

# 超导“小时代”之三十八 走向超导新时代

罗会仟<sup>†</sup>

(中国科学院物理研究所 北京 100190)

2018-12-08 收到

<sup>†</sup> email: hqluo@iphy.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20181209

未来已来，唯变不变。

这是超导“小时代”系列连载的最后一篇，在此，希望对超导研究的历史做一个简要的总结，并展望未来的超导研究和应用。

## 1 超导研究的巨大魅力

超导研究无疑在凝聚态物理领域甚至在整个物理学界中，都扮演着不可忽视的重要角色。从1911年卡末林·昂尼斯发现第一个金属汞超导体以来，超导的研究历程跨越了一个多世纪，带来过无数惊喜的发现，为物理学的发展做出了重要的贡献。以诺贝尔物理学奖为例，目

前共有200余位科学家获得了该奖，其中凝聚态物理领域的约有60位左右，有10名科学家是直接因为超导研究而获此殊荣<sup>[1]</sup>。他们是：卡末林·昂尼斯(1913年)，约翰·巴丁、列昂·库珀、约翰·施里弗(1972年)，伊瓦尔·贾埃沃、布莱恩·约瑟夫森(1973年)，乔治·柏诺兹、亚历山大·缪勒(1987年)，阿列克谢·阿布里科索夫、维塔利·金兹堡(2003年)(图1)<sup>[2]</sup>。其中有多位传奇人物，如：目前唯一两次获诺贝尔物理学奖的巴丁——他因晶体管的发明和BCS超导理论的建立分别于1956年和1972年获得诺奖；最年轻的得主

秀的实验物理学家<sup>[3]</sup>。这些科学家的经历告诉我们，超导的魅力是如此神奇，百余年来长盛不衰，结出了累累硕果。未来超导领域，必将还会持续涌现更多的诺贝尔奖，如发现常压室温超导体和建立高温超导微观理论就是学界公认的“诺奖级”工作，而诸如铁基超导、重费米子超导和有机超导等非常规超导材料的发现者也被寄予厚望<sup>[4]</sup>。

## 2 超导材料探索趋势

据不完全统计，目前为止人类发现的无机化合物大约有15万种，其中属于超导体的约有2万多种。可见，超导现象是普遍存在于各类材料之中的，包括金属单质、合金、金属间化合物、过渡金属与非金属化合物、有机材料、纳米材料等多种形态<sup>[5]</sup>。科学家甚至有一个信念——只要温度足够低或者压力足够大，任何材料都可以成为超导体。例如我们熟知的导电最好的金属金、银、铜等，它们就尚且不是超导体，根据BCS理论推算，超导温度可能在 $10^{-5}$  K以下，目前电磁运输实验测量手段是无法达到的。而金属氢的存在和可能的室温超导，至今仍然没有完全确认<sup>[6]</sup>。



图1 因超导研究获诺贝尔物理学奖的10位科学家

之一约瑟夫森——获奖工作在22岁读博士时完成，获奖时年龄33岁；最年长的诺奖得主之一金兹堡——获奖时年龄为87岁；最快获得诺奖的科学家柏诺兹和缪勒——俩人从发现高温超导到获得诺奖仅间隔10个月；生涯最平凡却又最幸运的诺奖得主之一贾埃沃——平淡的童年和糟糕的大学却不妨碍他成为最优

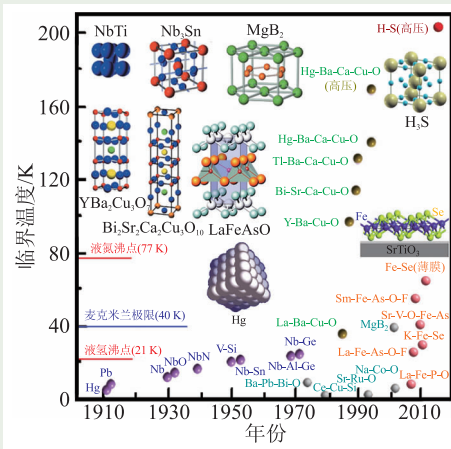


图2 超导材料的研究历史

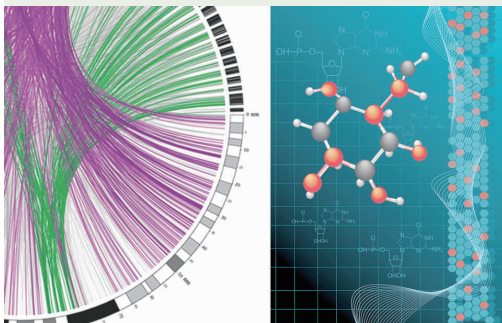


图3 “材料基因组图谱”与“原子制造工厂”(引自 www.materialsviechina.com 和 www.16pic.com)

按照超导机理是否可以用基于电子—声子耦合配对的BCS理论来描述,可以划分为常规超导体和非常规超导体,铜氧化物、铁砷/硒化合物、重费米子和部分有机超导体都属于非常规超导体。而高温超导体,则一般定义为临界温度 $T_c$ 有可能超越40 K的超导材料(起初门槛定义为20 K,后改用麦克米兰极限,即40 K)<sup>[7]</sup>。注意并不是意味着所有高温超导体必须 $T_c > 40$  K,由于掺杂组分和结构的不同,高温超导体临界温度是多变的,甚至可以消失为零。目前为止,仅有两大高温超导家族——铜氧化物高温超导体和铁基超导体,其中公认的铜氧化物高温超导最高 $T_c$ 记录为165 K(汞系材料在高压下),铁基高温超导

最高 $T_c$ 记录为65 K(FeSe单原子层薄膜)(图2)<sup>[4, 8-10]</sup>。

超导材料的结构各异、物性各异、临界温度各异,尽管在超导探索历史上人们形成了许多自认为“有效”的经验,然新超导材料的出现,总是会打破人们的这些认知。比如在母体为反铁磁绝缘体的铜氧化物发现高温超导电性、在含铁/铬/锰等磁性元素的材料中发现非常规超导电性、在相互作用很强的重费米子体系中发现超导电性等,理论和经验往往失效了<sup>[4]</sup>。近年来,随着科学技术的发展,在超导材料探索方面,也出现了多种新颖的手段,如超高温高压合成、微纳米加工、固态/液态离子调控、化学离子交换/注入、电子浓度门电压调控等,超导材料的覆盖面,正在迅速扩展。探索新材料过程更是采用了广积粮、高通量、面撒网的方式,结合大数据、机器学习和人工智能的应用,在“材料基因工程”和“原子制造工厂”等新概念模式下,人们正在加速超导材料的探索过程(图3)。越来越多千奇百怪的超导体,将在未来出现在我们面前。

### 3 超导机理研究方向

超导机理的研究汇集了诸多顶尖智慧的科学家,然目前为止,唯一获得重要成功的超导理论就是BCS理论。BCS理论中有关电子配对相干凝聚的

思想,对凝聚态物理乃至原子分子物理、粒子物理、宇宙天文学等都有深远的影响。对于高温超导材料,目前有关理论非常之多,但获得学界公认并能彻底描述其所有奇异物性的理论尚且没有。扩大到非常规超导材料,非常规超导微观机理,仍然几乎是一片混乱和未知。其根本原因在于,BCS理论其实仅考虑了电荷相互作用,或只考虑了电子—原子相互作用,而几乎忽略了电子之间的自旋相互作用和电子之间的关联效应。毫无疑问,电子是既带电荷也带自旋的,对于存在磁性有序态或强烈磁性涨落的非常规超导体而言,必须同时考虑电子之间的电荷和自旋双重相互作用,这对微观机理就造成了巨大的挑战<sup>[11]</sup>。

有意思的是,从实验的角度而言,目前能够测量的几乎所有超导体,其负责超导电流的载体都是库珀电子对。也就是说,电子配对成超导的思想,几乎对所有的超导体都成立。只是,电子是如何配对的?配对的对称性是什么样的?配对的“胶水”是谁或有没有?配对之后如何形成超导态?都是需要一



图4 超导机理的研究历程

系列的理论和实验多方位结合才能理解的问题，也是超导机理研究的核心问题(图4)<sup>[12]</sup>。特别是高温超导机理问题，被誉为是物理学领域“皇冠上的明珠”，对于强关联电子态物质的研究挑战了现有的凝聚态物理理论基石——朗道—费米液体理论。高温超导微观机理一旦建立，无疑是对物理学的一场巨大的革命，人们认识自然界将不再需要从个体推广到多体，而是直接面对一群具有复杂相互作用的多体世界。前沿的数学物理学家甚至认为，世界的本质，就是相互作用，而并非是我们所意识到的物质(如基本粒子等)本身，物质是相互作用的产物，物性是相互作用的结果(图5)<sup>[13-15]</sup>。那么，这种基于相互作用为研究对象的物理，该如何理解？它又会预言什么样的新现象和新物理？都是十分令人期待的。

#### 4 超导应用的未来前景

相对半导体而言，超导材料的应用十分滞后。在半导体芯片统治了我们如今电子世界的时候，我们从未见到过一件“超导家电”，原因在于尚未寻找到如同硅那样合适的超导材料。对于一个超导体而言，需要满足临界温度、临界磁场和临界电流密度均非常之高的前提下，才能适用于大电流、强磁场、无损耗的超导强电应用，同时材料本身的微观缺陷、力学性能、机械加工能力等也极大影响了产品化的进程<sup>[16]</sup>。对于弱电应用来说，则需要纯度极高、加工简单、成本低廉、品质优越的超导材料。已有的超导材料，各自都有它的应用局限：超导磁体大都采用易于加工的铌钛合金，但临界温度和上临界场都太

低；超导器件大都采用易于镀膜和加工的纯金属铌，但临界温度和品质因子都不能满足一些特殊需求；许多超导器件需要持续在低温环境下运行，即使材料本身成本不高，但是维持低温的高昂费用却是难以承受的<sup>[17]</sup>。

超导应用目前最成功的是超导磁体和超导微波器件等，也是极为有限。医院里的核磁共振成像大都采用超导磁体，其磁场一直存在线圈中，所以进入检测室需要摘除所有金属物件。基础科学研究采用的稳恒强磁场、大型加速器磁体、高能粒子探测器以及工业中采用的磁力选矿和污水处理等，也利用了场强高的超导磁体。发展更高分辨率的核磁共振、磁约束的人工可控核聚变、超级粒子对撞机等，都必须依赖强度更高的超导磁体，也是未来技术的可能突破口。超导微波器件在一些军事和民用领域都已经走向成熟甚至是商业化了，为信息爆炸的今天提供了非常有效的通讯保障<sup>[18]</sup>。

我们仍然要抱有乐观的态度，坚信随着超导材料、机理和技术的发展，更多的超导电力、磁体、器件，必然将在未来逐步走进人们的生活，甚至带来翻天覆地的变化。

可以想象，如果实现有机物或聚合物的室温超导，那么或许就可以用它来织成一个“悬浮云沙发”，放在客厅里也是一件十分惬意的事情(图6)。

如果超导磁悬浮的技术成熟且成本降低，或许高铁将来会换成时速500公里/小时以上的超导磁悬浮高速列车，交通会更加便捷(图7)<sup>[19]</sup>。

随着超导量子比特技术的迅猛

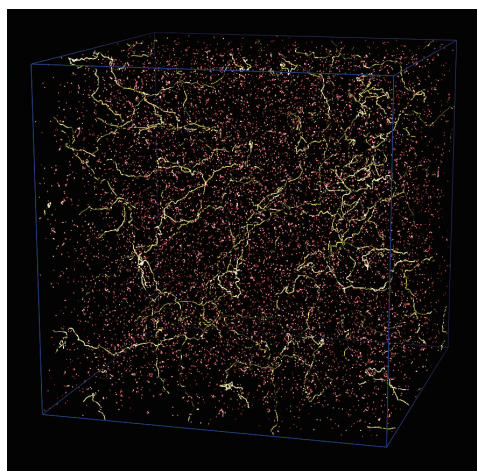


图5 复杂相互作用构成了我们的世界(引自 www.damtp.cam.ac.uk)



图6 “悬浮云”概念沙发(引自 www.th-edesignblog.org)



图7 设想的中国超导磁悬浮列车

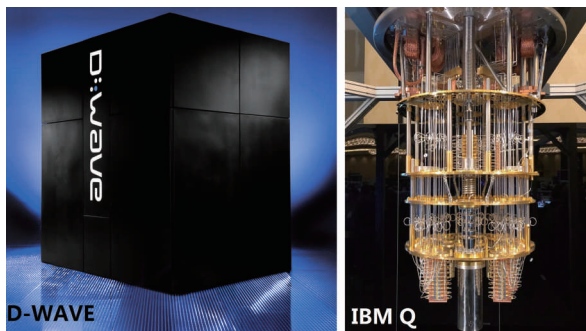


图8 “D-Wave”量子退火机与“IBM Q”量子计算机  
(引自 [www.hpcwire.com](http://www.hpcwire.com) 和 [i2.wp.com](http://i2.wp.com))



图9 科幻电影中基于超导可控核聚变动力的超级宇宙飞船(引自 [leftfm.com](http://leftfm.com))



图10 科技革命改变未来(引自 [uwm.edu](http://uwm.edu))

发展,量子计算机已经从最早的D-Wave量子退火机发展成了诸如IBM Q那样的新型量子计算机(图8),更强更大的量子计算在不久的将来会更多。如果参照半导体计算机的发展模式的话,或许用不了几十年,我们就有可能人人用上量子手机,在人工智能的帮助下,高效完成所有的工作和生活事务<sup>[20]</sup>。

超导可控核聚变发动机的成功研制,或许可以为未来的超级宇宙飞船提供源源不断的动力,帮助人类在太空中持续飞行数百年,去寻找下一个合适的家园(图9)。

新一代的科技革命,正在新材料、新机理、新器件的推动下,加速到来。超导的研究,机遇与挑战并存,希望总是在路的前方(图10)。

正所谓:“未来已来,唯变不变,关山万里,终将辉煌。”  
超导,未来见!

### 参考文献

- [1] [https://www.nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics/laureates/](https://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/)
- [2] 罗会仟. 自然杂志, 2017, 39(6):427
- [3] 贾埃沃 著. 邢紫烟, 邢志忠 译. 我是我认识的最聪明的人. 上海: 上海科技教育出版社, 2018
- [4] 罗会仟, 周兴江. 现代物理知识, 2012, 24(02):30
- [5] 章立源. 超越自由: 神奇的超导体. 北京: 科学出版社, 2005
- [6] Dias R P, Silvera I F. Science, 2017, 355:715
- [7] 张裕恒. 超导物理. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2009
- [8] Wang Q Y *et al.* Chin. Phys. Lett., 2012, 29:037402
- [9] Liu D F *et al.* Nat. Commun., 2012, 3:931
- [10] Tan S Y *et al.* Nat. Mater., 2013, 12:6340
- [11] 向涛, 薛健. 物理, 2017, 46(08):514
- [12] 罗会仟. 物理, 2014, 43(07):430
- [13] Kong L. Adv. Math., 2017, 213:271
- [14] Levin M A, Wen X G. Rev. Mod. Phys., 2015, 77:871
- [15] Lan T, Kong L, Wen X G. arXiv:1602.05946
- [16] Sarker M M, Flavel W R. Journal of Superconductivity, 1998, 11:209
- [17] Hosono H *et al.* Mater. Today, 2018, 21:278

[18] Newman N, Lyons W G. Journal of Superconductivity, 1993, 6:119

[19] <https://www.scmaglev.com/>

[20] Wendin G. Reports on Progress in Physics, 2017, 80:10

### 读者和编者

## 《物理》有奖征集 封面素材

为充分体现物理科学的独特之美,本刊编辑部欢迎广大读者和作者踊跃投寄与物理学相关的封面素材。要求图片清晰,色泽饱满,富有较强的视觉冲击力和很好的物理科学内涵。

一经选用,均有稿酬并赠阅该年度《物理》杂志。

请将封面素材以附件形式发至: [physics@iphy.ac.cn](mailto:physics@iphy.ac.cn); 联系电话: 010-82649470; 82649029

《物理》编辑部