

# 我所了解的高温超导

魏鹤鸣



我们深知物理学是一门研究物质运动规律及其基本结构的科学，是一门注重理论与实验并重的

学科。随着现代物理学的发展，物理学的大厦即将建成。在这物理学的晴朗的天空中，爱好物理的人们自由飞翔，完全不受“引力”的限制。自相对论和量子力学的建立，发展了原子物理、原子核物理、高能物理、半导体物理、电子学、激光物理、材料物理等多门学科。可以说在这现代物理学的双臂下，百花齐放。物理学为世界的发展，功不可没。当然，物理的发展要感谢那些孜孜不倦的辛劳付出的学者和一些以发展物理学为宗旨的书刊、杂志。

现代物理学的分支很多，不过我一直对超导物理有浓厚的兴趣。

得知“超导”这个名词还是从初中上物理课时知道的，听老师讲的很有意思，便产生了浓厚的兴趣，然而生活在农村，条件比较差，可查书籍比较少，更别说网络了，当时还不知道网络呢。现在在大学里，随着因特网的普及、学校图书馆的开放，我有了很大的空间去寻找自己的话题。超导在大学里第一次地出现在我的面前。

## 一、超导概述

早在19世纪，有关物质导电的宏观经验定律就已建立。例如，欧姆定律、基尔霍夫定律、电阻定律等，关于物质导电的机理已经成为一个非常重要的课题。

超导现象的发现与极低温度的探索有着密切的联系，而极低温度的获得是从气体液化技术开始的。热力学的发展使人们对低温的获得和存在绝对温度的思想产生了重大的影响。此时人们注意到纯金属的电阻随温度的降低而减少的现象。1902年，开尔文认为随着温度的降低，电子将凝结在金属原子上，使金属的电阻变得无限大。随后昂内斯认为电阻先随温度降低到一个极小值，然后开始加大，并会在绝对零度时变为无穷大。

21卷第6期(总126期)

1882年昂内斯成为莱顿大学物理系教授，开始把实验室的全部研究方向都确定在低温方向。1911年2月，昂内斯发现，在4.3K时，铂的电阻是一个定值。他认为这个定值是由杂质引起的，从而昂内斯选择汞作研究对象，因为汞在常温下可以连续用蒸馏法提纯。在3K时，他发现电阻降到 $3 \times 10^{-6}$ 以下，这是第一次观察到的超导电性。

1913年9月在华盛顿召开的第三届国际制冷会议上，昂内斯正式提出了“超导态”概念。

超导体的零电阻效应被发现后，人们也许是惊喜万分，在相当长的一段时间里，一直误认为超导电性是超导体的最本质的性质，却忽略了超导体的磁性质。迈斯纳注意到超导体在有磁场时的转变中，有滞后现象存在。随后研究表明，当物体进入超导态后，外部空间的磁场分布将发生变化，使超导体内部的磁感应强度保持为零。后来称这一发现为“迈斯纳效应”。

但是这个时期还是认识超导机制的起步阶段。

## 二、超导发展的划时代

20世纪30年代，超导唯象理论有了快速的发展，有戈特—卡西米尔的热力学理论与二流体模型，有伦敦兄弟的电动力学理论。可以说金属电子导电理论此时在许多方面取得了巨大的成功。但是，超导电性是宏观世界的一种现象，在解释超导现象时，它的微观机制是如何的呢？还没有人能够给出恰当的解释。此后，许多人开始这方面的研究。他们认为，金属电子导电理论所使用的自由电子模型对超导体不再适用，应该充分考虑电子间以及电子与正离子间的相互作用。从此以后，超导物理界在电子间的库仑作用以及电—声相互作用方面展开了广泛的研究。最终在1957年由巴丁、库珀和施里弗三人共同建成了完整的超导微观机制。此后，一些物理学家根据前人的工作，相继地发现了超导隧道效应和约瑟夫森效应。

对超导现象，BCS理论给出了比较满意的解释。而在应用方面，超导现象具有很宽敞的应用空间，具有很高的应用价值。到了现代，人们一直致力于对超导材料的研究。在1968年以前，高温超导材料

的研究处于停滞状况，一直在探索，但是没有较大的进展。

此时人们提出疑问，临界温度一直在十几 K、二十几 K。对于这么低的临界温度超导材料的应用价值何在？能否有更高的临界温度？能否在常温下就有超导现象产生？1986年10月，柏诺兹等人提出了他们在 Ba-La-Cu-O 系统中获得了  $T_c$  为 33K 左右的报道。同年 12 月 15 日，休斯顿大学报告了在处于压力下的 La-Ba-Cu-O 化合物体系中获得 40.2K 的超导转变。同年 12 月 26 日，中科院物理研究所宣布，他们成功地获得转变温度 48.6K 的超导材料。到 1987 年 2 月 16 日，朱经武的试验小组在 92K 处观察到了超导转变。同年 2 月 24 日，中科院物理研究所赵忠贤领导的研究集体宣布，液氮温区超导体起始转变温度在 100K 左右。这时期超导临界温度突破液氮沸点 77K 大关，对人类具有划时代的意义。

液氮代替了液氢，为超导技术实际应用展开了广阔的前景。现代物理学中关于超导现象的研究还在进一步的进行中。

### 三、超导应用与意义

由于临界温度的不断提高，人们将这些材料称为高温超导体。高温超导体的性质由载流子浓度决定，其本征特性是相干长度很短，即不均匀性。这对探索高温超导机理是十分需要的。超导的新奇特性的发现，对人类产生了重大意义。通过一些超导现象或效应，你就会惊讶地发现超导的美。

零电阻效应具有无损耗运输电流的性质。如能实现超导化大功率发电机、电动机，例如在电力领域，利用超导线圈磁体可以将发电机的磁场强度提高到 5 万~6 万高斯，并且几乎没有能量损失，这种发电机便是交流超导发电机。超导发电机的单机发电容量比常规发电机提高 5~10 倍，达 1 万兆瓦，而体积却减少 1/2，整机重量减轻 1/3，发电效率提高 50%。那么其不必要的能耗将大大降低，这在国防、科研、工业上具有极大的意义。

现在研究中的磁悬浮列车的材料就是应用磁场强、体积小、重量轻的超导磁体。磁悬浮列车的原理是运用磁铁“同性相斥，异性相吸”的性质，使磁铁具有抗拒地心引力的能力，即“磁性悬浮”。这种原理运用在铁路运输系统上，使列车完全脱离轨道而悬浮行驶，成为“无轮”列车，时速可达几百公里以上。这就是所谓的“磁悬浮列车”。列车上

装有超导磁体，由于悬浮而在线圈上高速前进。这些线圈固定在铁路的底部，由于电磁感应，在线圈里产生电流，地面上线圈产生的磁场极性与列车上的电磁体极性总是保持相同，这样在线圈和电磁体之间就会一直存在排斥力，从而使列车悬浮起来。

此外在受控热核反应装置、回旋加速器等都具有巨大的应用价值。

利用超导隧道效应，可以制造具有高灵敏的电磁信号探测元件和用于高速运行的计算机元件，可以制造出超导量子干涉磁强计，能测出脑磁图和心磁图，这对人的大脑活动具有重大的意义。也可以应用超导体于微波器件中，这对通信的质量的提高也具有重大的应用价值，通信质量的提高将会提高人们的生活水平，改善现在的生活现状。

在军事工业中，超导技术也可以发挥其特有的作用，超导扫雷具就是其中之一。超导扫雷具的工作原理是：超导扫雷具模拟舰船磁场特性，采用两根大电流电缆在海水中形成电极，并与海水组成闭合电路产生磁场，或者在船上安装一个电磁体产生磁场，从而得以将磁水雷引爆。

超导材料在强电、弱电方面的应用也具有很大的空间。在强电方面如高能物理受控热核反应、核磁共振等方面的应用，还有一些物理研究需要很强的磁场，一些特殊的设备都需要超导磁体。核磁共振成像仪就是一个实例。其基本原理：原子核带有正电，并进行自旋运动。通常情况下，原子核自旋轴的排列是无规律的，但将其置于外加磁场中时，核自旋空间取向从无序向有序过渡。自旋系统的磁化矢量由零逐渐增长，当系统达到平衡时，磁化强度达到稳定值。如果此时核自旋系统受到外界作用，如一定频率的射频激发原子核即可引起共振效应。在射频脉冲停止后，自旋系统已激化的原子核，不能维持这种状态，将回复到磁场中原来的排列状态，同时释放出微弱的能量，成为射电信号，把这许多信号检出，并使之进行空间分辨，就得到运动中原子核分布图像。核磁共振的特点是流动液体不产生信号，称为流动效应或流动空白效应。因此血管是灰白色管状结构，而血液为无信号的黑色。这样使血管软组织很容易分开。正常脊髓周围有脑脊液包围，脑脊液为黑色的，并有白色的硬膜为脂肪所衬托，使脊髓显示为白色的强信号结构。核磁共振已应用于全身各系统的成像诊断。在弱电方面，由于

约瑟夫森效应可以得到精确度高的电压值，在电压计量工作中具有重要意义：超导量子干涉仪（SQUID）的发明也是一个重要的应用，其具有高的磁测量灵敏度，在磁学中意义重大。

高温超导无源微波器件的成功研制，一些器件，例如滤波器、延迟线等，可以在几年内成为商品面市，为全球通信服务，可以保证通信的通畅。对超导材料的应用研究还在继续并且十分活跃。然而，超导技术的应用，也表现了许多不足之处。

超导体的广泛应用要解决材料在技术方面的很多问题。在材料方面，要求超导体应有较高的临界温度和临界电流。其安全稳定性要考虑，而提高超导材料的超导转变温度是超导材料得以广泛应用的基本前提，临界电流的提高也是至关重要的。

高温超导体本身也存在一些弱点。如强烈的各向异性，短的相干长度，不均匀性等等。现代在液氢温区大规模应用高温超导体还需要努力，进一步发展制备工艺。

超导技术的应用将会越来越广泛地造福人类，对超导电性机理的进一步的了解，将会对凝聚态物理学的发展以及相关边缘学科的发展产生极为深远的影响。各国政府，特别是工业发达国家的政府，对超导研究极力支持，给以大量投资，这些国家有实力的公司对研究成果迅速引进，迅速转变为生产力，这些都有利于超导技术的发展。这也说明，政府、企业与超导专家、研究者，在对超导将起的作用的看法方面取得了共识。超导技术在 21 世纪必将占有重要地位。

#### 四、科学展望与发展方向

超导技术将成为 21 世纪的宠儿，而超导材料也将深入千家万户。超导技术的发展、应用和普及将在世界能源方面发挥不朽的作用，将会为世界每年免去不必要的边缘耗散。如果能用上超导材料，那每年消耗的能量将不可估量。如果这些能量被合理地利用起来对人类的发展不可谓不大，或者每年为这些能量的耗散而投入的不必要的资金，用于资助那些苦难的、急需救助的国家与人民，那意义不可谓不大。超导材料的普及必将是一场材料大革命，其意义并不会亚于其他科技革命。

目前，第一代超导线材——铋氧化物线材已达到商业化水平。东京电力公司试制成功长 100 米、3 相、66 千伏的超导电缆，美国不久也将进行 100 米

超导电缆的安装试验。日本正在加紧研究开发高性能的超导电缆、超导变压器、超导限流器和超导蓄电装置等，预计 5 年后达到目标。日本磁悬浮列车线圈的超导化目前也在计划当中，预计将从明年开始进行研究和试制。目前各国都在积极研究开发第二代超导线材——钇系列线材。其中，包含钇的 YBCO (钇钡铜氧)和包含铌的 NBCO(铌钡铜氧)这两种线材，由于有更好的磁场特性，将来有可能成为超导线材的主流。有人预言不久的将来将会出现室温超导体。

我在大学二年级时，曾聆听了中科院一位科普专家的报告，是关于材料物理方面的应用。他讲的非常有趣生动，还用一些生活中的实例讲解有关材料方面的价值应用。有关美、苏“宇航之争”，是关于苏联和美国在航天方面应用新型材料而取得的成就；有德、日之间的磁悬浮列车，其应用有关超导材料产生足够大的磁场，从而轨与车之间形成一个很强的力，其速度之快非常惊人。

当时听报告就深有感触，材料的应用将是多么的重要啊！对国家、人民是多么的有意义啊！倘若我们生活中平常用的电线是用超导材料制成的话，对每家用户来说可以免交不必要的线路损耗而出的钱，长此以往对家庭用户、企业、公司来说是多么有利的事情啊。当然在一些大功率的用电器中可以大大提高安全系数，免去以前因导线发热而失火的事件发生。

21 世纪超导物理以及凝聚态物理都面临着新的难题，而科学难题的提出是件大好事，这必将预示着科学发展的一个新方向。

在物理学的各个研究领域，每一个研究领域在不同时期都曾涌现出激动人心的新发现。21 世纪物理学的发展将与人类文明的进步共生同行，大步跨进真理的境地。

我对超导的兴趣始于初中，现在在大学基本上已经把自己以后的研究方向定在凝聚态物理学方面。我想我会进一步去接触有关超导方面的知识、深入地研究有关理论。为了人类事业，为了物理学的发展，我会在 21 世纪物理学的天空里自由翱翔。

（江苏淮阴师范学院物理系 223001）

---

本文获“我心目中的现代物理”征文优秀奖