

要的直接诊断法。它们区分各种物理过程比较困难。另一种称为模拟法，即用电子束和离子束模拟等离子体。有时把两种方法结合起来。

通过人们对等离子体-表面相互作用的研究，认识到这些相互作用不仅影响等离子体的性质，也将决定未来聚变堆的可行性。

热核真空远不止这三个方面的内容，仅从这三方面来进行阐述已足于说明热核真空的重要性及发展情况。

随着核聚变研究的深入，聚变装置规模的不断升级，对真空技术的要求就越来越高。而聚变研究本身也为真空技术的发展提供了极好的舞台。热核真空技术就是这样不断完善和向前发展着。

低 温 史 话

沈慧君 郭奕玲

(清华大学 物理系)

早 期 尝 试

1784年英国化学家拉瓦锡作过这样的预言：“假如……地球突然进到极冷的地区，……空气无疑将不再以看不见的流体形式存在，它将回到液态，这就会产生一种我们迄今未知的新液体”。

他的预言一直激励着人们试图实现气体的液化，或者尝试达到极低的温度。

人们最早的努力是试图用高压压缩气体。十八世纪末，荷兰的马伦(Martin Van Marum, 1750—1837)曾进行过一系列实验，以检验波义耳定律是对所有气体有效，还是仅对空气有效。他取各种气体作实验，其中有一种气体是氨，他不断增大实验所需的压力，发现氨的体积与压力不成反比，这和波义耳定律不符，当他达到七个大气压时，突然出现了异常现象，即使不再增大压力，体积仍将继续减小，原来氨气这时开始转变为液体。从这个实验看来，氨的液化并不一定要靠降低温度，似乎光靠加压也可以达到目标。

马伦的观察引起了许多人的兴趣，他们想把各种已知气体压缩为液体，有些气体确实获得了成功，有些则在当时所能达到的最大压力作用下，仍然保持气态。这里要特别提到法拉第在1823年做的一个实验，当时法拉第正在皇家学院当戴维(Davy)的助手。有一天，法拉第和戴维的朋友巴里(Paris)博士正在研究氯化物的性质。对一根密封有氯化物的玻璃管进行加热，法拉第突然注意到玻璃管的冷端出现了一些油状的液滴。巴里博士离去时，认为可能是所用的材料不纯，然而第二天早晨，他收到了法拉第的信件，告诉他液滴就是氯。法拉第认识到，由于加热，密封管中的压力必然加大，但温度显然对液化也有影响，因此只有冷端才收集到液态的氯。1826年，法拉第又做了一个试验，他把冷端浸入冷却剂中，证明更为有效。于是他就把尚未液化成功的一些气体拿来试验，结果陆续液化了 H_2S 、 HCl 、 SO_2 及 C_2H_2 等气体。不过，氧、氮、氢等气体却毫无液化的迹象，许多科学家认为，这就

是真正的“永久气体”。

然而，实验家并没有就此罢休，他们设法改进高压技术。例如，埃梅（Aimé）曾将氧和氮封在特制的圆筒中，降到海洋深达1哩（1.6公里）的深处，使压力大于200个大气压；在维也纳，有一位医师叫纳特勒（Natterer），他在制造高压压缩器方面领先。1844年，他请了著名的技师，照他的设计建造了可抵挡200个大气压的设备，他宣称将要造出能耐2000大气压的容器，结果几年后，他超过了目标，达到3000大气压。这个成就是如此地惊人，以后好多年竟没有人能超过他。纳特勒至少证明了一件事，即直到压力为3000大气压，空气仍不能液化。

临界点的发现

法拉第并不是第一位认识到压力和温度都对气体转变为液体起作用的人。在他前面，有一位法国物理学家卡尼阿德·托尔（Charles Cagniard de la Tour, 1777—1859），1822年曾研究过加热对密封气体的作用。卡尼阿德·托尔选取酒精作为研究对象，装进密封的枪管中，但他看不见枪管中的现象，就决定利用听觉。他将一个石英球随酒精一起封进管内，听石英球滚动时发出的噪音。因为石英球在液体中滚动和在空气中滚动，噪音很不一样。他终于发现，在足够高的温度下，酒精完全变成了气态，一点液体也不存在。

他很想看到发生了什么事，并搞清楚这是怎样发生的。于是就将下一次实验改为用密封的玻璃管来做，里面的酒精只占一部分体积，一边加热，一边观察。然而尽管玻璃壁很坚固，每当液体只剩一半时，就会突然爆炸。他经过多次实验，终于得到如下结论，当酒精加热到某一温度时，酒精将突然全部转变为气体，这时压力达到119大气压。

托尔研究气液转变的这一现象，使他成了临界点的发现者，然而，当时托尔并不能解释，只是等到1869年安德纽斯（Thomas Andrews, 1813—1885）全面地研究了这一现象之后，才搞清楚气液转变的全过程。

安德纽斯是爱尔兰的化学家，贝伐斯特（Belfast）大学化学教授。1861年他用了比前人优良得多的设备从事气液转变的实验。他从托尔的工作吸取了教训，托尔用酒精做实验是相当成功的，但后来用水做实验，则因为水的沸点太高，压力要大到容器无法支持的地步，因此没有做成，所以安德纽斯就选了二氧化碳（ CO_2 ）作为工作物质。果然， CO_2 沸腾时，压力低到可以进行逐点测量，于是他就作出了完整的P—V图，如图1。从这张图可以看出 CO_2 气液转变的条件和压力、温度的依赖关系。

安德纽斯的结果不仅得到丰富的新事实，也对物质液气两态之间的关系作了圆满的说明，以前种种疑难和看来互相矛盾的结果，在他的P—V图中都有恰当的说明。从他的P—V图可以看出，当温度和压力足够高时，气体服从波义耳定律，当温度高于临界温度 T_c 时，不管加多大的压力，也无法使气体液化。这就说明了纳特勒1844年的高压实验为什么不能使空气液化。更重要的是，安德纽斯的仔细测量为认识分子力开辟了道路。

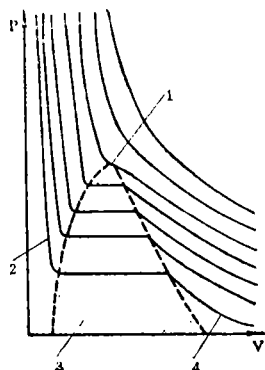


图1

1. 临界点；2. 完全液化；
3. 气液平衡区；
4. 完全气化

氧 的 液 化

“永久气体”中首先被液化的是氧。1877年，几乎同时，但却是用不同方法由两位物理学家分别实现了氧的液化。一位是盖勒德（Louis Paul Cailletet, 1832—1913），法国人，一位是毕克特（Paous-Pierre Pictet, 1846—1929），瑞士人。

盖勒德早先是矿业工程师，他原来也和别人一样，试图通过施加高压来使气体液化。他选取乙炔作为工作物质，这种材料在常温下大约加到60大气压就足以液化。可是，盖勒德的容器不够坚固，不到60大气压就破裂了，压缩的气体逃逸了出去，盖勒德这时正注视着管壁，发现就在破裂的瞬间，在管壁上形成了一层薄雾，很快就消失了。他立即领悟到这是因为在压力消失之际，乙炔突然冷却，看到的是某种气体的短暂凝结。不过，他当时误认为凝结的是水雾，可能是因为乙炔不纯，含有水份所致。他从著名化学家贝索勒特（Berthollet）的实验室里要到了纯乙炔，再进行试验，结果又出现了雾，这才断定是乙炔的液滴，他的乙炔实验虽然走了弯路，但却找到了一种特殊的方法来使气体液化。

于是，他立即尝试使空气液化。他确定以氧作为第一个目标，之所以首先选氧。并不是由于它的沸点（ -183°C ，即 90K ）较高（当时他还不知道氧的沸点），而是由于氧比较容易制备，而且容易获得纯净的氧。他将这一气体压缩到300大气压，再把盛有压缩氧气的玻璃管置于二氧化硫蒸气中，这时温度大约为 -29°C ，然后令压力突降。果然在管壁上观察到了薄雾，这一实验重复多次，盖勒德肯定薄雾就是液态氧。

有趣的是，正当盖勒德在法国科学院报告这一成果时，会议秘书宣布，不久前接到从日内瓦打来的电报，说：“今天在320大气压和140的冷度（按：即 -140°C ）下联合使用硫酸和碳酸液化氧取得成功”，署名是毕克特。

毕克特还事先写了一封信，介绍他的方法，这封信显然是在氧气液化之前写的，但他预见到了应有的结果，他用真空泵经管道T（如图2）抽去液体L表面的蒸气V，液体失去了速度最快的分子而降温。然后用这一液体环绕第二种液体，第二种液体又用泵抽走蒸气，它的温度必然低于第一种液体。如此一级一级联下去，终于达到了氧的临界温度。

盖勒德和毕克特的巧合不是偶然的，这样的事情在科学史中不乏其例。不同的人，在不同的地方，甚至用不同的方法，独立地却又几乎同时地作出某一项发明或发现。这是因为，科学的发展有一定的阶段性，科学家的思想一定会受到科学发展水平的制约和科学观念的影响。科学工作中固然有偶然发现，但科学家在进行工作时总有一定的目的和动机，才会引起他去注意偶然事件，而只要时机成熟，一般说来，总会有这一位或那一位科学家抓住“偶然”的线索。科学界已经期待“永久气体”的液化不下五十年之久了，盖勒德有寻求气体液化的明确目标，所以才抓住了乙炔液化这个偶然机会；如果盖勒德失去了这个机会，总可以期待会有别的人创造出这个方法来的。

液 态 空 气 的 获 得

盖勒德的实验只是目睹了氧的雾滴，并没有把液态氧收集到一起并保存下来，然而他的方法却在后来氮的液化中找到了应用，而毕克特的级联方法则成了一系列液化方法的起源。他们这一发现的重要意义，还在于证实了在温度足够低的条件下，“永久气体”有液化的可能性。

要获得液态空气，关键是要找到一种静态液化的方法。六年后的1883年，波兰的物理学家乌罗布列夫斯基（S·W roblewski, 1845—1888）和化学家奥耳舍夫斯基（K·Olszewski, 1846—1915）领先作出了贡献。当盖勒德发表实验结果的时候，乌罗布列夫斯基正在巴黎工作。1883年，由于波兰克拉考夫（Cracow）大学的聘请，他回到波兰，随身带了一套盖勒德的装置。在克拉考夫，他遇见了奥耳舍夫斯基。当时奥耳舍夫斯基已为氧的液化奋斗了许多岁月而未获成功，于是两人开始合作。他们将盖勒德和毕克特的方法综合运用，并作了两点改进，一是将液化的氧用一小玻璃管收集，二是将小玻璃管置于盛有液态乙烯的低温槽中，乙烯的液面蒸气不断被抽走，可以使液温保持在 -130°C ，他们的装置意图见图3。

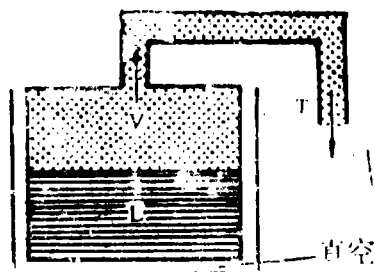


图 2

这样，他们就第一次收集到了液态氧。他们的合作时间并不长，后来奥耳舍夫斯基继续进行低温研究。据说，奥耳舍夫斯基是一位非常耐心，很有素养的实验家。他往往整月地呆在实验室不离开，后来他在低温领域里不断取得成就。除了氢和氦，对所有的气体他都实现了液化和固化。他还研究了液态空气的种种性质，成了著名的低温研究集体——克拉考夫学派的中心人物。

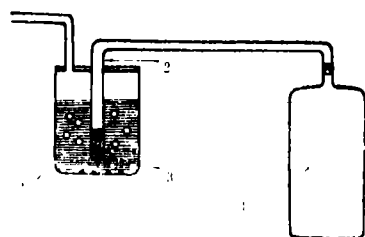


图 3

1. 在 -130°C 沸腾的乙烯；2. 加固的玻璃管；3. 凝聚的氧；4. 高压氧气钢瓶

大 规 模 液 化 的 实 现

19世纪五十年代焦耳和W·汤姆逊发现的多孔塞效应，也即焦耳-汤姆逊效应，到了1895年，在液化技术中发挥了重要作用。有趣的是，这里又遇到了两个人分别在两个地方，独立地但又几乎同时开始运用同一种新方法的例子，他们是德国人林德（Carl von Linde, 1842—1934）和英国人汉普逊（William Hampson, 1854—1926）。他们的方法基本上是沿着盖勒德的路线，利用焦耳-汤姆逊效应，即让气体分子经多孔塞做功，不过这个功不是推活塞对外做功，而是克服分子间的吸引力对内做功。由于受压缩的气体经多孔塞突然膨胀，气体的温度往往要下降，尽管这一温度降落不甚显著，但由于可以连续工作，其积累效果要比以前的方法好得多。这种方法既简便，又适于工业技术应用，工作物质在管道中循环，已经膨胀过并且冷却了的气体又去冷却其余的压缩气体，使后者在膨胀前就有所降温，经多孔塞喷出后再进一步降温，这样反复进行，就可以最终使喷出的气体凝结为液态。

1895年，林德和汉普逊分别在德国和英国获得了专利。

1895年以后，低温物理学在工业上的应用与日俱增，主要目标是为炼钢提供纯氧，纯氧和纯氮在别的工业部门也有广泛应用，林德和汉普逊创建的低温技术顺应工业的需要，得到了急速的发展。

氢 液 化 成 功

正这个时候，英国皇家学院的杜瓦（James Dewar, 1842—1923）也在为研究绝对

零度附近的物质性质而致力于解决低温的技术问题。1885年，他改进了乌罗布列夫斯基和奥耳舍夫斯基的方法，获得了大量的液空和液氧，并在1891年发现液态氧和液态臭氧有磁性。他又在1898年获得了液氢。这一成功轰动了科学界，因为当时人们总以为这是最后一种可能液化的“永久气体”（1895年氦已由拉姆赛（Ramsay）分离出来，但还不甚了解它的性质）。杜瓦成功的关键在于发明了一种特殊的绝热容器——当时叫做低温恒温器（Cryostat），后来称为杜瓦瓶——在杜瓦之前，盖勒德曾创造一种方法，把小试管放在大试管内，用橡皮塞塞住大试管，小试管悬挂在中央，大试管内盛有氯化钙之类的干燥剂，这样就可消除水蒸汽，避免玻璃壁结霜。1884年，奥耳舍夫斯基曾改进为外层容器盛液态乙烯并不断逸走蒸气，这样就造成了一道屏障，使外界的热无法进到内试管。而杜瓦感到这种方法既费事又不彻底，不足以保存大量的液氧。他想起了二十年前曾用过两层玻璃的方法来为量热器隔热，效果明显，于是就将两个玻璃容器套在一起，联成一体，容器之间抽成真空，这样内瓶就可盛大量液氧了。1893年1月20日，杜瓦宣布了他的这项发明。1898年，他用自己的“新型量热器”实现了氢的液化，达到了20.4K。第二年，实现了氢的固化，并抽出固体氢表面的蒸气，他达到了12K。

杜瓦满以为液化氢的成功就开启了通过绝对零度的最后一道关卡，谁知在他的残余气体中竟还有氦气存在，他和他的助手想了许多办法，经过数年努力，终未能实现氦的液化，原因大概是他没有获得数量足够的纯氦。

莱顿的低温实验室

正当世界上几个低温研究中心致力于实现氦的液化时，荷兰莱顿大学的低温实验室在昂纳斯（Kamerlingh Onnes, 1853—1926）的领导下于1908年首开记录，获得了60CC的液氦，达到4.3K，第二年达到1.38~1.04K的低温。

昂纳斯之所以能取得如此突出的成绩，除了他严谨的工作作风外，最重要的是他以大规模的工程来建立低温实验室。这个实验室的特点是：把科学研究和工程技术密切结合起来，把实验室的研究人员和技师组织起来，围绕一个专题，分工负责，集中攻关。他的低温设备规模之大，使同时代以及早于他的各著名实验室的设备简直成了“小玩具”。就这样，昂纳斯的低温实验室成了国际上研究低温的基地。在几十年中间，低温的研究人才不断从莱顿培养出来，科学成果不断在这里发表。这个实验室成了二十世纪大规模物理学研究的楷模。

超导性和超流性的发现

昂纳斯和他的合作者不断创造新的成绩。他们对极低温的各种物理现象进行了广泛研究，测量了10K以下的电阻变化，发现金、银、铜等金属的电阻会减小到一个极限值。1911年，他们发现某些金属，例如汞、铅和锡，在极低温下电阻会突然下降。1913年，昂纳斯用“超导电性”来代表这一事实。这样，他获得了诺贝尔物理奖。

1911—1926年间，昂纳斯继续对液氦进行了广泛研究，并发现了其它许多超导物质，不过他一直未能实现液氦的固化。这件工作是在1926年由他的同事凯森（W·Keesom）在液氦上加压25大气压才得以完成，这时的温度为0.71K。

1928年，凯森发现2.2K下液氦中有特殊的相变，十年后，苏联的卡皮查（Капица）和

英国的阿伦 (Allen) 和密申纳 (Misener) 又是分别却同时地发现液氮在 2.2K 以下可以无摩擦地经窄管流出, 一点粘滞性也没有, 这种属性叫做超流性。

磁 冷 却 法

正当人们在用各种方法探索低温的进程中受阻时, 一种崭新的致冷方法——磁冷却法应运而生, 这种方法也叫顺磁盐绝热去磁冷却法。磁冷却法的提出, 又是由两个人不约而同地重演了前人的故事。一位是加拿大青年物理学家盖奥克 (William Francis Giauque), 另一位是德国著名物理学家德拜 (Pieter Debye)。1926 年他们分别发表了这方面的论文, 但是由于技术上的困难, 直到 1933 年才由盖奥克和麦克道盖尔 (Mac Dongall) 在美国加州的伯克利以及德哈斯 (W·J·de Haas)、韦尔斯玛 (E·C·Wiersma) 和克拉麦斯 (H·A·Kramers) 在莱顿, 同时但又独立地实现, 他们分别达到 0.25K 和 0.13K。后来, 经过近二十年的努力, 用磁冷却法最低达到了 0.003K 左右。1956 年, 英国人西孟 (Simon) 和克尔梯 (Kurti) 用核去磁冷却法获得 10^{-6} K, 及至 1979 年芬兰人恩荷姆 (Ehnholm) 等人, 用级联核冷却法达到 5×10^{-8} K。

低 温 学 方 兴 未 艾

探索极低温条件下物质的属性, 有极为重要的实际意义和理论价值。因为在这样一个极限情况下, 物质中原子或分子的无规则热运动将趋于静止, 一些在常温下被掩盖的现象显示了出来, 这就可以为了解物质世界的规律提供重要线索。例如, 1956 年吴健雄等人为检验宇称不守恒原理进行的 Co-60 实验, 就是在 0.01K 的极低温条件下进行的; 1980 年, 联邦德国的克里岑 (Klitzing) 在极低温和强磁场的条件下发现了量子化的霍尔效应。

法拉第和托尔开创的低温事业, 已经有了一百余年的历史, 人们前赴后继, 向绝对零度进军。绝对零度虽然不可能达到, 但是人类可以创造条件, 无限地接近它。

低温物理学的发展正方兴未艾, 人类对低温世界的认识永无止境!

参 考 文 献

- (1) F.E.Hoare et al, Experimental Cryophysics, London: Butterworths, (1961)
- (2) M.and B.Ruhemann, Low Temperature Physics, Cambridge: Univ.Press, (1937)
- (3) K.Mendelssohn, The Quest for Absolute Zero, London: Taylor and Francis, (1977)
- (4) E.G.D.Cohen, Am.Sci.65 (1977) 752