火热“出圈”的“科幻级”技术会带来科技革命吗？

七问 室温超导

罗会仟

上周，美国罗切斯特大学助理教授迪亚斯团队宣布，他们发现了近常压的室温超导体，成果发表在《自然》杂志上。这一消息使“室温超导”这一“科幻级”技术迅速成为社会关注的焦点，争议和质疑也随之而来。

自1911年首个超导体发现以来，追求能够在常温常压下广泛应用的超导材料，一直是物理学家的终极梦想。然而，这一路探索困难重重。百余年来，人们是如何一步步解锁超导体的奥秘的？迪亚斯的最新成果可信度有多高？室温超导一旦成真，会产生哪些影响？本报特邀中国科学院物理研究所研究员罗会仟对此进行深入解读。

——编者

室温超导多年来一直是物理学家追逐的一个终极目标。

自从1911年发现第一个超导体金属汞以来，科学家们就在努力探索各类新型的超导材料。由于超导材料具有绝对零电阻、完全抗磁性等独特的物理性质，而且又属于一种宏观量子现象，在所有能用上电或磁的地方，都有可能用上超导材料。比如，实现无损耗的超导输电、超导储能、超导电动机、超导加速器磁体、超导磁约束核聚变、高速超导磁悬浮列车等强电应用，以及超导弱磁探测、超导滤波、超导单光子探测、超导太赫兹探测、超导量子芯片等弱电应用。

然而，绝大部分超导材料都需要在较低的温度下才会出现超导状态，这个温度称为“超导临界温度”。例如，大部分金属合金超导体的临界温度都低于23K（即−250.15℃），这意味着需要极其昂贵的液氦来维持低温。

迄今为止，科学家仅发现两类能够超越

1 迪亚斯团队的最新发现为何引发如此大的轰动？

40K以上的高温超导家族，即铜氧化物和铁基超导材料。在常压下，铜氧化物超导温度最高，为134K左右，目前主要用于实用化的两类铜氧化物超导材料临界温度为120K和90K左右。这两种材料可以在液氮环境下使用，制冷的成本已大幅度降低。但为了克服材料本身的缺点，它们在使用时需要采用粉末套管或基片镀膜方法，这又增加了不少成本。

总之，超导材料大都需要在低温环境下使用，如果能够大幅度提高其临界温度，最好达到室温以上，才能节约低温制冷的成本，更方便实现规模化的产业应用。

近十年来，科学家们发现，在氢化物材料，特别是稀土氢化物材料中，可以实现很高温度的超导电性。但这类材料又面临其他更加苛刻的条件，即需要在几百万个大气压的超高压力下才能实现超导电性，而且所获得的材料数量极少。更令人头疼的是，一旦释放压力，其超导性能就不复存在，故而无法达到任何应用的需求。

此次，迪亚斯团队宣布发现的镥−氮−氢三元化合材料，超导温度不仅达到了21℃，已非常接近室温（严格来说物理上室温定义为300K，即27℃），而且所需压力降低到了1GPa（1万个标准大气压）左右，这让人们看到了实现常压（1个标准大气压）室温超导的希望。

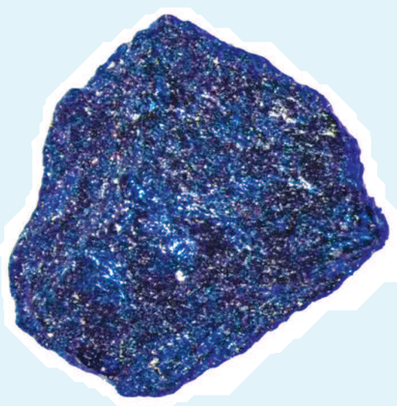
如果人类真的找到了常压室温超导体，而且它的各项应用指标都十分理想的话，那对整个世界的影响是极其深远的。

▲科幻电影中的磁悬浮室温超导体。（《阿凡达》剧照）

◀迪亚斯在实验室。

▼迪亚斯团队实验室创造的镥−氮−氢化合物样品。

（图源：罗切斯特大学官网）



2 此前有过撤稿经历，《自然》为何再度发表论文？

早在2020年，迪亚斯团队曾宣称在碳−硫−氢三元化物中发现了“室温超导”，最高超导临界温度为288K（约为15℃），需要的压力为267GPa。但是，这一结果后续一直没有被其他实验团队所重复。由于该实验数据显得十分完美，业内许多科学家都质疑该结果的可靠性，作者团队也曾对此回应，但《自然》编辑部认为没有充分回答质疑，最后期刊单方面撤回了稿件。不过在今年2月，作者团队重新提交了一篇论文，研究的是上次碳−硫−氢体系的重复结果，并给出大部分实验数据的处理过程，而且有了更多领域内更多作者的署名，目前论文应该正处于审稿状态。

迪亚斯团队3月9日发表在《自然》杂志的“近常压室温超导”结果，则是一个完全不一样的材料体系，即镥−氮−氢。这种材料放置在“金刚石压砧”装置中并加压后，在约21℃温度下及1万个标准大气压的压力下进入超导状态，电流不再具有阻力。而且这篇论文给出的证据链也非常完整，包括超导的零电阻、抗磁性、比热跃变等基本性质，还有X射线衍射和拉曼光谱等关于材料结构和导电性的数据，单纯从正文中给出的数据来看，已足以证明它是一个超导材料。

不过，科学家们对数据的分析过程仍然存在很大疑问，这需要后续更加细致的分析讨论和相关的实验验证来考量。究竟是真是假，我们也期待业界尽快给出一个定论。

3 室温超导究竟是“实验室神话”还是“未来之星”？

对于实验室发现的任何一个新材料，我们都要保持谨慎乐观的态度。一方面，新材料的发现确实意味着新现象和新物理的可能，也许还有许多重要的实际应用。另一方面，新材料的发现往往是突破某个单一指标或几个指标，对于规模化的产业应用而言，综合指标的全面提升才是最关键的。

就超导体而言，除了临界温度，还有临界磁场、临界电流密度等至少三个关键的临界参数。这意味着，任何情况下，只要突破三个临界参数中的任何一个，就意味着材料要么失去完全抗磁性，要么失去零电阻效应，或者两者统统消失。

超导体在强电应用环境下，往往承载着巨大的电流，一旦产生电阻或能量耗散，系统将发生升温或应力变化等各种不可控因素，最终导致整个超导设备“失超”，后果不堪设想。

此外，不仅仅是临界参数问题，还有超导材料在实际应用中必须面对的材料的机械性能、化学稳定性和受力不均匀等问题，这些都在制约着超导材料的应用。

所以说，即便实验室里发现了常压室温超导材料，也不一定意味着能马上实现大规模应用，而需要克服上述种种困难。这个时间可能需要很久，甚至最后不得不放弃应用。

4 人工智能技术将对超导研究带来什么？

在迪亚斯团队的这项工作中，我们注意到他们利用了人工智能来计算预测可能的材料结构。

事实上，这是现代材料科学中一种常用的手段。随着超级计算机集群的出现和算法的不断优化，人们已经有较大把握预测材料的基本结构，甚至计算出基本的物理性质，如导电性能、力学性能、光学性能等。

在寻找金属氢化物的过程中，人工智能就可以起到很大作用。比如借助强大的计算能力，给出相关材料在不同压力下可能的稳定结构，结合人工智能筛选，寻找出有可能出现超导电性的材料，再根据已知的超导理论，来推测其超导临界温度。一旦发现临界温度可能很高，就可以尝试开展实验合成，通过实际测量来验证其超导的可能性。

当然，这种方法仅仅适合于常规超导材料，它们可以用目前已经非常成熟的BCS超导理论（一种用来解释常规超导体的超导电性的微观理论）来描述，这也是为何其临界温度能够很好地被预测的原因。而对于非常规超导，例如铜氧化物、铁砷化物、铁硒化物以及重费米子超导材料而言，它们基本不能用常规的BCS理论来描述，与之相关的理论也完全不成熟，预测临界温度也就无从谈起。

不过，科学家们也在另辟蹊径。例如，通过理论和实验的经验来判断高温超导的“材料结构基因”，即某些特定的结构单元可能对实现更高温度的超导十分有利，然后结合人工智能和材料计算寻找合适的材料。这方面已经预言了一些新的非常规超导材料，不过目前为止尚未得到实验的验证。

5 超导终极梦想有望在中国率先实现吗？

上世纪六七十年代起，中国就已经在研发超导的应用，并探索高临界温度的超导材料。上世纪80年代，中国率先在钇钡铜氧体系中发现了90K以上的高温超导电性，首次突破了液氮温区（液氮沸点为77K）。

随后数十年里，中国的超导研究在飞速发展中，培养了一大批中坚力量，在实验条件方面也取得了很大提升。由于前期深厚积累，在2008年铁基超导浮现之初，中国科学家就很快抓住了机遇，把铁基材料的超导临界温度从26K迅速提升到了55K，证明其是第二类可以突破40K的高温超导家族。

在铁基超导领域，我国科学家不仅在新材料探索方面迅速推动，而且在基本物性测量、超导微观机理和超导应用基础研究方面，都走到了世界最前沿。比如，我国科学家率先提出了铁基超导体中自旋密度波序的存在，完成了全世界首根百米级铁基超导线材的研制等。

在铁基超导研究的带动下，中国的超导基础研究进入了一个全新的“领跑”阶段：新的超导材料不断被中国人发现，超导材料中许多新的量子现象也由我们揭示，理论科学家们也开始了一些新的尝试，高温超导线带材的实用化进程不断推进。随着近些年超导领域一些激动人心进展的出现，相信在不久的将来，中国科学家一定能在超导领域做出更重要的原创性工作，包括在常压室温超导材料探索和机理研究方面，也充满希望。

6 室温超导一旦成真，会带来科技革命吗？

室温超导与科技革命没有必然的联系。

我们必须清醒地认识到，任何一个新材料的出现，到它大规模的应用，都会有很长的一段路要走。如果室温超导依旧是在如同金属氢化物那样所需的超高压下才能实现，那么它的实用价值就要大打折扣。而且，如果金属氢化物超导依旧是传统的BCS理论的话，那它即使最终实现室温超导，在理论上也没有太多新的价值。

室温超导的实现，更多意义上是说明超导临界温度不存在一个上限，它总是可以被不断突破的，这为研究超导的科学们持续带来了新希望，一个不断突破纪录的希望。

发现高压室温超导体后，人们可以尝试降低压力到常压，如果到这一步还依然能保持室温超导或接近室温的超导，也是非常有意义的。人们还可以通过研究高压下的室温超导材料的结构和物性，借鉴到常压下的材料中，去搜索类似结构或物性的材料，或许能够帮助我们尽快找到常压室温超导体。

更进一步，如果在新材料中探索到新奇的物理现象，并实现一些意想不到的应用，那也许会带来新一轮的科技革命。

7 常压室温超导距离我们的生活还有多远？

我们的确更加期待，常压的室温材料能够被最终发现，而且它的三个临界参数都很高，并具有良好的机械性能，可以克服实际应用中的工程问题。电影《阿凡达》中的潘多拉星球上，那种含有室温超导矿石的大山，就可以悬浮在空中。如果室温超导材料真有付诸广泛应用的那一天，那么我们生活中处处可用到超导体，我们可以畅想天上有磁悬浮的房屋甚至城市。在城市中，地面道路上行驶的是没有轮子的磁悬浮电车，穿梭在城市之间的是超高速磁悬浮列车，甚至家里摆放的是没有腿的磁悬浮家具……

不过，话说回来，超导体即使临界温度很高，我们也倾向于在低温下去使用它，只是可能不需要那么低的温度而已。这是因为，温度越低，它能够承载的电流密度越高、磁场越强，超导的稳定性也越好，特别是超导的量子特性就越明显可控。在这方面，超导计算机就是一个很好的例子。尽管超导芯片大部分采用金属铝或铌，超导温度在1K以上，但为了更好地保证量子相干效应，这些芯片仍需要在mK（毫开尔文）的环境下使用。

对于超导磁体而言，温度越低它能实现的磁场强度越高，在一些特别需要强磁场的情形下，这是十分必要的。同样的，对于一些超导磁性或太赫兹探测而言，由于低温下量子效应的敏感度越高，探测的精度越好，所以设备未必需要在室温下工作。

超导简史

超导研究的历史虽然只有112年，但通过超导研究直接获得诺贝尔奖的科学家迄今已有10位。超导研究是物理学中一个很小的分支领域，却诞生了这么多诺奖，可见它非常重要。

超导是凝聚态物理研究的一个基本问题。我们知道，材料是由原子组成的，电子在材料里“跑”，必然会受到一定的阻碍，这种阻碍叫“电阻”。根据电阻大小，我们可以分出绝缘体、半导体、导体。物理学家有一个很简单的方法对其进行区分，就是看电阻随温度怎样变化。如果电阻随温度下降而下降，这种物质叫作“导体”；如果电阻随温度下降而上升，这种物质叫作“绝缘体”。

那么，超导体是如何发现并不断发展的呢？我们来简单追溯一下它的发展历史。

超导体三大特性逐步揭秘

温度下降到很低的情况下，电阻会有什么变化？早期，物理学家并不能解决这个问题。没有办法做实验，就只能猜想。

1911年，荷兰物理学家昂尼斯发现金属汞在−269℃时电阻突然消失，并因发现“超导电性”而获得1913年诺贝尔物理学奖。

所谓“超导”，指的是“超级导电”。不过，超导还有一个很神奇的磁效应。1933年，德国科学家迈斯纳因发现了超导的完全抗磁性，即磁场不能穿越超导体内部——磁通线进不去，以至于它内部的磁感应强度也是零。

有零电阻和抗磁性两个效应，我们就说这是超导体了。然而，超导还有第三个效应——超导热力学效应。超导是一个热力学现象，也是一种宏观量子的效应。超导热力学效应是三位理论物理学家在1950年左右提出的，他们先后获得了诺贝尔物理学奖。

目前比较成熟的超导理论解释是BCS理论，以其发明者巴丁（J.Bardeen）、库珀（L.V.Cooper）、施里弗（J.R.Schrieffer）的名字首字母命名。这三位科学家推测了一种情况：在材料内部，一个电子单独跑肯定会受到阻碍，两个电子配对跑为什么不会受到阻碍呢？我们可以把电子当成只有一只翅膀的小蜜蜂，一只翅膀的小蜜蜂飞不起来，但是左翅膀抱右翅膀，两只小蜜蜂配对就飞起来了，这叫作“双结生翅成超导”。这就是BCS理论的精髓。

这三位科学家中，巴丁还是世界上唯一一位两次获得诺贝尔物理学奖的人。他第一次获诺奖是因为发明半导体晶体管，改变了整个人类世界。

不懈追寻“三高”超导体

要找到一个好用的超导体，必须具备“三高”，即高临界温度、高临界磁场和高临界电流密度。但要同时达到“三高”很难，物理学家并不知道具体怎么做才能提高临界磁场和临界电流密度。于是，大家就去找合适的高临界温度超导材料。

从元素单质到元素化合物，科学家努力寻找更高超导温度的材料。曾经，科学家认为超导温度的上限是40K，并将之称为“麦克米兰极限”。

不过，1986年，两位来自IBM的科学家发现一种氧化物的超导温度能够达到35K，已经逼近40K红线。他们在1987年获得诺贝尔奖。紧随其后，中国科学院物理研究所的赵忠贤、美国休斯顿大学的朱经武和阿拉巴马大学的吴茂昆等人发现了一种名为钡钇铜氧的材料，其超导温度高达93K。

93K不仅意味着40K的极限不复存在，还意味着科学家从此进入了液氮温区，可以用液氮做超导实验。而之前做超导只能利用液氦——一升液氦需要好几百元，而一升液氮只要几元。

此后，科学家找到了一系列的铜氧化物高温超导材料，目前已能达到134K的超导温度，加压可以达到165K。虽然温度高，但人们发现铜氧化物属于陶瓷材料，一碰就会碎，为了更好使用这种材料，需要做成复杂的复合结构线带材。

2008年，日本科学家细野秀雄家发现了一种很重要的材料——铁基超导体镧铁砷氧氟，其超导温度可达26K。

中国科学家敏锐地注意到这个材料很重要，接着把镧氧铁砷氟中的镧换成了其他的镧系元素，结果他们获得的钐铁砷氧氟，超导温度可以达到55K。

这就是第二大高温超导体家族——铁基高温超导体。现在，科学家发现了这个家族的很多成员，其中很多是中国人发现的。铁基超导块体材料目前最高超导温度可以达到55K，铁硒薄膜材料至少可以达到65K，而且这个铁硒薄膜很神奇，只有一层原子的厚度。

未来生活期待室温超导

超导有很多重要的效应，但是超导材料到底有什么用呢？

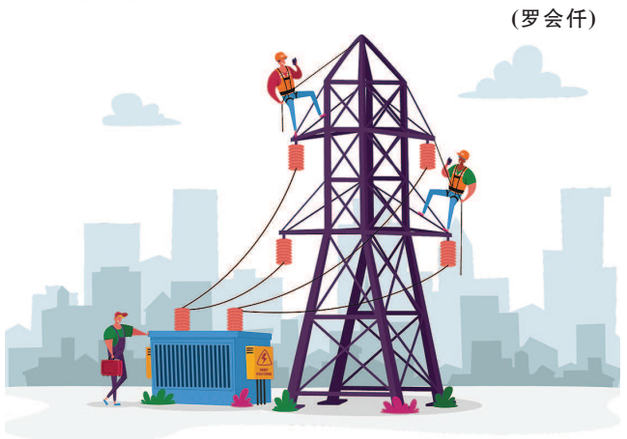
首先，一切用到电和磁的地方都可以用到超导体。比如输电，为了减少输电的损耗，只能加几千伏上万伏的电压，即使这样还是会有大约15%的损耗。如果用超导，就可以把这个损耗省掉，因为它的电阻是零。节约下来的这15%的电能，可能意味着人类的能源能多用100至200年，这是非常重要的。

再以超导磁悬浮列车为例。现在坐高铁，北京到上海最快的速度是每小时350千米，而日本试验的超导磁悬浮列车能达到时速600千米以上。如果再去除空气阻力，其时速至少能达到3000千米以上——北京到上海只需半小时就到了。即使人不一定受得了这个速度，但可以用于货物运输。

超导体在基础研究领域的应用也非常重要。比如，粒子物理学中希格斯粒子的发现已经获得了诺贝尔物理学奖。可以说，如今做高能粒子对撞实验的物理学家离开超导体就无法工作。因为，要把粒子加速器的能量提到很高，必须依靠很强的超导磁体，没有高场超导加速器磁体，他们也许就无法进行实验。

除了可以承载很强的磁场和电流，超导还有弱电应用。超导体可以做成一个器件——超精密超导量子干涉仪。这是世界上最精密的一种磁探测器。比如，芯片做好之后如果出现问题，不知道哪里断了，用这个探测器一扫就知道了，哪怕极细的纳米级芯片都可以检测出来。

（罗会仟）



图/视觉中国