



2023-12-05 收到

† email: mcheng@iphy.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20231209

百年超导，魅力不减。——赵忠贤

电影《阿凡达》中，一座座悬浮的大山给大家留下了深刻印象，它背后采用的就是室温超导体的概念。所谓室温超导体指的是临界温度达到室温(300 K)的超导体。事实上，超导体自1911年被发现以来，已有112年的历史，但我们对高温超导现象的微观机制仍不甚了解，室温超导体更是遥遥无期。

2023年11月27日晚，由中国科学院学部工作局、科学技术部人才与科普司支持，中国科学院物理研究所承办的第68期科学咖啡馆活动成功举行。本次活动的主持人是中国科学院科学传播研究中心副主任邱成利，主讲嘉宾为中国科学院物理研究所研究员罗会任。在这期沙龙活动中，罗会任以“室温超导意味着什么”为主题，向大家介绍了神奇的超导现象，解答了一系列有关超导现象的疑惑。

### 何为超导

超导确实意义非凡。至今，诺贝尔物理学奖已经颁给了200多人，凝聚态物理领域约有60余人获奖，其中有10人是因为超导研究获此殊荣。超导体有两个基本性质，一是零电阻，二是完全抗磁性。抗磁性其实并不罕见，水、石墨等材料都具有抗磁性，但只有超导体是完全抗磁性，可以将磁场完全排除在外。超导体分为两类，第一类超导

体在外磁场达到临界值时，完全抗磁性和零电阻都会立即被破坏，进入正常态；而大部分超导体都是第二类超导体，外磁场达到下临界值时，它们会首先进入混合态，此时仍具有零电阻，但外磁场可以部分地进入超导体，外磁场继续增加达到上临界值，才会彻底进入正常态。超导现象是一种宏观量子凝聚态，典型例子是两个不同的超导体形成的约瑟夫森结。由于电子的相位干涉，约瑟夫森结对通过它的磁通极其敏感，这使它成为最灵敏的磁场探测计，也被人们用来做为电压的基准。1957年，巴丁、库珀和施里弗提出了BCS理论，成功解释了常规超导现象，他们三人也因此荣获1972年诺贝尔物理学奖。BCS理论认为，材料内部的电子与声子之间存在耦合，两个动量相等、方向相反的电子可以通过声子作为能量媒介形成一个能量更低的束缚态，这就是库珀对。低温下库珀对可以凝聚到单一量子态，宏观上即表现出超导电性。现在我们把符合传统BCS理论的超导体称为常规超导体，不符合的即为非常规超导体。

超导其实已经得到了非常广泛的应用。深圳平安大厦由超导电缆供电，其使用的高温超导电缆均为国产，虽然成本颇高，且需要制冷机维持低温，但超导电缆无需电塔，可以极大地节约土地资源。

2021年，上海徐汇区也装备了一条超导电缆。另外，核磁共振所需的磁场一般也是由超导体提供，尤其是3 T以上的强场核磁共振设备。其他的诸如磁约束可控核聚变、粒子加速器中的强磁场也大都是由超导体提供的。另一个广为人知的应用是超导磁悬浮列车，目前我国在成都、长春等城市都有样车参与试验。量子计算机的最佳实现途径之一就是超导量子计算，不过超导量子计算机并非通用计算机，只能处理特定问题，在这个领域中国同样走在世界前列。

### 高温超导何处寻

自1911年发现超导现象至今，我们已经找到了许多超导材料，但它们大部分都没有应用价值，什么样的超导体才具备应用前景呢？具有应用前景的超导体必须达到“三高”，即高转变温度、高临界场、高临界电流密度。只有在临界值以下，超导体才会进入超导态，任何



图1 罗会任主题报告现场

一个指标高于临界值都会导致超导体进入正常态，而一旦超导体失超，往往会伴随大量发热，导致危险发生。

我们如何寻找新的超导体呢？罗会仟把发现超导体的基本方法形象地称作“元素炒菜”，即通过不同元素的不同组合来合成新物质，测试其是否为超导体。迄今为止，人们已经发现了上万种超导材料，但这其中绝大多数超导体在常压下的 $T_c$ 都低于40 K，40 K也就是所谓的麦克米兰极限。麦克米兰极限是根据BCS理论结合实验数据经验外推得到的常规超导体 $T_c$ 的上限，很有意思的是，目前发现的常规超导体在常压下都未能超过40 K。但很快，物理学家发现的铜氧化物超导体突破了这一极限。中国科学家在其中做出了突出贡献，赵忠贤等人率先将 $T_c$ 提高到了93 K，进入液氮温区。之后物理学家又发现了一系列具有类似结构的超导体，这就是铜基高温超导体，其 $T_c$ 常压下最高甚至达到了134 K。但铜基超导体是陶瓷材料，机械加工性能极差，为实际应用带来了巨大挑战，业界普遍的做法是利用金属基带和保护层包覆超导体以制作带材，目前已经可以量产，但还没有大规模应用。另一类高温超导体是铁基超导，这一类超导体由日本科学家细

野秀雄发现，初始 $T_c$ 为26 K，中国科学家随后在类似体系发现了 $T_c$ 超过40 K的超导体，证明其为高温超导体。在诸如镍基、锰基、铬基等其他新型非常规超导体领域，中国科学家也取得了世界领先的研究成果。

高压是我们发现新超导体的另一重要手段。理论上，如果将氢压缩到金属态，它很可能是室温超导体，但这需要的压力甚至达到了金刚石的极限。2017年，Dias宣称在495 GPa的压力下合成了金属氢，但其数据无法复现，后来大家推测是实验失误出现的假象。在此之前，德国科学家在220 GPa的压力下发现硫化氢是超导体， $T_c$ 约220 K。目前国际公认的 $T_c$ 最高的超导体是 $\text{LaH}_{10}$ ，它在188 GPa下展现出260 K的超导电性。除了高压以外，罗会仟也向我们介绍了几种发现新超导体的手段，比如原子级薄膜材料、离子液体调控、二维材料堆垛、理论计算设计新结构等。一旦我们真的发现了室温超导体，无疑将具有重大理论价值，可以帮助理解超导机制。但在实用方面却不必过分乐观，一个材料从发现到大规模应用需要解决很多技术问题，而且超导体的临界电流密度等指标一般随着温度降低而升高，即便是室温超导体，在强电强磁情境

下可能也更适合在低温下使用。

## 超导新时代

今年，两起宣称发现室温超导的新闻引起了社会各界的关注，事实上，发现室温超导并不是“新闻”，历史上曾多次出现宣称发现室温超导的乌龙事件， $T_c$ 有

声称达到373 K甚至更高的，但都没有被证实。

报告结束后，达内科技集团副院长孙善明问道：“我们通过不同元素的不同组合寻找新材料，这个过程有没有可能使用人工智能辅助？”罗会仟回答道：“科学家们现在已经借助计算机配合理论模型预言了很多材料，并建立了相应的数据库。但计算出来的材料数据可能不够准确，需要与实际实验数据比对，物理所正在通过‘物质科学电子实验室平台’把所有实验数据规范化，每做一次实验就会积累一部分数据，然后与计算结果匹配，这部分工作可以借助AI来完成。最后就是真正合成材料，这部分可以借助材料基因方法甚至人工智能机器人来提升实验效率。”

中国联通公司的王靖宇问道：“刚才听您介绍了超导在强电强磁方面的应用，请问超导在通信方面有什么应用吗？”罗会仟回答道：“其实超导在通信方面已经有应用了，在大钟寺有一个基站，20年前使用了超导滤波器。量子通信里也可能用到超导，接收量子卫星的光信号需要用到单光子探测器，单光子探测器既有半导体探测器，也有超导探测器，后者效率更高。物理所高鸿钧院士也在寻找超导体中新的量子束缚态。这些都将促进超导的器件应用。”

超导电性自被发现以来，已经走过百余年月，至今仍然焕发出勃勃生机，从金属时代到铜基和铁基时代，再步入迅速发展的云梦时代，不断激发新的科学思想。在这其中，中国科学家的身影越来越多，角色也越来越重要，相信在未来，超导的新时代一定更加精彩。

(中国科学院物理研究所

李存东 秦晓宇 成蒙 供稿)



图2 科普活动与会嘉宾合影

- ▶ 新型高效热交换器结合超绝热轻质柔性液氦传输管线，超低液氦消耗率，最低温度 <1.8K (备注：S-600 JT 插件最低温度 <1.3K)
- ▶ Scryo-S-200/300 和 500 采用特殊温度漂移补偿设计和优化的超绝热支撑设计
- ▶ 可升级为无液氦闭环系统,并保持低震动和漂移特性



Scryo-S-100  
通用型低温恒温器



Scryo-S-200  
超高真空低温恒温器



Scryo-S-300  
紧凑微型低温恒温器



Scryo-S-400  
超高真空低温插件



Scryo-S-500  
显微型低温恒温器



Scryo-S-600  
JT插件

### Scryo® 系列低温恒温器典型特性

| 类型   | S-100                                      | S-200                               | S-300                                       | S-400                                | S-500                             | S-600                                |
|------|--|-------------------------------------|---|--------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|
| 典型特性 | 低温恒温器                                      | 低温恒温器                               | 低温恒温器                                       | 低温插件                                 | 低温恒温器                             | JT插件                                 |
| 样品环境 | 真空   | 超高真空                                | 真空  | 超高真空                                 | 真空                                | 超高真空                                 |
| 温度范围 | <1.8K-500K                                 | <2.5K-420K                          | <1.8K-420K                                  | <1.8K-500K                           | <1.8K-420K                        | <1.3K-500K                           |
| 震动水平 | -  | <5nm                                | <10nm                                       | -                                    | <5nm                              | -                                    |
| 漂移水平 | -  | <2nm/min                            | <3nm/min                                    | -                                    | <2nm/min                          | -                                    |
| 温度稳定 | <25mK                                      | <10mK                               | <10mK                                       | <25mK                                | <10mK                             | <10mK                                |
| 典型应用 | 紫外 / 可见光 / 红外 THz, 基质隔离, 穆斯堡尔谱, 高压 / 高能物理等 | STM、AFM、离子阱、原子 / 分子冷阱、近场光学椭圆仪和高能物理等 | 显微 / 近场光学、低维材料、磁光、拉曼 / 红外光谱、高压、X-ray 和高能物理等 | STM、AFM、ARPES、椭圆仪、红外、超快、X-ray 和高能物理等 | 显微(磁光)、低维材料、拉曼/傅里叶/布里渊散射、高压和高能物理等 | STM、AFM、ARPES、椭圆仪、红外、超快、X-ray 和高能物理等 |

