

从超导研究发展史得到的启示

ENLIGHTENMENTS FROM HISTORY OF SUPERCONDUCTIVITY RESEARCH

章立源

自1911年卡末林·昂尼斯(Heike Kamerlingh Onnes, 1853~1926年)首次发现汞的超导电性以来,四分之三世纪过去了。为了认识超导电的本性并应用其造福于人类,人们进行了长期的基础研究和应用开发的尝试。1986年到1987年初,新的高温超导体之发现是超导发展史上划时代的突破。这必将加速在本世纪最后十几年中由超导技术诱发的科技革新的进程,其影响将会波及工程技术、计算机、军事、能源、医学、精密仪器以及一些基础学科,例如:电能输送,电动机和发电机的制造,磁流体发电,超导线圈储能,可控热核反应,超导磁悬浮列车,超导计算机,超导电子器件,高灵敏度电磁仪器,超导磁体,高能加速器,地球物理探矿技术,地震研究技术,生物磁学,强磁场下物性学,特异功能研究技术,临床医学等方面。本文拟谈谈从几十年来超导研究发展的历史得到的启示,和可以汲取的一些有益的经验。

回顾超导研究的整个进程,大致可分为三个阶段。

基本探索 and 认识阶段(从1911年到1957年)。1911年荷兰莱顿(Leiden)实验室揭开了人类研究超导电性历史的第一页。为了揭示在低温下极纯金属电阻的变化规律,昂尼斯决定测量纯汞的电阻。测量过程中,学生霍耳斯特(G. Holst)发现,当把汞冷却到液氮的沸点温度(约4.2K)时,电压突然降到零。最初以为是发生了短路,仔细检查后,他们确认,在4.2K附近的0.02K温差范围内,汞的电阻陡然下降到实际为零,该实验室的

仪器已无法测出。随后,他们又发现了锡、铅等金属也有类似的电阻突变现象。昂尼斯在他1913年发表的一篇论文中首次使用了超导电性(Superconductivity)一词,并指出:在4.2K条件下,汞进入了一种新态,称为超导态。

1933年在德国的迈斯纳(W. Meissner)和奥赫森费尔德(R. Ochsenfeld)发表的实验通讯指出:当物体进入超导态后,其内部磁导率为零,即超导体进入完全抗磁性状态,而不论此超导样品原来的历史如何,现称之为迈斯纳效应或迈斯纳-奥赫森费尔德效应。

1957年巴丁(J. Bardeen)、库珀(L.N. Cooper)和徐瑞弗(J. R. Schrieffer)三位美国人提出的超导微观理论,阐明了超导电性的物理机制,即通称的BCS理论。他们三人因此于1972年获诺贝尔物理奖。

超导技术应用的准备阶段。BCS理论的建立标志着人类探索和认识超导阶段暂告一段落,开始了超导技术应用的准备阶段。60年代研制出的铌-锆,铌-钛合金和铌三锡等超导材料的高载流能力具有实用价值。超导体金属学分支学科也随之发展起来。1961年昆兹勒(J.E. Kunzler)等人用超导线圈绕制磁体产生了10万高斯的强磁场。这种体积小、重量轻、电能损耗小的超导磁体产生的强磁场有极大实用价值。英国于1969年制成一台3250马力的直流超导电机,转速为200转/分,两年多的负载运行试验证明基本上成功。60年代中期还提出了超导磁悬浮列车的建议。

1962年约瑟夫森(B. D. Josephson)预言:对

章立源(Zhang Liyuan)北京大学物理系教授。

于超导—绝缘层—超导夹层（以下简称SIS 隧道结），当通过的电流小于某一临界值时，结上电压为零。此预言于1963年被证实。随之出现一系列的进展，逐渐形成超导电子学学科，成为小功率超导技术应用的基础。如超导量子干涉仪（SQUID），其对磁场的分辨率可达 10^{-11} 高斯，是研究神经磁场、心磁、肺磁等的重要手段；还可用于研究其他弱磁物质（如月球岩石磁性），检测弱磁讯号（如用于地球物理和军事方面）等。1966年马梯索（J. Matisoo）利用约瑟夫森结有结电阻为零与不为零两种状态，作成电子计算机元件。这种计算机有容量大、体积小、功耗小等特点。

1986年以来超导研究进入了新的阶段。综上所述，超导技术有广泛的应用前景。但是，到1985年超导材料的超导转变温度最高纪录是 $T_c = 23.2\text{ K}$ （ Nb_3Ge ）。这就需用液氮设备，花费大且不方便，从而限制了超导技术的应用。1986年4月别德诺兹（J. G. Bednorz）和 马 勒（K. A. Muller）宣布 $\text{Ba}_x\text{La}_{5-x}\text{Cu}_5\text{G}_{5(3-y)}$ 其中 $x = 1$ 和 0.75 ， $y > 0$ ）可能是 $T_c > 30\text{ K}$ 的超导体。在许多人证实了他们的发现后，1987年初出现了转变温度在液氮温区的超导体（钇钡铜氧化物）。这是本世纪重大科技进展之一，从此人类进入超导技术开发时代。本世纪之内超导技术必将引发一场技术革新。

分析超导研究的发展历史可以得出几点启示。

莱顿实验室的成功经验是：学术上有高瞻远瞩的规划，组织上有良好的科学管理和开放的学术风气，注重人才的培养。

在约四分之一世纪里，莱顿实验室成为当时世界上先进的低温研究中心不是偶然的。1882年，29岁的卡末林·昂尼斯就任莱顿大学物理学教授和实验室主任。在其任职的42年中，他采取了一些很有远见而又卓有成效的措施。例如，1892~1894年他在莱顿建成了一座大型液化工厂，液化空气、氧、氮，30年后，这座工厂仍能满足莱顿实验室的需要。虽然杜瓦（James Dewar）于1888年5月10日首先制成了液态氢，但莱顿实验室却能于1908年先于杜瓦使氢气液化。还应提到的是，约在1880年，昂尼斯注意到了范德瓦尔斯（J. D. van der Waals）用分子物理学研究气液相变的论文，尤其对按范德瓦尔斯理论预测当时尚未被液化气体的临界点感兴趣。昂尼斯预料到即将发生的巨大变化，于是在精心筹划气体液化实验，完善地运用科学仪器并解决所涉及到的工程技术

问题，组织培养所需人才以及实验测量等问题上投入相当大的精力。例如，1901年昂尼斯在莱顿实验室成立了仪器制造工和玻璃吹制工训练学校。这不仅保证了实验室研究计划的实现，而且这个学校的毕业生在四分之一世纪后，还在世界上许多物理实验室中发挥着重要作用。此外，昂尼斯使莱顿实验室向全世界从事低温研究的科学家开放，与当时有的实验室那种封闭“防范”研究形成了鲜明的对照。

学科和技术的发展有赖于相关科学和技术的成就；条件成熟后，一定的科技成果的诞生则是必然的；由谁来摘取成果，就看谁能掌握时机了。

超导微观理论于1957年问世，这是在发现超导现象的46年之后。超导理论的发展延缓，常被议论为理论物理学界的羞耻与绝望。其实不然。

显然，在1926年建立量子力学之前不可能建立超导微观理论。这是受科学发展阶段的限制，实践和实验走在了前头。其次，在1933年发现迈斯纳效应之前，人类对超导电性的基本认识还很片面，也不可能提出正确的微观理论。到本世纪50年代超导微观理论发展的时机才成熟了。这是由于在量子力学建立的基础上固体物理学学科发展了；还由于经全世界科学家几十年的努力，人们已认识到，一个完善的超导理论必须顾及以下已知的事实：零电阻效应，迈纳斯效应，超导态下电子比热的指数规律，从正常态向超导态转变时电子比热的跳跃，同位素效应，超导能隙，在正常态到超导态相变前后晶格结构无变化，正常区及超导区之间的界面能，伦敦的动量凝聚思想等。

在科学发展史中，类似的事例不胜枚举。我们欣赏并尊重天才的、合理的设想，但还是要要在实验技术条件成熟之后才能证实。早期，伦敦（F. London）曾天才地提出过超导能隙的猜想。他认为电子被某种形式的相互作用所耦合，使得最低能态和激发态可被一有限的能量间隔分开。由于超导能隙值位于远红外或微波区，通过实验发现超导能隙是困难的。第二次世界大战期间对雷达的研究也促进了微波技术的发展，50年代实验技术已可以检测远红外区的低辐射强度，这时以实验证明超导能隙存在的条件成熟了。对超导能隙的完全肯定，使人们认识到超导态下电子能谱的变化。

同样，1950年麦克斯韦（E. Maxwell）和雷诺兹（C. A. Reynolds）等两组美国物理学工作者同时独立发现：超导体的临界温度与同位素质量有关。其实昂尼斯早在1922年就用放射性铅的同位素作过实验，但限于当时试验技术的水平，未能得

出同位素效应的结论。到50年代,当原子能技术发展一定程度时,才为同位素效应实验提供了条件。同位素效应一经肯定,人们普遍认定,电子声子作用是导致超导电性的根源。

基础实验研究和理论研究,实用技术及其开发之间是互为条件、互相促进的,不能偏废,但不排斥在各特定期期应有所侧重。

综观超导研究的历史,人类探索低温物性始于本世纪初,是以低温技术的发展为基础的。在同一时期内,英国的汉普逊,德国的林德及法国的克劳德等人简化了液化空气的工艺,为形成大型工业展示了可能性。此后,这一支的发展使社会受益匪浅。而探索低温超导的基础实验研究,在经历了几十年的发展后,自1986年起,将从侧重基础研究逐渐转向侧重由超导技术引发的广泛技术革新。研究科技发展史有助于我们及时掌握特定期期应侧重的方向,制定正确的计划,投入力量,作出成绩,走在别人的前面。

超导研究的发展是真正国际合作的结果。今后仍然是国际范围内的竞争也是必然的。面对这场技术革新,我们应在国家指导下,组织好科技力量,通力合作,使我国跻身于世界先进科学之列。

76年的超导物理、超导材料和超导技术应用的发展是全世界范围内大量杰出的科学家(包括实验物理学家、工程技术专家、电子学家、理论物理学家、化学家等等)国际合作的结果。特别值得一提的是各国青年科学工作者的功绩。第一个观察到超导现象的人是昂尼斯的学生霍耳斯特;50年代中叶BCS理论建立时,库珀还不到30岁,巴丁看准库珀熟悉的量子场论方法对统计物理和超导研究中有用,就邀请他一起工作;BCS理论研究的另一位成员徐瑞弗,当时刚从美国麻省理工学院毕业,是巴丁的研究生,这个由老、中、青三人组成的小组解决了超导微观理论这个大难题;1962年还是英国剑桥大学研究生的约瑟夫森提出了约瑟夫森效应,为超导电子学奠定了基础。

1985年以前,在广泛的国际合作下,完成了超导技术应用的准备阶段。1986年制成了高温超导体,打开了超导技术应用的大门。这种广泛涉及科技、军事、医学等学科的超导技术的发展势不

可挡地在全世界范围内发展起来。随之,必然形成激烈的国际竞争。掌握好方向,组织好力量则是当务之急。

百家争鸣的方针有助于科学思想、理论的发展。

这在超导研究发展中也不乏正反事例。有些科学思想可能超前于实验条件成熟之时,伦敦关于超导能隙的猜想就是一个突出例子。1948年伦敦还天才地指出过:平均动量的长程有序应是超导态的基本性质之一。这应是一种平均动量的凝聚。若干年后,BCS理论完全证实了伦敦的天才设想。BCS理论认为,超导态下存在电子对(称为库珀对),各库珀对中的两电子自旋相反,而各个电子的动量可以不同,但每个库珀对的总动量为零。所以,可以说库珀对总是“凝聚”在零动量上。伦敦的思想本质上是正确的。能够重视这些较早提出的科学思想会加快科学研究的进程。然而做到这一点却并非易事。例如,早在1952年由苏联阿布里柯索夫提出的第二类超导体的理论,认为这类超导体有下临界场和上临界场,两临界场之间为混合态,这种超导体的磁通线组成二维周期性磁通格子。由于朗道的反对,这个理论直到1957年才发表。同样的例子是在约瑟夫森效应提出之前约30年,霍耳姆(R. Holm)和迈斯纳就已在实验中发现这一效应的最简单的表现形式(当金属变为超导体时,两金属间的接触电阻消失),只是当时人们并没有认识到它的普遍意义。

不同学术思想长期争论的现象是正常的,例如,库珀对与奥格对的争论。化学家奥格(Richard A. Ogg)于1946年根据实验提出用电子对解释零电阻现象,他是在有关液氨中很稀的碱金属溶液的实验基础上提出的。奥格对内两电子间距离为 10^{-8} 厘米,这种电子对是局域化了的。现在仍有用局域化电子对解释超导现象的,但不太成功。库珀对则完全不同,库珀对内两电子间距离数量级为 10^{-4} 厘米,这是目前公认的超导电子对机制。由于对新发现的氧化物高温超导体机制尚无定论,初步设想是重新启用局域化电子对。因此这一争论的最后定论尚难得出。相信百家争鸣一定会使科学、理论园地上结出累累硕果!

重 要 更 正

本刊1988年第1期《并行计算及其进展》一文中第34页二栏倒数第2行和第三栏第3行的“19世纪”应为“20世纪”

编辑部