

# 电子间的吸引与排斥

王智河

(中科院等离子体物理研究所 合肥 230031)

吸引和排斥作为特定的哲学范畴,专指无机界事物相互作用中两种相反因素的对立统一关系,是对接近和分离、收缩和膨胀、化合和化分、吸收和发射、引力和斥力、聚合和裂变等特殊矛盾运动所作的科学概括。显然吸引和排斥不是单一的、不变的;它是作为无机界的基本矛盾来把握的。

然而物理学里有一奇特的物理现象,即 Onnes 在 1911 年发现的物质超导电性,人们通过大量的实验对这一现象的超导机制作了广泛的研究。依据到目前为止所获得的种种实验结果,有一点已被肯定,即当超导体处于超导态时电荷载流子(电子或空穴)是配对的,其电荷为  $2e$ 。

我们都很熟知金属导体内电子-电子以及电子-离子间的作用主要是静电库仑力。导体中电子气的密度在宏观上是均匀的,电子的负电荷平均密度与离子的正电荷平均密度相等,因而表现出电中性。根据电磁场理论,带电体周围都存在着电磁场,它是传递电磁作用的媒介物。带电体通过电磁场交换量子而相互作用。其作用通常是同种电荷互相排斥,异种电荷互相吸引。作用力的大小遵守库仑定律。正是由于这种作用使得体系能量既可以升高也可

以降低。排斥作用使得体系的能量升高,吸引作用使得体系的能量降低。电子之间有没有吸引作用呢?

通过对超导体处于超导态时的电子比热测量,人们发现其比热随温度的变化并不是三次方规律,而是给出了很好的指数形式

$$C_{e,s}/\gamma T_c = 9.17 e^{-1.50T_c/T}$$

这一指数规律使人们想起在统计物理中得到的如果单电子体系在其能量范围内有能隙存在,在温度升高时,电子受激而跃过能隙  $E_g$ ,那么每一电子在激发过程中至少要吸收等于能隙  $E_g$  的能量。在温度  $T$  时,能隙以上的电子数与  $e^{E_g/K_B T}$  成正比。由此可知超导态必然存在一个能隙。能隙的存在对超导电性给出了一个重要的信息,它表明体系进入超导态后能量降低是由于超导电子凝聚到一个能隙以下,意味着电子

彼此之间有着相互吸引作用。人们已从实验上证实了超导体能隙的存在。那么,电子之间的吸引作用是怎样产生的呢?

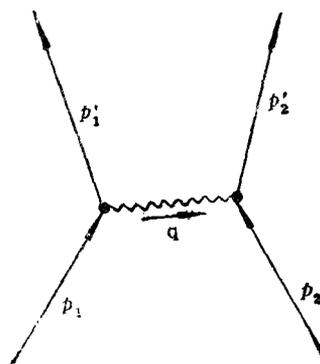


图 2 两电子相互作用的示意图

为了明确其物理图象,

H. Frohlich 给出如下一个物理模型(如图 1 所示)。当电子 1 通过整齐排列的晶格点阵时,电子 1 与离子点阵间的库仑作用而使得晶格点阵产生畸变,如果这时有一个电子 2 通过这个畸变的晶格时,将会受到畸变场的作用,即畸变场吸引第二个电子。与此同时电子 1 也从畸变场逃离,在逃离时也受到畸变场的作用,这个作用

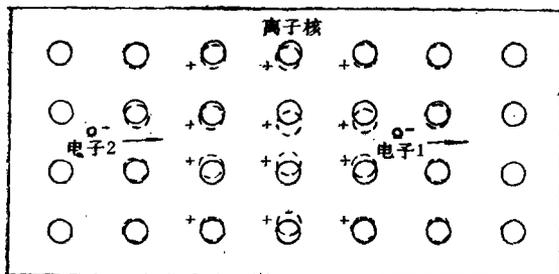


图 1 以晶格中的离子极化为媒介促使电子间的引力相互作用的机制

也表现为吸引作用。如果我们不考虑畸变场这个中间媒介,就好象第一个电子吸引第二个电子,同时第二个电子也吸引第一个电子。从能量和动量的角度来考虑这一过程,则可认为:动量  $p_1$  的电子发射一个声子  $q$ , 自己的动量变成  $p_1'$ , 当这个声子  $q$  被另一动量为  $p_2$  的电子吸收后, 这个电子的动量就变成  $p_2'$  (如图 2)。这个电-声子相互作用的过程就造成了电子之间的相互吸引作用而形成电子对(库柏对)。

不过这种媒介作用并不一定都能造成电子间的吸引,相反它也可能造成电子间的排斥。因为一个离子离开其平衡位置时,离子之间是紧密联系的,因而必然导致其它离子的移动,使得原来在整个电子气空间中的电荷密度均匀分布的状态产生扰动,从而引起电荷密度涨落  $\delta\rho^i$ 。即由于电子运动的变化,引起电子气的电荷密度涨落  $\delta\rho^e$ ,从而进一步引起晶格运动,导致离子电荷密度涨落  $\delta\rho^i$  的产生。这一过程可从固体振动理论来分析。

晶格本身具有许多简谐振动方式,对于这些简正模式来说,  $\delta\rho^e$  是一个强迫力,把能量和动量转移给晶格,从而激起晶格的简谐振动,该模式的自然频率为  $\omega(k) = \omega(p_1 - p_1')$ 。从无阻尼强迫振荡我们知道,如果强迫力的频率小于自然频率,振子的运动与强迫力同相,反之则有  $\pi$  的位相差。因此

当  $|\varepsilon(p_1) - \varepsilon(p_1')| \leq \hbar\omega(p_1 - p_1')$  时,

$\delta\rho^e$  和  $\delta\rho^i$  同位相,

当  $|\varepsilon(p_1) - \varepsilon(p_1')| > \hbar\omega(p_1 - p_1')$  时,

$\delta\rho^e$  和  $\delta\rho^i$  反位相。

金属原来是各处电中性的,电子的电荷密度涨落  $\delta\rho^e$  产生的电场与离子的电荷密度涨落  $\delta\rho^i$  产生的电场符号相反。如果

$$|\varepsilon(p_1) - \varepsilon(p_1')| < \hbar\omega_D,$$

$\omega_D$  是晶格简正模式  $\omega(k)$  的平均频率,叫 Debye 频率,则  $\delta\rho^i$  和  $\delta\rho^e$  同相,  $\delta\rho^i$  完全跟随  $\delta\rho^e$  变化,也就是说正离子的运动跟得上电子 1 的运动,离子电荷向电子集中,这样电子 1 的场最有效地受到它所感生的离子电场的屏蔽。如果  $|\varepsilon(p_1) - \varepsilon(p_1')| > \hbar\omega_D$ ,  $\delta\rho^i$  和  $\delta\rho^e$  反向,这时

离子不但不向电子集中,反而是远离,也就是不但不能屏蔽,反而是相对地加强了电子的电场。在前一种情况下,电子 2 受到电子 1 通过晶格媒介的吸引,而后一种情况则表现为排斥。

由能带理论,通过具体的计算得出,在 0K 时,许多材料中费米面附近动量和自旋都相反的一对电子,通过晶格媒介而发生的吸引力可以超过它们之间的屏蔽库仑排斥力,使得净的相互作用力为吸引力。

由于这种净吸引力的作用是导致超导态的因素,根据上述情况可以看到:

(1) 到某一个极限温度,吸引作用将减弱到不足以克服屏蔽库仑力,净吸引力消失,或者说  $(p, p)$  一对电子可能跃迁的态全被热激活电子占据,则超导态将消失。这个温度就是临界温度。

(2)  $T_c$  的大小决定于 0K 时的净吸引力强度。

(3) 因为吸引力是通过晶格的媒介而发生的,如果晶格离子质量大,则惯性大,那么声子的频率降低,即  $\hbar\omega$  小,因而电子形成库柏对的状态数减少,所以吸引力变弱,  $T_c$  减小。同位素效应正是这个原因所致。

电子对是由吸引力而束缚在一起的两个电子组成,实际上它们结合在一起的吸引作用并不强,由能隙能量  $2\Delta(\theta) = 3.53K_B T_c$  知道,电子对的结合能只有  $10^{-4} - 10^{-3} eV$  量级,因此如果把电子对理解成原子、分子那样紧密结合的实体就过份了。关于两个电子结合成对,比较正确的理解应认为它们不象两个正常电子那样完全互不相关地独立运动,而是存在一种关联性,  $\xi$  代表存在这个关联效应的空间尺度。

总之,超导材料中的电子间的相互作用表现为临界温度以上,电子间主要是库仑排斥力;临界温度以下,电子间的相互作用则表现出净吸引力。因而超导材料是电子间吸引与排斥的统一体。