

# 超导简史

廖湘彧

超导现象最初是 1911 年由荷兰物理学家昂内斯(Onnes)发现的。1908 年,昂内斯首次获得液化的氦,并且在液氦温度(4.2K)下研究各种物质的电学特性。他发现,在温度为 4.2K 时,汞的电阻突然消失。

1933 年,迈斯纳(Meissner)和奥森菲尔德(Oschenfeld)发现,处于弱磁场中的超导体将磁场从内部排斥出来(见图 1),这就是迈斯纳效应。1945

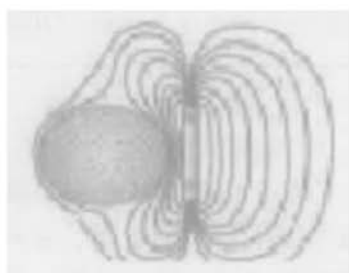


图 1 超导体排斥磁场

年,俄罗斯物理学家阿卡迪也夫(Arkadiev)利用这一特性首次演示了将一块小的条形磁铁悬浮于超导体的上方的实验(见图 2)。

随后而来的几十年,其他超导材料——金属、合金、化合物的超导材料相继找到。1941 年,发现铌的氮化物在 16K 温度附近呈现超导电性。1953 年,发现钒三硅( $V_3Si$ )的超导临界温度为 17.5K。1962 年,科学家们用铌钛合金首次制造出商用超导线材。上世纪 60 年代,英国的卢瑟福-阿普尔顿实验室将铜皮裹着铌钛合金制成的线材用于高能物理的粒子加速器的电磁铁,并于 1987 年首次在美国的费米实验室的万亿电子伏特超导加速器上投入使用。

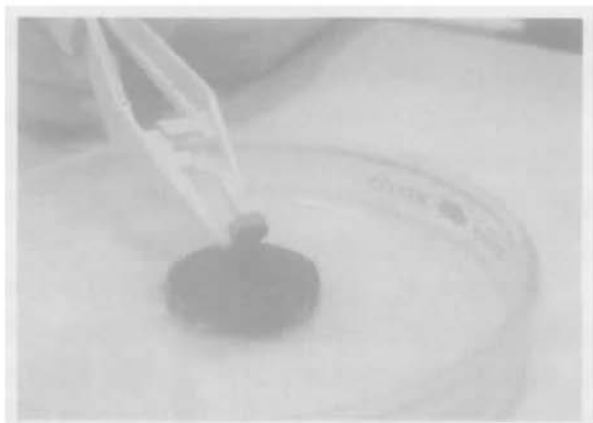


图 2 这是后来改装过的迈斯纳效应的演示。一块超导圆盘置于装液氮的容器底部,磁铁悬浮于其上方。磁铁在超导体中感生一个电流,因而产生一个磁场,与磁铁原来的磁场相互排斥,从而使得磁铁悬浮起来

第一个被广泛接受的完整的超导微观理论是 1957 年由三位美国物理学家巴丁(John Bardeen)、库帕



(Leon Cooper)和施里弗(John Schrieffer)创建的,他们的这一超导理论被称为 BCS 理论。该理论认为,超导电性是电子与晶格振动相互作用而产生的,金属中的电子在点阵中被正离子所包围,正离子被电子吸引而影响到正离子振动,并吸引其他电子形成了超导电流;在超导态金属中电子以晶格波(声子)为媒介相互吸引而形成电子对,无数电子对相互重迭又常常互换搭配对象形成一个整体,电子对作为一个整体的流动产生了超导电流,由于拆开电子对需要一定能量,因此超导体中基态和激发态之间存在能量差,即能隙。这一理论预言了电子对能隙的存在,成功地解释了超导现象。他们也因此而获得 1972 年度诺贝尔物理奖。1961~1962 年间,美籍挪威人贾埃瓦(I. Giaever)用铝做成了  $Al-Al_2O_3-Al$  隧道元件进行超导实验,直接观测到了超导能隙,很好地证明了 BCS 理论。BCS 理论很好地解释了接近绝对零度时单质和简单合金的超导电性,可是,对于后来发现的高温超导,由于它们是与以前的超导材料不同的超导系统,BCS 理论就不能做出合适的解释了。

超导的另一个重大的理论进展是约瑟夫逊(Brian D. Josephson)于 1962 年提出的量子隧道效应。约瑟夫逊当时在英国剑桥大学就读研究生,他提出,即使两块超导材料被非超导材料或者绝缘体所分隔开,仍然会有电流流过这两块超导体;在超导结中,电子对可以通过氧化层形成无阻的超导电流。他的预言随

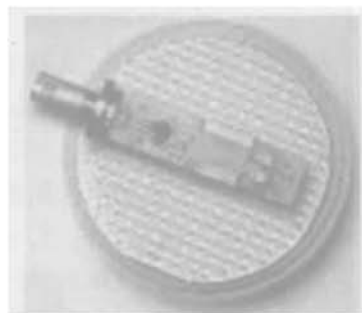


图 3 用约瑟夫逊效应制作的器件

后得到实验验证,他也因此获得 1973 年度诺贝尔物理学奖。这个量子隧道效应今天就称为“约瑟夫逊效应”,并成为微弱电磁信号探测和其他电子学应用的基础。图 3 所示的设备就是“超导量子干涉器(SQUID)”。

上世纪 80 年代,是超导领域取得重大发现的 10 年。1964 年,斯坦福大学的比尔·李特(Bill Little)提出有机超导体的可能性,1980 年,丹麦科学家首次成功合成这种理论上的超导体。不过,这种超导体的临界温度很低(1.2K),并且必须在高压下。它具有理论上的意义。

1986 年,位于瑞士苏黎世的 IBM 实验室有两位科学家——缪勒(K. Alex Mueller)和柏诺兹(J. Georg Bednorz),发现一种氧化物陶瓷( $\text{LaBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ ),它的超导临界温度大约为 30K,这是超导研究方面的一个重大突破。很快,另有几个实验室在 39K 用镧、铋和铜的氧化物陶瓷材料验证了这一实验。缪勒和柏诺兹由于他们的基础性突破而获得 1988 年度诺贝尔物理学奖。

缪勒和柏诺兹取得成功有一定的必然性。从 1983 年起,缪勒和柏诺兹合作,探索金属氧化物中高 Tc 超导电性的可能性。从 BCS 理论可以做出这样的推测,在含有强的电-声耦合作用的系统中,有可能找到高 Tc 超导材料。他们认为氧化物符合这一条件。于是就选择了含有镍和铜的氧化物作为研究对象,在这方面他们进行了 3 年的研究,取得了很多经验。1985 年,几位法国科学家发表了一篇关于钡镧铜氧( $\text{Ba-La-Cu-O}$ )材料的论文,介绍这种材料在室温以上具有金属导电性。有一天柏诺兹看到了这篇论文,很受启发,立即和缪勒一起,对这种材料进行加工处理,终于在 1986 年 1 月 27 日取得了重要成果。

缪勒和柏诺兹的发现超导领域掀起轩然大波,全世界的研究者根据各种可能“焙烧”陶瓷,不断寻求临界温度 Tc 更高的材料。1987 年 1 月,中国科学院物理研究所的赵忠贤、陈立泉等人获得了临界温度为 48.6K 的铋镧铜氧系超导体,并看到这类物质有在 70K 发生转变的迹象;同年,美籍华裔科学家朱经武和他的同事们发现 Tc 高达 90K 以上的超导体钇钡铜氧化合物( $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ ),首次将 Tc 提高到液氮温度(77K)以上。也在这一年,法国科学家将钙(Ca)加入铋镧铜氧化合物( $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CuO}_{6+x}$ )系统中,获得 Tc 高达 110K 的超导体化合物( $\text{Bi}_2\text{Ca}_2\text{Sr}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10+x}$ );又有人发现 Tc 为 125K 的铊钡钙铜氧化合物( $\text{Tl}_2\text{Ba}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10+y}$ )。1993 年发现 Tc 为 94K 的含汞超导材料  $\text{HgBa}_2\text{CuO}_{4+d}$ ,之后有人将 Ca 加入含汞超导材料中,形成的  $\text{HgBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{8+d}$  超导体,其 Tc 高达 135K,是目前 Tc 最高的超导材料。朱经武所领导的德州高温超导研究中心,发现将  $\text{HgBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{8+d}$  加压至 150 千帕,可将 Tc 提升至 153K,此温度高于一般常用的冷却剂四氟化碳( $\text{CF}_4$ )的沸点(145K)。

1997 年,美国的超导研究者发现,在非常接近绝对零度(0K)的温度条件下,有一种金和钢的合金既具有超导性又是自然磁体。他们意识到,具有这种特性的材料是前所未见的。自那以后,人们找到了多种这样的材料。

2001 年 2 月,日本青山学院大学教授秋光纯发现一种新的超导体——二硼化镁。它在冷却到绝对温度 39K 时,会表现出超导特性。二硼化镁结构简单,易于制作和加工,有着广阔的应用前景。4 月,日本住友电气工业公司开发出可通大电流的实用性较强的高温超导线材。在电阻为零的状态下,这种材料所能通过的电流密度为铜线的 350 倍,堪称世



图 4 医用 MRI



图 5 超导磁悬浮列车

界之最。我国科学家发现,非磁性杂质  $\text{Cu}_2\text{Mg}$  在提高二硼化镁超导体临界温度方面的作用显著。美国科学家根据 BCS 理论估算出二硼化镁新型超导体的临界温度可达 70K。日美科学家联合进行实验发现了高温超导体的铜氧化物中声子与电子相互结合,从而找到了声子与超导性有关的直接证据,这一结论推翻了认为声子与高温超导现象无关的定论。同年 9 月,贝尔实验室的科学家将氯仿(三氯甲烷)和溴仿(三溴甲烷)掺入足球烯( $\text{C}_{60}$ )分子,使其超导临界温度从 52K 上升到了 117K。此前,在 3 月 8 日,朗讯公司下属贝尔实验室的一个研究小组还首次发现在特定温度下电阻为零、可成为超导体的塑料物质,当这种塑料物质的温度降到 38K 以下时,电阻即消失。11 月,得克萨斯州休斯敦大学的研究人员在实验中发现碳纳米管具有超导电性,尽管不是零电阻,但却是十分接近,其实验结果与超导电性也完全一致。这种纳米管可称为第一种在室温条件下可工作的超导体。

高温超导材料的实际应用进展迅速。1999 年 12 月,美国完成一条三相单芯 30 米长、12.4 千伏/1250 安培铋系高温超导交流电缆研制,并成功地进行了

挂网试验,通过它向南线公司所属的 3 个工厂供电;1997 至 1999 年间,日本研制了 2 根 50 米电缆导体和 1 根 30 米单相铋系超导电缆系统;2000 年 12 月,中国成功地研制出 6 米长、2000 安培级铋系高温超导直流电缆;2003 年,中国首条年产能力 200 千米的铋系高温超导线材生产线生产的铋系高温超导线材各项性能指标都已位居世界前列。1995 年美国研制出一台额定值为 2.4 千伏/80 安培的桥路型高温超导限流器。2003 年,中国研制成功三相高温超导变压器样机,并顺利通过各项试验检测。2000 年 12 月,我国完成了世界上第一辆高温超导磁悬浮实验车系统,于 2001 年 2 月 11 日通过国家验收。2004 年,韩国开发出高温超导电动机,功率为 100 马力,转速为每分钟 1800 转,这种电动机的体积和重量不到同等级普通电动机的 1/3,效率可提高 2% 以上。

近年来,超导研究取得令人炫目成就的同时,也给人们留下了思索的空间。人们对高温超导的微观机理的理解还很不够,要认识高温超导的微观机理,还需要通过相当一段时间的研究。

(湖南省宁乡县夏铎铺中学 410614)

## 科苑快讯

### 国际空间站超导磁铁 将捕获宇宙反物质

据俄罗斯国立莫斯科大学核物理科学研究所所长米哈伊尔·帕纳修克宣布,国际空间站正在安装超导磁铁,科学家希望借助于它“捕获”暗物质、反物质和宇宙射线。

帕纳修克指出,在 AMS-02 (Alpha Magnetic Spectrometer)实验中来自美国、俄罗斯、欧洲和中国的科学家提出三位一体的目标——寻找反物质、暗物质和测量宇宙射线。他明确说明,“重达 7 吨中心是超导磁铁的复杂仪器计划在 2008 年运往国际空间站。”

他介绍说,“宇宙很大部分是由看不见的物质即所谓的暗物质组成,我们知道,暗物质是存在的,但是不清楚它是由什么构成的,希望 AMS 捕捉粒子光谱仪能帮助回答这一问题,并证实暗星系是存在的。”

他还指出,灵敏的 AMS 仪器能够捕获反氢基本粒子,仪器直径约为 2 米,高约 3 米,由欧洲核子研究中心研制的这台仪器将由航天飞机运抵空间站,

借助于自动机械手安装在空间站外表面,预计 AMS 仪器在太空工作寿命不少于 3 年。首次处理信息将由仪器自己进行,其中心计算机重复处理 16 次,然后将数据通过空间站计算机发送到美国宇航局,再转发至欧洲核子研究中心,随后发送至各地区中心,其中包括国立莫斯科大学。

在“削减”方案中,AMS 仪器原型早在 1998 年已经在太空逗留过,在 2 周时间里它“捕捉”到航天飞机货舱中的宇宙射线。帕纳修克强调指出,“安装 AMS 仪器不会引起空间站上仪器设备的故障,因为由于准确的计算 AMS 仪器外表的磁场等于零。”

据俄通社—塔斯社报道,欧洲核子研究中心专家研究和制造了仪器的核心部分——由 8 个硅酮传感器平面组成的半导体载波系统,其功能还包括数学模拟磁铁电子线路可能的故障。俄罗斯参加这项研究不受限制:在欧洲核子研究中心基础上将建立地区信息中心,俄罗斯专家将在地区信息中心接收和分析进入 AMS 仪器的信息。

(周道其编译自俄《世界新闻》2005/6/8)