sup>。

在此前后,关于磁致电阻的研究,也取得了重大的突破。自卡皮查开始对金属磁致电阻的研究以来,人们就注意到在某些特殊的方向上,单晶样品的磁致电阻并不趋于饱和,而是随磁场无限制地上升。1957年, Lifshits 和他的学生们提出了一种理论解释,认为在这个方向上,费米面和布里渊区界面接触,形成了所谓电子的“开轨道”<sup>[16]</sup>。这一崭新的概念把磁致电阻实验的结果和费米面的几何特征联系在一起。随后,苏联莫斯科的一个研究小组对贵金属(铜、金、银)进行的一系列磁致电阻测量的结果,与 dHvA、反常趋肤效应得到的完全一致,这一事实为 Pippard 的费米面模型提供了又一有力的证据,也为开展费米面研究提供了又一有力的武器。

这样,经过二三十年的不懈努力,在费米面的研究工作中,人们至少已有了三种成熟的实验手段: dHvA 振荡,它给出了费米面的极值截面积;反常趋肤效应,它给出了费米面的曲率;磁致电阻,它给出了费米面可能与布里渊区接触的部位。随着人们对费米面的认识不断向更深入的层次推进,新的实验方法相继“应运而生”。五十年代中期,美国贝尔实验室和布朗大学的物理学家们发现<sup>[17]</sup>,在外磁场下作回旋运动的电子对于声波的共振吸收,导致了声波衰减的周期性变化。这种声波衰减的周期振荡直接和声传播方向上费米面的线度(最大直径)相联系,这就是所谓磁声效应。它的理论是在1957年由 Pippard 首先提出<sup>[18]</sup>,由 Cohen 最后完成的<sup>[19]</sup>。实际上,即使没有外加磁场,从超声衰减的测量中,也依然可以得到关于费米面的大量信息。几乎是在同一时期,苏联的理论物理学家们对于回旋运动的导电电子对微波的共振吸收发生了极大兴趣。1956年, Azbel 和 Kaner 提出了后来被称作回旋共振技术(AKCR)的设想<sup>[20]</sup>。简单地说,这个技术测量的不是费米面的几何形状,而是回旋运动电子的有效质量。

换句话说,如果通过其它方法知道了费米面的形状,回旋共振技术可以给出电子在费米面上每一点的速度。这无疑对许多问题,特别是对输运性质的研究是极有价值的“情报”。若干年后,又是苏联物理学家 Gantmakher<sup>[21]</sup>提出了射频尺寸效应,利用微波的共振传输,为测定极薄样品的费米面提供了极好的方法。随着 A-H 理论的诞生, SdH 效应在电阻比较大的半导体材料的费米面的测试中,越发显示出其特殊的威力(关于上述实验方法的综合介绍可参考文献[22])。总而言之,老方法日趋完善,新技术不断涌现,构成了这一历史时期实验技术发展的特点。这些方法从不同角度进行探测,相互补充,相互印证,提供了较全面的关于费米面的信息。而在这些方法中, dHvA 效应被证明是最普遍、最强有力的方法。

应当指出,五十年代的成功探索,还在研究队伍的建设上取得了决定性进展。到了五十年代末,一支实力雄厚的研究队伍已经在全世界范围内形成。当时英国的剑桥、布里斯托尔,苏联的哈尔科夫、莫斯科,美国的芝加哥、伯克利及贝尔实验室等都是著名的费米面研究中心。费米面研究取得的成果对固体物理学的发展的影响是如此之大,以至后来人们专门为这一研究领域起了一个名字:费米学(Fermiology)<sup>[4]</sup>。1960年在纽约州的 Cooperstown 召开了关于费米面研究的国际学术会议(苏联未参加)。这次会议可以称得上是对五十年代研究成果的大总结,并迎来了六七十年代在费米面研究上的大好局面。

作者愿借此机会,对英国剑桥大学 D. Shoenberg 教授和 Sussex 大学 A. Grassie 博士在文献、史料方面的帮助,表示衷心的感谢。

### 参 考 文 献

- [1] L. V. Shubnikov and W. J. de Haas, *Nature*, 126 (1930), 500; *Proc. Amst. Acad. Sci.*, 33(1930), 418.
- [2] W. J. de Haas and P. M. van Alphen, *Leiden Comm.*, 208d, 212a, (1930), 220d, (1932).
- [3] L. D. Landau, *Z. Phys.*, 64(1930), 629.
- [4] N. F. Mott, *Contemp. Phys.*, 22(1981), 249.

(下转第 573 页)