

[美] 沈星扬 著



超 流 体

科学出版社

12

44

0 5/2
5 44

超 流 体

〔美〕沈星扬 著

科 学 出 版 社

1982

209645

内 容 简 介

本书简要叙述了在低温条件下超流氦⁴、超流氦³的实验与理论;对低温物理的意义与理论物理中极重要的“准粒子”概念作了初步介绍;论述了低温物理的研究,大大扩展了人类对从微观世界到宏观世界这一连续空间的基本认识。

超 流 体

[美] 沈星扬 著

责任编辑 姜淑华

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1982年12月第一版 开本:787×1092 1/32

1982年12月第一次印刷 印张:2 3/4 插页:1

印数:0001—4,950

字数:49,000

统一书号:13031·2123

本社书号:2900·13—3

定价: 0.42 元

代 序

1978年8月,中国物理学会在庐山召开年会,不少物理学工作者有感于物理学在提高全民族科学文化水平和实现“四化”中的伟大作用,建议中国物理学会与科学出版社合作,编辑出版一套《物理学基础知识丛书》,有计划有系统地普及物理学的基础知识和物理学的新发展。这一倡议当即得到了广泛的响应。为此,中国物理学会理事会进行了认真讨论,积极热情地支持了这一建议,于是,就在风景绮丽的庐山,在中国物理学会和科学出版社的共同主持下,正式成立了本丛书的编委会,讨论和制定了丛书的编辑方针和选题计划,正式开始了丛书的编辑出版工作。

物理学研究物质的运动规律,物质的结构及其相互作用,它是许多科学技术的基础。从本世纪开始,物理学经历了极其深刻的革命,从宏观发展到微观,从低速发展到高速,由此诞生了量子物理学和相对论,并在许多科学技术领域引起了深刻的变革。本世纪以来,物理学在认识和改造物质世界方面不断取得伟大成就,不断揭开物质世界的奥秘。原子能的利用,使人类掌握了新的能源;半导体科学技术的发展,导致了计算技术和自动控制系统的革命;激光的出现焕发了经典光学的青春;凝聚态物理学的发展,使人们不断创造出许多性能

大大提高的材料……;因此,向广大读者宣传物理学的基础知识以及物理学的新发展,乃是提高全民族科学文化水平和实现“四化”的需要。我们编辑出版本丛书的目的,就是试图在这方面贡献一份力量。

本丛书将着重介绍现代物理学的基础知识,介绍物理学的最新发展,要求注重科学性。我们希望作者发扬创新精神,力求做到题材新颖,风格多样;勇于发表独创性、探索性的见解,以活跃读者思路。在文风上则要求做到准确、鲜明、生动,深入浅出、引人入胜,以说透物理意义为主,尽量少用数学公式。

在编辑出版丛书工作中,我们得到了广大物理学工作者的热情支持和鼓励,还得到老一辈物理学家严济慈、钱临照、**陆学善**等同志的热情赞助和关怀。美国加州大学热斐尔学院院长吴家玮教授应邀积极参加编委会工作,并约请了美籍学者为丛书撰稿。我们一并在此致以谢意。

《物理学基础知识丛书》编委会

前 言

液氦³与液氦⁴具有许多超常的本领。在一定条件下它们能毫无阻力地流过毛细管,成为超流体。

依照本丛书出版宗旨,我在写作过程中着重于物理意义的描叙,尽量减少用数学推导获得物理结果的方法,以帮助一般读者较容易地掌握基本概念。

对液氦³与液氦⁴的许多稀奇古怪的性质,我在书里都作了广泛的介绍,与此同时,为了让读者了解目前我们对超流的规律和理论已有了较好的掌握,我还介绍了用“准粒子”理论解释超流现象的方法。

本书的内容安排如下:

第一章:论述研究低温物理的意义。介绍物相与有序度的关系。指出超流氦具有和一般物质在晶体状态时一样高的有序程度。

第二章:介绍在 2.17K 以下,液氦⁴的超流实验,包括粘滞系数测量、热机效应及第二声等。

第三章:利用“准粒子”概念,阐明超流实验的理论基础。

第四章:超流氦⁴与常流氦³的混合溶液是研究超流体及准粒子理论的理想物质,其中氦³准粒子的浓度可以随实验的需要改变。新发现的表面第二声是在氦⁴稀溶液(含极少氦³)

的表面、二维准粒子里的声波。

第五章：介绍液氦³的超流条件和特点。它在 34 个大气压和 0.0027K 的极低温下实现超流，并且具有三个超流相。

在低温条件下，物质内部变成了一个高度规律性的体系，在这样有序度极高的体系里，有时一些遵循量子力学规律的微观效应，可以在宏观尺度上显示出来。超流液氦⁴、液氦³就是这种微观效应的体现。超流体的研究，对人类掌握大自然，认识从微观到宏观这一连续空间的规律，提出了新的启示。

沈 星 扬

一九八一年七月

《物理学基础知识丛书》编委会

主 编: 褚圣麟

副主编: 马大猷 王治梁 周世勋 吴家玮(美籍) 汪 容

编 委: 王殖东 陆 埏 陈佳圭 李国栋 汪世清 赵凯华
赵静安 俞文海 钱 玄 潘桢庸 薛丕友

* * * * *

本书责任编辑: 吴家玮 陈佳圭

目 录

第一章 超流和低温的意义.....	1
一、流体和超流体.....	1
二、量子流体.....	4
三、分子作用力.....	11
四、凝聚状态.....	13
五、零点能.....	15
第二章 超流氦 ⁴	17
一、氦 ⁴ 的 λ 点	17
二、用肉眼测温.....	18
三、运动中的流体.....	21
四、粘滞性与超流.....	22
五、两种不同的粘滞系数.....	23
六、喷泉效应.....	25
七、热机效应.....	25
八、热传导.....	29
九、温度波.....	30
第三章 揭开超流之谜.....	32
一、准粒子的故事.....	32
二、第二声——准粒子中的声波.....	40
三、用中子散射测量激发能谱.....	44
四、超流氦 ⁴ 中的涡环	46
第四章 超流溶液.....	48
一、氦 ³ -氦 ⁴ 溶液	48

二、稀溶液中的氦 ³ 激发	51
三、用超漏发第二声	52
四、稀释致冷器	53
五、表面第二声	55
第五章 磁性的超流体	59
一、液氦 ³	59
二、费米子与玻色子	62
三、超导的成对理论	66
四、氦 ³ 的成对现象	68
五、一种费米子对的液体	70
六、最古怪的超流体	72
七、液氦 ³ 是各向异性的	76

第一章 超流和低温的意义

一、流体和超流体

说起流体，你可能很快的会联想起我们日常生活中离不开的两个好伙伴：水和空气。凡是能流动的物质都可以称为流体。液体和气体都是流体。上面举的例子中，水是液体，而空气是气体。水除了能以液态方式存在之外，还能以气态——水蒸气的方式存在。在常压下，当温度达到冰点或更低时，它又会结成冰以固态存在。液相^①的水和气相的水蒸气都是流体，它们的化学结构也完全相同，但流动性质却很不一样。如果把水蒸气引入一个容器，它立刻会充满整个容器，不论这个容器有多大，形状有多怪。但要是把水倒进一个容器时，我们却会看到一个水面。假设水原来的体积只有容器容积的一半，那么水只能占有容器的下半部。很明显，水蒸气可以完全适应容器的形状和体积，而水却只能适应容器的形状而保持自己原来的体积。原因在哪里呢？让我们从微观尺度上来研究一下水蒸气 and 水的组成吧！水蒸气和液态水都是一

① 相是具有相同成分、相同物理及化学性质的均匀物质部分。各相之间有明显可分的界面。例如空气是一个相，水和冰是两个相，水、冰和蒸气是三个相。

大群水分子的集合，但它们的密度却有很大的差别，这是液体和气体一个重要的不同点。定性地说，气体是分子稀疏的集合，定量地说，每立方米的气体只含有 10^{25} 个或更少的分子，例如饱和水蒸气的密度就在 10^{25} 个分子/米³ 左右。液体也由大群分子组成，但它的密度要比饱和气体大约一千倍，而且不随容器的大小改变体积，一立方米的水就含有 3×10^{28} 个分子。同时液体分子与分子间的引力作用比气体分子间引力大得多，也就是说，液体分子比较喜欢聚在一起，上面我们倒水的例子已经很清楚地说明了这一点。另外一个很好的例子是，我们听过而且见过一滴一滴的液体，却从来没有听说过一滴一滴的气体。气体和液体一个很大的不同，是在从气体到液体这个由分子作用力造成的凝聚过程中，液体产生了一个自由液面。

分子作用力的原因与凝聚现象等问题，都属于我们的课题范围，我们在后面将一一讨论。

再看看另外一个生活中的事例。装有氢气的气球要是有了一个很小的孔，气球里的氢气马上就会漏出来，没过多久就会漏光。如果我们用这个气球装水，说不定还能盛上好一阵子的水。这个例子又说明，液体和气体内水分子的运动状况不同，如液体里分子喜欢紧密地拉在一起，不象气体分子那样的行动自如等等，这些现象，先让我们记在心中，以便和超流体进行比较。

什么是超流体？它和上面叙述的日常所见的流体有什么不同？我们从超流体本身又能学到什么呢？在低温物理世界

里,已经出现了好几个超流体。人们最早接触到的超流体是液氦⁴。在 2.17 K ^① 以下的低温里,液态氦⁴ 能沿着容器的器壁,以薄膜形式爬出容器(图 1-1),还能流过半径小于 10^{-5} 厘米的小洞(图 1-2),它喜欢流向温度高的地方,又是一个极好的热导体,而且不论温度降得多低,它都不会在常压下固化结成“氦冰”。就是这许许多多与一般常见的流体大不相同的怪脾气,液氦⁴ 得到了“超流体”的美誉。



图 1-1 在 2.17 K 以下,液氦⁴ 能沿容器壁,以薄膜形式爬出容器

① K 代表热力学温标,也就是绝对温标,它的零点比水的三相点要低上 273.16°C 。

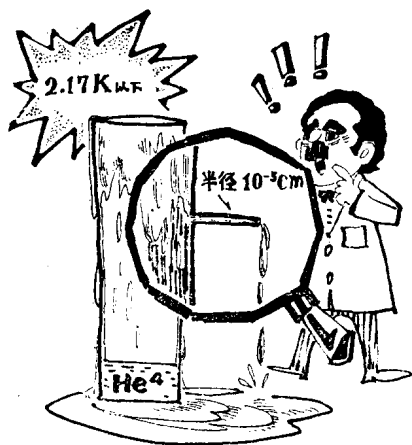


图 1-2 超流氦⁴能流过半径小于 10^{-5} 厘米的小洞

说到这里，我们可以给它下一个简单的定义：超流体是具有超常流动能力的流体。与此同时，普通的流体可以被称为常流体了。氦⁴的超流现象是一个量子力学^①效应的宏观体现，它是这本书的一个主要研究对象。除了液氦⁴之外，人们也遇到了另外两个超流体系——液氦³和超导体内的传导电子，它们都在低温世界里被发现了。

二、量 子 流 体

让我们先讨论一下促进低温物理学研究不断发展的原因。

^① 微观粒子的运动规律理论。

我们都知道，在原子、分子的微观世界里，量子力学理论能解释所有的物质现象，但是当物体大到包含着亿万个原子的情况下（在宏观世界中），许许多多原子杂乱无章的热运动把我们搞得眼花缭乱，而量子物理的规律也就不容易清楚地显示出来，这时，物质遵守一般经典力学规律。但当低温物理工作者的致冷技术一天一天推向绝对零度时，温度每下降一个数量级，就会揭掀开低温舞台新的一幕，经典物理以及我们的直觉所不能预测的结果接二连三的呈现在我们眼前。换言之，当物质的温度一步步趋近于绝对零度时，不同层次的量子规律开始逐渐显现出来，而且给我们带来了事先无法估计的科学与技术上的利益。

也许你会马上提出一个问题，量子力学既然是原子、核子或电子世界中的物理规律，为什么我们不直接设法进入微观世界中去呢？核子物理、高能物理的发展是朝着这个方向去做的，但今天人类对这些科学部门中所研究体系的基本规律掌握仍不足，不能简单明确地观赏全景，特别是对这些体系进行阐述及计算时，我们仍需要做出非常多而且复杂的假设，其中宏观与微观世界间的基本联系常常不十分清楚。在低温超流体系里，微观世界中的量子现象却非常干净利落地在

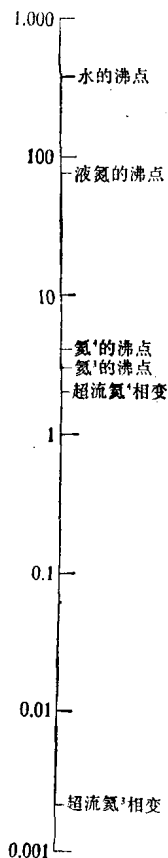


图 1-3

宏观尺度上显现出来,在肉眼可及的宏观世界里向我们招手。这就是为什么数十年来超流体的研究吸引了不知多少物理工作者注意的原因;近几十年来,两位大物理学家,朗道(Landau)和费曼(Feynman)就是很好的例子。

除了氦³与氦⁴以外,所有的物质都在进入低温和量子性质展示之前就已经变成固态,而氦的同位素却在固化之前就成了一个遵守量子规律的“量子”物质,一旦成为“量子”物质,它也就再不需固化了,因为量子力学告诉我们,在绝对零度,原子的运动并不会停止,因此在液氦体系(包括氦³及氦⁴)里,大自然制造了提供我们研究学习的“量子流体”。

氦是一个知名的气体,它的液化比许多其它气体要晚得多。但自从1908年荷兰科学家卡马林·昂内斯(Kammerlingh Onnes)成功地液化了氦气后,就为物理学开创了低温物理的新领域。氦的原子序数是2,宇宙间最常见的氦同位素是氦⁴,每一个氦⁴核子里有两个质子及两个中子,核外有两个电子。液氦⁴的沸点是4.2 K,在它的温区中,低温物理工作者曾经发现了许许多多新的物理现象,其中对液氦⁴本身的研究结果则更是振奋人心。

在2.17 K到4.2 K之间,液氦⁴是一个常流体,称为液氦I,它遵守着普通流体的规则,但当温度降至2.17 K以下时,液氦却变成了一个非常奇异的物体(液氦II),一个违反常规的流体——超流体。这个名字是苏联物理学家卡皮查(Kapitza)给予它的。他在1937年发现,2.17 K以下,液氦⁴的粘滞性明显地降为一个极小的值(小于 10^{-11} 泊,较详细的讨论见第

二章第四节，粘滞性与超流)，换句话说，在此温度之下液氦⁴的流动几乎是没有任何阻力的。从1937年到现在，我们已经发现了更多有关这个奇异流体的超常性质，同时对这些性质更进一步做了解释。这些结果给我们带来了重要的思想上的突破：超流体的这个独特宏观性质，却是量子物理性质的明确显示。在过去，这是不可思议的，量子物理效应一般在我们日常生活的世界里是小到看不见，测不出的，但液氦能通过细小的流管，它的薄膜爬出容器的现象却是肉眼可及的。

超流是完全违反直觉认识的，当我们旋转一桶水，水会因为液层间的摩擦跟着旋转。但是当我们旋转一个盛有超流液氦的容器时，容器里的一部分液体并不一定都愿意跟着旋转。超导体里的超流电子也有相似的脾气：超流电子会阻止外加磁场进入超导金属，原因是超流电子在超导体里会形成一个电流，这个电流产生的磁场恰好抵销了外加的磁场。

一直到不久前，超流现象只在氦⁴和超导金属里发现。1972年，氦³的超流性质也被发现了。氦³是氦的同位素里比较轻的一个。一般来说，同位素常有相似的性质，氦³和氦⁴都超流，也许并不奇怪。但液氦³和液氦⁴的研究却显示出这两个氦同位素有着截然不同的性质。在二十世纪30—50年代里，物理工作者认为氦³根本不会超流。现在我们知道氦³和氦⁴都超流，但原理是完全不一样的。

介绍液氦⁴、氦³-氦⁴混合溶液(主要是指氦³溶在氦⁴里的溶液)以及液氦³的发展和基本特性，是这本书的主要目的。液氦⁴是第一个被发现被研究的超流体系，我们的讨论也先从它