

通往绝对零度之路

林 熙

(北京大学 100871)

(一) 文明与低温的最初交汇

古代的文化常有传说。现代的科学文化却独辟蹊径,依靠实验和逻辑来了解世界的真相。

人可以分辨冷热的能力似乎不需要考证,也许也无法考证。类似于烧火取暖和蒸发、凝结这些热学现象在有文字记载之前已被人类了解。对热源的利用是衡量人类文明的标尺,陶器、青铜、冶铁这些伴随着高温环境的技艺贯穿了文明的进程。《周礼·冬官考工记》中有利用光学信息判断温度的方法,起源于唐朝孙思邈的“炉火纯青”一词也很好地体现了古人对热源使用的经验。摩擦、聚光和敲击等生火的方法也被熟知和推广。生活中对冷源的利用很常见。哪怕在没有冰箱的地方,人们也会采用天然的低温环境,例如,在低于冰点的温度下保存食物。与对高温的使用相比,可能古时候的人们很难想象材料的性质会在冰点以下发生显著改变,而更容易猜测更低的温度让材料的性质不再改变。从利用天然的冷源到人工获得更低温度的环境,人类花了漫长的时间。开始于人工制冰和寻找永久气体,人类踏上通往绝对零度之路。

1. 中国历史中的冰

古时候的人们对冷源的利用围绕着天然冰的存储和使用,最初的目的可能是延长食物的存储时间。人们主动利用低温环境的历史不容易留下考古活动可以发现的痕迹,我们只能从各种文字中侧面了解。因为我没有能力获得和看懂国外的历史文本,所以本文仅围绕中文历史文献对低温环境的

长期利用做一个简短的介绍。

我们的祖先将天然冰作为冷源有清晰的文字记载。《周礼·天官冢宰》中有“凌人:掌冰正。岁十有二月,令斩冰”的记载,周朝已有专职从事取冰、用冰的人员——“凌人”,其职能包括“夏,颁冰”。这个职位在记载中与“掌酒之政令”的“酒正”和“掌盐之政令”的“盐人”并列,可见利用天然冰的常见程度。如果把不通风且不被光照的冰窖建在地下,那么冰块可以长时间保存,凌阴就是藏冰的冰窖,也被称作凌室、冰井。《诗经·豳风》中著名的“七月流火,九月授衣”描写了季节的更替,这一篇的结尾就有“二之日凿冰冲冲,三之日纳于凌阴”的描写,它记载了古人收集冰块和储藏冰块的经验。我们今天依然在使用“凌”字的这个释义,例如,将其组词为“冰凌”和“冰激凌”。凌汛就是因为冰对水流产生阻力而引起的江河水位明显上涨的水文现象。

因为古人知道如何采集和存储天然冰块,所以古文中有“赐冰”这个给官员分发福利的叫法。有些文人写下“官微罢复久,赐冰胡可得”和“每岁长安犹暑热,内官相属赐冰回”,而陆游写下不一样的“扁舟归去应尤乐,莫羡金盘赐苑冰”。“赐冰”也做“颁冰”,这个说法可能出自《夏小正》的“颁冰者,分冰以授大夫也”。关于中国古代用冰最知名的文字记录也许来自宋代,因为下面这首诗曾出现在小学诗词读本中:

稚子弄冰(杨万里)

稚子金盆脱晓冰,彩丝穿取当银钲。

敲成玉磬穿林响,忽作玻璃碎地声。

文字记录之外,考古工作者曾发现来自春秋战

国时期的地下室痕迹,这些地下室可能是被用于储冰的凌阴遗址。明清之后可以确认的存冰场所就非常多了:知名的地方包括北京的雪池冰窖和恭俭冰窖,它们现在是北京市的重点文物保护单位;德胜门附近曾有冰窖,现在那附近有一个叫冰窖口胡同的地方;紫禁城和畅春园也毫不意外地建有冰窖。

2. 获得冰还是制造冰

尽管古人习惯于藏冰和用冰,但无法大规模造冰。《庄子·杂篇·徐无鬼》中记载“我得夫子之道矣,吾能冬爨鼎而夏造冰矣”,如果“爨”取烧或者做饭的意思,那么此处的“夏造冰”似乎没有什么可以令人强烈信服的理由。《关尹子·七釜》中记载“人之力,有可以夺天地造化者,如冬起雷,夏造冰”,随后行文的“死尸能行,枯木能华……皆纯炁所为”也让这个记载没什么可信度。《淮南子·览冥训》中有“以夏造冰”,《淮南万毕术》中有简略的制冰过程,现代的人们依据这些记载对古人是否实现过人工制冰存在争议。无论如何,文言文的叙述习惯和古时候对工艺的不重视,让这些技术就算实现过,也迅速失传了。有人还猜测古人可以利用化学反应的吸热制冰,例如,利用硝石制冰,但我不知道有什么可靠的记载可以支持这个观点。如果不是制冰,而仅仅是利用硝石制冷,则非常可能曾被观测到,因为在各种炼丹的操作中,硝石是常见原料。以可能来自汉朝的炼丹专著《三十六水法》为例,三十六个配方中出现了三十三次硝石,最多的一个配方用了三斤硝石,这里的斤是古代的单位,约为四分之一千克。

古代中国并不是没有关于物理实验的历史记载。《墨经》中有力学和几何光学的讨论,《梦溪笔谈》中有声学、光学和磁学的讨论。可能不太出名的宋代《革象新书》中有许多天文和光学相关的讨论,其中的《革象新书·小罅光景》详细描述了一个光学实验。历史记载中,其他零散的符合物理规律的观点和描述物理现象的文字想必还有很多,我听

说过的信息只是沧海一粟,而且很多典籍也必然已经失传了。但是,《墨经·经上》中那一句著名的“力,刑之所以奋也”也好,了不起的王允在《论衡》中提到的“聚日取火”也好,这些我知道的例子主要是对客观世界规律的一种描述。沈括在《梦溪笔谈·补笔谈卷》中有“以磁石磨针锋,则锐处常指南,亦有指北者……南北相反,理应有异,未深考耳”,他愿意写下“未深考耳”这四个字极为难得。我们在古籍中,除了《墨经》和《革象新书》等少数例子外,更常见到读书人觉得读通了经典著作就对世界无所不知的态度,而这种态度恰恰不会欣赏和看重来自实验的验证。此外,我们不得不承认很多历史记载有多种释义,极难理解,也许我们现在的阅读困难来自古时候纸张或者竹简的供应紧张,也许来自古今思维习惯上的差异。总而言之,我们已经很难再去确认古代是否有制冰的技术手段,我们只能判断,古代大规模制冰一定远远难于存储天然冰。

3. 从使用冰到热学

虽然古人可以使用存储的天然冰,但冰的使用者也不会是寻常人,对冷源的利用只是属于特殊阶层的奢侈享受。如今,我们普通劳动者能用得上空调、吃得起冰棍,还是得益于现代热学和制冷技术的发展。家用冰箱从20世纪40年代之后慢慢普及,于是冷冻食物可以归于家庭用品而不再归于奢侈品。家用制冰器出现于20世纪初,于是人们可以足不出户得到冰块。商业化制冰器发明于19世纪中期,于是冰块的获得开始变得简单。我们如今已经习惯了空调的使用,最早的电驱动空调出现于20世纪初期,最早的利用机械制冷对空气降温可能出现于19世纪中期。所有这些我们普通人能得到的冷源便利,都可以追溯到18世纪中期,因为那时卡伦利用乙醚蒸发获得了冰。

卡伦的工作是现代制冷的源头,但还不是低温学的源头。低温学的源头,出现在19世纪中期,那时以法拉第为代表的一群人开始了对各种气体的液化尝试。如果说通往绝对零度之路的起点是制

冰与气体液化,那么热学就是这条道路的路基。

热学是研究宏观物体各种热现象的规律和相互联系的一门学科,它的概念比较抽象,所以热学不论是理论上的进展还是实验上的进展都落后于力学。直到19世纪中期,热学的两大理论体系才逐渐成形:热力学是热现象的宏观理论,统计力学是热运动的微观理论。在17世纪开始发展的测温学和18世纪开始发展的量热学为热学研究做好了实验上的准备,帮助当时的人们建立了我们如今所理解的热力学。从伽利略时代到热力学第三定律提出的20世纪初期,一群伟大的科学家大约花了三百年的时间搭建了热力学的框架。热力学不考虑物体内部的微观结构,只是根据实验观测判断宏观物理量之间的联系。热力学的建立系统地推进了人类的降温进程。

(二) 制冷的起点是热学

热学是关于温度的科学。通过经验总结,人们提出了热力学第零定律:与第三个系统处于热平衡的两个系统,彼此也处于热平衡。或者说,存在温度这个物理量,它反映了一个热学系统的宏观性质。这个我们看似熟悉的物理量实际上是一个非常复杂的概念,它把复杂体系中大量粒子的运动抽象为一个数值。对于当时的科研人员来说,他们从未在熟悉的动力学问题中处理过这个概念。基于温度而不是热量,热力学被建立起来;而热量,只是系统和外界之间因为存在温度差异而转移的能量。

1. 测温学与量热学

对宏观热学现象最初的研究离不开对温度的测量,而热力学第零定律仅给出了比较温度是否相等的方法,人们还需要一个判断温度高低的方法。测温学需要从一个伴随温度连续变化的物理性质开始,人们最容易想到的性质就是热胀冷缩。传闻中,菲洛曾演示过空气的热胀冷缩。根据记载,伽利略可能在1592至1603年之间曾利用空气的热胀

冷缩发明了第一个温度计。在伽利略的设计中,空气被水封闭在玻璃管中,人们通过观测水面的位置判断空气的体积。1632年,雷伊改进了伽利略的设计,他将液体的热胀冷缩作为测量温度的方法。这两个早期温度计的读数都受大气压强数值波动的影响。玻璃管密封前装上酒精的温度计出现于1657年之前,这样的温度计的读数与大气压强无关。1657年,意大利玻璃工坊的技术人员可能制造过利用玻璃管密封的水银温度计,但是该温度计并未受到重视。有记载说,布略受密封酒精的温度计启发,于1659年制造了密封水银的温度计。也有人判断水银温度计的推广源自1714年华伦海特的贡献,认为他是第一个知道如何制作可靠的水银温度计的人。

获得了随温度变化的性质的信息之后,下一个重要的问题是如何建立一个通用的温度标准,也即如何确定温标。由于温度这个单位的复杂性,温标无法像长度或者质量的早期定义一样,通过某个实体来统一标准。玻意耳和牛顿都曾对温标做出过贡献,例如,牛顿将冰的熔点和人体体温之间的温区分为十二个区间,以用于标定温度。之后,出于实际生产和生活的需要,测温学在十八世纪发展迅速,那段时间产生了两个我们如今还在使用的温标:1724年的华伦海特温标和1742年的摄氏(摄尔修斯)温标。有趣的是,我们熟悉的摄氏度的定义与摄尔修斯原来的定义相反,那时他规定了沸水为零度、冰水混合物为一百度。现在的摄氏度的定义来自1743年克里斯汀的更改。

需要指出的是,人们对温度的认知是一个漫长的过程,现在我们所理解的温度的概念比测温学出现得更晚。一些物理学家为温度这个概念的形成做出了贡献。卡诺于1824年提出卡诺循环,这是对热力学规律进行研究的雏形。开尔文于1848年提出了用固定点和卡诺循环来确定温度的热力学温标,这个温标被称为开尔文温标,其单位是开尔文(K)。定义了温度的热力学第零定律之所以排序为零,是因为它过于重要,而被提出时人们已经命名

了其他热力学定律,这也是人们对温度和热等概念认识过程曲折的体现。

量热学的发展允许人们用实验手段严格地、定量地研究热学。在早期的水混合实验中,有人将等体积、不同温度的水混合,知道了水的末态温度正好是不同温度水的平均温度,于是人们得到了热量守恒的最初表达:热量既不能被创造也不能消失。更多的高低温混合实验现象逐渐表明了比热的存在,然而这些实验真正被理解需要等到布莱克指出温度和热量的差异之后。布莱克于18世纪60年代在制冰实验的过程中,注意到了固化和液化过程中存在用温度计难以测量的能量转移,并将这部分能量称为潜热,意思是隐藏的热量。与潜热对应的热量就是能被温度计测量的显热。布莱克的工作是和伽利略发明温度计同等重要的热力学实验的起点。

2. 热质说与能量守恒

拉瓦锡和拉普拉斯也开展过一系列比热测量,并且意识到热容不是物体所含热量的绝对数值,而是改变一定温度所需要的热量。拉瓦锡通过实验否定了18世纪初期非常流行的认为物质燃烧时释放燃素的燃素说,提出了热质这个词(燃素“phlogiston”的词源是“phlog”,在拉丁语里是火焰的意思;热质“caloric”的词源是“calor”,在拉丁语里是热的意思)。他的实验帮助人们接受了物质守恒的概念,而他自己将热质当作组成世界的基本元素之一。量热学澄清了热学的基本概念,也恰好支持了把热当作特殊物质的热质说。

热质说被高度认可的同时期,少数实验现象开始质疑它是否成立。18世纪,有人相信热是能量流体,有重量,所以开始了对热质重量的探索,然而出于这个目的的实验都没有成功。伦福德通过大炮钻孔的摩擦实验否定了热量守恒。随后戴维开展的摩擦熔冰实验也质疑热质说。大炮钻孔和摩擦熔冰这两个实验中的热量来源被归结为机械运动。

19世纪三四十年代,一大批科学家独立地通过

力、光、磁等不同形式能量之间相互转化的研究,提出了类似的能量守恒概念。1842年前后,迈尔通过对已有比热数据的计算提出了热学中的能量概念和能量守恒,他将水升温与等重量物体从一定高度的下降联系起来,得到的热功当量大约是当今准确值的85%。

能量守恒的提出不等于热质说的消失,热质说还需要更长的时间才会被抛弃。发现电流能产生热量的焦耳开展了三十多年的热功当量实验,他最终给出的热功当量数据与当今的准确值仅相差0.5%。焦耳的实验方法包括重物下降、做功、通电和摩擦,他研究了这些做法引入的能量和水温变化之间的关系。焦耳证明了绝热过程中外界对系统做的功与做功的方式无关,这些实验支持了能量守恒。

3. 热力学第一定律与第二定律

焦耳三十多年的热功当量实验给能量转化提供了最强有力的支持,热功当量联系了热学和力学这两门独立的学科。焦耳在不清楚热物理本质的情况下,提出了热量并不守恒、热量和功一致的观点。当时的人们并不知道气体分子机械能的知识,但依然建立了热力学这个物理分支。1845年前后,克拉珀龙等人开始讨论机械功和热量之间的关系。1847年,亥姆霍兹明确指出了功和热量都属于能量,并且能量守恒。1850年,克劳修斯给出了热力学第一定律的数学表达式。

能量这个概念被建立和推广之后,人们不再需要热质说。自热力学第一定律被广泛认可之后,热量只会被归于一种能量,而不再被当成一种物质。自焦耳的实验之后,人们公认能量守恒与转化定律是自然界的普适规律,它适用于一切形式的能量:能量可以有不同的形式,可以由一种形式转化为另一种形式,可以由一个物体传递到另一个物体,在转化和传递的过程中能量的总量不变。之后,在相对论出现时,爱因斯坦把能量守恒与质量守恒统一了起来。

克劳修斯在分析卡诺的工作并总结出热力学第一定律的过程中,还思考了热量流动的方向,提出了熵的概念,并总结出热力学第二定律。热力学第二定律的出现有内在的必然性。从卡诺的时代开始,关于热机工作效率的思考有着很强的现实驱动,不同于传统的水力驱动做功,作为热机能量来源的煤炭是有成本的,卡诺用了非常抽象但精巧的分析去讨论这个现实问题。卡诺从温度的角度去分析热机的效率,这样的做法并不是那么显然的研究切入点,因为当时的人们很难知道水蒸气的温度。虽然我们现在清晰地知道需要存在温度差异才能做功,但在那个年代,人们很难意识到没有“冷”的“热”是无用的。需要指出的是,卡诺的论证基于错误的热质说。

克劳修斯自己并没有命名他的这两个总结,我们习惯的热力学定律一词的英文“law of thermodynamics”的叫法来自兰金。热力学第二定律的形成过程比第一定律更加复杂、曲折,如果说第一定律让人清晰地知道能量的概念,那么第二定律则让人困惑自发过程的不可逆性,对第二定律的讨论甚至被扩展到物理学之外。在吉布斯和亥姆霍兹等人的共同努力下,热力学这个方向的框架被搭建起来,成为了一门与力学、光学和电磁学并列的基础学科。热力学一词的英文“thermodynamic”可能来自1848年开尔文的创造,并在兰金的帮助下推广,而统计力学一词的英文“statistical mechanics”可能由吉布斯首先使用。

4. 历史上的探索进程

在1798年伦福德的实验之后、热力学第一定律被广泛接受之前,热质说其实一直很被认可。除了摩擦实验外,热质说可以解释当时大部分的实验现象。例如,站在当时的科研人员的角度,他们可以认为热平衡是热质不均引起的扩散的最终结果,辐射来自纯热质的看不见的传播,对流来自载有热质的颗粒的流动。在热质说的年代,傅里叶建立了热传导理论,卡诺提出了卡诺循环和卡诺定理,瓦特

改进了蒸汽机。从克拉珀龙和开尔文分析卡诺的工作,到1850年克劳修斯提出热力学第二定律,热质说一直活跃于当时的学术观点中。

本文讨论热质说,是为了表达一个不新鲜的观点:当年的科研人员在迷雾的边缘探索,他们对热学的了解远比我们从教科书中获得知识困难得多,因而从利用冰到制冰、从制冰到获得更低的温度并不是一件轻松的事情。图1列举了部分热学实验和规律总结的时间点,以说明热学知识体系建立过程的曲折。

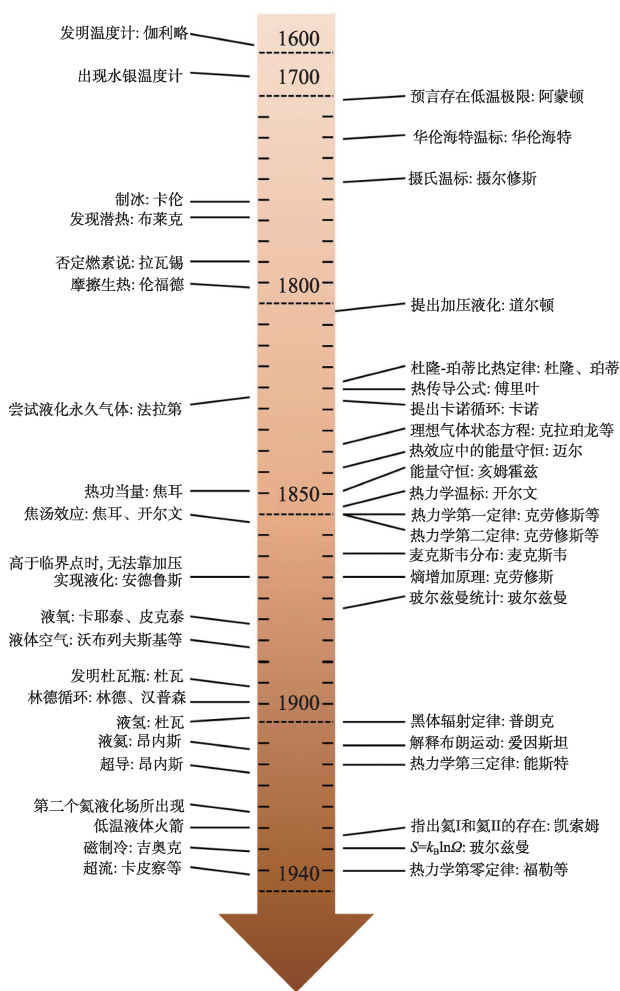


图1 制冷进展的早期线索与时间节点。显然,这个图无法包含所有的重要工作,而是仅体现了与本文相关的小部分工作,但是这些工作出现的先后顺序已经足以使我们想象到热力学建立过程的艰难

(三) 液化的挑战与成就

气体(gas)这个词出现于17世纪初期,其词源的含义是混乱。19世纪,在室温条件下依靠对气体等温加压,人们获得了许多新液体。那些在室温条件下不能依靠加压成为液体的气体,当时被称为永久气体。我们现在已经知道不存在零温极限下无法液化的气体,因此不再使用永久气体这个概念,或者仅用它描述在室温条件下不能依靠加压液化的气体。低温物理学产生于永久气体的寻找过程中。

1. 先行者们

据说1784年拉瓦锡曾预言如果地球被挪到太空中更冷的位置,那么大气或者部分大气将以一种人类当时未知的液体形式存在,这个思路鼓励着很多人尝试液化新气体,以及获得更低的温度。18世纪末,蒙热通过加压和用冰冷却,液化了二氧化硫。马伦对氨气加压并观测到了不符合气体定律的体积减小,这实际上是氨气液化的迹象,不过他当时好像没意识到加压引起了液化。19世纪初,道尔顿提出了加压液化的思路。

1823年,法拉第对密封玻璃管进行局部加热,使玻璃管中密封的氯气压强增大,于是玻璃管的低温端出现了液氯。利用这个方法,法拉第继续液化了硫化氢、二氧化碳、一氧化二氮、乙炔、氨和氯化氢等气体,但是未能液化氢气、氮气或氧气等气体。约二十年后,在其他科研人员进展的鼓励下,法拉第开始新的气体液化尝试,但他和其他科研人员都发现加大压强还是无法让氢气、氮气或氧气等气体液化,这些气体和甲烷、一氧化碳、一氧化氮等气体被当时的许多科研人员认为是永久气体。

在对新液体的等待中,人们逐渐理解了临界点现象。1822年,德拉图尔发现在足够高的温度下,液体酒精变成了气体,经过多次实验,他知道了高于某一温度时液体酒精会突然全部气化,成为临界点的发现者。19世纪60年代,安德鲁斯发现了当温度高于临界点温度时,不论加多高的压强,气体

也无法液化。也就是说,液化的主要技术路线从加压转变为了降温。对于当时的科研人员,气体膨胀和其他液体的蒸发是两种他们非常熟悉的降温方法,他们可以依靠这些方法的组合,以多级降温的方式逐层降低温度。

2. 空气的液化

1877年,卡耶泰和皮克泰独立地液化了氧气,在此之前,对永久气体的液化已经约五十年没有新进展了。这个漫长的等待说明了液氧这个突破的困难和重要,因此也有人将卡耶泰和皮克泰的工作当作低温物理学的开端。他们不约而同地选择了氧气,可能是因为当时的氧气比较容易获得。他们还都选择了降温作为液化方式,而不是加压。卡耶泰的降温手段是压强骤降,皮克泰的降温手段是多种液体持续蒸发。氧气的液化开启了人类征服永久气体的新旅途。

1883年,弗罗布莱夫斯基和奥尔谢夫斯基合作液化了空气,之后奥尔谢夫斯基液化了除氢气和氦气之外的所有常见气体。尽管人们已经能够液化空气了,但当时无法从液体空气中直接分离液氧和液氮。早期的液化技术无法获得大量的低温液体。在永久气体液化的进展中,气雾的获得甚至也被作为液化的证据。例如,1887年奥尔谢夫斯基展示了获得的几 cm^3 的液氧,1900年他展示了获得的100 cm^3 的液氧。人们刚刚具备空气液化能力时,获得这些液体的成本过高,因此低温液体并没有被广泛使用。从法拉第到昂内斯的年代,低温环境的获得从科学上是为了确认永久气体是否存在。

1895年,现代制冷工业有了雏形,这一年,林德和汉普森独立地利用焦汤膨胀液化了空气,基于他们思路工作的制冷方式被称为林德循环。1897年,特里珀能够以每小时产生25 L液体的速度液化空气。1902年,克洛德在林德循环的基础上加上了膨胀制冷,这个方法就是制冷技术中的克洛德循环。在这些新液化方式中,换热器开始被频繁使用,低温制冷开始与常规制冷有显著的结构性区别。

1906年,林德和汉普森的制冷方法被商业公司使用,被用于液化空气和生产氧气。这些制冷技术随着诸如炼钢需要氧气等工业需求而得到快速发展,被用于液氮和液氧的大规模生产。

3. 最后的永久气体

在寻找永久气体的过程中,氧气和氮气的液化促使了现代制冷工业的出现。而之后氢气和氮气的液化,以及这个过程中杜瓦瓶的发明,影响了当代的前沿科学探索。

大约在1878年,杜瓦获得了卡耶泰的一套液化设备,1885年,杜瓦改进了空气的液化方法。1898年,他利用焦汤膨胀和液体空气预冷,获得了液氢并于次年获得了固体氢。杜瓦以喜欢公开展示实验过程而闻名,他会定期面对观众,是一个比较另类的科学家。虽然氦在1868年已经通过光谱分析被发现,但直到1895年,氦才被提取和获得。考虑到信息传播速度和氦获得的困难,当时许多人以为氢气是最后一种永久气体。

杜瓦更重要的贡献是发明了以他的名字命名的低温容器,即杜瓦瓶。想要获得新的低温液体有两个明显的技术要求:一是降温,二是减少漏热。前者一直有大量的科研人员在努力,而杜瓦瓶的发明解决了漏热对永久气体液化的影响。1873年,杜瓦开始采用真空作为隔热的技术手段。1892年,他设计了当代低温容器的雏形,采用了中空的双层玻璃结构并且层间抽真空。如今的杜瓦瓶(常被简称为杜瓦)的主体结构已经不再采用有安全隐患的玻璃,而是采用带真空夹层的多层金属。杜瓦在成功液化氢气后,持续尝试获得更低的温度,他自己判断他获得的最低温度为16 K。有人推测他获得的最低温度为12 K或者更低。

1898年之后,人们逐渐了解了氦元素的存在,包括杜瓦在内的一批人开始了对新元素的降温。1908年,昂内斯首次在4 K附近液化了氦气,并于次年获得了低于2 K的温度。从昂内斯的突破开始,人们可以正式宣布永久气体并不存在。基于液

氦,人们认识了大量未曾预期过、被高温隐藏的量子现象。在当代的物理学、化学和材料学的研究中,将研究对象放置在低温环境成了一种非常常见的做法。

低温极限随着气体液化而不断被突破。气体被逐渐液化的过程,也就是制冷技术不断进步的过程(见图2)。部分元素因为过于难以获得,所以其液化时间晚于低温技术出现的时间。例如,氩(沸点为87.3 K)于1895年液化、氪(Kr,沸点为119.7 K)和氙(Xe,沸点为165.0 K)于1900年液化,因为氖(Ne)、氦和氩在1894至1898年之间才由拉姆齐发现。它们的名字的含义分别为氖(新的)、氩(懒惰的)、氪(隐藏的)和氙(奇怪的)。

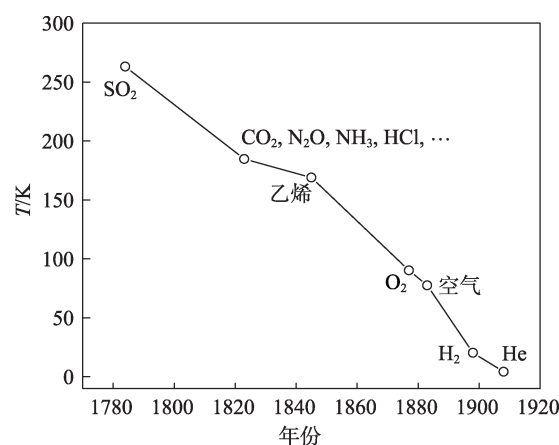


图2 气体液化的时间轴

当代低温学始于氦气的液化。1908年,昂内斯首次将氦气液化,使人类获得约4 K的低温,随后通过对液氦减压降温进一步逼近绝对零度。因此,低于液氦温度的低温学也被称为氦低温学。迄今为止,每一次制冷温度的降低都离不开氦元素:³He蒸发制冷可达约300 mK,利用³He固液共存相的压缩可降至约1 mK,而³He-⁴He稀释制冷则成为稳定获得mK温区的主流方法。沿“通往绝对零度之路”,在氦制冷之后,科学家先利用电子磁矩的绝热去磁获得低于氦温区的温度,最终通过核自旋的绝热去磁达到了当前宏观物体的制冷极限。每一次向更低温区的迈进,都依赖氦提供的前级预冷环境。以

上内容于2025年分别以《氦的液化与氦制冷》和《热力学极限与低温终点》刊登于《物理》杂志,描写了通向绝对零度之路的后半程。这条路虽越走越难,但每一段新温区的开辟,都伴随着新物理现象的发现。

如果说热学是通往绝对零度之路的路基,那么氦就是这条路上最重要的路石。考虑到宇宙背景温度仅为2.73 K,氦气的液化和随后的蒸发降温,使人类在低温领域首次突破了自然界的界限。

在时间、长度、质量等重要自然参数上,实验室只能模拟自然界中很窄的参数范围;唯独在低温这个参数边界,人类在百年前就已突破了自然界的界限。我们今天所了解的许多低温现象,仅仅存在于实验室中。从这个意义上说,低温物理学的进展是科学史上了不起的成就,它扩展了物理世界的边界。

*本文摘选自《低温实验导论》一书(北京大学出版社,2025出版)。

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

《现代物理知识》杂志隶属于中国物理学会,由中国科学院高能物理研究所主办,是我国物理学领域的中、高级科普性期刊。

科技创新、科学普及是实现创新发展的两翼。《现代物理知识》旨在普及科学知识、弘扬科学精神,设有物理知识、物理前沿、科技经纬、科学源流、教学参考、中学园地、科学书屋和科苑快讯等栏目。诚邀在物理学及相关领域工作的科技、教育和科普等方面的专家学者,以公众喜闻乐见的文字,深入浅出、图文并茂地与读者分享现代物理知识、科学前沿成果和大科学装置进展等精彩故事,共襄“两翼齐飞”之盛举。投稿时请将稿件的 Word 文档发送至本刊电子信箱 mp@mail.ihep.ac.cn,并将将联系人姓名、详细地址、邮政编码,以及电话、电子邮箱等联系方式附于文章末尾。

所投稿件一经本刊录用,作者须将该篇论文各种介质、媒体的版权转让给编辑部所有,并签署《现代物理知识》版权转让协议书(全部作者签名),如不接受此协议,请在投稿时予以声明。来稿一经发表,将一次性酌情付酬,以后不再支付其他报酬。

2026年《现代物理知识》每期定价15元,全年6期90元,欢迎新老读者订阅。

需要往期杂志的读者,请按下列价格付款:
2022~2025年单行本每期15元;2010~2021年合订本每本60元,2022~2023年合订本每本90元。

订阅方式

(1) 邮局订阅邮发代号: 2-824。

(2) 编辑部订阅(请通过银行转账到以下账号,并在附言中说明“现代物理知识 **年**期”)

名称:中国科学院高能物理研究所

开户行:工商银行北京永定路支行账号:
0200004909014451557

(3) 科学出版社期刊发行部:联系电话 010-64017032 64017539;

(4) 网上购买:搜淘宝店、微店店铺名称:中科期刊;淘宝、微信购买二维码:



淘宝网购刊



微信购刊