

超导体的“面子”

罗会仟

俗话说：“人活一张脸，树活一张皮。”人类其实是爱“面子”的动物，正是如此才有“女为悦己者容”的古语和“不爱江山爱美人”的故事。长的一副好脸蛋，无论是对女人还是对男人都是一件好事，因为脸是长给别人看的，给别人一个好印象就是好事的开端。看来“面子”对人至关重要，也是标定每个人特征的最大关键（图1）。对于凝聚态物理学研究对象之一——固体材料来讲，其实也存在类似的“面子”问题。下面我们就先来看看这个固体的“面子”到底是怎么样的？



图1 “人活一张脸，树活一张皮。”人类其实是爱“面子”的动物。（摘自《科学》杂志）

一、固体的“面子”

大部分固体材料都是由原子在空间周期性地分布构成的，这种周期排布原子阵列叫做“晶格”。受到晶格的影响，内部电子在固体里的运动并不是杂乱无章的。我们可以把周期性排列的原子内部结构简单地分成两部分：外层电子一般比较容易摆脱原子的束缚而自由运动，我们把它们叫做价电子；而内层电子被带正电的原子核束缚住，可以把它们和原子核看成一个带正电的整体，我们把它叫做原子实。这样，价电子在固体中的运动就可以看成是在一片具有周期结构的正电背景下的运动。根据量子力学的基本原理，我们很自然地知道价电子的动量分布应该是某些一系列的值，即它的能量分布也是某些特定的系列值。泡利不相容原理指出，同一个系统中不能有两个或两个以上的电子处于完全相同的状态。那么，具有周期结构的固体材料中每个价

电子的动量都不相同，注意到能量只和动量大小有关而跟动量方向无关，因此具有相同动量大小的电子将构成一个等能面。如果我们把电子按照能量从低到高排列的话，排完所有的电子之后它将形成一个实体，体的表面就是电子的最大等能面。这就是固体材料的“面子”，我们用一个著名物理学家的名字命名它——“费米面”（图2）。对于固体材料来讲，材料的结构决定了费米面的结构，而费米面的结构则决定了它的物性。研究一个材料的费米面结构是凝聚态物理学研究中的一个有力手段，它能直接揭示材料物性的本质，对人们理解和应用材料特性都有重要指导意义。

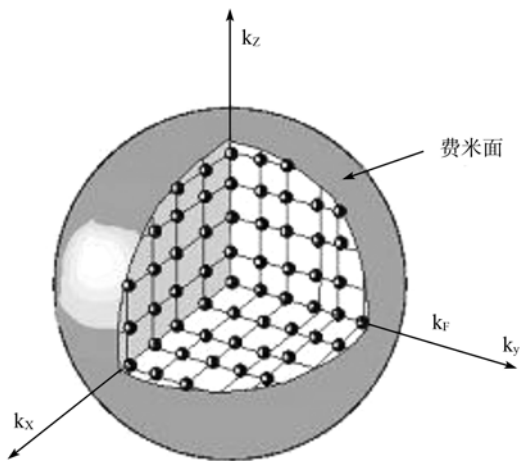


图2 固体材料的“面子”——费米面，指的是固体中电子按照能量从低到高填充而形成的最大等能面

一般来讲，最为理想化的费米面应该是一个完全各向同性的球面。不过因为实际的固体结构千奇百怪，这就必然形成各种不同形状的费米面。“世界上没有两片完全相同的树叶”，当然，也没有两张完全相同的脸。固体中的费米面就是千奇百怪、变化多端的（图3）。对于金属钾而言，原子的排布是一个简单的立方体，因此它的费米面就是一个球形。但是对于金属铜而言，它的费米面就多了好几个“窟窿”，而对于金属钙，这些“窟窿”长的更大，使得这个所谓的“球面”只剩下了一些小片相连。

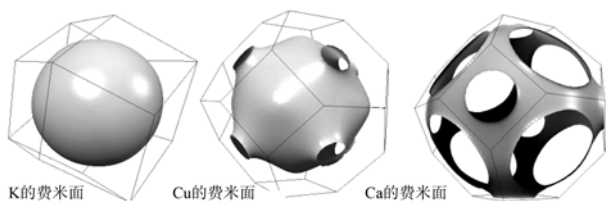


图3 金属钾、铜、钙的费米面。(摘自佛罗里达大学物理系主页)

二、神奇的超导体

在固体材料里面有一个神奇的家族，在这个家族里面，当温度降到某个临界温度以下时，电子的运动是不受到任何阻碍的，也就是实现了零电阻状态。我们知道电阻极大的材料叫绝缘体，而电阻较大的材料是半导体，电阻较小的材料叫导体或良导体，至于电阻为零的材料，我们则叫它们为“超导体”。超导体的神奇之处不只是在于它能在某个温度之下实现零电阻态，而且它还能把所有外界磁场的磁通线排出体外，在体内实现“零磁场”状态，这叫做“完全抗磁性”或迈斯纳效应。如果从热力学上来讲，超导其实是一种宏观量子现象，这是因为电子之间产生关联且被“凝聚”了，也就是说能量降到了最低状态。

巴丁、库伯、施里佛在 20 世纪 50 年代成功解释了常规的金属及合金中的超导现象。如我们前面所述，具有周期结构的固体材料中的电子无法处在同一个状态，它们必然按照能量成低到高排列而形成费米面。超导体在临界温度以上正是这种状态，叫做“正常态”，因为这和正常金属没有多大区别，同样具有一定的电阻。如果温度降到临界温度以下，原子实的热振动效应将大为减小，这时处于费米面附近的价电子，也即动能最大的那部分电子就可以借助某种相互作用而两两配对。库伯指出这种配对必须发生在两个动量相反的电子上面，也即关于费米面中心对称的两个点上，这样配对系统就可以处于一个稳定的状态，这些配成对的电子就叫做库伯对。费米面附近的电子两两配对后，它们就可以不再受到泡利不相容原理的约束，从而可以发生相干关联而凝聚下来，即同时降到能量最低态——超导态。超导态的形成和费米面密切相关，因为电子的配对首先发生在费米面附近，随着超导态的形成，所有的电子对都会凝聚到最低能量状态，费米面也就“塌陷”直至完全消失。超导体在正常态和超导态下是完全不同的两个状态，一个是“倍有面子”，

另一个则“颜面无存”。

要进一步理解零电阻态的形成，我们首先必须认识固体材料尤其是金属材料的电阻起因。在正常态下，周期排列的原子实会在平衡位置附近做无规则的热振动，这样电子经过时就会“磕磕碰碰”，另外，固体里面的缺陷和杂质同样会对电子的运动造成“障碍”，这两大类效应就是电阻的主要起因。由此看来，即使把原子实完全“冻结”，也即降到绝对零度的话，电子的运动仍然会受到杂质和缺陷的阻碍。要真正实现零电阻态，我们必须换一种思路。实际上，当电子在周期性结构的正电背景中运动时，它必然受到晶格的吸引作用，而原本的晶格也会因为这个吸引作用而产生畸变。当下一个电子经过的时候，这种晶格的畸变就等同于给它一种额外吸引相互作用（注意库仑相互作用大小和距离平方成反比）。这样就等同于两个电子之间形成了一种相互吸引的作用。这就像冰面上两个人抛球，他们之间通过球这个媒介形成了一种配对作用。所谓“物以类聚”，两个配对的电子也需要某些“相似性”，这要求它们是能量大小相同并且动量方向相反的。这样的电子对在固体中运动，若其中一个电子受到散射，另一个电子必然受到相反方向的散射，两者相互抵消，对于整个电子对的运动而言，它的运动就是不受阻碍的，因而可以实现零电阻的状态。但是我们同时还得认识到，这种靠库仑相互作用形成的晶格畸变并不是很稳定的，而原子实的无规热振动可能会轻易地把这小小的畸变“抹平”，以至于电子根本来不及“找朋友”就各奔东西了。这就需要降低温度，从而减小这些热振动效应，使得晶格畸变的能量大于热振动的能量，这样电子一旦配对就足以抵抗热振动的效应。同样，如果电子顺利配对，它们一起运动时就可以绕开杂质和缺陷这类“路障”，因为这些坑坑洼洼的旁边早已经是畅通无阻的平坦大道了（这有点像良导体中的短路现象）。由此可见，只要降低温度，让电子引起的晶格畸变能足以抵抗热振动，然后电子们两两配对，携手前行就可以不受障碍，从而实现超导，这就是为什么超导态一定在低温下才能实现的原因（图 4）。而对于“完全抗磁性”，理解要更为复杂一些，这里就不做解释了。

费米面对固体材料的许多物理性质起着决定性的作用，而超导体中电子配对是发生在正常态下费米面附近的，因此，费米面的结构对于超导的形成

过程以及超导体的各种特性有着密切的联系。令人感到惊讶的是，随着对超导的不断深入研究，各种类型的超导体不断被发现，而这些超导体的面相可谓众生百态。以下我们就给各类超导体看面相去。

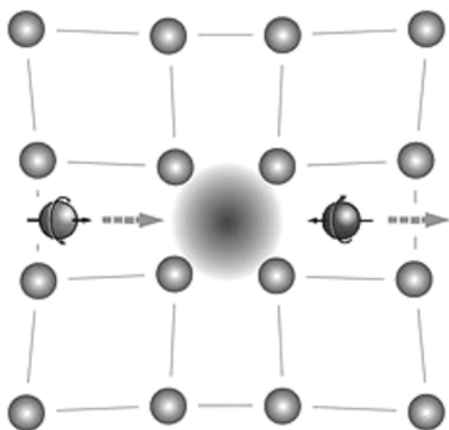


图4 超导体中的库伯对形成机理

三、“多面相”的常规超导体

我们习惯上把巴丁、库伯、施里佛的理论描述的超导体称为“常规超导体”。从超导材料的发现历史来看，常规超导体一般指的都是金属单质或者合金。其实超导体并不神秘，我们常见的许多金属甚至非金属都可以超导，有的在常压下就可以实现超导，有的需要在高压下才能超导。不过总体来讲，这些元素单质的超导临界温度都很低。我们可以从元素周期表中看出，目前发现的元素当中，超导元素占了大多数（图5）。

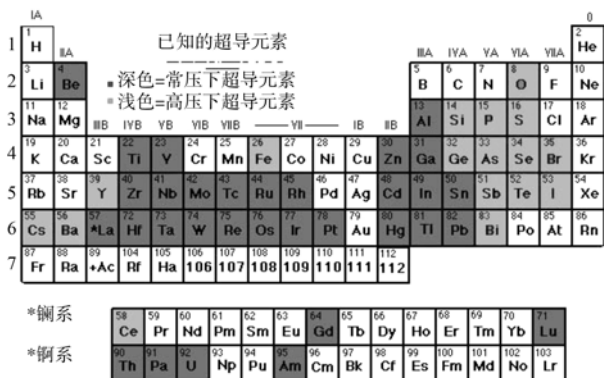


图5 超导元素占了元素周期表的大部分（摘自 superconductors.org）

下面我们摘取几个超导元素单质的费米面来看看（图6）。金属铌的费米面像一簇盛开的喇叭花，你从几个方向去看都是一个的“大喇叭”。而金属铟的费米面像一个帐篷顶，满满地撑开还有棱有角

似的。至于金属钨的费米面，有点像一堆凌乱的小孩玩具，各种形状的都有，很是缤纷多姿。但是不管何种形状，它们应该都是一个面或者多个面，即是闭合的。但是对于高温超导体来说，它的费米面变得更加令人困惑。

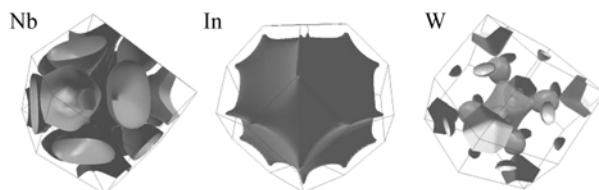


图6 超导铌、铟、钨的费米面（摘自佛罗里达大学物理系主页）

四、高温超导体的“变脸术”

每个人都很爱惜自己的脸面，在外人面前，总是希望有个美好的展现，不给自己丢脸。常规超导体的面子固然各式各样，不过至少脸面还是比较完全的。但对于高温超导体，甚至有些时候“撕破了脸”，或者干脆“不要脸”。所谓的高温超导体是相对于原先的常规金属超导体而言的，因为金属和合金的超导临界温度都很低，根据巴丁他们的理论预言，常规超导体临界温度不可能超过30K。但是1986年及以后发现的铜氧化物超导体临界温度都大大超过了这个数值，最高的记录是136K，在加压情况下甚至可以达到160K。这一类超导体称为“高温超导体”。实际上“高温”一点都不高，即使是160K也是零下100℃左右，这只不过是相对于“低温”到只有10K甚至更低的金属超导体而言。有趣的是，物理学中还有所谓的“低温等离子体”，其实指的是3000K左右的等离子体，这个“低温”一点也不低！自从高温超导体发现以来的20多年里，关于高温超导的形成机理还存在广泛的争论，不过还好好的是，至少已经有了一些明确的结论。高温超导的机理和常规超导是不大一样的，只是高温超导体里面同样存在库伯对，但库伯对配对和相干凝聚并不是在同一个温度点发生的，而提供配对的相互作用媒介也不大像是晶格本身。高温超导体机理问题中最大麻烦制造者就是电子本身。常规的金属而言，电子的巡游性很强，可以把它们独立起来近似看成自由电子；但是对于高温超导体而言，电子和电子之间存在很强的相互作用，它们之间是强烈相互关联在一起的，所谓“牵一发而动全身”，只要一个电子运动状态发生变化，所有电子都要受到影响。就像一个

教室里每个同学都手拉手在一起，下课了要出门将是一件很困难的事情。物理学对处理这种多体关联的问题很是一筹莫展。正是如此，研究高温超导体的费米面将带来许多有价值的信息，令人无比惊讶的是，高温超导的费米面太出乎人的意料了。

为了解释这个问题，必须先说明一些概念。在高温超导体中按照载流子的性质分两大体系，一个是电子型的、另一个是空穴型的。所谓空穴其实就是电子的空位，只不过用空穴来描述更为简洁一些而已。目前人们对空穴型的高温超导体研究的比较深入透彻，结论也比较统一，因此就关注这一类高温超导体吧。高温超导神奇的地方是，它的超导临界温度是在一定范围内可调节的。这就是所谓的掺杂的问题，在同一个材料结构里，随着掺杂的空穴浓度的变化，超导临界温度从零开始增加，达到一个最大值后又继续下降，形成所谓“钟形”结构，就像倒扣的中国式古铜钟一样。一般把左边空穴浓度比较低的区域叫做欠掺杂区，最大临界温度点的掺杂称为最佳掺杂点，右边较大浓度的掺杂称为过掺杂区。另外，高温超导体是准二维的层状结构，超导主要发生在二维的铜氧面上。因此，高温超导体的费米面其实可以认为是二维的。好了，下面就开始上演高温超导的“变脸术”。

因为高温超导体的性质是随着掺杂浓度不同而变化的，这让人很自然地想到它的费米面也应该是随着掺杂变化而变化的。事实上确实如此（图7）！高温超导体在零掺杂的情况下是一个绝缘体，因为它的母体是一种陶瓷——看看我们用的碗就知道，它是导电的么？但是随着掺杂浓度的增加，它的金属性逐渐增强，直到出现超导。若掺杂很多又使超导消失了，这时就可以得到一个和常规金属差不多的东西。从绝缘体走向金属，也使得它的费米面变得非常古怪。需要提醒读者的是，这里说的是空穴型的高温超导体，因此费米面也是空穴型的，空穴型的费米面和前面出现的电子型的费米面不同的是，它的弧是朝外弯的，弧外侧是空穴内侧才是电子。我们先看看过掺杂区，因为这个区域最接近正常金属，因此它的费米面是一个连续的大面。最佳掺杂点的费米面则略微收缩一些，不过你可以把图中方块不断连续重复，你会发现这些大弧仍然是闭合的（相对电子而言）。但到了欠掺杂区，这张“脸”就面目全非了。原来连续闭合的大圆圈被打断成了

一段一段的弧，我们把它们叫做“费米弧”（Fermi arc）。这是非常奇异的，因为真正的费米面应该是闭合（电子按能量堆积出来的总是一个闭合的面），何况不闭合的何以叫做一个“面”？但这个欠掺杂高温超导体却偏偏不走寻常路，把费米面撕的支离破碎，很是奇怪。许多人都认为，这和库伯对在超导临界温度以上就形成的机制有关，但究竟什么造成这样的结果，还存在一些争论。

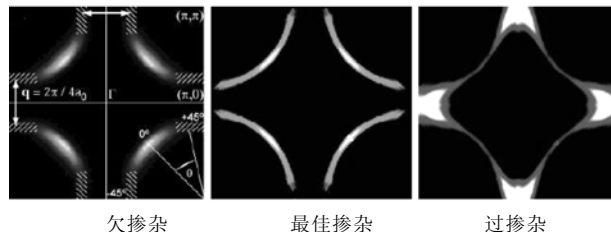


图7 高温超导的费米面随着掺杂浓度的变化而变化
(摘自斯坦福大学物理系沈志勋教授相关论文)

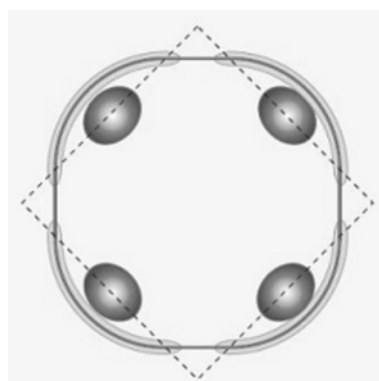


图8 高温超导体的费米面：大费米面、费米弧和费米口袋
(摘自《自然》杂志)

当然，还有更令人困惑的是，2007年的一篇Nature文章报道说欠掺杂区域的费米面根本不是一个大的费米面，而是一个小的费米口袋（Fermi pocket）。在我们所看到的那一段段费米弧下面，其实隐藏的是一一个个小小的口袋，口袋里面装满了电子。实验数据本身是没有必要怀疑的，但是这样的结论却引发了许多讨论。这让高温超导的“面子”更加扑朔迷离。如果我们把大费米面、费米弧、费米口袋画在一起的话，就形成了图8那样的“费米面”。这就是神奇的高温超导体，神奇的大“变脸”！

五、其他超导体的“多面术”

小时候看《镜花缘》，就为里面的“两面国”感到惊奇。一个人的脑袋前面是一张脸，后面还是一张脸，喜笑怒骂只需要转个身就可以了。对于某些

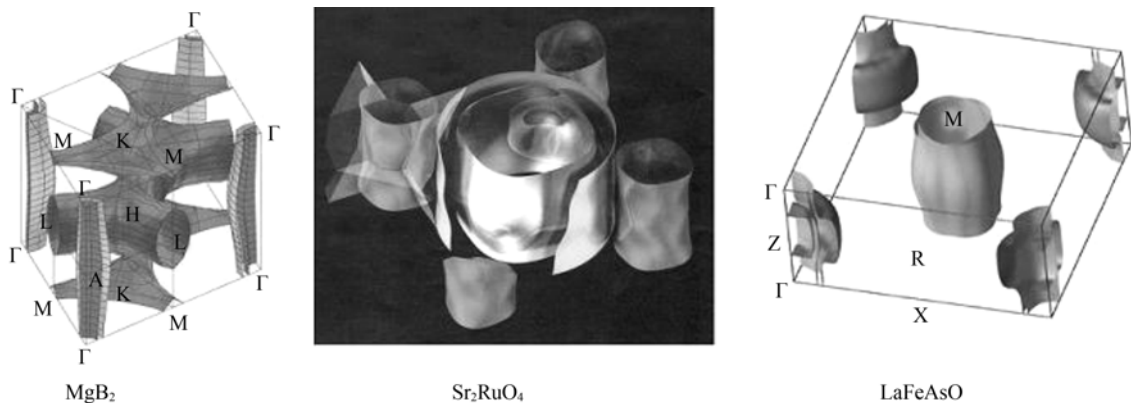


图9 其他超导体的多重费米面结构 (摘自 arXiv.org)

超导体来说, 这样的情况并不少见。我们来看看最近些年发现的三种超导体: MgB_2 , Sr_2RuO_4 , LaFeAsO (图9)。

从图9中可以看到, 这些超导体里面费米面有两个甚至是多个。 MgB_2 的费米面里面是一堆“塑料薄膜”连接在一起, 四周是四个独立的小圆片(实际上是八个, 里面还分别套着一个)。 Sr_2RuO_4 则像一圈卫生纸, 一圈圈的没完似的。而 LaFeAsO 这个2008年才发现的超导体, 费米面也是有多种多样。

对于这些有多个“脸蛋”的超导体, 它们的特性是非常丰富的, 因为不同的“脸蛋”之间还存在复杂的相互作用。研究它们的费米面以及费米面所决定的性质, 可以为它们的各种应用打下坚实的基础。

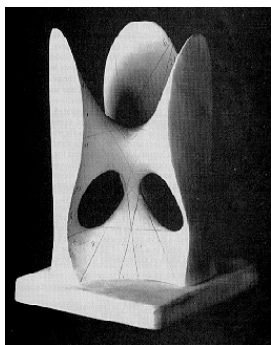


图10 优雅的费米面就像一尊艺术品, 充满着自然界最神秘的美丽

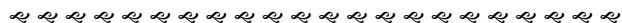
各种各样超导体的“面子”恐怕已经让您一饱眼福了, 其实这不过是冰山一角。要是把所有超导体的费米面罗列出来的, 那简直就是一副艺术画卷(图10)。的确, 费米面那优雅的曲线就像一副艺术品, 无论你从那个角度看它, 都散发着自然界最神秘的美丽。探寻这种美丽的真谛, 正是凝聚态物理学家们一生孜孜不倦的追求!

看完此文, 许多读者都可能会问这么一个问题: 究竟具有什么样的费米面的材料才会超导呢? 本文

并未敢涉及这个问题, 因为这个问题没有答案。而勉强的回答是令人沮丧的——我们无法通过费米面预测超导, 只能研究超体会具有什么样的费米面。不过幸好的是, 通过对许多超导体的各种费米面的研究, 能逐步认识清楚超导是如何形成的, 也就是电子是如何在费米面上进行配对的这个问题。凝聚态物理学研究是一项非常艰巨的任务, 因为我们面临的是10的23次方(阿伏伽德罗常数), 如此庞大的系统, 要想完全彻底地认识它, 恐怕还需要无穷的时日。费米面的概念则给了我们一把开启这个复杂系统的钥匙, 也即把这个系统简单化、理想化以寻找出路, 这也正是凝聚态物理研究的精髓思想之一。

(中国科学院物理研究所 100190)

本文获“我心目中的现代物理”征文优秀奖



封面照片说明

2009年7月22日上午, 我国出现了五百年一遇的长江大日食奇观。之所以有人称其为“中国大日食”, 是由于这次日全食是自1814~2309年近500年间, 在中国境内全食持续时间最长的一次, 而且我国至少约有3亿多人居住在日全食带沿线, 据悉, 这次日食吸引了数亿地球人。为了避开可能出现的阴云, 成功地拍摄到日食照片, 许多天文爱好者自驾车奔赴日全食带定点选址, 如突然遇到阴天, 随时准备驱车前往晴天地带观测。日全食如约而至。封面是7月22日上午北京天文馆于杰鸿、李国良在湖北省潜江市江汉油田拍摄的日全食照片。