

超导的发现

2010年9月出版的 *Physics Today* 杂志上刊登了两位来自荷兰莱顿大学教授关于超导现象被发现的过程的文章。一位作者是 Dirk van Delft, 他是该大学的科学史教授; 另外一位是 Peter Kes, 他是该校在超导磁通动力学领域工作的著名教授。他们对超导发现过程的详细描述, 拉开了2011年超导被发现100周年庆祝的序幕。本文以这篇文章为基础, 对超导现象从发现到发展略作介绍。

像很多重要科学现象被发现的过程一样, 超导现象也是在不断改进和提升技术的过程中被偶然发现的。20世纪初期, 欧洲机械工业化已经发展到了相当高的水平。莱顿大学的卡末林-昂内斯(H. Kamerlingh-Onnes)一直在追求达到更低的温度。由于低温的标志是将某种气体液化。当时, 世界上数个实验室均力图实现将沸点很低的氦气液化。1908年7月10日, 卡末林-昂内斯迎来了他人生最辉煌的时刻——第一次将氦气液化并达到了4.2 K (-268.8°C) 以下的温度。通过适当减压, 就可以获得1.5 K左右的温度, 为研究低温条件下物质的行为打开了方便之门。这个重要进展也使得他们小组于1911年4月8日在水银中第一次发现超导现象。图1显示的是卡末林-昂内斯和他的实验员 Gerrit Flim (盖芮特-菲立姆) 1911年发现超导现象时的照片。卡末林-昂内斯本人由于发展液氦低温技术和发现超导现象而荣获1913年的诺贝尔物理学奖。

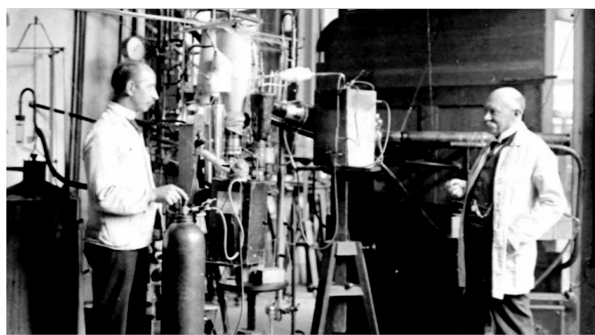


图1 卡末林-昂内斯(右)和他的实验员盖芮特-菲立姆(左)于1911年在世界上首台氦液化器旁的照片

当时传统的理论和物理学家的经验都认为, 金属的电阻只有到绝对零度时才可能完全消失。在有限温度下电阻消失是不可思议的一件事情。对于体内存在一些杂质的样品, 电子运动会受到这些杂质的散射, 因此即便是在绝对零度, 电阻也可能不是零。也有一派学说认为电子的迁移率(mobility)会随着温度的下降而降低, 因此金属的电阻完全可能会在低温下出现发散, 即变成绝缘体! 这件目前看起来不起眼的争议却是当时物理学家们非常关注的科学问题, 也凸现了实验物理的魅力, 因为最后唯有实验能够敲定这个结论。在

获得氦气液化的温度以后, 卡末林-昂内斯就很想做这个实验。他们发现水银(在低温下早已是固态)的电阻随着温度逐渐下降, 当冷却到4.2 K左右时, 电阻突然消失(如图2(a)所示), 而在金属铂中, 当测量温度降到4.2 K以下时, 电阻仍然存在(如图2(b)所示)。他们称这种处于超导电状态的导体为超导体。超导体电阻突然变为零的温度叫超导临界温度。

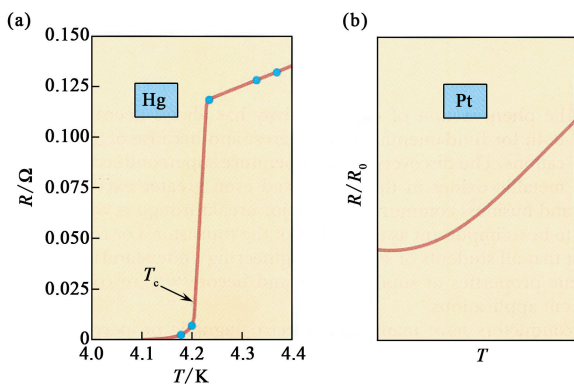


图2 水银(a)和金属铂(b)的电阻随温度的变化关系

超导现象在当时是完全出乎人们对金属电阻行为理解的大概图像, 因此开始不能被人们广泛接受。在 *Physics Today* 的原文中, 作者写到: 由于信息资料的缺乏, 这个重要发现一度被怀疑, 甚至有谣传, 卡末林-昂内斯实验室的记录本消失了。文章中用了大量的篇幅来介绍这个过程。当时对超导现象的发现产生怀疑有几个原因: 首先, 这个新现象超出了人们当时对物理知识理解的水平; 其次实验室记录字迹潦草、简捷。比如在1911年4月8日的记录中, 写到“水银, 实际为零(3K)”, 这里应该是讲电阻为零; 紧接着后面一句是“用金也重复”。我们知道金是不超导的, 当时可能是用金作为测量导线, 也重复了实验。好在物理学是实验科学, 随后的实验证据说明了一切, 超导现象是真实存在的一个重要现象。

从此超导现象代表了一类重要的新现象, 引起了人们的好奇心, 并被演示具有重要的应用价值。在超导现象被初步确认后, 卡末林-昂内斯考虑的下一个问题是电阻在超导态是真正消失为绝对零, 还是有一个“微小的, 测量不出来的电阻”。因此, 他用铅(Pb)设计了一个闭路线圈, 感应一个电流以后, 测量它电流的衰减。根据 Maxwell 方程的原理, 如果电阻真正为零, 这样电流就会没有能量耗散, 因此会无衰减地永远流下去。当时实验条件很简陋, 他用一个指南针的偏转情况来判断电流是否有衰减, 或线圈中是否有持续电流(persistent current)。1914年4月24日, 他在给荷兰皇家艺术和科学学院的报告中写到: “在1个小时内, 电流(0.6 A)

没有可察觉的变化。……一个超导线圈，如果在荷兰莱顿泡在液氮中并被励磁，那么当把它拖到很远的地方时，它的电流会继续流动，这可以演示载流的超导体具有永久磁体的性能……”。可惜当时要把装有大量液氮的低温装置拖到很远的地方在技术上还是不现实的。在卡末林-昂内斯去世6年以后，即1932年，他的技术员盖芮特-菲立姆实现这个夙愿。他把装有液氮的铅制线圈，在荷兰莱顿励完磁以后（电流200A），用马车拖到了英国伦敦，在英国皇家学院例行的周五学术报告会上，展示了超导体的魅力：电流会没有衰减地一直流动！

从此超导电性为人类所知，超导研究的热潮开始兴起。此后75年间，超导研究集中在单元素金属和多元合金中，通常称这些金属或金属合金的超导体为常规超导体，其原因是这些超导体中的电子配对基本上都是通过原子晶格的虚振动，即所谓声子作为媒介的。但直到1986年，超导转变温度只被提高到23K（约-250℃）左右。与此同时，超导理论研究也在发展，科学家们对于超导电性产生的原因进行了不懈探索，最后揭示出超导电性的形成是由于电子两两配对，而这些电子对发生量子凝聚后其运动发生相位相干的结果。目前超导领域正在向高温超导材料和非常规超导机制方向发展。在新型高温超导材料方面，科学家们于1986年底发现了铜氧化物超导体，目前最高超导转变温度达到134K（高压下

到160K）。2008年以后又发现了铁砷基的高温超导体，目前转变温度达到了57K。图3中显示的是超导转变温度随被发现时的时间关系图。而这些新型高温超导体中的电子的配对方式不再是通过交换声子，可能是通过交换反铁磁自旋涨落。如果这个图像是正确的，超导转变温度完全可以达到更高值，为人类社会带来更多方便的应用。

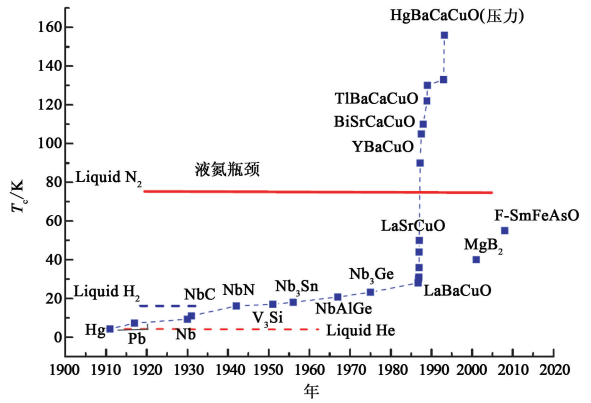


图3 超导体的转变温度随被发现的时间的关系

（中国科学院物理研究所 闻海虎 编译自
Physics Today, 2010, (9):38）