

畅通无阻的流动

——2003 年诺贝尔物理学奖

江向东 黄艳华

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

支配微观世界的量子物理学具有在我们普通的宏观世界一般不会出现广泛而引人注目的效应。然而,在某些情况下,其中的量子现象却是可见的。2003 年的诺贝尔物理学奖所奖励的工作就涉及到这样两种情况:即超导电性和超流性。阿列克谢·阿布里科索夫 (Alexei Abrikosov, 俄罗斯和美国双重国籍。1928 年生于



前苏联的莫斯科, 现年 76 岁。1951 年在莫斯科的物理问题研究所获得物理学博士学位。美国伊利诺斯州阿贡国家实验室著名科学家。) 和维塔利·金茨堡 (Vitaly Ginzburg, 俄罗斯人。1916 年生于前苏联的莫斯科, 现年 88 岁。1942 年获莫斯科大学物理学博士学位。俄罗斯科学院列别切夫物理研究所理论组的前组长。) 发展了超导理论, 安东尼·莱格特 (Anthony Leggett, 英国和美国双重国籍。1938 年生于英国伦敦, 现年 66 岁。1964 年在牛津大学获得物理学博士学位。美国伊利诺斯大学麦克阿瑟教授。) 解释了一种超流性。超导电性和超流性都是在很低的温度下才出现的现象。

出乎意料的冷却效应

19 世纪开始进行电的本性的研究时, 人们得知金属和某些合金是通过让电子在原子间移动来导电的。可是, 电子这种杂乱无章的运动会导致原子振动从而产生热。如果电流太强, 所产生的热量就足以使导体熔化。另外, 人们还发现, 通过导体的电流会产生磁场, 磁场反过来又产生反向电流, 电和磁相互作用并彼此抵消。

1911 年, 荷兰物理学家昂内斯做出了一个非同寻常的发现。他对低温下物质的性质特别感兴趣,

而且还在极低温下成功地制造出了液氦。昂内斯在研究水银的导电性时, 发现当用液氦把这种金属冷却到绝对零度以上几度时, 它的电阻就消失了。他把这种现象命名为超导电性。虽然没能找到这种现象的理论解释, 但是, 在变得越来越依赖于电的现代社会中, 这种现象显然具有深远的意义。昂内斯因为这项工作荣获

了 1913 年诺贝尔物理学奖。

两种类型的超导体

过了大约 50 年, 物理学家约翰·巴丁、利昂·库珀和罗伯特·施里弗才提出了能解释超导现象的一种理论 (即 BCS 理论, 这是用他们姓氏的第一个字母来命名的, 他们荣获了 1972 年诺贝尔物理学奖)。这种理论表明, 在超导体中一些带负电荷的电子会形成对, 即所谓库珀对。这些电子对沿着由材料中带正电荷的金属原子的规则结构形成的吸引通道流动。这种结合以及相互作用的一个结果是, 电流能够均匀地流动并表现出超导电性。成对的电子通常被认为是一种冷凝物, 类似于在气体冷却时形成的液滴。与一般液体不同的是, 这种“电子液体”是超导的。

这种超导体被称为第 I 类超导体。它们是具有迈斯纳效应这种特性的金属。所谓迈斯纳效应就是, 在超导状态, 只要磁场的强度没超过某个限度, 它们就会与周围的磁场相抵消 (见图 1)。如果周围的磁场太强, 超导电性就会消失。

可是我们知道, 有些超导体没有或者只部分地显示出迈斯纳效应。这些超导体一般是各种金属的合金或是由非金属和铜组成的化合物。这些超导体即使在强磁场中仍保持超导性质。实验表明, 这些

现代物理知识

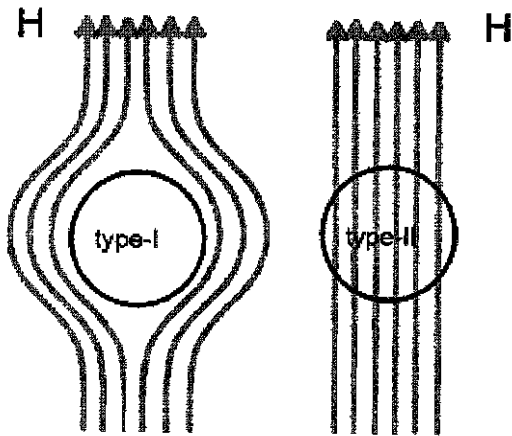


图1 第 I 类超导体 (type-I) 屏蔽磁场 (迈斯纳效应)。如果磁场强度增加, 它们就失去超导电性。第 II 类超导体 (type-II) 就不会发生这种情况, 而是通过让磁场进入来适应强磁场

所谓的第 II 类超导体的性质不能由 BCS 理论来描述。

阿布里科索夫在莫斯科的卡皮查物理问题研究所工作, 他成功地提出了一种解释这种现象的新理论。他的出发点是在对超导电性的描述中, 借助一个序参量来考虑超导冷凝物的密度。他能够用数学表明, 序参量如何能够描述涡旋, 以及外部磁场如何能够沿着这些涡旋中的通道贯穿材料 (见图 2)。

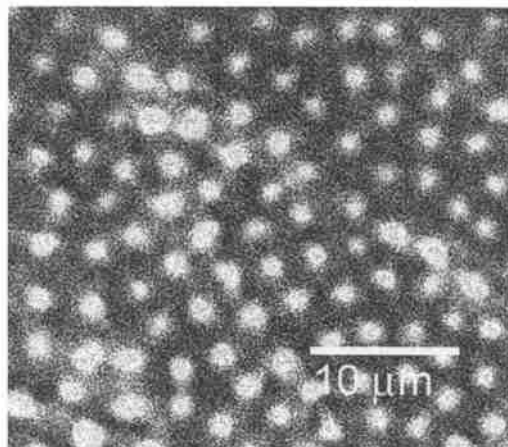


图2 第 II 类超导体中电子液体的一个阿布里科索夫涡旋格。磁场穿过这些涡旋

阿布里科索夫的理论能够预言涡旋数目如何随着磁场强度的增加而增加, 以及一旦涡旋的中心重叠, 材料中的超导性质如何消失。在新超导材料的研究中, 这种描述是一种突破, 而且在发展和分析新的超导体和磁铁中仍在广泛使用。在过去的 10 年中, 他的一些论文从 20 世纪 50 年代末以来已经越来越频繁地被引用。

16 卷 1 期 (总 91 期)

阿布里科索夫的论述所依据的理论是 20 世纪 50 年代初期由维塔利·金茨堡和列夫·朗道 (后者因液氦的开创性理论荣获了 1962 年诺贝尔物理学奖) 系统地阐述的。这种理论打算描述当时所知道的超导体中的超导电性和临界磁场强度。金茨堡和朗道认识到, 如果要解释超导体和磁性的相互作用, 就要引入一个描述材料中超导冷凝物密度的序参量。一旦引入了这个参量, 当达到大约 0.71 这个特征值时, 显然存在一个破缺点, 而且原则上存在两类超导体。对于水银, 这个特征值大约为 0.16, 而且当时所知道的其他超导体的值也与此接近。因此, 当时没有理由要去考虑破缺点以上的值。阿布里科索夫通过表明第 II 类超导体精确地具有这些值而完成了这个理论。

我们在超导电性方面的知识已经带来了变革性的应用 (见图 3)。具有超导性质的新化合物正不断地被发现。在过去的几十年中, 已发展了大量的高温超导体。第一种高温超导体是乔治·柏诺兹和卡尔·缪勒制成的, 他们获得了 1987 年的诺贝尔物理学奖。所有高温超导体都是第 II 类的。冷却技术是利用超导体的关键因素。一个重要的极限是 77K (即 -196 °C), 这是液氮的沸点, 液氮既比液氦便宜又便于操纵。

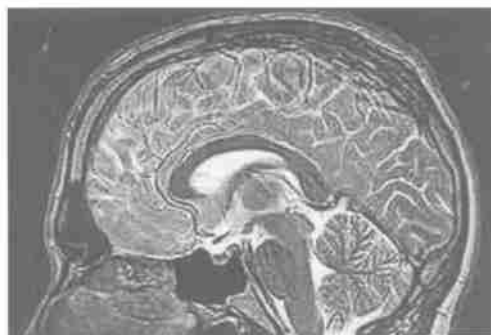


图3 人脑的 MRI (磁共振成像) 图像。磁共振照像机的分辨率部分地取决于磁场强度。当今已经使用强超导磁铁, 这些超导体全是第 II 类的

两种迷人的超流体

最轻的稀有气体氦在自然界中有两种形式, 即两种同位素。通常的形式表示为 ${}^4\text{He}$, 其中的数字 4 表示原子核中的核子数 (2 个质子和 2 个中子)。在非正规形式 ${}^3\text{He}$ 中, 原子核中只有一个中子, 因此轻一些。在天然的氦中, 重同位素比轻的多 10^7 倍。这就是为什么只有在最近 50 年中才可能制造出大量的 ${}^3\text{He}$, 比如在核电站。

在常温下,这两种同位素气体只是在它们的原子量上有所不同。如果氦气被冷却到大约 4K,气体就凝结了,变成了液体形式。这就像水蒸气凝结成水一样。只要温度不是太低,这两种同位素的液体都具有相似的性质。液氦被普遍地用作冷却剂,比如在超导磁铁中。在这种情况下所用的当然是出自天然的氦,也就是说,所用的是常见且便宜的 ^4He 。如果液氦被冷却到更低温度,在这两种同位素的液体之间就会出现显著的差别:量子物理效应的出现导致液体失去内部运动的所有阻力,变成了超流体。这两种液体在极为不同的温度出现这种超流现象,而且它们展现出相当广泛而迷人的性质,比如能从保存它们的容器的开口上自由地流出来。这些效应只能借助量子物理学的方法来解释。

历史性的发现

^4He 变为超流体这个事实是彼德·卡皮查(1978年获得了诺贝尔物理学奖)和其他一些人在 20 世纪 30 年代末就已经发现了的。这个现象几乎立即就被年轻的理论家朗道解释了。从普通流体到超流体的这种转变是玻色-爱因斯坦凝聚的一个例子,对 ^4He 这种转变出现在 4K,更近些时候在气体中也观察到了这个过程,为此 2001 年诺贝尔物理学奖授

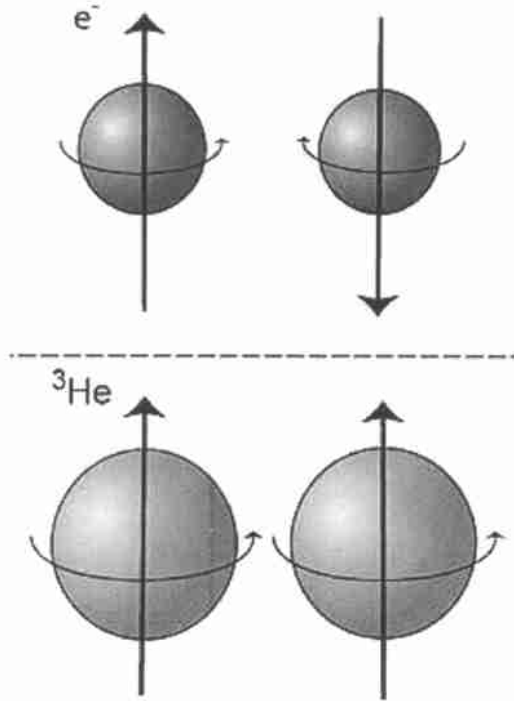


图4 超流体 ^3He 中出现的对的形成与在超导体中电子间出现的库珀对的形成不同。氦原子的磁性是共同作用的,而电子的磁性是彼此抵消的

予了埃里克·康奈尔、沃尔夫冈·克特勒和卡尔·韦曼。

对 ^3He 同位素,进入超流态的转变直到 20 世纪 70 年代初期才被戴维·李、道格拉斯·奥谢罗夫和罗伯特·理查森(此三位是 1996 年诺贝尔物理学奖获得者)发现。这个发现来得如此之晚,一个原因是这种转变出现在极低的温度,比 ^4He 的低很多,大约是其临界温度的 1/3。这是因为, ^3He 的量子物理效应与 ^4He 的不同,它不能直接经历玻色-爱因斯坦凝聚,这个发现并非出乎意料。在巴丁、库珀和施里弗的 BCS 理论中,存在一种机制:库珀对的形成与 ^3He 中出现的不同(见图 4)。

各种各样的超流体

用正确的方式解释了这种新超流体性质的第一位理论家是安东尼·莱格特,20 世纪 70 年代他在英国的萨克西斯大学工作。他的理论帮助实验家们解释了实验结果,还为系统地阐述 ^3He 中的超流动性提供了一种框架。莱格特的这种理论,在其他物理学领域中也证明是有用的,比如在粒子物理学和宇宙学中。

作为超流体, ^3He 由原子对组成,其性质远比 ^4He 超流体复杂得多。特别是 ^3He 超流体的原子对具有磁性质,这意味着这种液体是各向异性的,在不同的方向上有不同的性质。这种现象在发现之后马上就被用到了由这种液体进行研究的实验之中。通过磁测量揭示出,这种超流体具有非常复杂

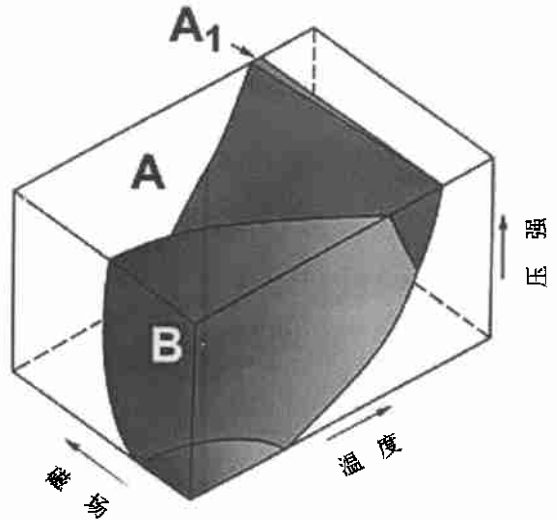


图5 超流体 ^3He 可以存在 3 种相,分别为 A, A₁, B。相的类型由压强、温度和磁场确定

她用物理的情趣,引我们科苑揽胜; 她用知识的力量,助我们奋起攀登!

欢迎投稿,欢迎订阅

2004年的《现代物理知识》继续设有物理知识、物理前沿、科技经纬、教学参考、中学园地、科学源流、科学随笔和科苑快讯共8个栏目。欢迎大家向这些栏目踊跃投稿。

恳请大家注意如下几点:稿件最好用微机打印,请单面打印并留1.5倍的行距,不能打印的,请用方格纸以正楷誊写;外国人名地名,请译成中文,有必要保留外文名称时则在文中首次出现时将外文用括号括在中译名后面,图表中的外文也尽可能地译成中文;插图须在文中相应位置标上编号,手绘插图线条及图中标注的文字务必整洁清晰;文稿无需附“参考文献”“摘要”“关键词”等,但务必附上英文题目和作者的英文姓名;无论网上或邮寄投稿,务必将联系人姓名、详细地址邮政编码以及电话、电子邮箱、传真等联系方式全部书写清楚;网上投稿请以Word文件(扩展名DOC)附件发送至本刊电子信箱,不能转换成Word文件的,请直接发送;请注意语言规范,例如,“其它”一律改为“其他”,“公里”改为“千米”,“公斤”改为“千克”,数字和百分数尽量采用阿拉伯数字,除了书刊名称用书名号外,一般文章的题目则用引号。

从2003年第3期开始,每期的扉页上都刊登本刊的电话、传真、网址和电子信箱,欢迎各界人士与我们联系。

《现代物理知识》的读者对象颇为广泛,有科学工作者、教育工作者、科学管理干部、大学生、中学生和其他物理学爱好者。欢迎各界人士继续订阅!

在邮局漏订或需要过去杂志的读者,请按下列价格汇款到《现代物理知识》编辑部(100039,北京918信箱现编部)补订。1992年合订本,18元;1993年合订本,18元;1994年合订本,22元;1995年合订本,22元;1996年合订本26元;1993年增刊,8元;1994年增刊,8元;1996年增刊,15元;1997年合订本,30元;1998年、1999年合订本已售完,尚有1999年1、4、5、6期单行本,每本3元;2000年附加增刊合订本,38元;2000年增刊,10元;2001年合订本,48元;2002年合订本,48元;2003年合订本,48元;2004年每期7元,全年42元;《奇异之美——盖尔曼传》,32元;《反物质——世界的终极镜像》,18元(上海科技教育出版社“哲人石”丛书最近出版的两本)。以上所列,均含邮资或免邮资。

的性质,表现为3种不同相的混合物。这3种相具有不同的性质,而且混合物中的比例取决于温度、压强和外部磁场(见图5)。

超流体 ^3He 是一种工具,研究人员也可以用它

在实验室中研究其他现象。特别是,超流体中的湍流的形成最近被用于研究有序是如何转变为混沌的(见图6)。这种研究可能导致对湍流出现的方式的更好理解,这是经典物理学的一个未解的难题。

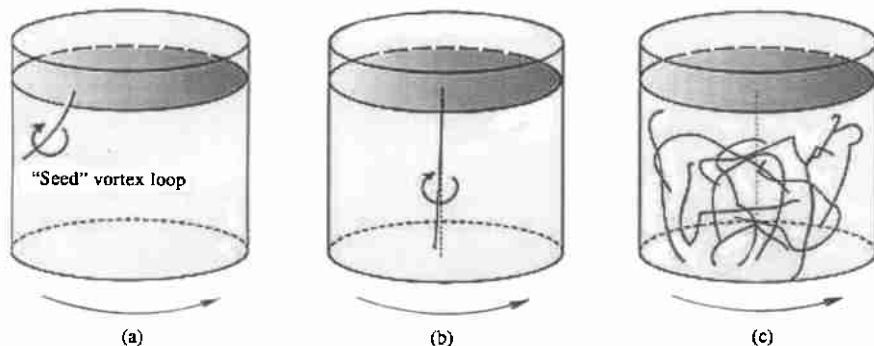


图6 最近已表明,如果涡旋产生于一个盛有超流体 ^3He 的容器中(a),其结果会主要取决于温度。在临界温度之上,涡旋沿旋转的轴排列起来(b)。在临界温度之下,涡旋会出现混乱(c)