

百年超导,魅力不减

赵忠贤

(中国科学院物理研究所 超导国家重点实验室 北京 100190)

超导电性发现已有百年了,它已经成为物理学中的一个重要分支,与超导有关的诺贝尔奖已经授予了 5 次.超导电性的应用也已在许多方面发挥着不可替代的作用.100 年虽然已经过去,但人们对超导研究的兴趣依然未减.例如,虽然很多一流的物理学家都在努力,但铜氧化物超导体以及新发现的铁基超导体的机制却还没有完全清楚,超导仍然充满了神秘色彩.与 X 射线、激光和半导体相比,超导的广泛应用还远没有实现.人们普遍认为,超导电性的机理和应用研究将会极大地推动物理学尤其是凝聚态物理理论的发展,同时也将开发出更多、更新的应用.

20 世纪 50—60 年代,以 NbTi 和 Nb₃Sn 为代表的有实用价值的合金超导体的发现以及 Josephson 效应的发现,形成了低温超导技术研发的热潮.人们发展了线材制备工艺,制备了各种与电工及信息技术有关的样机,并在磁体绕制和减少交流损耗等方面解决了基本的物理与技术问题.低温超导技术首先在仪器磁体和加速器磁体等强电方面得到了应用,同时也在弱电应用方面取得了进展,发挥了不可替代的作用.但是与同一时期出现的激光技术相比,超导技术应用的广泛性和影响力还远远不够.

80 年代后期,铜氧化物超导电性的发现,因其临界温度突破了液氮温区,导致了更大规模的世界性的超导研究热潮的出现.20 多年来,虽然高温超导机理研究还没有取得突破性进展,但应用研究领域却得以拓展.一批很有潜力的大型高温超导样机已制备成功,如全超导的示范配电站、35000kW 的电机等.移动通信基站上也使用了几千台高温超导滤波器.但是,高温超导的商品还是太少.对于物理学家而言,研究高温超导机理以及发展量子力学是动力,虽然由于科研难度大和经费支持减弱,使得有些人放弃了相关研究工作,但一些一流的学者仍在坚持.社会需求是很关键的,这就需要在进行材料和机理研究的同时努力推动应用.

超导作为宏观量子态具有极为特殊的物理性质和极大的应用潜力,特别是在能源方面.有人认为 21 世纪电力工业的技术储备有两个,一个是超导,另一个是智能电网.超导体可以用于军工、信息技术、大科学工程、工业加工技术、超导电力、生物医学、交通运输和航空航天等领域.

在弱电应用方面,基于超导体隧道效应的器件能够检测出相当于地球磁场的几亿分之一的变化,世界上找不到比它更灵敏的电磁信号检测器件,其灵敏度理论上只受量子力学测不准原理的限制;利用交流超导隧道效应制备的电压基准已经代替了化学电池电压基准;世界上最快的模数转换器和最精密的陀螺仪都已用超导体实现了.高温超导的微波器件不仅在雷达等方面得到了应用,也在移动通信方面开始发挥作用.

在能源方面,超导技术是电力工业的一个革命性的技术储备,是新一代的舰船推动系统的基础,是磁约束受控核聚变不可替代的制备强磁体的材料.多数医用核磁共振成像设备和高分辨率的 NMR 用的强场磁体也是超导的.另外,超导磁悬浮列车也具有其独特优势.

20 世纪 90 年代,在超导企业的高峰会议上曾预测,2020 年与超导有关的产值可以达到 2000 亿美元.现在看来达到这个预期还有很大难度,需要一定的突破.从现在算起还有近 10 年的时间,努力还是有希望的.关键是超导材料的研究要有突破,一是要发展和改进现有实用超导材料的制备工艺;二是要探索新的更适于应用的超导材料.前者从物理上讲是可以做到的,需要解决的是发展新工艺和降低成本.对于同样质量的超导带材在制备样机时也有很多工艺技术需要创新和发展.

在新材料探索方面,以下事情可以考虑做,第一是在铜氧化物和铁基材料中挖掘并开发出新的实用超导材料;第二,高压下 HgBaCuO 的临界温度已经可以达到 150—160K,表明超导态是可以在这

高的温度下存在,因此在新材料方面有希望找到在常压下临界温度更高的超导体. 铁基超导体的发现是个极大的推动,不仅是第二个高温超导的家族,而且又是一次思想的解放,因为过去搞超导的科研工作者都担心 Fe 离子对超导有抑制作用. 对于高温超导体家族的特性研究可以归纳一些规律,从而帮助寻找新的高温超导体,例如结构是四方又是准二维的、同时存在多种合作现象的体系.

探索新超导体始终具有极大的吸引力,科技界从未放弃,从超导发现时起就一直在坚持^[1]. 近 20 多年的进步是巨大的,除实用的超导材料之外,一些新超导体的发现也不断为物理学和材料科学的研究提供重要内容,甚至开辟新的研究领域(例如有机超导体、重费米子超导体等),与此同时也带动了新的工艺技术的发展(例如调制合金,现在称为异质多层膜)和具有特异性的非超导材料的发现(例如庞磁阻和可能用于存储的阻变材料等).

室温超导体能否找到,既没有成功的理论肯定,也没有成功的理论否定. 而事实上,临界温度一直在提高,新的超导体在不断地被发现. 如果能发现室温超导体,那么其影响是无法估计的,世界也可能就不一样了.

超导电性有丰富的量子力学内涵,推动了包括物理思想、理论概念和方法的创新. 早在 1911 年索尔维会议上,包括爱因斯坦在内的一流物理学家就对此非常关注^[2]. 由于当时的数据太少,他们中的一些人放弃了相关机理的研究. 然而,超导机理研究却一直吸引着一批一流科学家. 传统超导理论的建立经历了以 London 方程(基于 Meissner 效应)为代表的现象描述阶段,以 Landau—Ginzberg 超导理论为代表的唯象理论阶段,和目前已建立的 BCS 微观理论.

在成功的 BCS 理论出现之前,经历了两次世界大战. 在战争之后,科学家(包括伦敦兄弟、海森伯、费恩曼等)又重新把超导机理研究放在重要的位置. 而巴丁始终热衷于超导机理研究,直到与其合作者解决了这一问题.

迈斯纳效应的发现确定了超导电性为宏观量子现象. 迈斯纳效应是对称性自发破缺的结果,是 Anderson—Higgs 机制的一种表现形式. Anderson 等(包括 2008 年的诺贝尔物理奖得主 Nambu 等)提出了规范场自发破缺的 Anderson—Higgs 机制,这个机制是基本粒子质量的起源,是量子规范场论(包括大统一理论, QCD)的物理基础. BCS 超导理论是量子力学建立之后最重要的理论进展之一,它不仅

清晰地描述了超导的微观物理图像,而且其概念也被用于宇宙学、粒子物理、核物理、原子分子物理等领域,推动了物理学的发展.

高温超导机理向传统的固体理论提出了新的挑战,是物理学公认的一个难题. 高温超导机理的解决可能与新的固体电子论的建立是同步的. 铜氧化物超导体的 D-波对称和赝能隙的存在应该是共识的. 多种合作现象的共存与竞争使实验研究和理论研究都遇到了很多问题. 正是这些问题才带来了挑战与机遇. 铁基超导刚刚发现不久,相关的实验和理论研究还处于初步阶段,但也存在着多种合作现象的共存与竞争. 随着实验研究和理论认识的深入,应该能够建立新的理论,以期解决有关超导电性的全部问题. 这可能是新的固体电子论诞生的一个基础.

超导发现于从经典物理学向量子或现代物理学的过渡时期. 很多文章介绍了百年来超导的进展和其中一些重要发现的历史过程. 在阅读这些文章的时候,除崇敬之外,我从中还学到很多东西. 1911 年 4 月 28 日,卡末林-昂内斯教授向阿姆斯特丹科学院提交的报告中指出,他观察到了零电阻现象^[2],两年后才最终确定发现了超导电性. 我以为有以下几点值得深思:第一是实验技术和方法的发展与完善,例如实现氦的液化和零电阻的测量、确认和分析;第二是概念上的突破和超导概念的确定等. 后一点尤为关键,这是值得我们反思的. 正如严复所云:“中国学人崇博雅,‘夸多识’;而西方学人重见解,‘尚新知’”. 实验技术的不断提升和概念上的突破在超导研究中是非常关键的,已经取得的成就源于此,未来成功亦应如此.

超导已经开始造福人类并有着广泛的应用前景. 21 世纪一定会有新的技术成为经济的新增长点. 在超导材料方面的突破有可能是候选者. 对超导电性的深入认识一直推动着量子力学和物理学的发展. 高温超导体的发现又带来了新的机遇和挑战. 这是一个充满挑战与发现的领域. 中国科学家应该也能够为人类的文明做出新的、无愧于我们先人的贡献. 探索高温超导体和解决其机理的问题就是最好的选择之一.

致谢 感谢向涛和郑东宁研究员在成文过程中的帮助.

参考文献

- [1] 赵忠贤. 物理, 1977, 6(4): 211 [Zhao Z X. Physics (Wuli), 1977, 6(4): 211]
- [1] Dahl Per Fridtjof. Superconductivity. New York: American Institute of Physics, 1992