

绝对零度的探索

— 低温物理趣谈

K·门德尔松 著



科学普及出版社

绝对零度的探索

——低温物理趣谈

K·门德尔松 著

张长贵 孙大坤 季允豪

科学普及出版社

内 容 提 要

本书是世界著名低温物理学家门德尔松所著的世界流行普及读物，已译成10多种文字。

本书以低温发展史为背景，以向绝对零度逼近为线索，运用通俗易懂的物理图象，介绍了低温物理学全貌。前四章讲气体液化的历史，第五、六、七章讲有关低温物理的热力学、统计物理和量子力学知识，后四章讲极低温获得及超导电性和超流动性。

本书适合理工科大专院校师生、中学教师爱好物理的高中生及有关的科技爱好者阅读。

The Quest for Absolute Zero

K. Mende Lssohn

• • •

绝对零度的探索

——低温物理趣谈

K·门德尔松 著

张长贵 孙大坤 秦允豪 译

责任编辑：陈金凤

封面设计：王序德

•

科学普及出版社出版（北京海淀区白石桥路32号）
新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售
北京燕山印刷厂印刷

•

开本：787×1092毫米1/32 印张：8.625 字数：192 千字

1987年7月第1版 1987年7月第1次印刷

印数：1—3,700册 定价：1.40元

统一书号：13051·1521 本社书号：1407

ISBN 7-110-00090-7/O·2

作者简介

库尔特·门德尔松 (Kurt Mendelssohn) 是英国皇家学会会员。他1906年生於柏林，在那里他跟随着名的物理学家能斯脱(Nernst)、普朗克(planck)、爱因斯坦(Einstain)与薛定谔(schroedinger)学习物理学。于1933年来到英国牛津大学。在英国，他是第一个将氨液化的人。此后，他以教授身份参观访问了许多国家，並几次访问中国。他还出版了好几种低温物理学方面的著作。他曾任牛津沃尔夫森(Walfson)学院名誉教授。于1980年逝世，终年74岁。

AB 075/06

引 言

自从这本书1966年第一次出版到现在已经10多年了，在此期间已出现了13种不同语言的译本，这对作者来说是最为欣慰的评价。目前这本书的普及本在英国与美国已售完，但需求量仍在不断增加，很多大学教师还希望能再次买到这本书。因为在过去10年中，低温物理学的研究范围和研究方向都发生了巨大的变化，因此，我觉得若将它直接照原样再版是不妥的；对于低温物理学的历史与基本内容自然不需要改动，所以，头7章的内容基本保持不变。事实上，当我们处理10年前这本书中的有关段落时，还要考虑到这10年中技术工艺方面的最新成果。

第八章中讨论磁冷却，並注意到磁冷却方法的发展，特别是它延伸到核致冷的方面。

紧接的一章是关于超导电性方面的讨论，内容扩充颇多。对一些能证明磁通量子化的实验作了说明，並用它解释了第Ⅰ类超导体。在这里还补充了一些BCS理论的主要论点，因为它对超导电性给出了十分确切的解释。另外，在第一版中对高临界磁场的超导材料的使用曾作过一些说明，这类超导材料在生产与应用方面的发展速度确实是惊人的。在这10年中，超导技术以不曾有过的极大速度向前发展。空间技术也离不开低温。低温物理由过去那种狭窄的学术研究转变成规模宏大的研究和企业应用的联合。但是如果把人们的着眼点完全限制在目前低温物理正在着手的新方向上，显然也是不

现实的。我最初想把超导技术发展的所有情况用简单扩充第九章的办法作一全面介绍，看来这种打算是不可可能的。于是，增加了新的一章——第十章，专门介绍超导技术的各个方面。

关于超流性也增加了许多内容，即现在的第十一章，最近，发现液态氦-3(^3He)在毫开(mK)温度范围内也有超流性，这是低温物理在过去10年中的一个重大发现。它的发现对人们了解超导性和超流性具有重要意义。另外，我们还介绍了在毫开温度范围内所必须采用的新的致冷方法。

另外，象对氦-3的超流动性等有趣的最近发现证明，在低温下的基础研究是无止境的，新近的技术领域的明显变化是从纯研究向着应用转变。事实上，与30年代末期的工作相比，以及从二次大战后的研究情况看，基础理论研究的规模没有增加。对纯基础研究的兴趣明显减少，其主要原因是除了氦-3领域中有令人鼓舞的发展外，其他领域几乎没有提出什么新的基本问题。另一方面，许多有能力的富于想象力的年轻科学工作者的兴趣，被引向创造绝对零度以上几度范围内的令人鼓舞的新技术上去了。这是25年前基础研究的全盛时期所梦想不到的。

也许值得注意的是：基础研究的重心在那些日子里没有把新的应用研究放在应有的位置。一个典型的例子是英国牛津克拉仁登实验室，在超导电性与超流动性研究领域曾是第一流的，而现在，它没有一个学科是研究超导与超流的。其它一些老的实验室，也发生了类似地变化。有关液态氦-3的基本研究已转移到其它大学中去了。如美国的康奈尔大学与圣迭戈哥大学，芬兰的澳塔涅米大学以及英国的曼彻斯特大学与苏塞克斯大学等，这些学校的领导人常常是那些老的

研究机构培养出来的，他们把原来的研究兴趣带到了新的地方，这种科研重点的转移有许多原因，最主要的有两个，一是30年代低温物理研究的先驱者都因年迈而退休；二是继承他们的新一代明显地缺乏低温研究全盛时代那种敢于冒险搞尖端科学的精神，这样，低温物理的研究就成了他们实验室的一个收缩项目，他们又回到普通固体物理的常规研究中，虽然它们不象低温物理研究那样时髦。

现在，低温物理的探索者已经进入了低温技术的邻近领域，这样，可为新思想和新成就提供一个史无前例的广阔天地。根据应用工作的特征，要使低温物理研究摆脱过去那种死气沉沉的气氛，而去与熟悉生产过程的工程技术人员相结合，所以他们的工作已转移到技术大学中去了。更重要的是实验室直接与政府或工业部门紧密地联系起来。

于是，从这本书第一版到现在再版的10年中，不仅有一些新的重要发现，主要表现在低温研究方向产生了根本的转移。现在还在转变中，可以充满信心地预计到，在几年的时间里，低温的研究将从大学实验室被吸引到技术发展中心去。在这方面，我们还刚刚开始，将来会产生怎样的结果，现在预言还为时过早。就低温的基本研究而论，这本书要比10年前的第一版更切题，更完整。

K·门德尔松

一九七七年

目 录

引言

- 一、 1877年在巴黎·····(1)
- 二、 1883年在克拉科夫·····(19)
- 三、 1898年在伦敦·····(44)
- 四、 1908年在莱顿·····(67)
- 五、 热力学第三定律·····(83)
- 六、 量子化·····(103)
- 七、 不确定性·····(124)
- 八、 磁冷却·····(147)
- 九、 超导电性·····(174)
- 十、 接近绝对零度的技术·····(205)
- 十一、 超流动性·····(227)

一、1877年在巴黎

我们的故事从1877年圣诞节(12月25日)前夕开始,地点是在巴黎的法国科学院的会场内。在一个星期之前,就传说有一项重要的发现要宣布,这时与会者虽按常规办着各项公务,但却都以焦急的心情等候着这个消息,科学院秘书M·杜莫斯(Dumas)终于象报幕员一样站起来宣读了拉瓦锡(Lavoisier)著作中一段话作为开场白:

如果把地球放到太阳系中较热的地方,比如说这地方的环境温度比水的沸点还要高,那么所有液体甚至某些金属都将转变成气体进入大气中。另一方面,若把地球放到很寒冷的地方,例如靠近木星或土星的地方,那么我们的河流和海洋中的水都将变成冰山,空气,或者至少是它的某些成份,不再护持为肉眼看不见的气体,而转变成迄今为止我们还不清楚的新液体。

自从伟大的化学家写下这段预言以后,经过几乎一个世纪的努力,想在实验室内创造出拉瓦锡的“新液体”的尝试都失败了。现在将要宣读的重要消息,是氧气的液化,在通向绝对零度的征途上这件事无疑是一里程碑。

这个消息的创造者是一位新当选的科学院通讯会员。他是塞因河畔夏蒂隆的一位采矿工程师、名叫盖勒特(Cailletet)。起初他和许多前辈一样,希望利用高压使气体液化。他首先选择乙炔(C_2H_2)作为试验物质,因为有人推测在室温下

用大约60个大气压力就足以使乙炔变成液体了。然而，在达到这个压力之前，实验用玻璃管破裂，压缩气体从裂缝中泄出。盖勒特意外地观察到在乙炔气体外泄时玻璃管内有微量的雾形成，产生后又立即消失。当时，他先怀疑乙炔气体不纯，看到的雾可能是水的微滴。为了确定这一点，他使用有名的白德劳 (Berthelot) 实验室供应的很纯的乙炔，重做实验，雾重复出现。可以毫不怀疑地认为是乙炔被液化了。盖勒特得出结论：气体压力急速降低时使乙炔突然冷却，因此他见到部份乙炔气体被凝聚。随即这些凝聚的气体被室温又气化了“祸兮福所依”，盖勒特的不幸事故为他提供了气体液化的新技术。

在获得了上述经验之后，他立即开始了一项重大的研究课题：空气液化。他先选择氧气，因为当时能够容易地得到很纯的氧气。他将纯氧压缩到大约 300 大气压，并同时用二氧化硫液体在盛压缩氧的厚玻璃管周围蒸发，使之冷却到 -29°C 。然后，突然降低氧气压力，盖勒特再次观察到凝聚薄雾。多次实验使他确信，薄雾不是由于杂质造成的，是氧液化了！他将这实验的说明交给科学院。科学院要宣布的重要消息，就是这份实验报告。

然而，盖勒特论文刚宣读完，科学院秘书又站起来宣布，比盖勒特论文还早两天，即12月22日，科学院收到一位物理学家从日内瓦发来的电报。电文是：

今天，在320大气压下，用亚硫酸与碳酸相结合的方法，使氧冷却降温 140 度时，氧气被液化了。

R·毕克特

这一简短的电文说明，毕克特 (Ranulpictet) 发出消息较早，也意味着他先盖勒特一步、把氧液化。他没有发现盖

勒特取得成功的诀窍，他采用逐步逼近冷却法使氧液化；每步液化不同的气体，作为下一步的预冷，最后将氧液化，这就是著名的“级联”液化法。关于这方面的问题，留待以后讨论。重要的问题是毕克特与盖勒特在相同的时间里，用完全不同的方法达到同样的目的。

它不是发现的偶然重合，科学史提供我们许多这样的例子：在大致相同的时间里有两个或更多的人各自独立的完成相同的发现。当我们说，“独立”时，实际是指不可能相互抄袭或者看过他人的成果。当把科学知识状况作为一个整体来考虑时，这些发现决不是独立的。科学的发展不是靠一系列幸运的偶然事件。它是一种有机的成长过程，因此，不可避免地在各个发展阶段上要有所发现。盖勒特如果不是把注意力集中在气体液化上，他是不会看到那种乙炔气体冷凝薄雾的。如果他抓不住出现薄雾的实质，也会有别人马上注意到它。正是如此，才有毕克特走另外的路达到相同的结果。在后面将看到，尽管我们的故事是以1877年圣诞节前夕的二重奏开始的，可是演出早已经安排好了，宏大的开场必定正好在当时来临。

这种不可避免地在适当时间取得成功的科学进展引起一个棘手的问题：即成功的前后次序。人尽皆知大量荣誉属于首先作出发现者，人们知道够多的近于并驾齐驱的竞赛的情况，这种比赛有一定的规则，这种规则在不同的时间和不同的国家虽然略有不同，但是都是以某种正式公布先后为准。法国在盖勒特和毕克特的时代，就是向科学院报告备案的时间为准。根据毕克特的电报，他肯定实验成功的日子是12月22日。勒盖特又怎样呢？他的那篇论文宣读的时间确实是12月24日。他的决定性的观测是12月2日作出的；纯粹是因为

个人的原因，在12月3日、10日甚至17日的科学院会议上没有宣布这一重要的发现。盖勒特处于左右为难的境地。他准备在12月17日会议上竞选科学院通信院士，他明智地认为，在那天或前不久的会上宣布这个轰动一时的结果，是不光彩的做法。选举是有争议的，他那样做会被认为是试图影响投票人。另一方面，只要不在科学院正式公布，别人也就无法知道了；而他已安排在12月16日，星期六，在巴黎的埃科尔·诺玛尔，在应邀的同事面前演示他的氧液化实验。在第二天的科学选举中，他以33票赞成，19票反对当选为科学院通信院士。

现在，这一重要宣布确实是在12月24日作出的，而毕克特的电报又确实是12月22日。看来盖勒特是失去了他的发现的优先权。然而，故事的结果是喜剧性的。在12月2日这天，盖勒特在塞因河畔的夏蒂隆做完了他的决定性实验；他给在巴黎的朋友圣-克莱尔·戴维 (Sainte-Claire Deville) 写了一封信，在信中给出了这个发现的完整记录。信是3日到达巴黎的。圣-克莱尔·戴维立即将信送到科学院常务秘书处。根据这封信的署名日期与密封邮戳的时间，现在盖勒特正式成为第一个将氧液化的人。

毕克特在他的第一次实验报告中，关于他的实验的最终温度只字未提。盖勒特已估计在他的膨胀过程中，气体温度下降了约摄氏200度；作为很粗略的猜测，这误差并不太大，在那个阶段温度的降低从来没有这样大。在值得纪念的12月24日的会议之后一个星期，盖勒特又将氮液化了，这样，地球表面的大气就能被液化了。这是他在圣诞周里取得的又一重要成就。

阿蒙顿 (Guillaume Amontons) 生活在17世纪后期，看来是他第一个提出绝对零度的概念的。他是玻义耳与马略特

稍迟一些的同时代的人：玻义耳与马略特也曾各自独立地证明：当空气被压缩时，空气的温度随压力增加时它的体积按同一比例减少。阿蒙顿在幼年时就失去了听觉，而他的一生完全献给温度的研究与测量事业。在他创制一种可靠的温度计的努力中，他用为水银柱所禁闭的空气体积来指示温度。他测量了在体积不变的情况下，空气压力与温度变化的关系，这样他就扩展了玻义耳和马略特的工作。他是从水的沸点开始他的测量工作的。他注意当温度以相等量下降时，造成空气的压力也以相等量减少，即温度与气压成正比。从这一事实出发，他得出结论：当进一步冷却空气，温度为某一确定值时，空气的压力应该变成零。他估计这个温度为 -240°C 。因为气体的压力不能变成负值，所以气体的温度也必然存在最低温度。到此温度，空气或其他任何物质不能再冷却。阿蒙顿就领先于查尔斯和盖·吕萨克在法国的工作；后二者在一个世纪后再一次独立地用更严格的形式提出这一定律。他们指出，温度每降低一摄氏度的压力降低等于冰的熔点即 0°C 时气体压力的 $\frac{1}{273}$ 。所以最低温度应是 -273°C ，这叫做“绝对零度”。

阿蒙顿设想在绝对零度时，所有运动都停止，完全处于静止状态；这是有意义的。这个事实是重要的，因为它给出了他关于热的本质的认识的一种暗示。热与温度的意义以及关于它们的专门测量使17、18世纪的科学家遇到一些棘手问题。他们曾问自己，“热”的本质是什么？在火焰上加热到刚好沸腾之前的水的物理状态，很明显与冷水是不同的。这一点能用阿蒙顿的温度计指示出来。同时，某些东西已进入水中去了，这某些东西是由火焰供给的。炼金术的传统说法

是来自火焰的某种“火原”进入水中。采用另一种方法，一个热的铁块放入水中，水的温度也会升高。对所有这些观察的似是而非的解释，可以通过假设存在一种所谓“热质”的流体来作出，它的唯一性质是热和当两物体接触时它可以从一个物体流到另一个物体。因此热质先从火焰传给铁块，接着再从铁块传给水。关于它的浓度是用温度计来测量的；并与任何流体一样，它必然从浓度高的物体流向浓度低的物体。最后，铁块和水具有相同的温度，这也意味着具有相同的热质浓度了。这种关于热的物质性的概念的最大优点，是允许定量描述。例如，能够用某一单位测出热质的数值。1克水的温度升高一度时所需要的热质叫做1个卡路里(简称卡)。热质的麻烦是，它是没有重量的流体，因为发现一块铁加热以后并没有变重。这件事使它难以与我们物理世界图景中的其他量一致起来。

在19世纪初期，最终抛弃了作为没有重量的流体的热质说，但是，从它以不太清楚的形式保留到今天的事实，说明这个概念还是有用处的。例如，用焦耳为单位的热的概念与另外一些概念，诸如温度、压力与体积等构成了今日热力学的基础。

热力学的威力就在于使用这些很好定义的物理量，它们能容易地、不含糊地测定。又有简单而直截了当的公式把这些量联系在一起，成为解决许多莫明其妙的科学与技术问题的钥匙。由于热力学具有普遍的性质，使得这些问题的解决极为容易。

从现在起热力学概念将在我们的故事中不时出现。它们与热的原子解释即分子运动论，是平起平坐的。热力学中所用的一些量是：温度，用温度计测量；压力，测量单位面积

上所受的力；体积，测量容积的尺寸。所有这些物理量的观察尺度都比个别原子大许多百万倍。在热力学中，热量的基本单位是焦耳，它是一克水，温度升高四分之一摄氏度（更精确地说是 0.239 度）时所需要的热量。这个定义与热的物理性质是无关的。它可以是没有重量的流体或其他东西。

阿蒙顿作为静止状态来讲述绝对零度告诉我们，实际上他想到的不是假设的物质“热质”而是某种东西。这个其他东西就是原子尺度的运动。在阿蒙顿之前 2000 年，德谟克里特 (Democritus) 就主张，所有物质是由很小的、不可分割的结构单元——原子组成的。从那时起，原子理论虽然有其起伏，但是始终没有被完全放弃，它的吸引力之一是，不用没有重量的流体，仅需以当时已知的力学定律为基础也能解释热。牛顿与阿蒙顿是同时代的人；应用描述天上和地上物体运动的牛顿定律去描述那些称为原子的假想小粒子的运动，是唯一自然的。阿蒙顿似乎没有能跳出这个含糊不清的讲述，但是，在 1738 年伟大的瑞士数学家与科学家丹尼尔·伯努利严格地处理了这个问题。在他的关于“流体力学”的著名论文里，他假定，所有“弹性流体”，例如空气，是由许多很小的作不停的无规则运动的粒子组成的，这些粒子之间以及粒子与器壁之间在不断地碰撞。因为碰撞是完全弹性的，所以运动不会减速。这些粒子的行为有些象网球似的；所不同的是这些粒子根本不会感到“疲劳”。当这些象网球的每一个粒子落到容器底部时，在任何时候，它会一再反弹回到最初的高度。碰撞的激烈程度和各个粒子的速率，作为热感被我们感知。碰撞越激烈，粒子平均速率越高，则温度越高。

伯努利指出：这个理论得到的结果与阿蒙顿在 1702 年的

实验达到的结果一样。

用动力学来解释热现象是很成功的；倒不是因为它特别简单，而是它能用熟悉的力学名词透彻地解释热现象。不需要象没有重量的热质这样的新概念。

物理世界已建立了自洽的和完整的方案，这是科学上的基本信条。因此，我们指望我们所有的观察，不论看起来它们对我们怎样无联系，它们必定是这种模式的一部分。这种模式的发现是所有基础研究的唯一目标。当我们仍然忙于发现新现象时，迄今我们的工作仅仅是开始；因此，我们知道，即使我们是非常聪明的人，也不能指望形成这个模式的概念。这就好象小孩子堆积木，我们现在知道我们甚至还没有得到所有的积木块。既不知道这个积木组合到底有多大，也不知道有这种积木的规模可能是无穷大的不舒服感觉。考虑到事情的这种情况，当我们在这里那里找到了几块积木，并且配搭在一起，形成一些模式的小岛，（虽然现在还看不出这些小岛与其它岛屿的联系）的时候，我必定认为自己非常幸运。当我们能够把两个岛屿联接起来的时候，实际上就赢得胜利。借助于分子运动论，把热现象和力学定律直接联系起来，就是这种胜利——在科学史上是最大的胜利之一。

尽管如此，经过一世纪，伯努利的分子运动论才被人们接受，我们能够容易地知道其中的原因。热感觉的解释是这样作出的：肉眼看不见的微小粒子的速率就好象数量巨大的针刺一样撞击我们；这种解释是有说服力的。而且，如同我们将马上看到的那样，玻意耳与盖·吕萨克从实验上发现的气体的体积、压力与温度之间的关系，可以作为分子运动论的简单和直截了当的结果出现。然而，热量又如何用原子

运动来表达呢？人们能直接看出，把热量看成是一种无重量的流体，它可以从一个物体流入另一个物体，这是非常方便的。而且打过弹子球的人都知道，要预知两个以上的球之间的碰撞已是很困难的，更何况要从数学上来处理亿万个高速运动粒子之间的碰撞呢？仅当这个最后的问题得到满意的解决，分子运动论才是有效的。然而热力学的功能是把物体的宏观性质互相联系起来。只要人们不要求用严格的物理学模型来解释，总可以用热力学来处理；它的解答可能意义不很明确，但结果总是对的。

直到今天，在热现象方面仍有许多问题，它们用热力学去解答困难并不大，但是用分子运动论去解释是相当棘手的。无论在什么时候，只要条件选为我们可以把分子或原子视为完全弹性的网球，分子运动论便给出一幅清楚而又简单的图景；但是，一旦我们考虑了这些网球之间的相互作用力，困难就成为难以克服的。另一方面，要想从大量的分子或原子之间碰撞中计算个别分子或原子运动更是不堪设想。

到了19世纪后半期，麦克斯韦与玻尔兹曼采用统计的方法，克服了大量粒子碰撞产生的看起来可怕的数学上的困难。统计方法源出于政治经济学，这个名字就意味着它是从处理大量的人类社会问题的过程中得来的。和其他大多数处理社会问题的方法一样，它不考虑个别值，而是取它的大数量的平均值。正如预算考虑平均收入和保险公司考虑人的平均预期寿命一样，分子运动论考虑平均速度。即使有些人死得比平均寿命早，也不会使保险公司受损失，因为必定有另外一些人活得比平均寿命长。无论在什么时候，在一种气体中，都有一些原子或分子的速度比平均速度高得多，而同时也有另外一部分原子或分子的速度比平均速度低得多；只要在