

现代化知识 文库

低温世界的 探索——超导之谜

DIWENSHIJIE DE TANSUO

❖ 知识出版社 / 出版

3

- 低温之最的探索
- 低温的奇妙现象
- 低温的独特奇异功能
- 未来的低温世界





现代化知识文库

倪海曙 主编

低温世界的探索

——超导之谜

张宝凤 编著

知 识 出 版 社

上 海

内 容 提 要

低温世界是个奇妙的世界，人们怀着强烈的兴趣对它进行探索。随着科学技术的突飞猛进，促进了社会的进步，同时丰富了人类现代知识宝库。对低于120K(—153℃)深冷低温的研究，目前已形成了独立的学科。在深冷低温下会出现微妙的物理现象，产生新颖的物理效应，随之广泛应用于社会实践。目前已在航天、能源、工业、农业、医学、生物、物理等方面的应用，呈现出特殊功效，从而促进了社会的现代化，造福人类。人类在向绝对零度进军中，业已获得了深冷低温，同时涌现出许多低温科学家，他们艰辛奋斗的历史是激动人心的。全书结构完整，写得通俗易懂，文笔流畅，是广大科学爱好者研究这门学科的一本入门向导。

装帧设计 王 俭

现代化知识文库

低温世界的探索

——超导之谜

Diwen Shijie de Tansuo

——Chao-Dao zhi Mi

张宝凤 编著

知识出版社出版发行

(上海古北路650号)

(沪 版)

新华书店上海发行所经销 常熟周行联营印刷厂印刷

开本 850×1035毫米 1/32 印张 3.5 插页 2 字数 78,000

1988年6月第1版 1988年6月第1次印刷

印数：1—3,000

ISBN 7-5015-5321-1/N·5

定价：1.15元

总 序

社会主义现代化建设需要知识，需要在不断更新中的现代化知识。

人类的知识是不断发展、不断更新的。现代的社会，文化科学突飞猛进，人类知识的更新速度空前加快；假定 19 世纪的知识更新周期是 80~90 年，现在已缩短为 15 年，而某些领先学科更缩短为 5~10 年。知识体系不断更新，人的知识结构也必须不断更新，进学校求得适用一辈子的知识的“一次教育”已经成为陈旧的观点。这样，不断地进行更新知识的再学习，也就成为现代人生活和工作的需要。“活到老，学到老”这句格言有了新的含义。现在，好些国家已经在研究和推行“终身教育”，又称为“知识更新教育”，它的主要方法是提供对最新知识的深入浅出的介绍，以便自学。现代化的人才要由实行全面的终身教育来造就。

人类认识日新月异，各门科学的新分支层出不穷，边缘性、交叉性学科随着发展，形成了人类知识结构的综合化和整体化的新趋向。因此，现代化社会不仅需要“专才”，而更需要“通才”，也就是具有新的知识结构的科学人才。现在许多成就卓著的科学家，极少是只限于一门专业的，他们往往在边缘性、交叉性学科领域中以博识多才取胜。当然，一个人不可能通晓一切知识的细节；但是，如果知识深广，视野开

阔，就可以具有融会贯通、触类旁通的创造能力。我国的现代化事业正需要成千上万这样的通才。

《现代化知识文库》就是为了提供知识更新的学习材料而出版的。它将系统地、全面地、通俗地介绍从自然科学到社会科学各个部门的最新成就，特别是边缘性、交叉性学科的新进展以及它的难题和解决的方向。《文库》的有些内容在国内还是第一次作系统介绍，希望它的出版对正在探索科学文化新境界的读者有所帮助。

这套文库将不断补充新的选题，分辑出版，每辑10本。编著者大多是中年科研人员，由老一辈的著名科学家担任编审。从内容到文体都将按照客观情况的发展不断更新。

知识就是力量，我们的工作希望得到大家的支持和帮助。

《现代化知识文库》编辑部

1982年5月

作 者 的 话

低温学科包括了低温物理、低温技术和低温工程三个部分,相应于理论、技术和应用三方面的内容。它是一门完整而又有自身特点的应用学科。

本书叙述这三方面的内容,使读者得到有关低温学科的基本科学知识,并从中认识到低温科学与国民经济、现代化建设之间的紧密关系,以及它的实用价值。

第一章介绍低温的含义及概念。并以低温获得的历史来叙述低温技术方面的内容。第二章叙述低温物理方面的内容。并且说明这些现象最基本的机理。同时,可使读者认识到,正是这些物理效应才使低温技术实用化。这也是低温应用的理论基础。第三章叙述低温工程方面的内容。低温技术能够应用于各学科和社会各领域,并且具有独特的功效。

这本书也可使读者了解低温学科中的重要人物——著名的低温科学家以及低温学科发展的历史。

低温是现代科学发展方向之一,低温领域的研究成果正不断渗透于各学科中,发挥其独特的功能。本书尽力反映低温学科的近代面貌,以利读者了解现代科学的信息并向科学进军!

张 宝 凤

1987年2月

前 言

在当今的世界上，人们已经把我国古代传奇小说中描述的嫦娥奔月、飞檐走壁、千里眼、顺风耳等变为事实。如今不仅人造卫星上了天，而且宇宙飞船还可以载人遨游太空、登上月球，开辟人间第二乐园。空对空导弹、反弹道导弹、洲际导弹已代替了古代的刀箭和近代的枪炮。红外和光纤技术可使人们眼观六路、耳听八方。侦察、通讯、资源、气象等卫星遍布宇宙空间、扫描全球各个角落。各国的军事设施、生活动态、资源矿藏以及气候信息都可以借助于红外遥感、光纤通讯等技术通过卫星而了如指掌。尤其是电子计算机的兴起，使人类进入了电脑世界。人们可以坐在办公室里的安乐椅上控制社会的生产、贸易、交通并进行科学研究，只有借助于科学技术的威力，人类才能更有效地改造自然、创造幸福的生活。

在科学的百花园中，低温科学以其独特的光彩吸引着人们。它是科学的百科全书中的新篇章。它兴起于60年代，风靡于80年代，目前已渗透到各学科之中。相继出现了低温光学、低温声学、低温电子学、低温真空学、低温医学和低温生物学等。它能应用于天上、地下和人间。无论是卫星的遥感探测器和海底石油资源的探测仪器，都要应用低温技术。它更与人民生活衣食住行密切相关。废品处理，食品的运输冷藏，河道的疏通，都与低温结下亲缘。而且应用低温技术研制的超导磁悬浮列车，已达当代列车行驶之最高速度（517公里/小时）。威胁人类生命的肿瘤、癌症，也可应用低温技术来诊断、治疗。低温已在近代新技术科学中占有一定的地位并呈现其重要性。本书所谈的低温是指远比冰点（摄

2 低温世界的探索——超导之谜

氏零度)温度低的温度。这一领域的物理现象具有自身的特点、规律和理论,低温技术有着奇妙的应用价值,因而形成了独立的学科。

本书介绍低温的科学知识及其进展的情况,与读者同游低温世界,以探求科学的真理。低温下,那些神秘微妙的物理现象和低温应用上的奇异功能,将会增加读者对低温科学的兴趣,并且从中得到新的知识。

第3辑10种

- 衰老生物学——长寿与衰老的探索
- 饮食营养与癌症
- 气体放电——等离子体物理的应用
- 个性心理学
- 生物工程学——过去·现在·未来
- 价值工程的发展和应用
- 发育生物学
- 市场预测
- 低温世界的探索——超导之谜
- 现代逻辑

封面设计 王 俭

目 录

前 言

第一章 低温之最的探索..... 1

- 1.开氏温标(2)
- 2.低温的温区(5)
- 3.低温之最的探索(5)

第二章 低温的奇妙现象.....28

- 1.神秘的超导现象(28)
- 2.微妙的超流现象(32)
- 3.超导现象的理论解释(35)
- 4.不凡的狄·哈斯·范·阿耳芬效应(40)
- 5.实用的约瑟夫逊效应(41)
- 6.迷人的穆斯堡尔效应(44)
- 7.新生的量子霍尔效应(46)

第三章 低温的独特奇异功能.....48

- 1.具有威力的低温液体(48)
- 2.神通广大的低温“千里眼”(51)
- 3.功能独特的低温粉碎(59)
- 4.新型特效低温农药(60)
- 5.实用的低温冷处理(61)
- 6.简便迅速的低温打捞(62)
- 7.保质保鲜的生物冷藏(63)
- 8.高度纯净的低温真空(65)
- 9.高超神奇的低温医学(68)
- 10.精确灵敏的低温计量(82)
- 11.优点颇多的超导磁体(90)

第四章 未来的低温世界..... 101

第一章 低温之最后的探索

在日常生活中,炉火给人们以温暖的感觉,而冰霜又给人们以寒冷的感觉。人们为了确定自然界的冷热程度,规定了温度的标准——温标。日常使用的摄氏温标也称为国际温标,是由瑞士科学家摄尔西斯(Celsius, 1701~1744)于1742年制定的。该温标以水的冰点为零度、沸点为100度。其间等分100格,每格1度。用 $^{\circ}\text{C}$ 来示之。水的冰点即为 0°C ,其沸点即为 100°C ,而 0°C 以下,就进入了低温世界。随着人类的探索、科学的进展,低温领域逐渐扩大,人们能够获得更低的温度。无数科学家为探索低温之最后而废寝忘食、孜孜不倦地奋斗着。

远在公元前许多年,人们已开始了对低温的探索,用人工来制冷。大约在公元1300年,我国元朝时,已用人工方法获得了 -21°C 的低温。有一次,在为意大利旅行家马可·波罗举行的宫廷宴会上,佳肴之中出现了奶酪冰淇淋。它是用冰水、食盐混合液制取的一种新颖美味冷食。制备这种冷食运用了固体物质溶解吸热相变的物理原理,而这种方法也是低温制冷的基本方法之一。人类有意识地去开拓低温世界,只有200年左右的历史。18世纪,有位法国科学家查理(Charles, 1746~1823),他原是财政部的一个小职员,但他迷上了氢气的上升现象,发奋自学,刻苦探索研究,于1783年着手进行了一系列氢气球的实验观测,终于在1785年对实验规律作了总结,建立了气体的查理定律:一定量的气体,在一定体积下,气体的压强与温度的关系为:

$$p = p_0 + p_0 \left(\frac{t}{273} \right)$$

此后，又有一位从事物理、化学方面研究的法国科学家盖-吕萨克(Gay-Lussac, 1778~1850)，在1820年提出了气体的盖-吕萨克定律，即气体的体积与温度关系为：

$$V_t = V_0 + V_0 \left(\frac{t}{273} \right)$$

这里，不约而同的是，都有273这个数。那么，温度等于-273℃时，这将意味着什么呢？这引起了当时无数科学家的兴趣。

1. 开氏温标

英国科学家开尔文 (Lord Kelvin, 1824~1907)，本名汤姆逊，开尔文是英国女王维多利亚授于他的爵位称号。在上述气体定律的基础上，提出了开氏温标。他指出：-273℃应该是冷的极端。作为他的温标之零度，称绝对零度。而开氏温标与摄氏温标之间的换算关系为：

$$T(K) = 273 + t(^{\circ}C)$$

这里K是开氏温标的标志，T是开氏温标的温度。应用这个绝对温标，可使许多物理公式简化。尤其有利于低温下的应用。上述气体查理定律、盖-吕萨克定律均可简化为：

$$\frac{P_t}{P_0} = \frac{T}{T_0}$$

$$\frac{V_t}{V_0} = \frac{T}{T_0}$$

开尔文的这一绝对温标的提出和绝对零度的概念，加速了开拓低温世界的进程。

低温下通常以开氏温标来表示温度。随着低温科学的进展，国际上也建立起低温实用温标。这是为了使各国的温度测量有个基准，使各种温度计有统一对比的标准，为便

于实用而建立起来的。1968年国际权度大会第13次会议建立了低温的国际实用温标 (International Practical Temperature Scale, 称为 IPTS-68 温标)。规定了以铂电阻温度计为 13.8~903 K 温区的基准温度计, 还制定了平衡氢 9 个温度参考固定点(表 1-1)。1976 年因低温学科的进一步发展, 又作了修正, 规定了 0.5~30 K 温区内以锗电阻温度计作为基准温度计, 又制定了氢沸点等 11 个温度参考的固定点(表 1-2), 这称为国际实用温标的临时温度 (EPT-76)。

这里, 国际实用温标是指其规定的基准温度计不是热力学温标的热力学温度计, 而是实用温度计。热力学温标也称绝对温标, 它基于热力学卡诺循环原理, 其中热机的效率 η 与物质无关而与温度有关:

$$\eta = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{T_2}{T_1}$$

由这个原理建立的温标, 仅与物质温度有关而与物质性质无关。

开氏温标就是热力学温标, 它基于气体定律中压强与温度的关系。由此制成的气体温度计, 就是热力学温度计或称绝对温度计。铂电阻温度计、锗电阻温度计是基于铂或锗的电阻与温度关系。

这种温度计显然是与其物质性质有关, 不是单一温度的函数。但是较实用, 故称之为实用温度计。以它们作基准的国际温标称为国际实用温标。摄氏温标已普遍使用, 故国际上规定它为国际温标。而低温学科却是采用开氏温标的。

表 1-1 IPTS-68定义的固定点

平 衡 状 态	国际实用温度指定值 T_{68} (K)
平衡氢固相、液相、汽相平衡三相点	13.81
平衡氢液相、汽相在33330.6帕压力下平衡点	17.042
平衡氢液相、汽相间平衡即平衡氢沸点	20.28
氮液相和气相间平衡(氮沸点)	27.102
氧固相、液相和汽相间的平衡(氧三相点)	54.361
氩固相、液相和汽相间的平衡(氩三相点)	83.798
氧液相和汽相间的平衡(氧冷凝点)	90.188
水固相、液相和汽相间的平衡(水三相点)	273.16
水液相和汽相间的平衡(水沸点)	373.15

表 1-2 EPT-76固定点

参 考 点	指定温度 T_{76} (K)	参 考 点	指定温度 T_{76} (K)
镉的超导转变点	0.519	平衡氢三相点	13.8044
锌的超导转变点	0.851	平衡氢在33330.6 帕压力下沸点	17.0373
铝的超导转变点	1.1796	平衡氢沸点	20.2734
铟的超导转变点	3.4145	氮三相点	24.5591
^4He 的沸点	4.2221	氮沸点	27.102
铅的超导转变点	7.1999		

2. 低温的温区

通常摄氏零度以下属低温。但是按其获得的方法、应用的情况以及在这些温度下所呈现的物理现象之不同,可分为:普冷、低温(深冷)、极低温三个温区。按 1971 年国际制冷会议的建议,这三个温区的温度范围为:

普冷: $273 \sim 120 \text{ K}$

低温(深冷): $120 \sim 0.3 \text{ K}$

极低温(超低温): 0.3 K 以下

在工程技术上,将获得普冷的技术称为制冷技术,而将获得低温和极低温的技术称为低温技术。本章论及的低温世界,主要是指低温和极低温的温区。

3. 低温之探索

早在 1755 年, W. 库隆(Cullen)就发明了第一台制冷机,满足了当时食品冷冻的需要。但是真正向低温进军的第一个闯将是著名的物理学家、化学家法拉第(M. Faraday, 1791~1867),他出于对低温世界的神往与好奇,结合他的科学知识及实验技术,想通过气体的液化来获得低温。物质通常有三种状态,即气态、液态、固态。例如:水汽遇冷成雾而成液体水,而水再降低温度就能结成固态的冰。同样,氯气、二氧化碳、氧气等气体也可液化,这就是自然界里物质状态变化的现象。液化气体获得低温是基于物理学中的相变制冷原理。物质的三种状态在物理学上被称为三相。其状态的变化被称为相的转变,简称相变。法拉第利用这个物理原理,在一个密封的倒置 V 型管中,一端装入氯的水合物结晶体,并用火焰加热,使氯水合物分解而放出氯气、产生高压。管的另一端浸置于冷却剂中,于是氯气在高压、

低温下凝结而成液态氯。他采用了同样的方法液化了二氧化碳,获得了 -78°C 的低温。法拉第的成果使当时的科学家赞叹不已,并纷纷模仿他的实验方法来获得低温。当时他们企图使已发现的所有气体液化,而获得更低的温度。但是法拉第与他同时代的人,虽然历经艰辛,却都惊奇地发现,氧、氮、氢、一氧化碳和甲烷这5种气体却顽固不化,不能液化。人们在失望之余给这些气体取名为“永久气体”。

在低温世界的开拓中建立功勋的开尔文,依靠他的聪明才智,继续扫清向低温世界进军途中的障碍。在他精心研究能量守恒定律的基础上,产生了获得低温的另一途径的设想。他认为若让气体通过一个与外界绝热的多孔物质膨胀,按理想气体定律:

$$PV = RT$$

(式中 R 为气体常数)

应该得到温度没有变化的结果。但是他对此怀疑,感到实际气体未必如此。因而他于1861年邀请当时在热功研究中名望很高的焦耳(J. P. Joule, 1818~1889)共同进行了这一实验。在实验中他们发现:经过多孔物质膨胀后的气体,其温度随压强差值成正比地变化。在常温、常压下,空气、氧、氮、二氧化碳等绝热膨胀后降温,氢则升温。进一步研究又发现,存在着一个转化温度,高于转化温度膨胀后升温,低于转化温度则降温。空气、氧、二氧化碳的转化温度均高于室温,因而在常温、常压下膨胀后降温。由此得出结论:要使气体通过与外界绝热的多孔物质膨胀后获得降温的效果,就必须使气体的起始温度在转化温度以下。这种获得低温的方法,在物理学上被称为焦耳-汤姆逊(Joule-Thomson)效应。这也是目前获得低温最基本的方法。同样原理,气体通过小孔,由高压到低压,在与外界绝热条件下膨胀,同样也可产生这个效应。因而焦耳-汤姆逊效应也称为节流效应。上面提及的转化温度被称为节流效应的转化温

度。表 1-3 为几种气体的节流效应转化温度。由于实际气体分子具有一定体积、分子之间存在内聚力,因而经过节流效应的气体会升温或降温。

表 1-3 节流效应的转化温度

气 体	转化温度(K)	气 体	转化温度(K)
氧	893	氢	204
氮	225	氦	621
氩	723	氖	51

开尔文的理论为探索低温尽头指明了方向,而焦耳-汤姆逊效应则使人们用气体获得低温有了实验依据。此后,人们开始向“永久气体”挑战。第一个骁将是患有胃病的瑞士科学家 R. 皮克特(Pelletet)。他企图用冷冻的方法来治疗他的胃病,凭藉对低温的酷爱,他致力于气体液化的研究。终于在1877年首次使氧液化。

同时,传说他用 $-90 \sim -110^{\circ}\text{C}$ 的低温对他的胃进行冷冻治疗,并获得良好的效果。使他食欲改善,精神振奋,他开创了冷冻医疗的历史。因此,“永久气体”的称号首先被皮克特获得液氧所破除。

另一位在征服“永久气体”征途中作出贡献的是英国皇家学院的安德鲁斯(T. H. Andrews, 1813~1885),他长期致力于“永久气体”液化的研究。但是他与其他同时代科学家一样,累遭失败。在失败之中,他总结经验教训,并且毫不气馁地转而探索另一种液化原理和方法。1869年,他从对气体的体积、压强和温度关系的研究中,获得了重大的物理发现:气体只有处于一定的温度下才能液化。他提出了临界温度的概念。这一概念阐明了气体液化的原理,并从理论上证明“永久气体”无一不可制服。关键在于要使气体置于