

奇异的关联

陈小凡 杨学栋 陈志来

电是人们时常谈起的话题，而电阻则是与电相伴而生的。一般情况下导体都有电阻。从微观上讲，电阻是由载流子被格点散射而引起的。由于电阻的存在，电能中的一部分在导线的传输过程中作为热能而被消耗掉了。那么，能不能不消耗而传输电能呢？答案是肯定的。这要求导体的电阻为零。电阻为零或近乎为零的导体被称之为超导体，它是由荷兰物理学家昂内斯于 1908 年发现的，昂内斯由于这一工作而获诺贝尔物理学奖。超导体并不是在所有温度下电阻都为零，它只有在一定温度以下电阻才为零，处于超导状态。早期发现的超导体的超导转变温度一般在 -263°C 左右，这在工业上很难实现。但在 1986 年，缪勒和柏诺兹在金属氧化物陶瓷中发现了超导转变温度在 -243°C 的超导体，由于其超导转变温度较高，人们一般把其称之为高温超导体，缪勒和柏诺兹由于发现了高温超导体而获诺贝尔物理学奖。在 1986 年以后的几年里，陆续发现了超导转变温度更高的高温超导体。目前发现的超导转变温度为 -118°C 左右，达到了工业上比较容易实现的温度，从而为超导的应用开辟了广阔的前景。

一、常规超导体中电子的状态

电子在粒子物理中属于轻子，参与电磁和弱相互作用。像通信、光谱、导热、导电等都与电子有关。电子在超导中也起着重要的作用。

一般把超导转变温度在 -263°C 左右的超导体叫常规超导体。是什么机制使常规超导体具有超导电性呢？这一理论问题困扰了科学家长达 49 年的时间。直到 1957 年，美国物理学家巴丁、库珀和施里弗经过长期的艰苦努力，才用量子场论和量子力学从理论上解释了常规超导体的超导电性，他们的理论一般被称之为 BCS（取自巴丁、库珀和施里弗英文姓的第一个英文字母）理论。在 BCS 理论中，超导电性来源于由电子与晶格（原子或分子规则排列形成的空间结构）的电磁相互作用导致的晶格畸变（也可称之为局部微小形变）所引起的比较弱的电子-电子吸引，这种吸引使电子-电子形成对态（一般称之为库珀对），这种对态可以看成为具有玻色统计性质的状态，类似于液 He^4 在低温下的超流动性。

库珀对在超导体中的流动没有阻力，因而由库珀对作为电流载体形成的电流的电阻为零。巴丁、库珀和施里弗由于解释了常规超导体的超导电性而获诺贝尔物理学奖。解释常规超导体的超导电性不仅显示了科学探索中的艰辛，也显示了人类在认识自然的过程中的令人赞赏的合作精神和不屈不挠的顽强意志。

二、高温超导体中电子的状态

科学发展过程中有两种模式：一种是先有实验，后有理论，另一种是先有理论猜想，后有实验验证，多数情况是第一种模式。高温超导体的发现属第一种模式。实验证据表明，在高温超导体的超导态，电子-电子仍形成对态，但这种对态中电子-电子之间的吸引作用很强，不能用常规超导体中的晶格畸变来解释，显示出一种奇异的关联。从高温超导体的发现到现在已经过去 23 年的时间，至今人们还未找到被普遍接受的解释这种奇异的关联的微观理论模型。

三、高温超导体正常态的奇异特性

对常规超导体，其正常态的特性和普通的金属是一样的。在高温超导体发现后不久，人们对高温超导体正常态的各种特性进行了测试，令人意外的是，它们在许多方面和普通的金属是不同的，如电阻与温度的关系、霍尔系数对温度的依赖性、核磁共振中自旋点阵弛豫率与温度的关系和能隙的出现等。这些奇异特性说明，高温超导体中的电子的行为是非常令人难以理解的。我们现在还不知道这些奇异特性是有量子规律还是其他规律所决定的。尽管有些理论解释了其中的一些特性，但它们的解释是唯一的吗？在自然科学领域，唯一性一直是科学家追求的目标。为了解释某一现象，人们可以提出各种各样的理论，唯一地解释所有观察到的现象是我们取舍理论的基础，也是一个成功理论的标准。为了解释星体和物体的运动，牛顿提出了万有引力定律，当时没有人证明它的唯一性，现在我们知道，在解释星体和物体的运动方面，牛顿的万有引力定律不是唯一的，狭义相对论和广义相对论就比牛顿理论更准确，但是狭义相对论和广义相对论具有唯一性吗？我们不知道，至少至今没有人证明它们的

唯一性。今天，量子理论也处于同狭义相对论和广义相对论相同的情形。量子理论能够解释光谱和常规超导等现象，但是它具有唯一性吗？至今没有人证明。也许，唯一性的探求一直是一种激励，一种向人类智力发出的挑战。在社会科学领域，到达一定社会形态的道路是唯一的吗？历史证明它不是唯一的。没有人证明从高级社会形态转变到低级社会形态的可能性，如果这种转变发生，将是人类的悲哀。

四、高温超导体超导态的奇异特性

高温超导体超导态的奇异特性是它具有很短的相干长度和极高的超导转变温度，这是由高温超导体超导态中的电子强关联所引起的。这些奇异特性暗示着，在高温超导体中可能存在新物理或新的相互作用。高温超导体超导态的另一奇异特性是有很高的临界磁场，因而可以用来产生强磁场。高温超导体超导态的其他奇异特性还包括：是极端的第二类超导体，超导能隙显示出 d 波的各向异性。

五、描述高温超导体的几种理论模型

在我们找到解释高温超导现象的正确理论之前，制造具有特定性能的高温超导材料只能是经验性的和盲目的。

有一位著名物理学家曾说过，没有实验物理，理论物理学家就会飘忽不定，而没有理论物理，实验物理学家就会犹豫不决。理论在人们探索未知世界的过程中起着实验不可替代的作用。解释高温超导的理论的关键点在于如何选择多粒子体系的量子态及其哈密顿量。迄今为止，人们提出了以下几种理论来解释高温超导现象，它们是：安德森的非费米液体理论，施里弗的自旋袋理论，派斯(Pines)等人的近反铁磁费米液体理论，珐马(Varma) 等人的边缘费米液体理论，双极化子理论，孤子理论，赫伯德模型和 t - J 模型等。这些理论中的每一个理论都在某些方面定量或定性解释了实验事实，但没有一个理论定量解释了所有的实验事实。也许我们需要另一种思路来解决高温超导之谜。我们提出用多粒子关联解释高温超导的设想。不管解决高温超导之谜的最终理论是什么，它一定是简洁，优美，并且可能出乎我们的预料。

六、描述超导体的唯象模型

唯象模型不同于理论模型。理论模型是从物理

本质上认识问题，而唯象模型仅从现象的层次上提出对问题的看法。1950年，金兹堡和朗道建立了一种描述超导体的唯象理论，称之为金兹堡-朗道理论。在这一理论中，用有效波函数描述电子的行为。金兹堡-朗道理论不仅可以用于常规超导体，而且可以用于高温超导体。推广了的金兹堡-朗道理论不仅可以描述有效波函数随空间的变化，还可以描述有效波函数随时间的变化。金兹堡-朗道理论不是基本的理论，它可以从建立在量子场论基础上的格林函数理论推导出来。格林函数理论与BCS理论是等效的。格林函数理论是多粒子体系的量子场论，它通过多粒子量子真空中的单粒子传播子来容易地计算一些物理量。

七、高温超导的应用和展望

人们研究高温超导并不是仅仅是因为它是对人类智力的挑战，更重要的是为了把它应用于我们的生活中。至今，人们已把高温超导体应用于核聚变、SQUID（超导量子干涉仪）器件、超导电机和磁悬浮列车等。

我们力图在本文中対常规超导体和高温超导体的特性给出一个轮廓性的描写。自从高温超导体发现以来，数以千计的物理学家辛勤地工作在这一领域，希望做出历史性的贡献。科学既是一种证明了的东西，也是一种信仰。从本质上讲，人们探索未知世界的目的是为了提高人类的物质生活水平和精神满足。超导电性的发现从一个侧面反映了科学发现的历程：它是那样的漫长，那样的精彩，那样的诱人，那样的令人兴奋和激动。对光的实验研究催生了狭义相对论和量子力学，而对引力的研究催生了广义相对论。现在多数物理学家认为，对高温超导体的研究会使我们对多粒子体系奇异的关联行为及相互作用的认识有着革命性的改变。高温超导、暗物质和暗能量、类星体这三大当今物理难题，激励着一代又一代物理学家去探索隐藏在实验现象之后的新理论。尽管高温超导机制的揭示还可能相当长的时间，但大多数人坚信，我们一定能找到解释高温超导的正确理论。

（哈尔滨工业大学物理系 150001）

本文获“我心目中的现代物理”征文优秀奖