

神奇的超导

罗会仟 周兴江

一、什么是超导？

电阻起源于载流子（电子或空穴）在材料中运动过程中受到的各种各样的阻尼。按照材料的常温电阻率从大到小可以分为绝缘体、半导体和导体。绝大部分金属都是良导体，他们在室温下的电阻率非常小但不为零，在 $10^{-12} \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}$ 量级附近。自然界是否存在电阻为零的材料呢？答案是肯定的，这就是超导体。当把超导材料降到某个特定温度以下的时候，将进入超导态，这时电阻将突降为零（图1），同时所有外磁场磁力线将被排出超导体外，导致体内磁感应强度为零，即同时出现零电阻态和完全抗磁性。超导态开始出现的温度一般称为超导临界温度，表示为 T_c 。微观上来说，当超导材料处于超导临界温度之下时，材料中费米面附近的电子将通过相互作用媒介而两两配对，这些电子对将同时处于稳定的低能组态，叫“凝聚体”。在外加电场驱动下，所有电子对整体能够步调一致地运动，因此超导又属于宏观量子凝聚现象。对于零电阻态，实验上已经证实超导材料的电阻率小于 $10^{-23} \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}$ ，在实验精度允许范围内已经可以认为是零。如果将超导体做成环状并感应产生电流，电流将在环中流动不止且几乎不衰减。超导体的完全抗磁性并不依赖于超导体降温 and 加场的次序，也称为迈斯纳（Meissner）效应。一个材料是否为超导体，零电阻态和完全抗磁性是必须同时具有的两个独立特征。

超导态下配对的电子对又称库珀（Cooper）对。配对后的电子将处于凝聚体中，打破电子对需要付出一定的能量，称为超导能隙，它反映了电子间的配对强度。一般来说，超导态在低外磁场及低温下是稳定的有序量子态。超导体的一系列神奇特性意味着我们可以在低温下稳定地利用超导体，比如实现无损耗输电、稳恒强磁场和高速磁悬浮车等。正因如此，自从超导发现以来，人们对超导材料的探索脚步一直不断向前，对超导微观机理和超导应用的研究热情也从未衰减。随着对超导研究的深入，一系列新的超导家族不断被发现，它们展现的新奇

物理现象也在不断挑战人们对现有凝聚态物理的理解，同时实验技术手段也因此得以加速进步，理论概念更是取得了诸多飞跃。已逾百年的超导研究，在诸多科学家的推动下，依旧不断展示新的魅力！

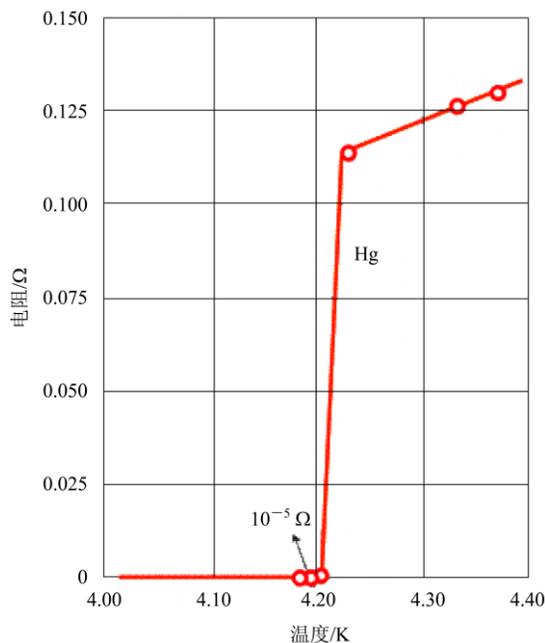


图 1 金属 Hg 在 4.2K 以下的零电阻态

超导材料研究和发展历史展现了人们在超导探索中的种种曲折和惊喜，反映了人们在对大自然的认识过程中如何付出努力又如何收获成果。随着新超导材料的不断发现，人们试图用基于量子力学的微观机理去理解超导的本质。描述超导的微观理论在丰富的实验观测基础上逐渐浮出水面。这些理论在为人们寻找其他超导体方面既起到引导作用，也曾有误导的一面，但它们突破了传统物理概念的樊笼，对凝聚态物理乃至整个物理研究都起到了主要的推动作用。当然，人们更迫切地希望能够实现超导的大规模应用，为人类生产和生活带来福祉。这也正是超导研究的最终目的。

二、超导材料的历史

超导的发现和发展，与低温的获得密切相关。传统的低温环境主要依靠液化气体来实现，比如液

氢的沸点是 20 K(热力学温标中 0 K 对应着零下 273 摄氏度, 20K 即相当于零下 253 摄氏度)。1908 年, 荷兰莱顿实验室的昂内斯 (Kamerlingh Onnes) 等将最难液化的气体——氦气成功液化, 并获得液氦的沸点为 4.2 K。通过液氮进一步节流膨胀技术可以获得低至 1.5 K 的低温环境。随后在 1911 年 4 月 8 日, 昂内斯等人在测量金属汞在低温下的电阻时, 惊讶地发现当温度降至 4.2K 以下时, 汞的电阻突然下降到仪器测量不到的最小值, 基本可认为是零电阻态。第一个超导体——金属汞就此被发现, 其 T_c 为 4.2K。原则上说, 如果把高纯金属认为是理想导体, 也可以具有零电阻态, 但超导体与单纯零电阻态的理想导体有本质区别, 具有更多的奇特性质。1933 年, 德国物理学家迈斯纳 (W. Meissner) 和奥森菲尔德 (R. Ochsenfeld) 发现超导体内部磁感应强度为零, 即具有完全抗磁性, 超导态下磁化率为 -1 , 这成为判断超导体的另一个重要特征指标。

超导现象发现之后, 人们又陆续研究了其他金属和合金是否在低温下具有超导电性。人们发现原来超导现象在大部分金属中都存在, 一些材料在常压和低温下即可超导, 还有的需要在高压和低温下才有超导电性。在元素周期表中, 除了一些磁性金属如 Mn、Co、Ni, 碱金属如 Na、K、Rb, 部分磁性稀土元素, 惰性气体和重元素等尚未观测到超导电性外, 其他常见金属甚至非金属元素都可以实现超导。

金属和合金以及简单金属化合物的超导临界温度都很低, 到 1986 年为止, 人们发现 T_c 最高的化合物是 Nb_3Ge , $T_c = 23.2$ K。这意味着实现超导态需要依赖非常昂贵的液氦来维持低温环境, 极大地制约了超导研究和超导应用。当时一些理论甚至明确指出, 基于电声子相互作用机制的超导临界温度可能存在一个极限, 即超导临界温度的最高值 $T_c^{max} = 40$ K。然而, 人们从未放弃寻找更高 T_c 超导材料的希望。1986 年, 位于瑞士苏黎世的 IBM 公司的柏诺兹 (J. Bednorz) 和缪勒 (K. Müller) 独辟蹊径, 他们没有从常见的金属合金体系中去寻找更高转变温度的超导体, 而是选择在一般认为导电性不好的陶瓷材料中去探索超导电性。结果他们在 La-Ba-Cu-O 体系中首次发现了可能存在超导电性, 其 T_c 高达 35 K。这一发现引发了世界范围高温超导研究的热潮, 随后上演了一场空前激烈的刷

新 T_c 记录的争夺战。1987 年 2 月, 美国休斯顿大学的朱经武、吴茂昆研究组和中国科学院物理研究所的赵忠贤研究团队分别独立发现在 $YBa_2Cu_3O_{6+\delta}$ 体系存在 90 K 以上的 T_c , 超导研究首次成功突破了液氮温区(液氮的沸点为 77 K), 使得超导的大规模研究和应用成为可能。之后, 1988 年盛正直等人在 Tl-Ba-Ca-Cu-O 体系中发现 $T_c=125$ K; 1993 年席林 (Schilling) 等在 Hg-Ba-Ca-Cu-O 体系再次刷新 T_c 记录至 135 K; 1994 年, 朱经武研究组在高压条件下把 $Hg_2Ba_2Ca_2Cu_3O_{10}$ 体系的 T_c 提高到了 164 K, 这一最高 T_c 纪录一直保持至今。在短短十年左右时间, 铜氧化物超导体的 T_c 值翻了几番, 令人惊叹于科学家的勤奋和激情之余, 更多的是被超导研究中的惊喜和无穷的魅力所吸引。相对于常规的金属和合金超导体 (一般称为传统超导体), 铜氧化物超导体具有较高的超导临界温度 (突破传统理论设定的 40 K 极限), 因此被称为高温超导体。

事实上, 除了金属合金和铜氧化物高温超导体之外, 人们还在诸多其他材料中发现了超导电性。在其他金属氧化物中如钛氧化物、铌氧化物、铋氧化物、钇氧化物、钴氧化物等材料中同样发现了超导电性, 只是这些超导体的 T_c 不如铜氧化物高, 因此它们并不被称为高温超导体。在一些特殊金属化合物如 $CeCu_6$ 、 $CeCu_2Si_2$ 、 $CeCoIn_5$ 、 $YbAl_3$ 和 UPt_3 等中, 电子的有效质量是常规金属的一百倍甚至一千倍左右。也就是说, 电子在这些材料中的运动并不像走在平坦大道上那样非常自由, 而是如同在泥塘中艰难行进, 即电子被强烈地局域化了, 等效于电子的质量大大增加。这类超导体被称为重费米子超导体, 其最高超导温度在 $PuCoGa_5$ 中达到 18.5 K。碳元素的众多同素异形体为超导探索提供了丰富的空间, 有机超导体一个新的家族便由此诞生。富勒烯超导体就是 C_{60} 和碱金属之间的化合物, 如 Cs_3C_{60} 的 T_c 高达 38 K, 此外诸如 KC_8 和 CaC_6 等碱金属或碱土金属碳化物也有 10K 左右的超导电性。在其他一维和准二维有机材料如 k -BEDT-TTF₂X 和 λ -BETS₂X 等也同样发现了 1 K 左右的超导电性, 2011 年, 中国科学家又在碱金属掺杂菲和多苯环化合物中分别报道了 5 K 和 33 K 的超导电性。2001 年, 人们在具有简单二元结构的 MgB_2 材料中意外发现了 39 K 的超导电性。有趣的是, 该材料其实早在 1953 年就被合成, 而且作为商用试剂广泛出售,

只是一直没有人意识到它是一个 T_c 这么高的超导体。后来实验证实了它具有和常规金属超导体相同的超导机理，和铜氧化物超导机理截然不同，因此它不属于高温超导体的范畴。但 MgB_2 的独特之处在于它的电子结构中具有两个典型的能带，是一个两带超导体。两类不同能带上的电子同时参与了超导电性，被认为是该材料实现高超导温度的原因，这为人们理解超导形成机理提供了新的思路。

随着对超导的不断探索，新超导体带给人们的惊喜从来没有停止过。2006 年，日本的细野秀雄 (H. Hosono) 研究小组在探索新型透明导电材料时，偶然发现 $LaFePO$ 存在 4 K 左右的超导电性，随后他们于 2008 年一月又发现 $LaFeAsO_{1-x}F_x$ 中存在 26 K 的超导电性。之后在国际上引发了高温超导研究的第二波热潮。在短短的数月之内，中国科学家通过合成其他稀土铁砷化物将 T_c 成功提高到了 56 K。经过日、中、美、德等国科学家的共同努力，许多具有新结构体系的铁砷化物和铁硒化物超导体被陆续发现。典型母体如 $LaFeAsO$ 、 $BaFe_2As_2$ 、 $LiFeAs$ 、 $FeSe$ 等，这些材料几乎在所有的原子位置都可以进行不同的掺杂而获得超导电性。这个新的超导家族被称为铁基超导体，因其同样具有 50 K 以上的超导电性，且超导机理不同于传统的超导体，所以它是继铜氧化物高温超导体发现之后新的第二类高温超导体。值得深思的是，类似结构的铁基化合物其实早在 2000 年甚至更早就被人们合成，只是并未进一步研究超导的可能性。而传统的观念认为，铁元素因为和铁磁性相关，会极大地破坏超导电性，因此铁基超导的发现，恰恰就是“山穷水尽疑无路”之后的“柳暗花明又一村”，而且这一村绝对是个超级大村。目前保守估计的铁基超导家族成员至少有 3000 多种（许多还尚待发现），几乎超越了以往发现的所有各类超导体的总和。基于在铜氧化物高温超导研究中积累的丰富经验和高精实验手段，人们迅速推进了铁基超导的机理研究。科学家发现这类超导体和 MgB_2 类似也是多带超导体，确切说是五个不同能带的电子和空穴载流子都可能参与了超导电性之中。更令人兴奋的是，一方面铁基超导材料表现出传统金属超导体的一些类似特征，另一方面它又和铜氧化合物的超导机理有着深刻的类比之处，这为不同超导材料的研究构建了诸多桥梁，将超导的研究带入一个前所未有的广阔空间！

概括一下，目前发现的超导材料主要可以划分如下几大家族：金属和合金超导体、铜氧化物超导体、重费米子超导体、有机超导体、铁基超导体以及其他氧化物超导体。金属和合金超导体可以用传统超导微观理论解释，又称为常规超导体，而其他尚无法用传统超导理论解释的超导材料则叫做非常规超导体。铜氧化物和铁基超导体的超导临界温度可以超过传统超导理论预言的 T_c 上限 40 K，因此他们又称为高温超导体。并不是所有铜氧化物和铁基超导体都有 40 K 以上的 T_c ，这两大家族部分体系的最高 T_c 也不过 20 K 甚至 10 K，但由于其超导起源和家族里其他成员相同或相似，人们还是习惯称它们为高温超导体。我们将各种代表性超导体的 T_c 对应其发现的年代总结在图 2 中。可以看出，新超导体在每个时期都在不断涌现，其中铜氧化物和铁基高温超导体的发现，都是在短时间内迅速提高了超导材料的最高 T_c 记录。新超导体的探索历史不断说明了打破常规教条的重要性，铁基超导的发现还启示了高温超导可能广泛地存在于更多的材料之中，因此未来的超导探索会永远充满惊喜和新的发现！

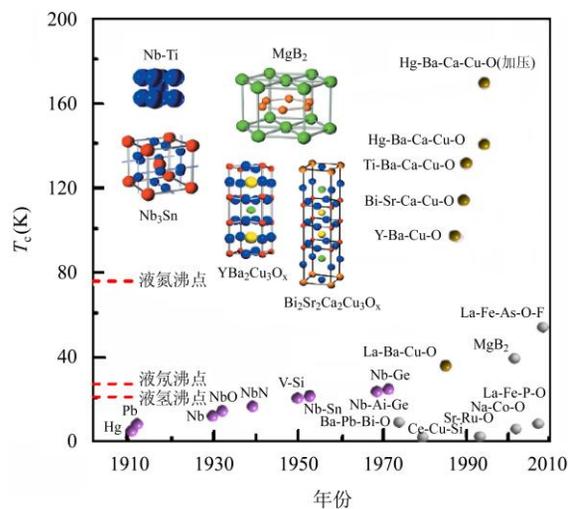


图 2 各种超导体的 T_c 及其发现的年代，插图为几种典型超导体的晶体结构

三、超导理论的发展

超导现象被发现以后，许多理论物理学家试图对超导的起源进行理论上的描述。然而，超导微观机理的建立经历了一个艰巨而曲折的漫长过程。20 世纪初期，许多顶级的理论物理学家都试图从量子力学基础上理解超导电性，但最终并没有获得成功，

其中包括爱因斯坦、玻尔、海森伯、费曼等。直到超导发现近 50 年后，超导微观理论才被建立。

在最初对超导电性的认识过程中，唯象理论起到了非常重要的作用，如二流体模型和伦敦（London）方程等。其中最著名的是前苏联物理学家金茨堡（Ginzburg）和朗道（Landau）于 1950 年建立的金茨堡-朗道理论（简称 G-L 理论），他们从热力学统计物理角度描述了超导相变。G-L 理论以朗道的二级相变理论为基础，假设了超导态和正常态之间的相变可以用一个所谓相变序参量来描述，从而推导出超导转变附近的临界行为。G-L 理论告诉我们，外磁场并不是完全不可以进入超导体，实际上它穿透进入了超导体的表面。即使在超导临界温度以下，如果外磁场足够强，那么它也可以完全进入超导体而彻底破坏超导态，即恢复到正常态。能够破坏超导态的磁场称为临界场 H_c ，一些超导体只存在一个临界场，称为第一类超导体。而实际上大部分超导体存在两个临界场，即下临界场 H_{c1} 和上临界场 H_{c2} ，这些超导体被称为第二类超导体（图 3）。当磁场增加到下临界场时，磁场将进入超导体内部，完全抗磁性被破坏，但是超导电子对仍然以超导环流的形式存在，零电阻态还被保持，这个中间状态被称为混合态；当磁场进一步增强到上临界场时，零电阻态也被彻底破坏，超导体恢复到有电阻的正常态。1957 年，阿布里科索夫（Abrikosov）从 G-L 方程导出，在第二类超导体中，磁场其实是以量子化的量子磁通涡旋进入超导体内部的，一个磁通量子为 $\Phi_0 = h/2e$ （约为 $2.067 \times 10^{-15} \text{Wb}$ ）。在低温和低场下，量子磁通涡旋将有序地排列，如图 4 所示。量子化的磁通很快就被实验所证实，并开辟了涉及超导应用的一个重要领域——超导体的磁通动力学研究。G-L 方程的发展为其他物理学领域注入了活力，如其四维扩展柯尔曼-温伯格（Coleman-Weinberg）理论等在量子场论和宇宙学都取得了重大的成功。

早期的超导微观理论研究都是从单电子模型出发，但都以失败告终。随着研究的深入，人们认识到，处于超导态的电子必须存在一个能隙才能保护超导态的稳定。同位素效应实验发现说明超导临界温度 T_c 和晶体中的原子热振动密切相关。原子热振动的能量准粒子（物质的运动单元，并不是作为物质结构单元的真实粒子）又叫做声子，因此超导很

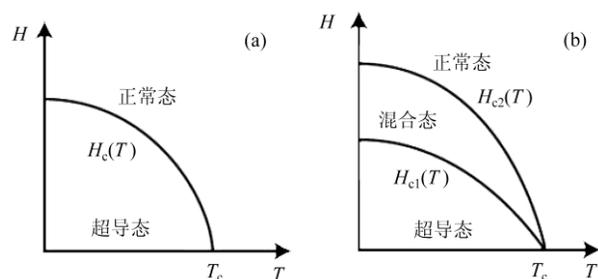


图 3 第一类超导体和第二类超导体

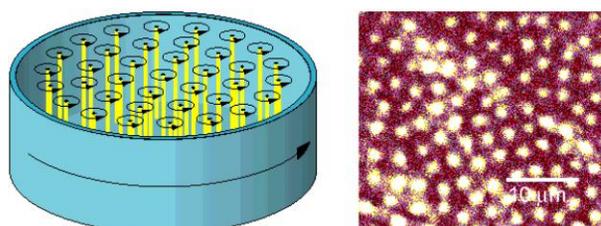


图 4 量子磁通涡旋阵列示意图（左）和实验观测图（右）

可能起源于电子和声子之间的相互作用。基于这些研究背景，1957 年美国科学家巴丁（J. Bardeen）、库珀（L. N. Cooper）和施里弗（J. R. Schrieffer）成功建立了常规金属超导体的微观理论，简称 BCS 理论。这是一个老、中、青三代科学家合作成功的典范：巴丁早在半导体研究和应用中就卓有建树，对超导的实验和理论研究进行了系统的总结，运用他敏锐的洞察力，策划了建立超导微观理论的“路线图”，他负责组建了三人团队；库珀则从电子-声子相互作用模型出发，指出只要费米面附近的电子存在净吸引作用，就可以形成配对，达到一个具有能隙的稳定态，配对后的电子对又称库珀对；施里弗则借鉴量子场论的研究成果提出了正确的超导波函数，说明超导态确实是库珀对的量子凝聚态。在 BCS 理论框架下，电子-电子配对是通过交换“虚”声子而实现的。当一个电子在晶格中运动时，会由于库仑相互作用而导致局域晶格畸变，这样，当另外一个电子通过时，会感受到第一个电子通过时导致的晶格畸变的影响，从而在两个电子之间产生间接吸引相互作用。当参与配对的两个电子的动量大小相等，方向相反，且自旋相反时，对配对最有利。这样形成的电子对总动量为零，总自旋为零。所有的电子对在运动过程中能够保持“步调一致”（物理上叫做相位相干，即具有相同相位），即使受到杂质等散射也将保持总动量不变，从而在外加电场作用下能够不损失能量而运动——这就是零电阻

态的起源。要破坏超导态就必须打乱库珀对的整齐步调或者克服能隙将电子们拆对，电子之间配对相互作用强度和空间上的关联尺度是由整体电子能量和动量分布情况所决定的，因此超导态是在低温和低磁场下稳定的电子对宏观量子凝聚态（图 5）。



图 5 李政道先生提议的有关 BCS 超导机理漫画：单翅蜜蜂代表单个电子，题曰：“单行苦奔遇阻力，双结生翅成超摩”，下面为蜂窝状的 C_{60} 系列超导体

BCS 理论的成功，不仅表现在它可以解释已经观察到的实验现象，而且在于它可以预言许多新的实验现象并被后来的实验所证实。通过 BCS 理论，可以导出库珀对的空间关联长度——相干长度、磁场穿透超导体表面的穿透深度、下临界磁场和上临界磁场、临界电流密度等一系列超导体特征物理量。更重要的是，它提出了基于电子-声子机制的超导体 T_c 的描述公式，并据此预言了常规超导体 $T_c^{\max} = 40 \text{ K}$ 的上限。BCS 理论在解释常规金属超导现象中获得了巨大的成功，它的许多物理概念和物理思想都在后续的超导研究中影响深远。尽管后来发现电子配对未必需要自旋相反，导致配对的相互作用的媒介未必是声子，而配对对称性也未必是各向同性的 s 波（即各向同性的配对能隙），但电子配对的思想仍然是一直沿用的。此外，BCS 理论也被粒子物理学家扩展用来描述核子之间的配对相互作用，只是相互作用力从电磁相互作用改为了强相互作用。脉冲中子星上的质子超流和中子超流就可以用 BCS 理论很好地加以解释。BCS 理论的建立对粒子物理的重大进展如 Goldstone 定理、希格斯机制的提出等产生了重要影响。

然而，高温超导体的发现，以及一些其他非常规超导体的发现，对经典的金属理论（朗道费米液体理论）和传统的 BCS 超导理论提出了挑战。在铜

氧化物高温超导体中，母体的晶体结构是以 Cu-O 层为基础的氧化物层状结构（图 6）。通过氧的缺失或稀土氧化物层的掺杂可以引进载流子（空穴或者电子）来实现超导。母体材料按照常规金属电子论的预计应该是金属态，但实际上它却是一个反铁磁绝缘体。这是因为在铜氧化物这一类材料中，电子-电子之间存在强烈的同位库仑排斥作用，从而导致电子被局域化而形成了强关联态。传统金属理论中，电子-电子之间的相互作用微弱，因此通过研究独立电子的行为就可以理解整个体系的行为。而在强关联体系中，电子的运动将不再“独来独往”，而是“牵一发而动全身”，单纯研究一个电子的行为已经不再适用，而必须研究所有电子的多体行为，这是传统固体理论尚未真正解决的难题，所以理论研究从一开始就面临着挑战。同样，传统的 BCS 超导微观理论也在铜氧化物高温超导体中遇到了困难。一方面，铜氧化物高温超导体的超导转变温度（常压下达到 135 K，高压下 164 K）已经远远超过了 BCS 理论预言的极限（ $\sim 40\text{K}$ ）；另一方面，BCS 理论预言超导能隙的对称性为各向同性的 s 波（即能隙分布是在各个方向上完全相同的球形），而铜氧化物高温超导体中实际上是各向异性的 d 波（即能隙分布为十字花瓣形，在对角线方向上存在能隙为零的节点）。

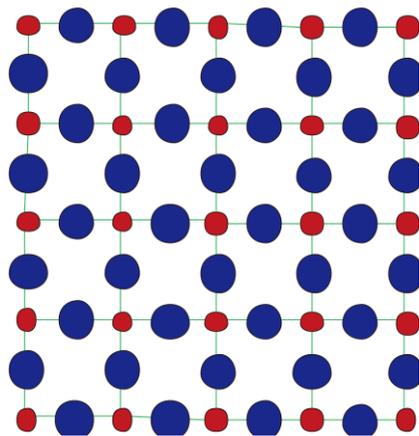


图 6 铜氧化物高温超导体中的 CuO_2 面，其中，小点代表铜(Cu)，而大点代表氧(O)

和传统金属超导体不一样的是，铜氧化物超导体还有许多令人感到非常困惑、难以理解的物理性质。首先，铜氧化物具有一个所谓的电子态相图，即其物理性质会随着载流子（电子或空穴）浓

度和温度而变化（图7）。铜氧化物在没有载流子掺杂时，对应的母体是反铁磁绝缘体。随着载流子浓度的增加，反铁磁性逐步被压制，电子之间的库仑排斥相互作用被部分稀释，不再局域化的电子将能在低温下形成超导。超导态如同一个倒扣的钟形，最高的 T_c 处对应的掺杂浓度称为最佳掺杂点，低于最佳掺杂区域称为欠掺杂区，高于最佳掺杂区域称为过掺杂区。其次，铜氧化物的奇特不仅表现在超导态（如高 T_c 和 d 波能隙），更表现在其正常态（超导临界温度 T_c 以上）的特性。对传统金属和合金超导体而言，只有在进入超导态之后，超导能隙才形成。而在铜氧化物高温超导体中，实验发现在欠掺杂区域，在 T_c 以上时材料还没有进入超导态，已经有能隙形成。这个能隙一般称为赝能隙（意指类似能隙），对其起源以及与高温超导电性的关系至今尚不清楚，是高温超导研究的一个关键问题。此外，在赝能隙区尽管已是金属态，但是其特性无法用已有的金属理论——费米液体理论来理解，因此被称作非费米液体态；直到过掺杂到不超导，系统才逐渐恢复到接近费米液体状态。如此复杂的相图同时

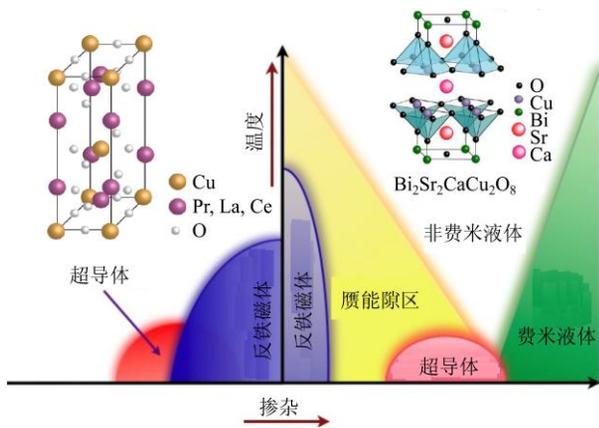


图 7 铜氧化物高温超导体的电子态相图和典型晶体结构

伴随着许多奇特的电子性质。比如一般金属中的电子最高占据的等能面——费米面都是闭合的（碱金属费米面就是一个很好的球面），但在空穴型铜氧化物超导体中，尽管在过掺杂区域还是比较常规的大的闭合面，但是到了欠掺杂区域已经断开成了一段段的“费米弧”，最新的实验结果甚至指出每段“费米弧”的后面其实隐藏着一个小的“费米口袋”（图8）。诸如此类的物理现象都超出了现有的凝聚态物理中的概念和理论所能理解的范畴，也是铜氧化合

物超导微观理论最大的难点。

到目前为止，尽管经过 25 年的努力，铜氧化物高温超导体的研究在理论和实验上都取得了重要

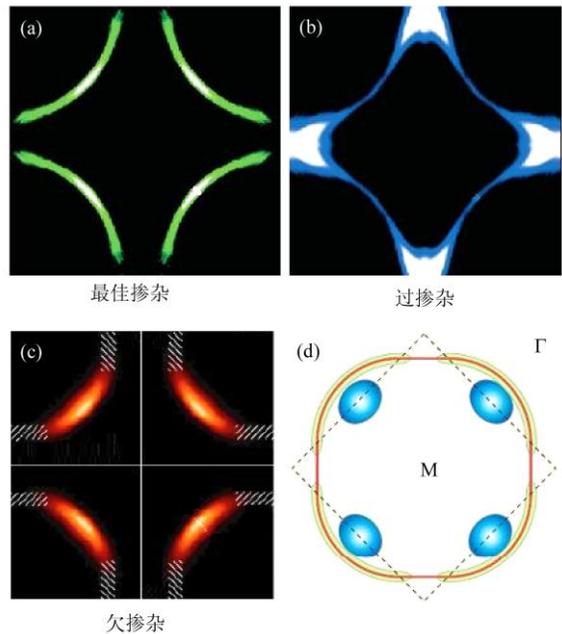
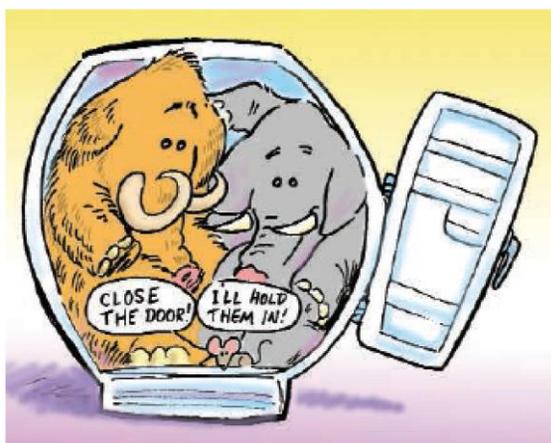


图 8 铜氧化物高温超导体不同掺杂浓度下的费米面

进展，但还没有一个完整的理论得到这个领域的普遍认可。理论物理家们在研究高温超导机理的过程中提出了许多模型，但是这些多理论模型都未必能够预言稳定的 d 波超导态，更难以解释赝能隙的本质。在这些理论框架下，要回答两个重要的问题。第一，在传统的 BCS 超导体中，电子配对和库珀对进行位相相干并凝聚是同时在超导转变温度点发生的。那么在铜氧化物高温超导体中，电子形成配对的温度和库珀对产生相干凝聚的温度是否一定相同？如在欠掺杂铜氧化物中有人就认为，很可能在 T_c 以上就已经存在库珀对，直到温度降至 T_c 时才发生相位相干凝聚而形成超导。第二，传统超导体中电子-电子之间是通过交换声子这个媒介而导致配对的。那么，在高温超导体中，电子-电子配对是否需要媒介？如果需要，那么这个媒介是什么？人们一直在苦苦思索着这两个问题的答案（图9）。

正在铜氧化物超导电性研究陷入攻坚阶段的时候，铁基超导应运而生。这个新的庞大高温超导家族为超导机理的研究提供了有重要意义的参照。这类超导体和铜氧化物有着许多相似性，也有明显的不同之处：它同样具有层状结构，负责导电的为 Fe-As 层，只是不如 Cu-O 层那么平坦，且

Fe-As-Fe 的键角大小会直接影响 T_c ；其母体为具有长程反铁磁序的金属，通过电子或者空穴掺杂引入载流子也可以实现超导态（图 10）；电子之间的关联特性仍



“We have a mammoth and an elephant in our refrigerator—do we care much if there is also a mouse?”

图 9 铜氧化物超导体电子配对是否需要“胶水”（中间媒介）？图中文字道：“我们已有一个猛犸（意指电子间电荷相互作用很强）和一个大象（意指电子间自旋相互作用很强）在冰箱（即低温环境下）里，难道还在乎里面还有一只小老鼠（即电子配对媒介“胶水”）么？”（P. W. Anderson, *Science* 317, 1705~1707（2007））

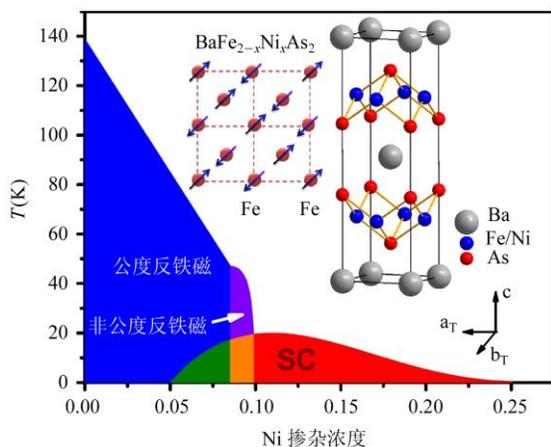


图 10 典型的铁基超导体 $BaFe_{2-x}Ni_xAs_2$ 体系的电子态相图、晶体结构和反铁磁结构

然存在，只是未必起源于电子的同位库仑排斥能。同时，铁基超导体在某种程度上又接近于金属合金和 MgB_2 等常规超导体，比如：它具有五个能带参与导电，即存在五个费米口袋，电子的配对有可能起源于不同费米口袋之间（图 11）的散射。一个非常有趣的问题是，铁基超导体的高温超导电性产生

的机理，是与铜氧化物超导体一样呢？还是循着另一条新的途径？如果这两类高温超导体具有相同的超导机理，那么铁基超导体的研究会为铜氧化物高温超导体的机理研究提供一个重要的参照。如果这两类高温超导体的机理不同，则自然为人类提供了多条获得高温超导体的途径。对铁基超导体的实验和理论研究仍有许多工作要做，我们期待通过不断对比分析就有希望获得一个能够统一描述现有超导现象的理论模型。

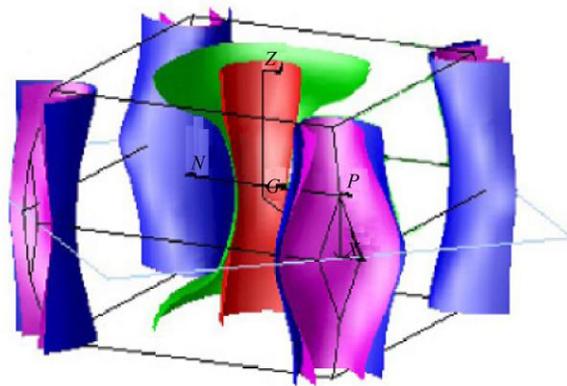


图 11 $BaFe_2As_2$ 母体的多带费米面

四、超导的应用

和已经成熟的半导体工业相比，超导的应用，特别是高温超导体的应用，很多还处于刚刚起步的阶段，但其蕴含的巨大潜力仍期待人们去开发和挖掘。超导体可以用于信息通信、强稳恒磁场、工业加工、无损耗输电、生物医学、磁悬浮运输和航空航天等领域。目前超导应用主要分强电应用和弱电应用两个方面。

强电应用 超导体在低温下可以实现稳定的零电阻超导态，这意味着超导线圈可以通过较大的电流而无焦耳热的产生。一方面，我们可以采用超导输电线进行远距离输电，从而大大降低输电过程的损失。目前采用铜或铝导线的输电损耗约为 15%，我国每年的输电损耗就达一千亿度左右，如果采用超导输电线就可以节省相当于数十个发电厂的电力。采用超导输电还可以简化变压器、电动机和发电机等热绝缘并保证输电的稳定性，提高输电的安全性。鉴于超导体的零电阻和高电流传输密度的特性，美国计划采用超导电缆将三大电网（东部电网，西部电网和德克萨斯电网）之间实现有效互联。另一方面，如果给闭合超导线圈通上电流，就可以维

持较强的稳恒磁场，这便是超导磁体。常规稳恒磁体要实现强磁场就必须采用非常粗的铜导线，并将其泡在水中冷却，这使得磁体体积特别庞大，而且必须持续不断地通上电流，消耗更多的电能。相比之下，超导磁体具有体积小、稳定度高、耗能少等多种优势。正因如此，在生物学研究和临床医学上采用的高分辨核磁共振成像技术大都是采用超导磁体；在科学研究中一些物性测量系统的稳恒磁体也是采用超导材料制成的，一些大型粒子加速器的加速线圈也常采用超导磁体，例如欧洲大型强子加速器 LHC 的加速磁体和探测器都采用了超导磁体；作为未来能源问题突破口之一的磁约束受控核聚变（人工托克马克），超导技术更将发挥不可替代的作用；跟常导磁悬浮技术相比，采用超导磁悬浮技术的磁悬浮列车将更为高速、稳定和安全。这是因为超导体内杂质和缺陷对进入体内的部分磁通线具有钉扎作用，因此它在因抗磁性而产生磁悬浮效应的同时，还能够磁约束住悬浮着的磁体，一旦磁体远离超导体，超导体还会将磁体“拉住”，因此超导磁悬浮物体运动过程是十分稳定的，一些演示用的超导磁悬浮小车甚至能够侧贴甚至倒挂在超导导轨上运动。另外，超导体一旦失去超导电性进入正常态，完全抗磁性将立刻消失，无摩擦的超导磁悬浮铁轨将恢复成有摩擦的正常铁轨，这对于紧急情况下列车制动非常有效。除了超导输电和超导磁体这两种强电应用外，利用超导转变时的电阻变化，还可以研制超导限流器，用以维护电网的安全。

目前使用的超导线材主要有 NbTi 和 Nb₃Sn 合金，需要采用液氦进行冷却，但其加工工艺相对比较成熟，金属的良好延展性让其能够制备成各种形状的线材，中国已经有不少公司能够生产合金超导线。铜氧化物高温超导输电线和磁体也处于试用阶段，采用液氮冷却可以大大降低成本。不过铜氧化物为陶瓷材料，脆性强、可塑性差、可承载的电流密度也较低，大规模应用推广尚需解决技术和成本的问题。相同直径的电缆，高温超导体电缆的电能传输能力是一般铜芯电缆的 5 倍以上，具有一定的优势。2012 年 1 月开始，德国准备铺设一条长达一公里的高温超导输电试验线路，该“AmpaCity”项目为期四年。此外，MgB₂ 材料因其具有较大的临界电流密度、造价低廉、其超导临界温度（约 39 K）进入了液氮温区，是未来超导强电应用的重要材料

之一。如果能将 MgB₂ 材料为基础的超导磁体商业化，核磁共振成像仪中的超导磁体体积将大大减小，价格也更为低廉。届时医学核磁共振检查将如同现在 X 射线胸透一样方便快捷，开一个普通的体检车即可以到农村做核磁共振体检。人们甚至大胆设想，通过太阳能和风能发电，采用超导电缆和液氢一起输入到千家万户，利用清洁能源，既节省了电能，又提供了清洁的燃料，是未来能源危机的解决方案之一。

弱电应用 1962 年，当时还是研究生的约瑟夫森（B. D. Josephson）在安德森（P. W. Anderson）的鼓励下从理论上预言超导隧道结中存在约瑟夫森效应，即超导电子对可以隧穿两个超导体之间很薄的绝缘层，其隧穿电压敏感依赖于外加磁场。利用约瑟夫森效应制备的超导量子干涉仪（SQUID）是最为精确的微弱磁场探测器之一，最高精度达到 5×10^{-18} T。利用 SQUID 可以进行高精度的磁测量，它能够检测出地球磁场的几亿分之一的变化，也能够探测 10^{-9} T 到 10^{-6} T 之间的生物磁场，心磁图和脑磁图也是未来医学诊断中在心电图和脑电图之外的有效补充检查手段之一。灵敏的磁探测器能够大大促进生物磁的研究，比如“飞鸽传书”靠的就是鸽子头部和喙部对地磁场的灵敏感应来准确判断飞行方向，海豚、金枪鱼、海龟、候鸟、蝴蝶甚至某些微生物内，都有微小磁体，它们具体是如何影响生物功能的，至今尚不清楚。基于 SQUID 技术，人们还可以设计超导量子比特器件，是量子计算机的基本元件之一，而量子计算机的多通道快速并行计算将为未来的人类生产和生活带来革命性的变化。2012 年 3 月，IBM 研究院的科学家正式宣布一次可进行百万项计算的量子计算机研制成功。也许在不遥远的将来，传统计算机一整天的运算量在量子计算机上只要一秒，最终量子计算机将成为信息时代的主角。此外，世界上最精密的模数转换器和最精密的陀螺仪也是采用超导材料制备的。高温超导微波器件是采用高温超导薄膜为波导材料制备的微波滤波器、超导天线及微波子系统等。高温超导滤波器具有很高的信噪比，比传统滤波器的性能有很大的提高。在军事和国防领域，超导滤波器可用于卫星和雷达通信，在民用领域，可以服务于移动通信。目前，我国的部分移动通信基站已经开始采用铜氧化物高温超导滤波器，高温超导滤波器已

经悄然开始了产业化和规模化生产和应用。也许在您使用 3G 手机网上冲浪的时候，超导技术已经悄然在为您服务。

超导体有许多神奇的性质，目前的超导应用仅仅利用了零电阻、完全抗磁性和超导相位相干等几个最主要的物理特征。由于我们对非常规超导体展现出的新奇量子现象还缺乏理解，微观量子态的应用上更是十分稀少。随着超导研究的深入，新的超导材料也必将会被发现并应用。如同半导体的发现和应用让人类社会发生翻天覆地的变化一样，超导的应用前景也将会十分乐观，并给人类带来无尽的福祉。

五、超导研究的未来

自 1911 年超导发现以来，在超导研究的百年历史上共有十人获得了五次诺贝尔物理学奖：1913 年昂内斯因氦气的成功液化和超导的发现获奖；1972 年巴丁，库珀和施里弗因常规金属的超导微观理论——BCS 理论获奖；1973 年约瑟夫森和贾埃弗因

超导隧道结中的约瑟夫森效应理论预言及实验研究与江崎玲於奈 (L. Esaki) 分享诺贝尔奖；1987 年柏诺兹和缪勒因铜氧化物高温超导材料的发现而获奖；2003 年阿布里科索夫和金茨堡因超导唯象理论和预言量子磁通涡旋与莱格特 (A. J. Leggett) 分享诺贝尔奖 (图 12)。其中巴丁是历史上唯一获得两次诺贝尔物理学奖的科学家 (除他以外仅有居里夫人分别获诺贝尔物理学奖和化学奖各一次)，前一次是因为半导体晶体管的发明。我们完全可以乐观地预见，在未来的超导研究还会有更多的诺贝尔奖诞生，这也正说明超导研究是凝聚态物理中长盛不衰的热门领域。

未来的超导研究主要集中在三个方面：一是不断提高现有的实用超导材料制备工艺，改善超导器件的性能指标，提高制冷系统的性能，推进超导产业的市场化和规模化；二是不断探索更适合应用的超导材料，如具有较高的 T_c ，较大的临界电流密度，



图 12 超导研究史上获得诺贝尔奖的十位物理学家

良好的韧性和塑性，廉价的原料和简易的合成方法等；三是研究清楚现有超导体的微观机理，为寻找新的超导体提供必要的理论指导。三个方面是相辅相成的。

寻求更高 T_c 的超导体是超导研究的重要目标之一。铜氧化物超导体的 T_c 在高压下已经达到了 160K，我们完全有理由相信更高 T_c 的超导体在不久的将来被发现。室温 300 K 下的超导体也不仅仅是个梦想：现在没有理论证明它能实现，也没有理论证明它不能实现。理论家已经预言，在足够强的压力下（大于 400 GPa）氢将可能被压缩成金属态形成金属氢，它可能是一个室温超导体。另一个被预言的可能室温超导体是碱金属或者碱土金属掺杂的单层石墨烯，这将在超导器件应用上大有用武之地。超导发现的历史告诉我们，超导材料探索之路需要打破常规，充满种种意外和惊喜，我们根本难以预测下一个超导体是什么类型的材料，这也正是超导研究始终焕发魅力的秘密所在。

建立完善的超导微观理论以获得对超导特性的全面理解也是超导研究的重要任务之一。目前人们把能够用 BCS 理论描述的超导体称为常规超导体，而其他超导体如铜氧化物超导体、铁基超导体、有机超导体和重费米子超导体等统称为非常规超导

体。在非常规超导体中，库珀对的概念仍然适用，只是能隙结构也即配对称性开始多元化；配对的媒介也从声子扩展到其他可能的机制上；电子配对和相位相干也不再要求同时发生。总之，似乎 BCS 理论描述的仅是特殊的常规金属超导体，而对于普遍性的其他非常规超导体，或许更需要一个更加普适的理论来进行描述。

超导研究是一个充满挑战和机遇的领域，它激起了世界上许多优秀的实验物理学家和聪明的理论物理学家的浓厚兴趣，挑战着人们对现有物理框架和物理概念的理解，也丰富了我们对于大自然的认识。尽管超导的发现已有百余年的历史，但对超导材料和超导物理的研究，仍然是凝聚态物理最活跃最重要的领域之一。我们还应该注意到，越来越多的中国人和华人的身影不断加入到超导研究的队伍之中来。他们的研究成果也愈加受到科学界的重视并确实推进了对超导本质的理解，新的超导材料正在不断地被他们发现，超导应用也在中国开始蓬勃发展。中国应该对超导研究和应用做出更大的贡献，我们共同对中国超导研究的美好未来充满期待！

致谢：作者感谢于绿老师对本文提出的宝贵意见和修改。

（中国科学院物理研究所 100190）



科苑快讯

树木的形状

很久以前，达芬奇就注意到“树干的高度等于同一高度树枝的总粗度”。如果用公式表示就是 $D^2 = \sum d_i^2$ ， D 为主干直径， d_i 为次生分支直径， i 为大于等于 1 的自然数。不过公式中的指数在自然界中不是 2，其值根据物种不同实际是在 1.8~2.3 之间。达芬奇公式适用于几乎所有树种，动画师也常用它创造计算机生成的树（如图）。传统解释认为这与树从根部到树叶的泵水过程有关——将水从植物下部运输到上部，需要相同的静脉总直径。但这难以自圆其说，因为树枝横截面只有很少一部分用于水分养料的输送，其他部分则是有弹性的木质组织。

现在美国圣迭戈市科罗拉多大学的埃洛伊（Christophe Eloy）提出一个出人意料的简单解释，

并且已在简单模型中被证实。简单模型考虑到了枝条承受的持续风压，以及果实和积雪的负荷压力，因此枝条不能太细，最终公式指数的精确计算结果正是 1.8~2.3。



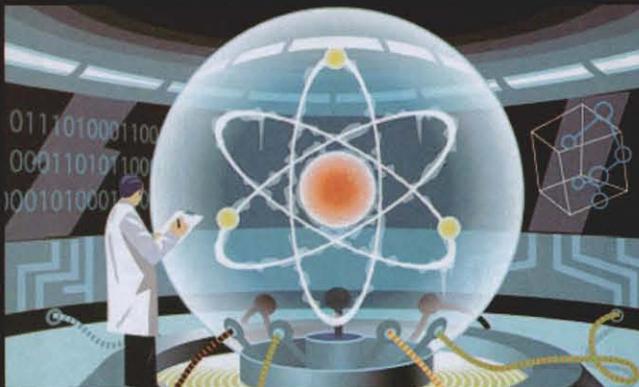
（高凌云编译自 2012 年 1 月《欧洲核子中心快报》）



▲ 设想的中国超导磁悬浮列车



▲ 超导磁悬浮
<http://news.softpedia.com/news/Superconductor-20-year-old-Mystery-Solved-56191.shtml>



▲ 量子计算机假想图
<http://www.zmescience.com/research/ibm-quantum-computer-28022012>

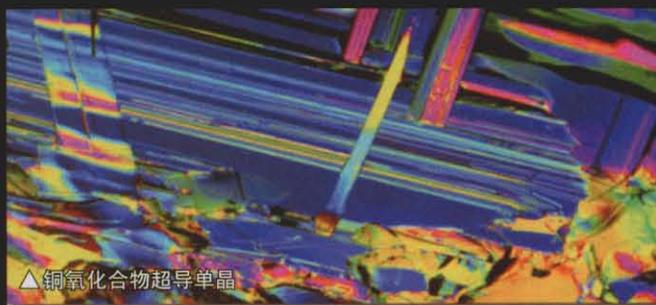


▲ 欧洲大型强子对撞机 LHC 上的加速隧道

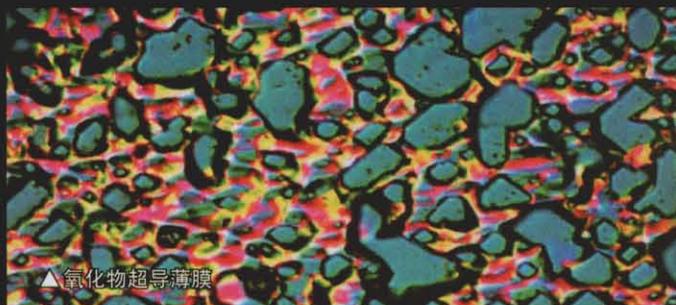
神奇的超导

■ 罗会仟 周兴江

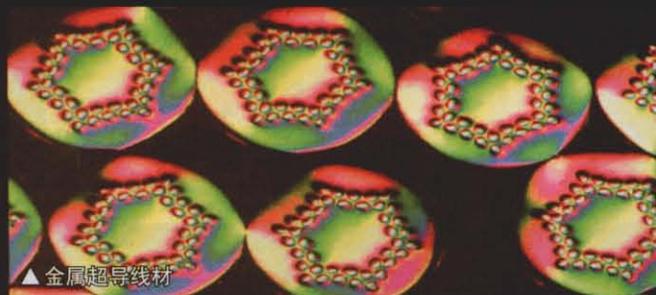
超导是凝聚态物质里电子体系的一种宏观量子凝聚现象，涉及凝聚态物理中的基本概念和最前沿问题。超导材料具有零电阻和完全抗磁性等一系列神奇的特性，在能源、科研、医疗、通信等各个领域均有重要用途。已逾百年的超导研究，在无数聪慧的科学家推动下，依旧不断绽放新的魅力！



▲ 铜氧化物超导单晶



▲ 氧化物超导薄膜



▲ 金属超导线材

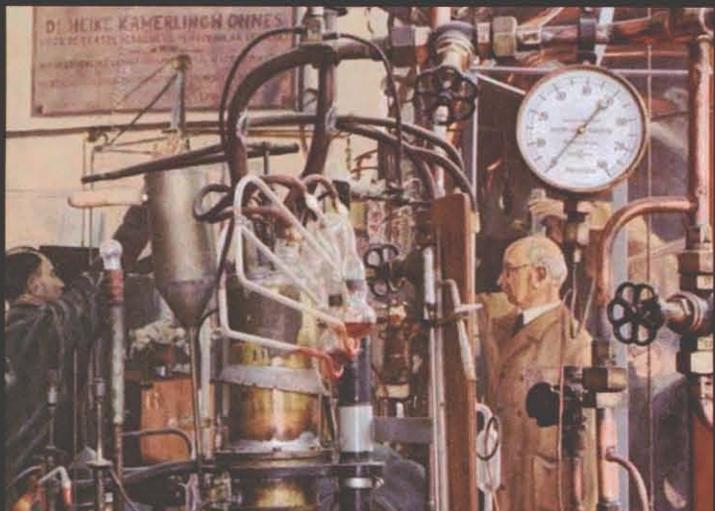


▲ 有机超导体

<http://micro.magnet.fsu.edu/micro/gallery/superconductor/super.html>

超导材料

新材料探索就像在费米海中钓鱼。固体材料内部的电子体系构成了“费米海”，这些电子的可能组态决定了材料的宏观性质。当你试图用鱼钩钓到超导体的同时，其他“鱼类”（材料）也可能被你找到。于是在新材料探索中，总是充满惊喜和收获！

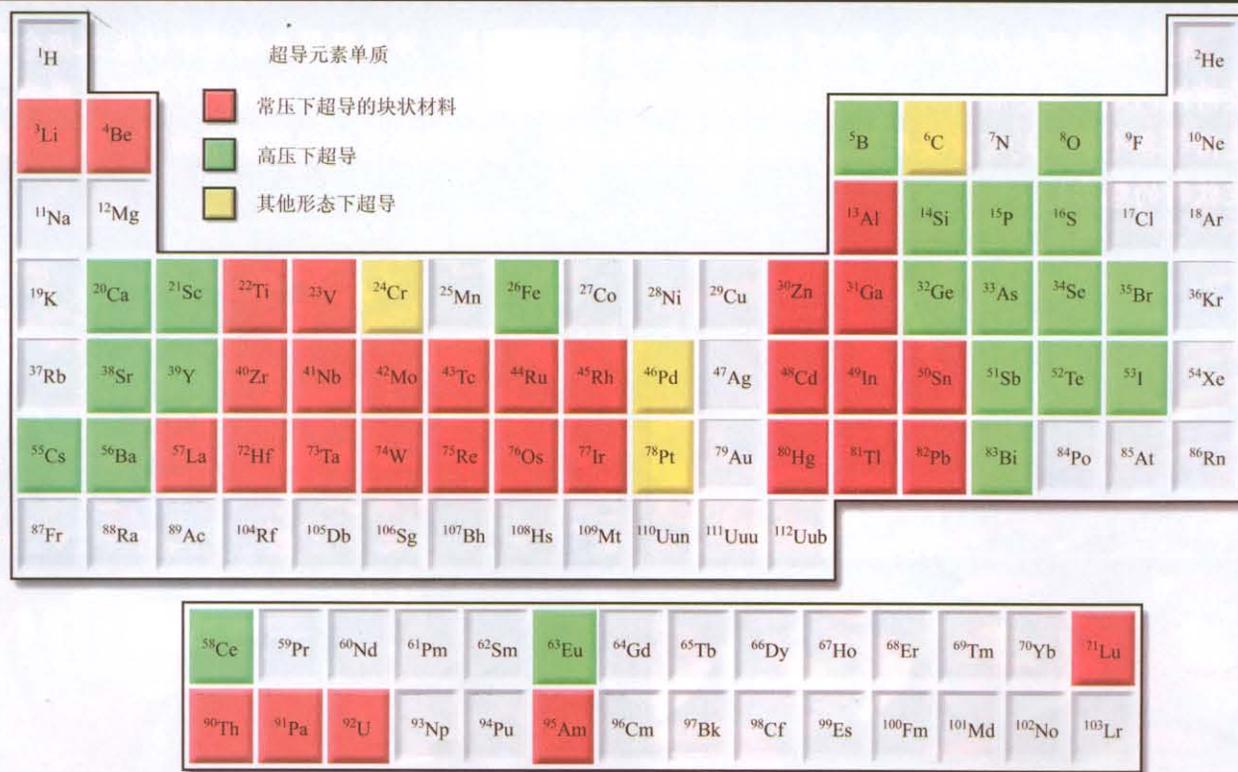


▲ 昂内斯和他的氦液化装置
<http://xnz1.jpkc.cc/xnz1/showindex/676/108>



▲ 图下从左到右依次对应的材料为：超导、非传统和传统的近藤系统、准晶、Stoner 系统、局域磁矩材料。（*Nature Physics* 4, 167 ~ 169, 2008）

随着技术的进步，氮气、氧气、氢气、氖气等各种气体先后被液化，最终只剩下了氦气未被液化，当时被认为是最难液化的气体。荷兰科学家昂内斯以范德瓦尔斯方程为理论基础，在荷兰莱顿实验室搭建了一套氦气液化装置，通过对氦气的不断节流膨胀，终于成功获得了液态氦。液氦的沸点为 4.2 K，通过进一步节流膨胀可以获得 1.5 K 左右的低温。液氦的成功获得极大地推进了低温物理学的发展。在随后的 1911 年，昂内斯等人测量了金属汞的低温电阻，发现了超导现象。



▲ 单质超导元素：红色为常压体超导的单质元素，绿色为高压下超导的单质元素，黄色为特殊形态（如薄膜或纳米管）下的超导元素。
<http://www.magnet.fsu.edu/education/tutorials/magnetacademy/superconductivity101/fullarticle.html>

金属合金超导体



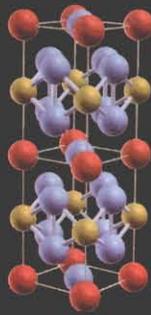
Hg

铜氧化物超导体



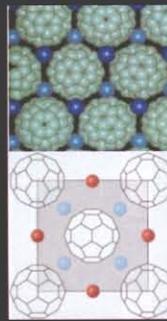
La_{2-x}Ba_xCuO₄

重费米子超导体



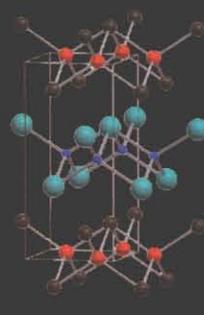
CeCoIn₅

有机超导体



K₃C₆₀

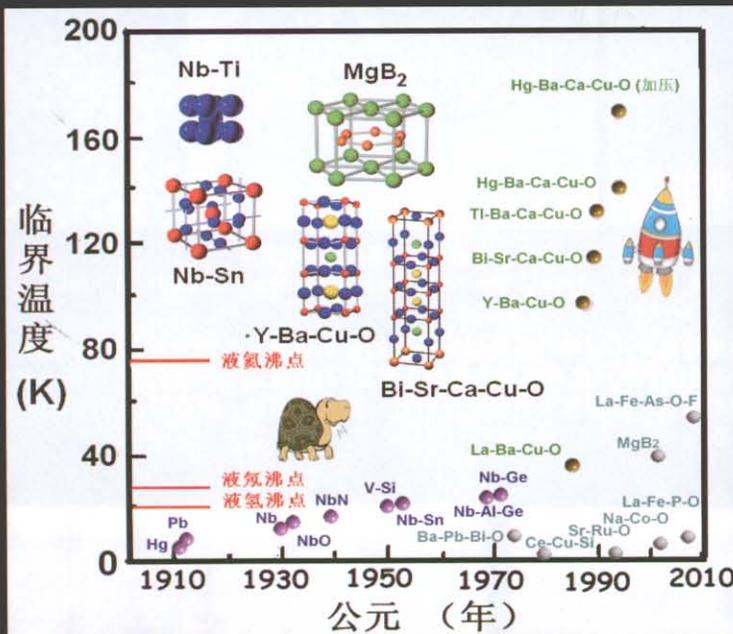
铁基超导体



LaFeAsO

目前发现的超导材料主要可以划分如下几大家族：金属和合金超导体、铜氧化物超导体、重费米子超导体、有机超导体、铁基超导体以及其他金属氧化物超导体等。

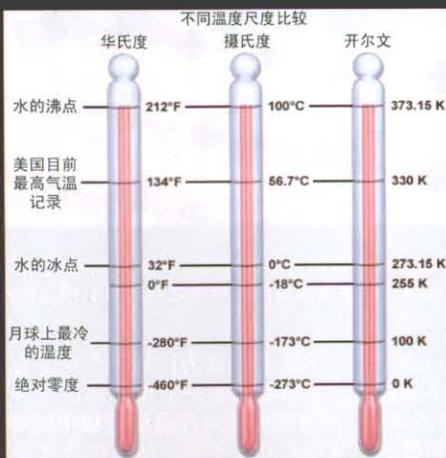
图中对应着几种超导体的晶体结构：常规金属超导体汞是密集堆积的立方晶格、铜氧化物高温超导体钡铜氧是以铜氧面为基础的层状结构、重费米子超导体铈钴铟和铁基高温超导体镧铁砷氧都是具有层状结构材料、有机超导体 K₃C₆₀（掺钾足球烯）中钾离子分布在 C₆₀ 分子间隙当中。



目前发现的一些典型的超导体及其晶体结构。横轴为发现的年代，纵轴为超导临界温度，插图为几种超导体的晶体结构。1986 年以来发现的铜氧化物高温超导体在短时间内大大提高了 T_c ，如同乌龟慢慢爬升的 T_c ，在 20 世纪 80 年代坐上了火箭。目前最高纪录 T_c 为汞-钡-钙-铜-氧在加压下的 T_c 约为 164K。

插图显示了几种典型超导体的晶体结构：铌钛合金、铌锡合金、二硼化镁、钇钡铜氧和铋锶钙铜氧。

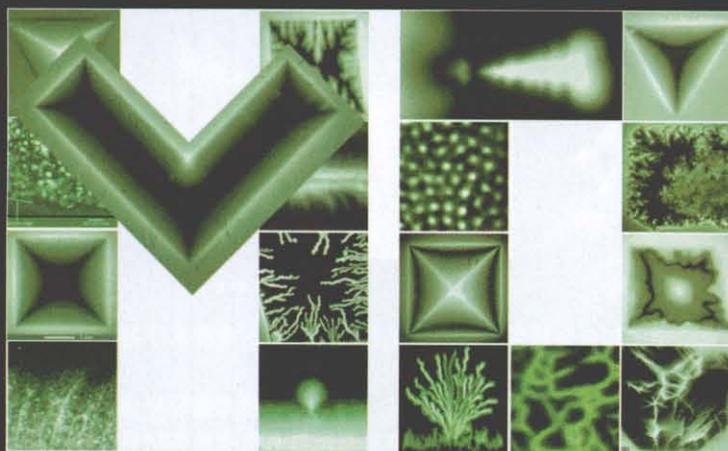
（罗会仟博士毕业论文《高温超导体的单晶制备及正常态输运性质研究》）



◀ 华氏温标、摄氏温标和热力学温标之间的对应关系

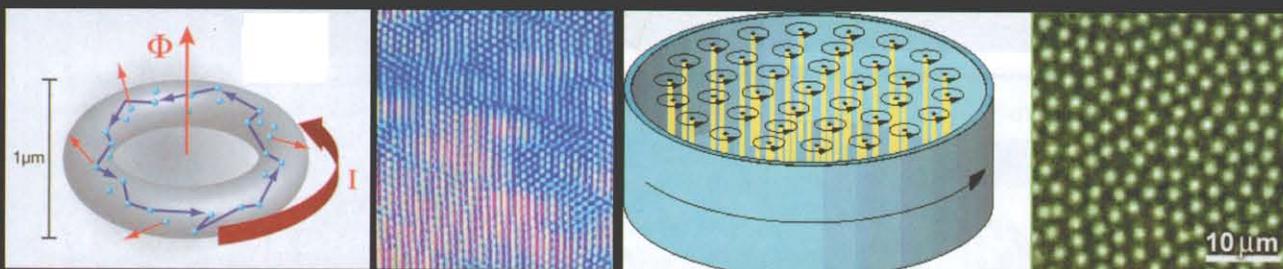
<http://www.magnet.fsu.edu/education/tutorials/magnetacademy/superconductivity101/fullarticle.html>

超导理论的发展



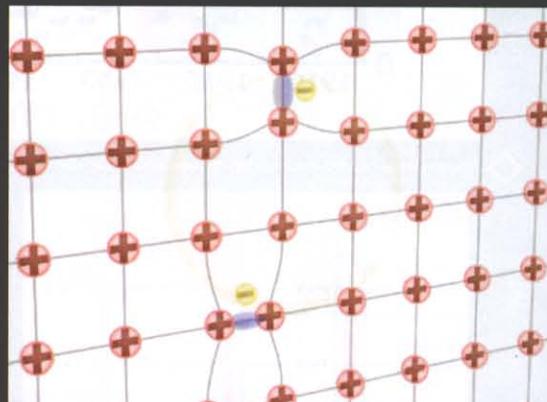
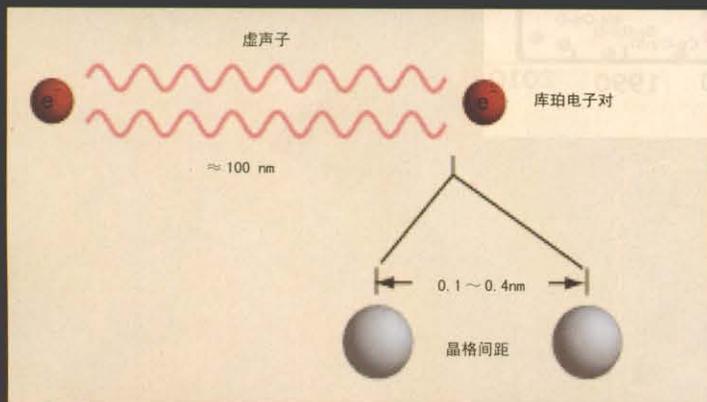
前苏联科学家金茨堡和朗道建立的 G-L 超导唯象理论认为：外磁场并不是完全不可以进入超导体，实际上它穿透进入了超导体的表面。即使在超导临界温度以下，如果外磁场足够强，那么它也可以完全进入超导体而彻底破坏超导态，即恢复到正常态。采用磁光技术，我们可以直接观测到磁通线是如何随着磁场的增加逐渐穿透到超导体内部中去的。图中树枝状即为已经进入超导体的磁通线，点状为有序排列的量子化磁通。

◀ 磁场穿透进入各种超导体时的磁光照片
<http://www.mn.uio.no/fysikk/english/research/groups/amks/superconductivity/mo/>



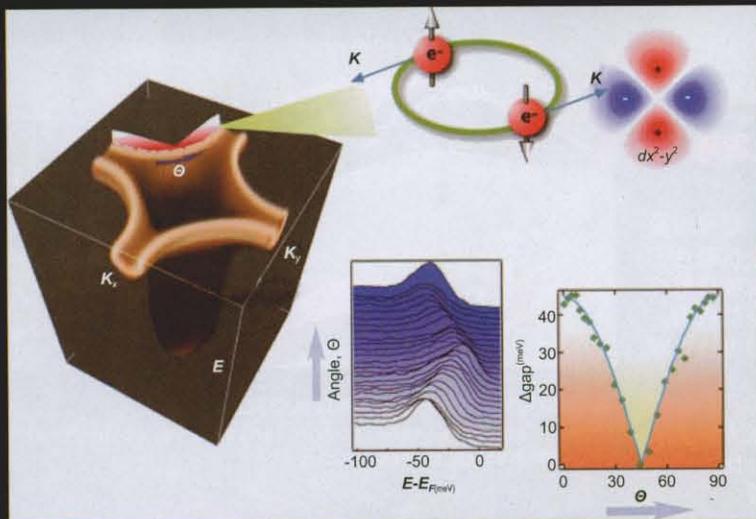
▲ 单个磁通量子 <http://physics.aps.org/articles/v1/7>
 ▲ 正在运动的磁通玻璃态 *Nature* 396, 348 (1998)
 ▲ 超导体中磁通格子示意图和观测图 <http://www.math.psu.edu/qdu/Res/Pic/gallery1.html>

阿布里科索夫从 G-L 方程导出，在第二类超导体中，磁场其实是以量子化的量子磁通涡旋进入超导体内部的，一个磁通量子为 $\Phi_0 = h/2e$ (约为 $2.067 \times 10^{-15} \text{Wb}$)。每个磁通量子中间是有磁场穿透的正常态，周围被超导环流包围。在低温和低压下，量子磁通涡旋将有序地排列。随着温度和磁场的变化，磁通量子也会发生钉扎、跳跃、蠕动、流动等行为，有序排列的磁通格子将会出现固态、玻璃态、液态等各种形态。

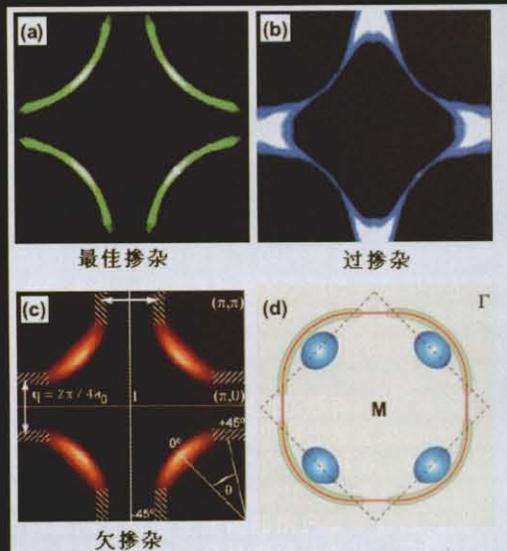


▲ 电子通过交换声子相互作用而配对。显示了电子对在空间尺度为约 100 纳米，远远大于晶格间距 (0.1 ~ 0.4 纳米)。
 ▲ 超导体中库珀对形成原理。说明了局域的库仑相互作用是如何导致晶格畸变形成电子之间的吸引相互作用的。

巴丁、库珀、施里弗三人成功建立的传统金属超导体的微观理论——BCS 理论。BCS 理论认为：当一个电子在晶格中运动时，会由于库仑相互作用而导致局域晶格畸变，这样，当另外一个电子通过时，会感受到第一个电子通过时导致的晶格畸变的影响，从而在两个电子之间间接产生吸引相互作用，相当于交换了虚声子。所有的电子对在运动过程中能够保持“步调一致”（物理上叫做相位相干，即具有相同相位），即使受到杂质等散射也将保持总动量不变，从而在外加电场作用下能够不损失能量而运动——这就是零电阻态的起源。

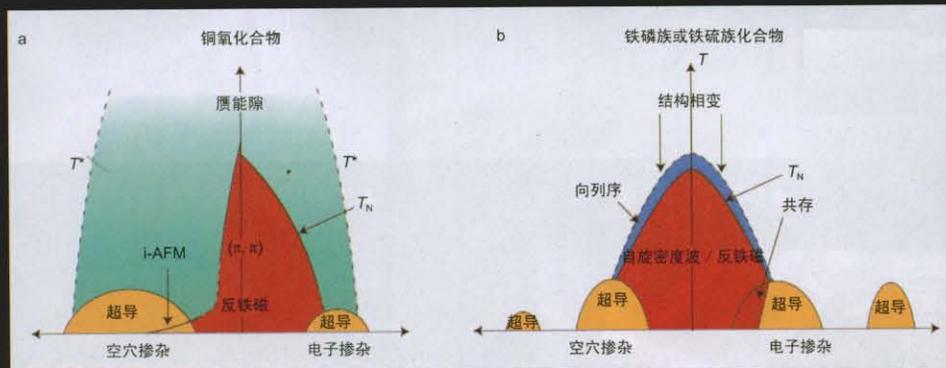


▲铜氧化物超导体中的d波能隙结构
<http://arpes.stanford.edu/>



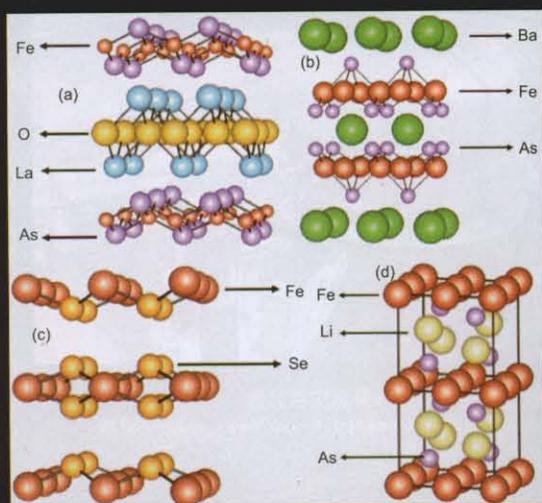
▲空穴掺杂铜氧化物高温超导体的费米面，(a)、(b)、(c)分别为最佳掺杂、过掺杂和欠掺杂样品的费米面，其中欠掺杂样品只有不连续的不间断费米弧存在。(d)示意可能费米口袋的位置。

上图为空穴型铜氧化物超导体的费米面和能隙，超导库珀对在费米面附近上形成。当参与配对的两个电子的动量大小相等，方向相反，且自旋相反时，对配对最有利。配对后的电子将打开一个能隙，在铜氧化物超导体中，这个能隙会随着相对费米面的不同角度而变化，形成一个十字花瓣形。在反节点方向能隙最大，在节点处能隙为零，在90度范围内能隙大小呈现“V字形”分布。不同能隙区域还会有相位符号的变化。



◀铜氧化物超导体(左)和铁基超导体(右)的电子态相图对比
Nature Physics 7, 272(2011)

和铜氧化物超导体相对比，铁基超导体也有类似的电子态相图。铁基超导体的母体也是反铁磁体，但属于金属态。随着空穴或者电子掺杂浓度的增加，反铁磁转变的奈尔温度将逐步被压制，最终出现超导。在非常过掺杂的材料中(即空穴或电子完全掺杂)，甚至还存在另外一个小的超导区。



◀常见的四种铁基超导体母体结构：(a) LaFeAsO, (b) BaFe₂As₂, (c) FeSe, (d) LiFeAs
Supercond.Sci.Technol. 23, 073001(2010)

和铜氧化物超导体类似，铁基超导体也具有层状化学结构。它的基本单元是Fe-As层或Fe-Se层，中间是稀土氧化物、碱土金属、碱金属或者其他更复杂的化学结构。和铜氧化物不同的是，铁基母体材料中任何一个元素都可以被相近的元素所替代，形成化学内压、空穴或电子掺杂等而形成超导。

超导的应用

超导材料的应用主要分强电应用和弱电应用

超导的强电应用

超导的强电应用主要分三个方面：超导输电线、超导磁悬浮和超导磁体。主要利用了超导体的零电阻性和完全抗磁性。目前超导磁悬浮列车还处于试验阶段，尚未投入大规模应用。采用常规金属合金制造的超导输电线已经得到了广泛的应用，包括超导磁体的绕制。而高温超导材料制作的超导输电线也将投入市场。

超导磁体具有稳定性好、耗能低、磁场强等优势。在生物学研究和临床医学上采用的高分辨核磁共振成像技术大都是采用超导磁体。在科学研究中超导磁体更是应用广泛，比如常规实验室测量设备、大型加速器的加速通道和探测器等。

制约超导强电应用的因素主要是长期维持低温环境的费用比较昂贵，另外超导体具有一定的临界电流密度，对于 T_c 比较高的铜氧化物高温超导体，其临界电流密度很低，很难实现大规模强电应用。



▲ 日本铁路研究所的超导磁悬浮试验车
http://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2003/05feb_superconductor/



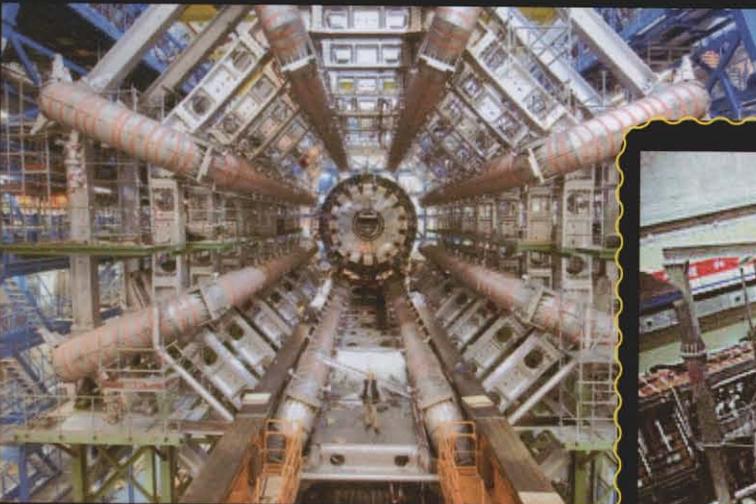
▲ 高温超导输电线和带材



▲ 核磁共振成像仪



▲ 生物核磁共振脑成像



▲ 欧洲大型强子对撞机 LHC 上的探测器

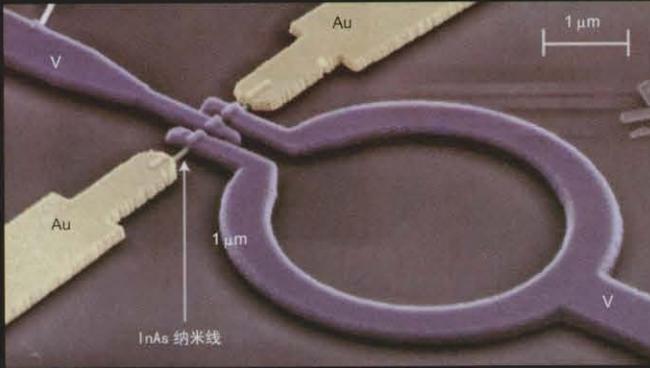


▲ 位于合肥的超导托卡马克核聚变实验装置
http://www.fjkjt.gov.cn/newsedit.asp?news_xxbh=25276

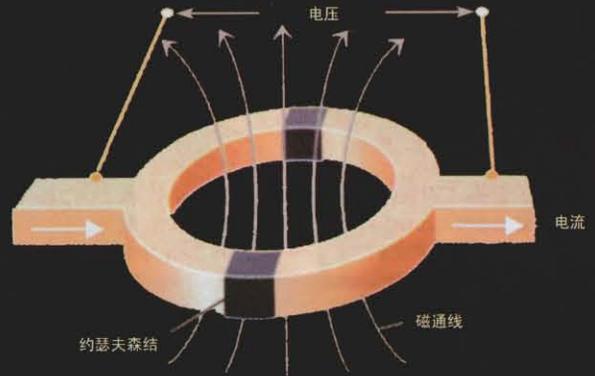
托卡马克核聚变装置俗称“人造小太阳”，是解决目前化石燃料能源危机的出路之一。它利用人工可控核聚变技术，可以不断提供能源，超导磁体在其中可以约束核聚变反应，是达到人工可控目的的重要环节。

超导的弱电应用

利用约瑟夫森效应制备的超导量子干涉仪 (SQUID) 是最为精确的低磁场探测器之一, 最高精度达到 5×10^{-18} T。利用 SQUID 可以进行高精度的磁测量, 它能够检测出地球磁场的几亿分之一的变化, 也能够探测 10^{-9} T 到 10^{-6} T 之间的生物磁场。基于 SQUID 技术, 人们还可以设计超导量子比特器件, 它是量子计算机的基本元件之一, 而量子计算机的多通道快速并行计算将为未来的人类生产和生活带来革命性的变化。



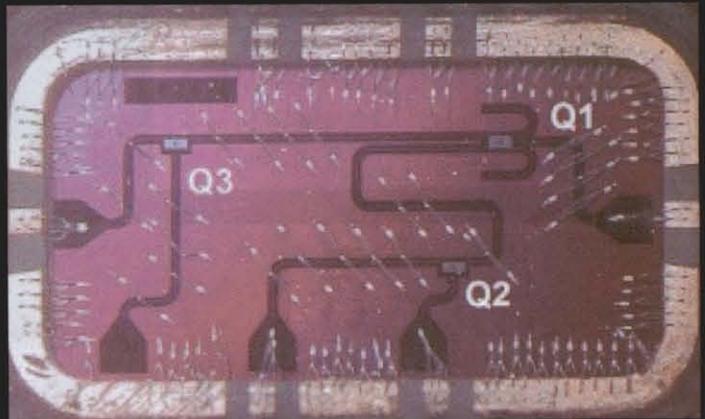
▲ 基于 SQUID 原理的“电子泵”
Nature Physics 7, 857~861 (2011)



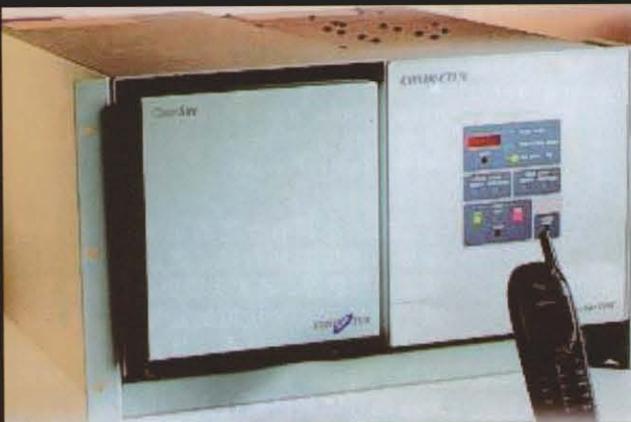
▲ 超导量子干涉仪 (SQUID)
<http://www.csiro.au/en/Organisation-Structure/Divisions/Earth-Science--Resource-Engineering/geophysics/Superconducting-quantum-interference-devices.aspx>



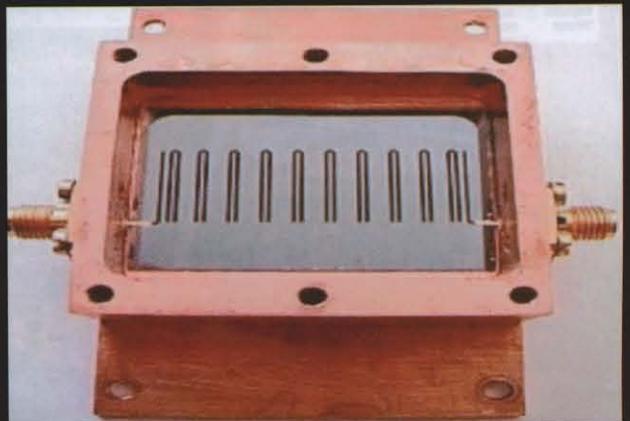
▲ 超导量子比特



▲ 三个超导量子比特



▲ 手机接收系统信号基站



▲ 超导滤波器

超导磁悬浮

超导磁悬浮的原理是利用了超导体的完全抗磁性（迈斯纳效应）：进入超导态后，外部磁场的磁通线将被排出超导体外，因此当磁体靠近超导体时会受到很强的排斥力，当排斥力和重力抵消就实现了超导磁悬浮。

图中看到的超导磁悬浮都是采用了高温超导材料钇钡铜氧（属于第二类超导体），通过液氮冷却到超导临界温度以下，上方的小磁铁就可以悬浮起来了。



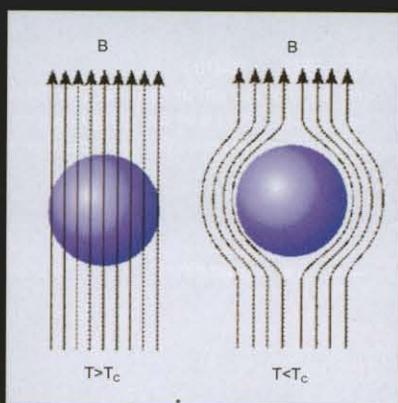
▲ <http://www.chemistryland.com/>



▲ 超导磁悬浮 <http://www.wondermagnet.com/images/super5.jpg>



► 超导体的迈斯纳效应：超导体进入超态后，外部磁场磁通线将被完全排出。



▲ 在超导磁悬浮平台上的日本相扑运动员
<http://www.ru.nl/hfml/research/levitation/>



▲ 在强磁场中因水的抗磁性而悬浮的青蛙
http://en.wikipedia.org/wiki/Magnetic_levitation



▲ “悬浮云”概念沙发
<http://www.designbuzz.com/entry/floating-in-the-clouds-with-the-magnetically-levitating-sofa/>

► “飞毯”上的老鼠

<http://cdn.gajitz.com/wp-content/uploads/2009/10/scientists-levitate-mice-using-magnets.jpg>



由于水具有一定的抗磁性，处于强磁场中的生物如青蛙、老鼠等都可以实现常规磁悬浮。若要实现更强的磁悬浮，就必须借助完全抗磁的超导体。像日本相扑选手这样的体重，只要超导材料足够大，是可以悬浮在磁平台上的。如果室温超导体最终被找到，也许就可以制造如“悬浮云”式家居沙发，试想躺在云朵上的感觉是何等惬意！