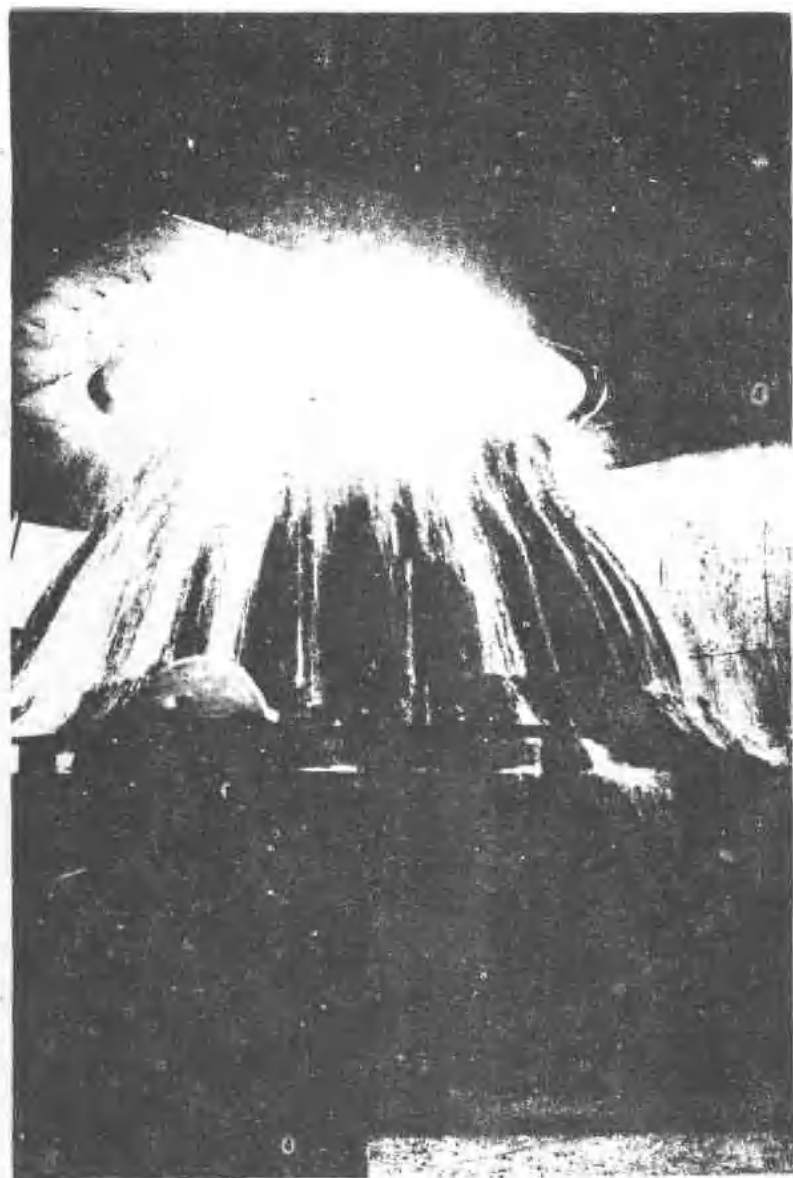


第二十七冊

低 溫 學

譯者：黃炳華



白熱且似噴泉的熔融金屬從煉鋼爐中向外傾瀉出來，在非常低溫下製成的純氧，用一管子（或“氧槍”）將其注入一巨大容器中，鋼鐵工業是液態氧的最大使用者。（參看 21 圖）

目 錄

I	“冷”到底有多冷？	1
	低溫的工業技術	3
II	溫度	7
	絕對零度	9
III	溫度計	11
IV	物質的形態	15
	熱力學的研究	17
V	低溫的形成	19
	低溫的冷凍	20
	熵的觀念	23
VI	低溫的保持	27
	太空中的熱輻射	28
VII	低溫液態氣體的性質和功用	31
	正氫和仲氫	34
VIII	低溫下物質的性質	37
	機械性質	37
	電學性質	38
IX	量子流體	43
	氦 II 的性質	44
	^3He 的性質	46
	超導磁鐵	49
X	低溫學的應用	53
附	錄：量子力學	57

低溫學

原著：HENRY L. LAQUER

譯述：黃炳華

I “冷”到底有多冷？

冰雪有多冷？

北極海中的水有多冷？

乾冰有多冷？

液態氮有多冷？

外太空有多冷？

你能回答這些問題嗎？爲什麼任何人都想知道這些問題的答案？什麼是僅能在這些低溫下而不是在其他溫度所能做到的？

低溫學（cryogenics）是對於非常低溫度的研究和應用之一門科學，將試著去回答上面所提的某些問題。低溫學可能牽涉到實際的工程問題，如生產數噸的液態氧供製造高性能的鋼或供引燒火箭的燃料。它可應用到急速冷藏外科手術的組織標本以供醫藥上的研究，冷藏登山者所攜帶的輕量食物，幫助物理學家研究物質的一些最基本性質。爲了達成上述目的，低溫學的研究者在低至接近絕對零度（即華氏零下 459 度）百萬分之一度內進行研究工作。

自從被視爲一門科學後，低溫學的發展迄今至少有 75 年的歷史了。我們知道在常溫下所有物質中的原子和分子都以等速度運動或激變（agitation），這種運動通常是原子、核子和電子之間的基本互應作用，降低溫度常可減小這種運動所引起的干擾，因此對低溫學的研究可以增加我們對原子和分子間的作用力、金屬導體和半導體中所流過電流的性質，和現在我們很熟悉，但也仍很陌生的神秘磁力之自然性質的瞭解。

低溫學也主要發現了超流動性 (superfluidity) 和超導性 (superconductivity) 兩種完全意想不到的現象。前後有 40 年，幾乎每一個著名的理論物理學家都努力去瞭解這些“超 (super)”的性質，對這些問題所做一致的回答及公式的寫成，是近十年來的事。直到今天，雖然科學家和工程師已普遍應用這些可驚的性質，但大部份還僅能用量子力學中抽象的語言來解釋超流動性和超導性的現象。

正因為低溫學是研究這種“非常的冷 (uncommon cold)”，所以這些“超 (super)”性質“不平常 (uncommon)”到難以相似的地步。在常溫下，你一定不相信一種液體能自山腳流向山頂或流過密閉的欄柵，然而在很低的溫度時，超流體氦 (superfluid

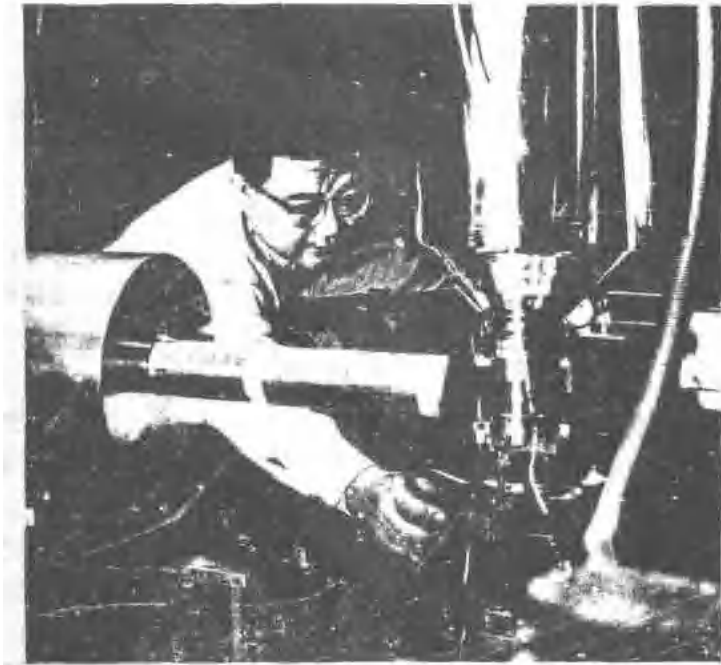


圖 1 一個化學家正在調整實驗裝置，利用一大規模的核反應器來分析材料在非常低溫時的晶体和磁結構，材料的試樣放在裝液態氦的大圓柱筒下方的小盛器裏；左邊的管子是量測射中了 (Scattered Neutrons) 的偵檢器。

helium) 却有上述的現象。你同樣會感到驚奇，如果家裡的電源斷掉後，你發現仍有電流在綫路上流動，超導體 (superconductor) 就是有這種現象。這些流動的現象並不是“永久性的運動 (perpetual motion)”，不是詭計，也不是幻想，而是在很低溫度下所發生的非常自然的現象。

低溫的工業技術

低溫學大規模的工業技術發展歷史迄今仍不到 25 年，現在它主要關係著“永久的 (permanent)”氣體 (如氫氣、氮氣和氧氣) 的液化作用。當變成液體時，這些物質 (substances) 的密度較大，且較氣體易於處理。由於第二次世界大戰，太空探險計劃，和繁榮經濟的需要，從 1962 年起工業界開始生產液態氮，並發展了可生產數以噸計的液態氧的全國性工業技術。

正如研究核子物理學發展了核能電廠，研究固態物理學而有電晶體電視的裝置，今天對低溫學的研究可能導致明天工程上的驚人成就，甚至會有新消費物品的發明。低溫的技術現在已被用來製造超高度真空 (ultra-high vacuum)，和應用至低溫計算機 (cryogenic computer)，製造高磁場磁鐵 (high-field magnets) 供高能物理和控制熱核融合研究之用。

低溫學還有我們夢想不到的用途——推進我們的工業技術和改善我們的生活。當輻射與物質作用時，物質的結構會顯著地發生變化，過後可能部份會恢復原狀，部份會改變原子和分子的運動速度形成另一種形式。我們從低溫學的應用，可瞭解這個過程和物質本身的基本性質。

因為在液態氮所具有的低溫下，可由消除原子和分子的運動回復作用來“凍結 (freeze in)”輻射作用，這種研究已可用來對太空探險所需的材料作主要的選擇和處理。因為太空船周圍的溫度很低，且受強烈輻射帶照射的損害，在常溫下已不可能如在地球上一樣有局部的“回復 (healed)”作用。在太空技術上，低溫學可能研究將來利用超導磁鐵作太空船的屏蔽 (shields) 以抵擋太空輻射的照射。



圖2 工程師們正在利用一氣泡計數腔 (bubble chamber) 放下世界上最大之高磁場超導磁鐵至使用位置以供高能物理研究之用 (再參看圖 20, 31, 32)

超導磁鐵將來還可主要利用於磁流動力 (Magnetohydrodynamic, 簡寫MHD) 發電機, 使熱游離氣體或電漿 (Plasma) 很快地通過磁場, 將熱能改變為電能而不需要鍋爐 (boiler) 或渦輪發電機 (turbogenerator) *。

當我們將所有的可能性考慮過後, 我們一定要記住科學和技術——基本的研究和工程上的應用——少數的人為區分祇是為了某些時候的需要, 通常很難加以區別, 今天包括低溫學等某些還不很發達的科學, 可能是明天多方面巨資工業的基礎。

* 參看“能量直接轉換 Direct Conversion of Energy”一書, 本文庫第七冊對MHD過程有詳盡的說明。



圖 3 兩位科學家正在檢查實驗室中的氦冷藏器，使溫度保持在絕對零度上 0.04 度。使用時，整套儀器都要被密封在真空箱中。

II 溫度

現在再回到我們的問題，“冷”到底有多冷？”這應當很簡單。我們對溫度——熱和冷——都有一種主觀的感覺，用一支水銀溫度計，我們能量得空氣、水、冰雪的溫度，因為有人已在那上面刻好度數。這些刻度和已有的溫度單位多少有其一致性，相似於科學上和商業上所用的其他度量單位，我們僅需將溫度計插入物質中，等到水銀柱的高度不再改變時，讀水銀面所到達的刻度，即得物質的溫度。根據溫度計所示的度數，我們可主觀地感覺出物質的冷熱程度。無論在任何時候，溫度度數都具有相同的意義，我們可用不同的溫度計（祇要製造良好）量得相同的度數，但是不幸地，普通水銀溫度計並不能測“乾水”*有多冷，因在未量得之前，水銀已先凝固。如果將溫度計插入液態空氣或液態氮中，玻璃外殼很可能會馬上破裂，因此要量這種很低的溫度，我們一定要以一種特製的溫度計和另一種單位。全世界大部份地區都使用攝氏（ $^{\circ}\text{C}$ ）†單位，但英語國家却慣用華氏（ $^{\circ}\text{F}$ ）‡單位來量氣溫，然而，在很低的溫度下，這兩種單位都不如用絕對溫度（ $^{\circ}\text{K}$ ）§方便，這單位是建立在較難的絕對零度之觀念上。

* 固態二氧化碳（ CO_2 ）

† 因瑞典天文學家 Anders Celsius 而得名，他設計了攝氏溫度計，以水之冰點為零度，以水之沸點為一百度，其間等分一百度。

‡ 因德籍荷蘭物理學家 Gabriel Fahrenheit 而得名，他發明了水銀溫度計及華氏單位，以水之冰點為三十二度，以水之沸點為二百二十度，其間等分為一百八十度。

§ 因蘇格蘭物理學家 William Thomson (Lord Kelvin) 而得名，他提出了絕對單位和絕對零度的觀念。

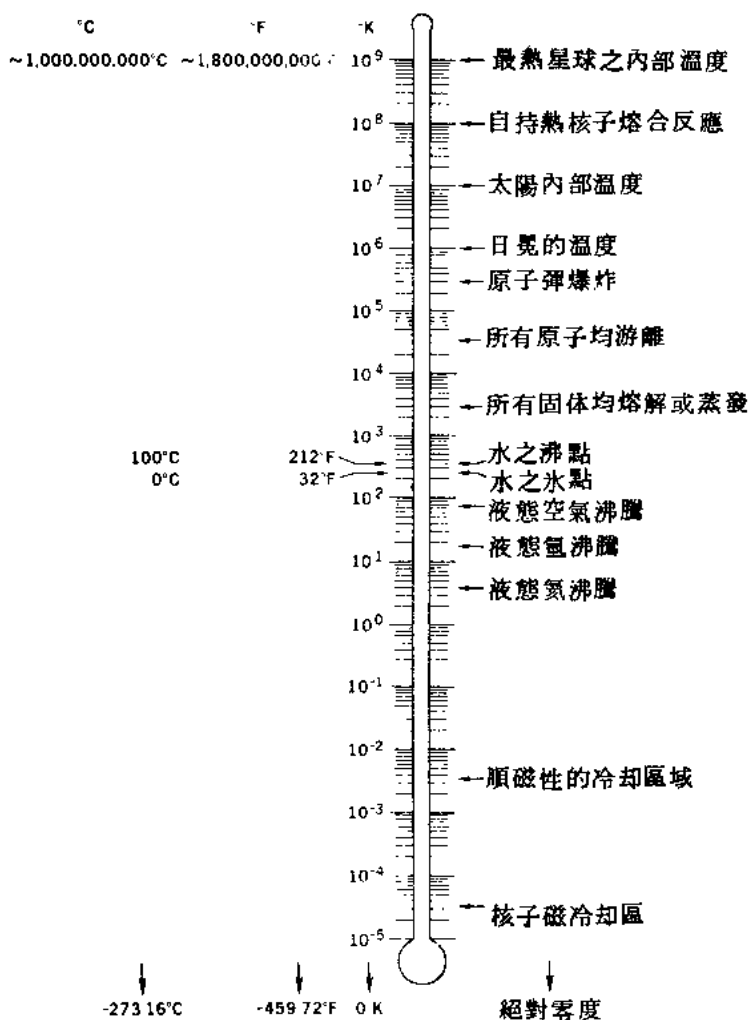


圖 4 溫度單位。溫度計左邊的那一行以對數法表示的絕對溫度含意著要達到低溫所需的努力，這個表示也強調著熱一定是從溫度較高處流向溫度較低處，並且在任何實驗室的儀器中，不可能達到溫度的絕對零度。

絕對零度

絕對零度表示物質在此溫度，所有分子和原子均停止運動，為理想的最低溫度。然而它並不包括量子力學中“零點運動（zero-point motion）”的觀念，除非瓦解運動粒子的集聚系統，否則縱然達絕對零度，亦不能停止這種運動。由運動的自然性質來看，絕對零度是不可能達到的（譯者按：熱力學第三定律云：“絕對零度是不可達到的最低溫度”，即絕對零度是最低的極限，人類不可能用任何方法降低溫度達到絕對零度。此定律可由熱力學第二定律：“在一密閉系統中，欲使熱自動從低溫處移至高溫處是不可能的”引導而來，近年來科學發展一日千里，常有意想不到的事情被發現，但尚無發現與熱力學三定律有矛盾之處。）但能達到絕對零度上百萬分之一度內的低溫。所有這些在物質內部發生的分子和原子運動，我們均稱之為“熱運動（thermal motions）”，這些運動是用肉眼看不見的，它們決定了物質的大部份因溫度而變的性質。

正如一直綫可僅由兩點所連成的，一種溫度單位是由二固定溫度來定義的。最初在標準一大氣壓（760 毫米水銀柱，或 760 torr *）時，攝氏單位定冰之熔點為 0°C 和水之沸點為 100°C ，絕對溫度單位定絕對零度為 0°K 和冰之熔點為 273°K ，不幸這等於有三固定點而導致溫度的不一致。因為科學家希望這兩種單位度數間的大小都相等，因此必須把三點中之一點的溫度改變百分之一度，祇要準確的實驗在進行時需要考慮這三點的相互關係。

現在除了絕對零度外，僅有一固定點獲得國際制定為標準溫度，那是水的“三相點（triple point）”，1948年測定為 273.16°K ，即絕對零度上 273.16 度。當蒸氣壓等於一大氣壓時，水的三相點降至 273.15°K （ $= 0^{\circ}\text{C} = 32^{\circ}\text{F}$ ），沸點降至 373.15°K （ $= 100^{\circ}\text{C} = 212^{\circ}\text{F}$ ），這些在攝氏溫度上的固定點和其他次要

* 還有其他溫度單位，如美國太空工程師用的 Rankine 單位（ $^{\circ}\text{R}$ ），是一種絕對單位，相鄰兩度間的溫度差異和華氏溫度同（攝氏單位一度之 $\frac{9}{5}$ ），因此 $491.67^{\circ}\text{R} = 273.15^{\circ}\text{K} = 0^{\circ}\text{C} = 32^{\circ}\text{F}$ 。

的參考點（即所謂的國際實用單位，**International Practical Temperature Scale**）和實驗室中最好的度量方法，均定期由國際重量和度量協會公佈之。

III 溫度計

我們可由二點、三點或五點在溫度計上定出一個區域、二個區域或四個區域的溫度，但是爲了要能測得任意溫度，我們需要有包括整個區域的溫度計。幸好物質的很多物理性質會因溫度改變，這些改變，我們可用來做製成溫度計的基礎。最初我們假設這些性質安定地隨溫度成綫性改變，因此固定點間的距離能被分成許多小等分，每一等分表示一度，任何一度均具有相同的距離（或角度或電壓）。

水銀溫度計是利用當溫度升高時，液態水銀膨脹均勻的特性製成的。其他較便宜的低溫溫度計係利用會隨溫度上升而均勻膨脹的著色酒精或液態烴製成。

很多材料的長度變化可茲利用，祇要我們有一固定長度的參考材料，但事實上不很容易得到。將兩種不同的金屬束在一起（因爲每種金屬的熱膨脹不同），我們可由彎曲的角度，簡單地測得當時的溫度。這種設計，相同的角度（可往上彎或往下彎，參看圖 5）表示相同的溫度變化。其他溫度計如電阻溫度計（resistance thermometers）是利用電阻的變化製成的，熱電偶（thermocouples）是利用熱能和電能的轉換製成的，也有溫度計是利用蒸氣壓的變化製成的。

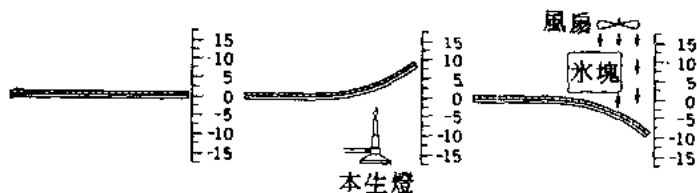


圖 5 二種金屬構成的溫度計，會隨溫度的改變而呈不同的曲度。

用不同的溫度計量固定點或校正點以外的溫度所引起的困難是所量得之溫度可能不很一致，尤其嚴重的是量固定點區域外的溫度。大部份的物理性質隨溫度的變化也不一致，它們之間並不能永遠保有直綫性關係，圖表上用以表示的曲綫有時會升或降，因此某些溫度計

在某些地方並不適用，我們要能知道在某種情況下那種溫度計較準確，那種溫度計不準確。

溫度計校正的步驟和絕對零度的觀念有密切的關係，氣體壓力（ P ）、體積（ V ）、絕對溫度（ T ）之間的關係可由下面的“理想氣體定律（ideal gas law）”來解釋：

$$P \cdot V = n \cdot R \cdot T$$

此處 n = 氣體的摩爾數（克分子數）或分子的數目。

R = 氣體常數。

因此當密閉容器中裝有一定量氣體時，其壓力和絕對溫度成正比，定容氣體溫度計是根據這定律製成的。“理想氣體”壓力定出了固定點間的溫度單位

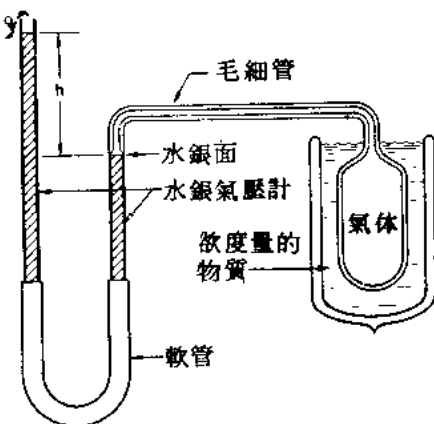


圖6 定容氣體溫度計。絕對溫度和兩管的水銀面高度差成正比。

然而，事實上氣體的活動並不絕對如理想氣體方程式所言，在壓力不很高時，上述方程式大抵可適用。製出準確的氣體溫度計畢竟是件乏味和嚴格的工作，目前世界上僅有少數實驗室在做低溫下準確的氣體溫度計的校正工作。

也有一些溫度計僅能用於低溫的情況下，它們所改變的物理性質和溫度成反比（即正比於 $\frac{1}{T}$ ），當溫度愈低時，其效用愈好。這些包

括以鍺(germanium)做電阻，以礬做電阻的溫度計和磁溫度計(magnetic thermometers)，前者用以量電阻，後者用以量磁敏感度(magnetic susceptibility)——物質單獨在磁場中基本的磁化反應。(以後會再詳敘)

科學家的研究低溫度需要其他更多能够產生複製結果、reproducible result)的溫度計。

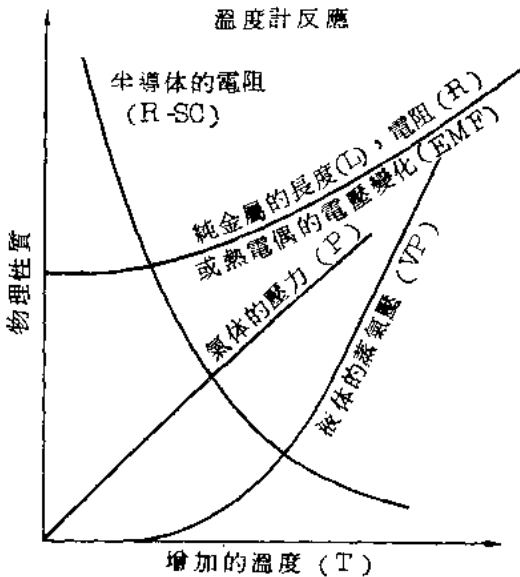


圖 7 用於低溫工作中的各種不同溫度計之相對反應。僅有氣體溫度計是能在其適用區域內維持有線性關係的儀器。純金屬電阻溫度計和熱電偶在 10°K 和 20°K 之間並無任何反應，但在 70°K 以上呈線性反應。蒸氣壓(V.P.)溫度計從無線性反應，平常是呈指數反應。

