

· 卷首语 ·

铁基超导体研究:凝聚态物理的一个新机遇

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)

2008年日本科学家首先在掺F的LaOFeAs中发现了临界温度为26 K的超导电性。在高温铜氧化物超导体发现之后,虽然科学家发现了多种临界温度高于26 K的超导材料,但是都没有像这次这样引起强烈反响。这是因为在传统观念中,磁性元素铁不利于超导,而新发现的铁基超导体恰恰是以铁为主的化合物,其临界温度如此之高,完全与传统认识相背。LaOFeAs是具有层状的四方结构的准二维超导体,在这一点上与多年来坚持在类似结构系统中探索新型超导体的中国科学家的思路形成了共鸣。中国学者很快用其他稀土元素Sm、Ce、Pr、Nd、Gd等替代La,将超导临界温度提升到40—50 K以上,创造了临界温度55 K的纪录。同时,国内外的学者还发现了几种结构的铁基超导体并观察到丰富的量子合作现象。中国学者最早指出铁基超导电性与自旋涨落密切相关,即超导性与磁的不稳定性密切相关;并最先报道了费米面与超导能隙的实验测量结果。短短几个月内,该领域的学者就意识到,一个新的高温超导家族诞生了。这是继第一个高温超导家族铜氧化物发现之后的新突破。不仅提供了丰富的物理现象值得物理学家深入研究,而且为超导的应用提供了新的途径。

1911年卡梅林-昂纳斯发现超导电性之时,正值物理学从经典物理学向现代物理学、特别是量子力学的转变时期。1913年在首届索尔维会议上卡梅林-昂纳斯介绍了他的发现,与会者包括爱因斯坦、居里夫人、普朗克等都给予了极大的关注,但对其机理莫衷一是。1915年爱因斯坦考虑到实验数据太少而放弃了有关研究。1933年迈斯纳效应(即理想超导体的内部磁感应强度等于零)的发现,使得科学家认识到超导电性绝对不仅仅是一个电阻等于零的理想导体,而是一个宏观的量子现象,并在此基础上建立了伦敦方程和金兹堡-朗道方程等超导的

唯象理论。1957年巴丁、库珀和施里弗提出了超导微观BCS理论,很好地解释了金属和合金中发现的超导现象及其微观机理。这是凝聚态物理具有里程碑意义的工作,推动了量子理论的发展。

1986年铜氧化物超导体的发现使超导临界温度超过了液氮的沸点(即77.3 K),常压下临界温度最高达133.8 K,超过了传统BCS预言的超导温度极限(~ 40 K),因而被称为高温超导体。这一开创性的发现不仅具有重大的应用前景,同时极大地促进了强关联电子体系的研究,为多体量子力学提供了新的内涵丰富的研究对象。近30年来,尽管铜氧化物的超导机理问题还没有解决,但对这个问题的研究一直激发了物理学家的好奇心和创造力,取得了一系列的重要进展。发现了包括d波超导能隙、 π 能隙、自旋及电荷序等大量的新奇量子现象,澄清或理解了它们与超导之间关系,推动了多体量子理论的发展,同时也促进了尖端实验手段的发展和完善。近年来凝聚态物理许多热门的分支领域,例如庞磁阻效应的发现及其应用、拓扑绝缘体、量子有序及其调控等都或多或少地受益于对铜氧化物高温超导电性的研究。

自超导电性发现以来,超导体的应用一直倍受关注。20世纪60年代,基于第二类超导体和超导隧道效应的发现,在国际上出现了低温超导技术,与激光技术的出现几乎是同步的。遗憾的是超导技术虽然有很多的优越性,但大规模的应用没有实现,无法与激光技术的应用相比。这主要是受制于低温技术的发展。只有在特殊的方面,如核磁共振成像磁体,加速器用的磁体以及仪器设备等方面得到了应用。铜氧化物超导体的临界温度高于液氮沸点,液氮的获取也比较方便,但是这种超导带材的综合成本还是太高,广泛的应用还需要在工艺技术上有所突破,同时也需要新的技术集成和对市场的培育和开拓。

* 中国科学院院士,带领团队因铁基高温超导体研究获得2013年度国家自然科学奖一等奖。
本文于2014年4月16日收到。

铁基超导体的发现为超导材料的探索、超导机理和应用的研究带来了新的机遇和挑战,同时也为破解“发现更适于应用的超导体甚至是室温超导体”和“高温超导机理”这两个世纪性难题,提供了新的内容。铁基超导材料的探索,从掺F的LaOFeAs 26 K超导电性的发现到突破经验的麦克米兰极限值(40 K),仅用了几十天的时间,而且在随后的几年时间里,新的铁基化合物超导体不断被发现,不仅有磷族化合物铁基超导体,还有硫族化合物、金属间化合物以及氧化物铁基超导体,仅母体化合物就有多种,形成了第二个高温超导大家族。

铁基超导体的电子结构呈现出典型的多带特性,铁的5个d电子轨道都对费米面附近的能带有贡献。这与铜氧化物中只有铜的1个d轨道形成的单带结构有显著的差别。铁基超导体的物理性质主要由FeAs层或FeSe层的电子结构决定。大多数铁基超导体在布里渊区中心有3个空穴型能带,在布里渊区边界有2个电子型能带。铁基超导研究早期的一种比较流行的看法认为铁基超导配对与电子在空穴和电子型费米面之间的散射有关。但最近实验发现在 $AxFe_{2-y}Se_2$ ($A=K, Tl, Cs$ 等)和单层FeSe/SrTiO₃超导体中,只有电子型费米面,不存在空穴型费米面,对这种基于电子在空穴型和电子型费米面之间散射的超导机理提出了质疑。在铁基超导体中,电子之间的洪德相互作用,以及局域电子之间的磁性交换相互作用都非常重要,这些相互作用对铁基超导的电子配对都有很大影响。

铁基超导体作为一种新的非常规超导体,其机理不能用基于电声相互作用的BCS超导理论来解释。铁基超导体与铜氧化物超导体的相图有很多相似之处,其未掺杂时的超导体母体通常都具有共线反铁磁长程序,随着掺杂和载流子浓度的增加,反铁磁长程序被抑制,出现超导,超导临界温度由低到高,逐渐增加,达到一个最大值后,又会逐渐降低,直至消失。但不同铁基超导体的能隙函数对称性有可能不同。目前仍不清楚铁基超导体是否与铜氧化物超导体具有相同的超导机理。

不同于铜氧化物母体为莫特绝缘体,铁基超导

体的母体大都为不良导体。铁基超导体的费米面的拓扑形态会随着掺杂或施加的压力而急剧变化,呈现出不同寻常的超导和正常态行为。大多数母体或低掺杂的铁基材料,都存在共线反铁磁长程序和磁性相变,中子实验表明铁基超导电性可能与自旋激发有关,同时实验还发现d电子的轨道自由度也对超导电性有很大的影响。此外,铁基超导电性与结构的调制也存在紧密的联系。掺K的FeSe超导体在高压下存在超导的再进入效应,即在超导在压力下首先消失,然后在更高的压力下又会重新出现。在钛酸锶基底上制备的单层铁硒膜显示了独特的特征,其能隙存在的温度可以高达65–70 K,尽管超导转变温度是否能达到这么高还需要进一步的工作来确定,但这个现象与界面有关,即使临界温度达不到70 K,也是一个极其值得研究的问题。

铁基超导机理的实验研究对超导样品的质量提出了很高的要求,很多情况下高质量样品的制备是揭示超导机理的关键。铁基超导体与铜氧化物超导体一样,也存在电子不均匀性和化学相的分离。特别是铁基超导体更严重的化学相分离为制备单相的晶体材料带来了困难,也是解决铁基超导问题研究的一个瓶颈问题。

铁基超导体的超导临界温度虽然比铜氧化物超导体的低,但在应用中,它的加工工艺相对简单。铁基超导体的上临界磁场极高,有报道指出,铁基超导薄膜在30万高斯的磁场下仍然可以有每平方厘米10万安培的电流密度,这在强磁体方面有巨大的应用潜力。例如,为研制用于生命科学的核磁共振成像系统在技术上实现突破带来了希望。

超导研究是一个充满了好奇、活力和发现的领域。自超导发现百余年来,对其机理、应用和新材料的探索就从未停止。如果能找到适于广泛应用的超导体,特别是室温超导体,就有可能带来一场新的科技革命。铁基超导体的发现为凝聚态物理的发展带来了新的机遇,对其机理的研究,无疑也会和研究铜氧化物超导体机理一样,促进凝聚态物理,特别是新的固体电子论的发展,也必将为人类的文明做出新的更大的贡献。

Outline of the Study on Iron-based Superconductors

Zhao Zhongxian

(Institute of physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)