

科學譯叢

——物理學：第2種——

低 溫 物 理

卿 卓 夫 著

813

科學出版社出版

科學譯叢

——物理學：第2種——

低 溫 物 理

P. A. Ченцов 著

陶 鈞 譯

科學出版社出版

1954年12月

內 容 提 要

這是一本關於低溫物理的較通俗的中級讀物，本書簡要地概述導致低溫的方法和低溫物理中的一些重要的現象——液態氮的超流動性和金屬的超導電性等——以及這些低溫現象的應用前途。

低 溫 物 理

ФИЗИКА НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР

Издательство «Знание»

Москва—1952

原 著 者 Р. А. Ченцов

翻 譯 者 陶 鈞

出 版 者 科 學 出 版 社

北京東四區德勝門外大街二號

印 刷 者 北 京 新 華 印 刷 廠

阜成門外北護士路

發 行 者 新 華 書 店

(譯) 54079

1954年12月第 1 版

自然: 081

1954年12月第 1 次印刷

(京)0001—8,200

開本: 787×1092 1/25

字數: 21,000字

印張: 1 13/25

定價 2,500 元

目 錄

導言.....	1
溫度是什麼.....	2
低溫.....	6
液態氦的超流動性.....	11
金屬的超導電性.....	23
低溫下金屬的磁性.....	28
接近溫度的絕對零度.....	29
結論.....	31
參考文獻.....	33

導 言

低溫在人的生活中起着很大的作用。人們很早以前便學會將冰和各種不同的鹽類混和起來，藉以獲得降低了的溫度，進而利用冷來保存食品。以後，科學和技術的發展，促成致冷機的發明，靠着作功來顯著地將溫度降低。因此，得以獲得越來越低的溫度。同時知道，在常溫下為液體的一切物質，在足夠的冷卻下便能變成固體；同樣，氣態物體也能冷卻成為液態。在這方面，即使過去被稱為永久氣體的——氧、氮、氫也非例外。

各種不同的物體在低溫時所具性質的研究，說明了它們和近於室溫時所具性質在許多情況下有顯著的不同。同時闡明了在低溫時，發生了某些特殊而具有實用意義的過程。例如，在奧斯丁型鋼(аустенитная сталь)中馬丁體的變化(мортенситное превращение)在低溫下進行得很快，工業上利用這個現象來進行“鋼的冷加工”。

自從製造液態空氣的機器發明後，低溫得到了更廣泛的應用，這種機器的“原料”便是大氣空氣。

在今天，在物理、化學、生物學以及其他的實驗室中普遍地使用液態空氣：用以進行低溫下的實驗，用以在高度真空設備中凝集水分、水銀和其他物質，以及其他許多用途。衆所周知，物體具有受熱後體積膨脹，冷卻時體積縮小的物理性質。普通情況下，這類體積的改變並不顯著，但冷卻到液態空氣溫

度時，即接近 -200°C 時，物體在體積上的減小，已十分明顯；所謂金屬成品的“冷配合 (холодная посадка)”就是利用這個現象。

實際利用低溫的重要方向之一是將氣體混合物分離為它的各組成部分。在進行過程中，首先用冷卻方法使混合物變為液態，然後通過被稱為精餾塔 (ректификационная колонка) 的分離裝置。空氣的分餾是獲得工業用氧的最重要的方法，大家都知道它在現代化技術中的意義。

本文所敘述的一些物理現象，都是在比液態空氣溫度低得多，接近於絕對零度 (-273.16°C) 時所發生的。在這情形下，一系列的物質具有異於平時的性質，以致我們需要引用特殊的新術語，如超導電性 (сверхпроводимость)、超流動性 (сверхтекучесть) 等等。在這類現象領域中的研究大大的擴充了我們對於物質的認識。

溫度是什麼

當人或任何生物接觸熱或冷的物體時，便會體驗到溫暖或寒冷的感覺。然而，經歷了數千年的長時間才把客觀估計物體冷熱程度的問題弄清楚。

使用溫度的概念來量度物體的熱性，是發展上一個極端重要的階段。對於溫度，我們了解為這樣：倘若物體A的溫度高於物體B的溫度，則當它們接觸時，就可以觀察到熱從A向B轉移，最後二者溫度相等，達到熱平衡狀態。並且可以確定，在熱性程度 (溫度) 改變下，物體的其他性質，例如體積、導

電性等，同時也發生了相應的改變。所以物體任何性質的改變都可用來說明它本身所具溫度的高低。

在大多數的情況下，都利用物體在受熱時發生膨脹的現象來量度溫度。最適宜的物體是氣體。大家都知道，處在恆壓下的任何兩種氣體，從同一溫度加熱到另一相同的溫度時，它們體積上的變化是相同的。因此，一定質量氣體的體積，在恆壓下可作為該氣體溫度的量度標誌。

認識到氣體體積隨溫度按直線性規律變化着，並且令溶解的冰的溫度等於 0° ，沸騰的水的溫度等於 100° ，我們就得到在今天通用的國際的 100 刻度溫標。

利用這種的氣體原溫度計，可以校準各種類型的副溫度計——水銀溫度計、溫差電偶、高溫計(пирометр)、電阻溫度計，有了這些儀器就更便利了熱的研究的進行。

俄羅斯天才科學家羅蒙諾索夫(М. В. Ломоносов)在揭露熱現象本質上起了突出的作用，他第一個指出：構成一切物體的最小質點* 是經常不停地在運動着，這種分子運動就是熱的本質。溫度是這種熱運動的度量：溫度愈高，分子運動愈快。他同時指出：如果繼續冷卻，應當達到熱運動停止的時候。物質的這個狀態被稱為溫度的絕對零點¹⁾。

* 羅蒙諾索夫當時所說的最小質點，從現代的觀點來看，就是分子(譯者註)。

1) 按照現代的量子力學概念來說，任何物體質點的運動是由兩種不同性質的部分所組成：熱運動和所謂“零點”運動(“Нулевое” движение)。後者和熱運動有所區別，它是和物體質點不可分離的，並且不能傳遞給其他物體。當溫度為絕對零度時，只是熱運動停止下來，而“零點”運動和與其相應的“零點”能量仍被保持着。

固態、液態和氣態物體中，分子的熱運動具有不同的性質。

在氣體中，分子按一切可能方向以不同速度很紊亂地運動着。雙原子的氣體分子，它的分子和啞鈴形狀相似，因此在平移的熱運動以外，還要加上啞鈴狀分子的轉動運動。在多原子的氣體分子中，所發生的情況相類似。所以，氣體所具溫度，不只說明了平移運動的速度，並說明了氣體分子的轉動速度。

在固態物體中發生着另一種熱運動的情況。固體絕大多數由晶體構成¹⁾。構成晶體的原子和離子並非紊亂地分佈在空間裏，而是在空間裏排列成一定的系統，形成不同形狀的空間點陣(решётка)。例如在食鹽(NaCl)的點陣裏，兩種原素的離子交替地排列而形成立方點陣。純銅和若干其他的金屬結晶形成了其他形式的立方點陣。至於金剛石的點陣更為複雜。

照例，自然物體是由許多微小的晶粒所組成，每個晶粒中的原子形成晶體點陣。我們通常說：固體原子以規則的形式在空間排列着。但嚴格地說，原子並非固定於晶體的陣點上，而是不斷地在這些陣點周圍作振動。因此，它的溫度正說明了振動質點的振幅和運動速度。

在液體中，溫度同樣地說明了分子熱運動的強度，但它的運動方式是極複雜的。

由此看到，溫度是說明任何物體的物理狀態的最重要因

1) 某些固體，例如玻璃，不具有整齊排列的結構，因此，從它們結構的觀點上來看，這些物質應當和液體放在一類。事實上，它們是過冷液體，要是經過足夠的時間後，可以變成穩定的結晶狀態[這時玻璃的透明減弱，可比較玻璃的混濁(помутнение)現象]。

素。並且顯然，溫度的升降——受熱和冷卻——在物體內引起顯著的變化。

溫度的影響在氣體上表現得尤其明顯。例如體積和壓強，這些敘述氣體狀態的基本量，在溫度有所改變時即很劇烈地改變着。

倘若，保持百度溫度計的刻度大小，並用溫度的絕對零度代替水的冰點作為零度，一定質量氣體的體積、壓強、和溫度間的相互關係（克拉珀龍方程式）便變得特別簡單。這樣的標度稱為“溫度的絕對標度”，依照它來測量的溫度稱為“絕對溫度”¹⁾，並用符號 K 來表示。很明顯的，物體的絕對溫度要比用普通標度量度出來的溫度高 273.16° 。所以，例如，溶化的冰的溫度約等於絕對溫度 $273^\circ K$ ，而大氣壓強下水沸騰的溫度約為 $373^\circ K$ 。

按照氣體分子運動學，理想氣體的絕對溫度和氣體分子平移運動的動能值成正比例。

溫度的絕對標度是理論物理和低溫物理中被使用的基本標度。今後在本文中亦將用溫度的絕對標度——開氏溫標。

現今，物理實驗家所可以達到的溫度領域已極廣濶：在實際上，可達到的最高和最低的溫度的比值已大於一千萬倍。在實驗室條件下，使具有大電容量的容電器經過高壓充電後，通

1) 驟然看來，認為“絕對標度”的決定是極隨便的，它僅和若干有限的物質類——即指氣體言——的巧合的性質發生聯系。事實不是如此，絕對溫度概念的意義不是在於它可以適用於氣體的性質上，而是建立在所謂熱力學第二定律的定量表述上，但，這個問題和與熱力學第三定律——能斯特定理——聯系着的絕對零度的不可達性問題的研究都不在本文範圍內。

過高壓氣體所包圍着的金屬導線進行瞬息放電，這樣可以得到最高溫度（25,000°K左右）¹⁾。關於獲得“超低”溫度的方法，本文後面將要講到。

顯而易見，溫度在增高方面的紀錄比較低，它離開室溫不遠，超過後者不到一百倍。而溫度降低的紀錄和室溫比較起來要顯著得多：室溫超過最低可達溫度十萬倍。

向高溫方向發展是很有用的，因為我們可以觀察到一系列在室溫和較低溫度下看不到的現象。這些現象包括：一切我們所熟知的常溫下為固態的物體變成液體，繼續加熱後成為氣體；鐵和其他鐵磁性材料失去了它們的磁性；原子的熱電離和熱的光激發（возбуждение свечения）以及許多其他的現象。高溫在冶金業、化學工業和其他許多工業與技術領域中具有廣泛的實用意義。

但是在低溫領域內，向着絕對零度發展的物理學研究所能獲得的結果更為有興趣。

低 溫

一切氣態物質，在正常壓強下被充分冷卻時，便變成液體。要是將液體繼續冷卻下去又能變成固態²⁾。

足夠地降低溫度，氣態空氣可以變為液體，後者在大氣壓強下在溫度 83°K 左右（即 -190°C 左右）時沸騰。普通氣態空

1) 幾百萬度的高溫度，在原子爆炸時產生，並且當極大的隕石〔杜古斯基型（Тунгусский тип）隕石〕和地球相撞擊時也能發生。

2) 氦元素是唯一的例外，它只能在壓強大於 25 個大氣壓強時，受冷才會變成固態。

氣為氧和氮的混合物，同樣液態空氣可以視為液態氧和較易揮發的（在較低溫度下沸騰並且較快地沸騰盡）液態氮的混合物。

液態空氣用雙層壁的所謂“杜瓦瓶 (дьюар)”¹⁾的特殊容器保存起來；這種容器雙層壁間的空氣被抽去，藉以消除傳遞熱的主要途徑。這些措施是必要的，因為在其他相同條件下，熱傳導量的大小是和物體本身與周圍物體間溫度差值成比例，現在情況中，溫度差值大於 200° 。

此外，液態空氣的汽化

（潛）熱比較小——比水的汽化熱要小 10 倍左右。

液態空氣用特殊的、能“致冷”的設備來製造。氣態空氣在這些裝置中首先經過壓縮，在這上面要化費極大的功。同時將被析出的熱量導走，氣體再度被冷卻到室溫左右。然後讓壓縮空氣膨脹，完成外功——推動活塞或轉動渦輪。由於膨脹在很低的熱傳遞下進行，因此這些功是僅依靠氣體本身所具能量來完成的，後者主要屬於分子紊亂的熱運動的動能。在膨脹時消耗了這些能量，氣體分子熱運動的速度減小下來，它的溫度隨着下降。設備的構造形式極為重要，因為這在頗大的程度上

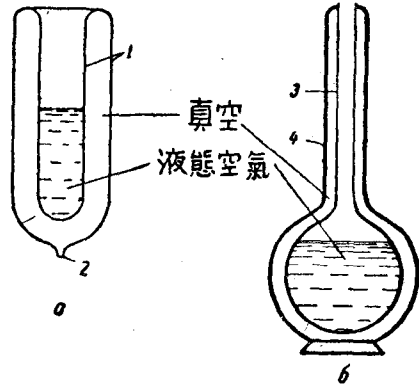


圖 1. 保存液態空氣的杜瓦瓶（剖面圖），

- (a) 玻璃的； (6) 金屬的；
 1~玻璃容器體； 2~銲合處；
 3~薄壁金屬瓶； 4~金屬容器體。

1) “杜瓦瓶”在日常生活中，習稱為“熱水瓶 (Термос)”。

決定它的經濟指標。

即使在液態空氣溫度時，許多為我們所熟知的物體，它的性質已經急劇地改變了。在普通溫度下勉強強強可以聽到發出啞聲的鉛質鈴，當冷卻到液態空氣溫度時，便開始發出清晰的高音調聲音來。橡皮的性質改變得更為奇怪：它完全喪失了彈性，成為脆弱的固體，加以打擊即破裂成許多碎片。橡皮管在彎曲狀態時冷凍下來，便不會再延伸，並且受得住頗大的荷載。某些物體在液態空氣溫度下的性質便是如此。

怎樣獲得比自由沸騰的液態空氣的溫度還要低的溫度呢？我們可以利用熟知的液體所具的物理性質——壓強降低時液體的沸點隨之降低——來達到目的。例如，高山上空氣稀薄，水的沸點比 100°C 低下若干度。

相似的，壓強降低時，液態空氣便不在 83°K 時沸騰，而在 80.75 或者 70°K 時沸騰起來。後者溫度值須視壓強大小而定。這個現象用下列方法可以實現：在杜瓦瓶中裝入液態空氣，並用金屬蓋子蓋住瓶口，如圖 2 所示。蓋子上鉗接兩根管子，其一用以抽氣，另一連接在氣壓計上，藉以量度液態空氣沸騰時的壓強值。知道了飽和蒸汽壓強和溫度間的關係，再按氣壓計測得的壓強值便立刻得到沸騰液體的溫度。低溫實驗物理中使用極廣泛的副溫度計即是這樣。

倘若在盛低壓下沸騰的液態空氣的杜瓦瓶中，浸入玻璃細頸瓶，它和外界空氣用貫穿瓶蓋的玻璃管溝通起來，則經過不大一段的時間，細頸瓶內開始充灌了液體；外界空氣開始凝結在細頸瓶中。這是由於杜瓦瓶內的溫度低於在大氣壓強下空氣

沸騰(也即開始凝結)的溫度所致。

在物理學中廣泛地應用藉抽去液態氣體的蒸汽來獲得低溫的方法，尤其抽去液態氧的蒸汽時可以得到介於 90 和 55°K 間的任何溫度。

要是用液態氫作冷却媒劑，便能獲得更低的溫度。大氣壓強下氫氣在 20.4°K 時液化(和沸騰)。用抽

去液態氫的蒸汽的方法可以達到 14.0°K 的溫度(三相點)。將固態氫的蒸汽抽去可以得到更低的溫度(約達 10°K)；在這個溫度間隔內，固態氫上的蒸汽壓強對促成熱交換(теплообмен)來說還是足夠大的。

物體在 10~90°K 溫度間隔中的物理性質的研究引起了許多重要的發現。一系列原來在較高溫度下正確的“定律”，在這個溫度間隔中便喪失了它的作用。屬於這些定律之列的是，例如，所謂“杜隆-珀替定律”——任何固體的熱容量，每一克分子量約為 6 卡/度。當溫度降低到 100°K 和 100°K 以下時，熱容量急劇下降，如圖 3 所示。

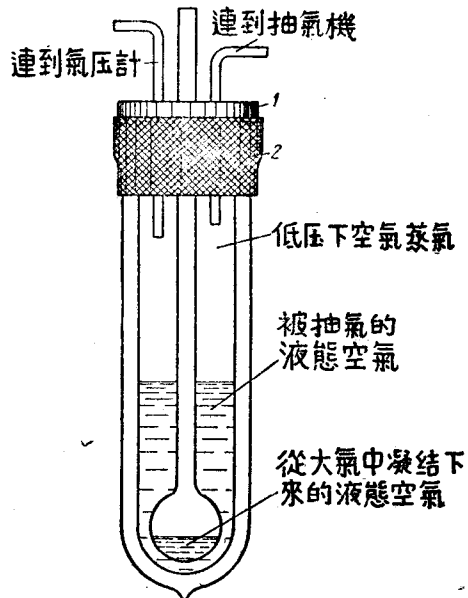


圖 2. 從杜瓦瓶中抽去液態空氣的蒸汽：
1~金屬蓋； 2~橡皮套。

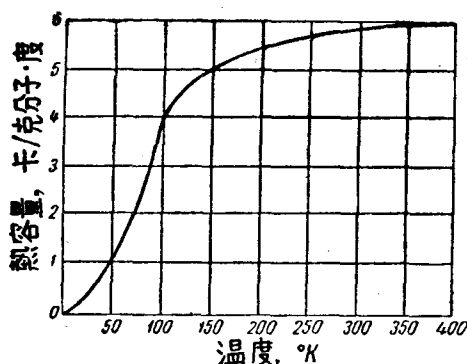


圖 3. 銅的熱容量和溫度間關係。

在前者的情形下存在着分子的轉動；氣體的熱能量便不單是分子平移運動的能量，並且還有分子轉動運動的能量。低溫下的實驗指出，單原子和多原子氣體在低溫時熱容量值間的差別消失了。我們可以引用氫熱容量的溫度關係作為例子。當溫度低於 50°K 時，氫的熱容量實際上和單原子氣體的熱容量相同，並且和溫度無關。這說明了：在這間隔內溫度的變化只引起平移運動平均速度的改變，而不會引起分子轉動自由度 (степень свободы) 的激發。

同樣的，發現了一系列其他極有趣的現象——分子內部運動的激發、第二種相變等等，這些研究在頗大程度上都是由於用了液態空氣和液態氫所獲得的溫度領域中的研究所促成的。

但是，當物理學家從事於祇能用液態氫才能達到的溫度領域中的研究時，便發現了完全出於意料的、嶄新的現象。今日，低溫物理中所要了解的現象範圍，主要的就是指在氫溫度

多原子氣體的熱容量是同類的另一例。我們都知道，例如雙原子的氣體在接近室溫時的熱容量每克分子量為 5 卡/度左右，比單原子氣體的熱容量高出 2 卡/度。

兩者間的差別是由於

(гелиевая температура) (4.2°K 以下的溫度) 下所觀察到的。

在十五年前左右，蘇聯哈爾科夫 (Харьков) 物理技術研究所已給低溫 (氦的溫度) 物理的發展打下了基礎。在該所使用液態氦工作不久，莫斯科成立了在今日以瓦維洛夫 (С. И. Вавилов) 命名的蘇聯科學院物理問題研究所。這個研究所主要工作方向之一是研究溫度接近於絕對零度時物質的性質。該所並已完成了大量的低溫物理領域的實驗工作。

低溫物理是新的科學。但是蘇聯學者能够在短時期內就取得了在該物理領域的主要地位。許多低溫物理上的工作獲得了斯大林獎金，便足以證明工作的高度水平。

低溫物理中最突出的發現是超導電性和超流動性。這些現象究竟是些什麼呢？

液態氦的超流動性

在普通條件下，我們知道氦是很輕的、化學上不活動的氣體，氦原子不單是與其他元素的原子間相互作用小，並且氦原子彼此間也很少交互作用。因此，在冷卻時它比其他一切氣體更緩地轉變為液態。氦的臨界點為 5.3°K (-268°C 左右)。可見，高於這個溫度時要將氦變為液態是不可能的。在大氣壓強下，溫度為 4.22°K 時氦開始沸騰和液化。

液態氦為無色的、極輕的 (比重為水的 $1/7$) 液體。它具有小的折射率，若是盛在透明的玻璃容器——杜瓦瓶中，很難看得出來。液態氦很快地便能沸騰乾盡，這是由於它的汽化熱很低——小於 5 卡/克分子——所致。液態氦的保存很困難。必須存

放在具有防止熱輻射的鍍水銀壁的特殊杜瓦瓶中。盛有液態氮的杜瓦瓶又必須裝在另一鍍水銀壁並灌滿液態空氣的杜瓦瓶內，如圖4所示。但是，氮，照例在杜瓦瓶中總共祇能維持幾小時之久，在氮溫度下進行研究便感到極度困難。使用抽去液態氮蒸汽的方法可以比較容易地使它的溫度降至 $1.1 \sim 1.2^\circ\text{K}$ 。要是用強有力的抽氣機並且對外部熱輻射防護得極好，則可到達 0.71°K 的溫度。在這溫度下氮仍保持液態。現時物理學家都確信：氮即使溫度低到靠近於絕對零度也仍為液態。

雖然，液態氮在冷卻下不會變成固態，但它却經歷着另一種完全異常的極突出的轉變。這種轉變的存在可以在逐漸抽空盛氮的杜瓦瓶的過程中直接觀察到。先是看到，氮猛烈地沸騰着。這個現象在溫度超過 2.19°K 前沒有改變。但祇要“越過”這個溫度，氮的狀態便急劇變化了。要是溫度高於 2.19°K ，液態氮和它的蒸汽間的分界面極度模糊，而低於這個溫度時，分界面便鮮明而固定。

在 2.19°K 的這種轉變（轉變溫度的較精確值為 2.186°K ）經過了詳細的研究。首先被發現的是：它不是一般的相變，因為在轉變中沒有發生熱量的放出和吸收。代之的是觀察到熱容

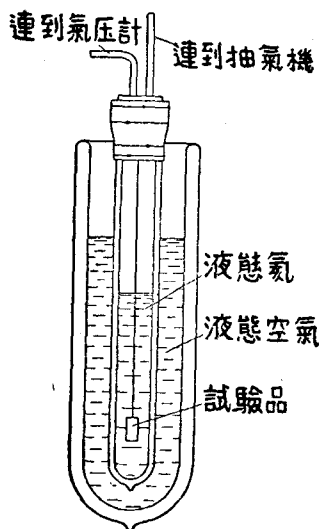


圖4. 盛液態氮的杜瓦瓶(剖面圖)。

量與溫度關係的顯著的反常：靠近轉變溫度時，熱容量急劇增大，如圖 5 所示。由於熱容量和溫度關係的曲線在接近轉變處類似希臘字母 λ (ламбда) 的形狀，此轉變被稱為 λ -轉變，溫度 2.19°K 被稱為 λ -點。液態氦在溫度高於 λ -點時稱為氦-I，低於 λ -點則稱為氦-II。

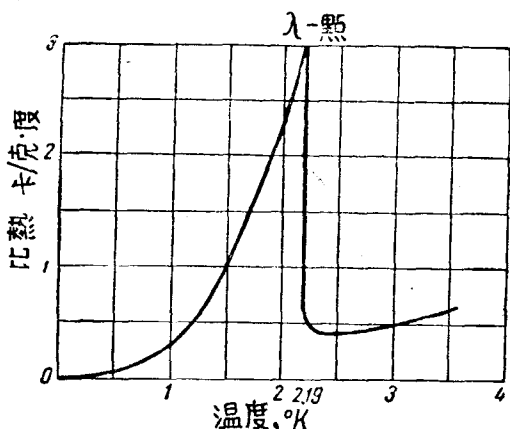


圖 5. 氦熱容量曲線上的 λ -峰。

大體上，氦-I 的性質和普通液體極為相似。相反的，氦-II 却是一種具有迥非尋常的性質的液體。氦-II 的這些性質中，其最重要的，為蘇聯學者所發現並加以詳細研究的，是它的超流動性。如吾人所習知，每一種液體（或氣體）都具有一定的粘滯度。粘滯性表現在，例如，阻礙液體或氣體在毛細管或狹縫中的流動；祇可能在毛細管（縫隙）兩端具有足夠大的壓強差時，才能有明顯的流動速度。在用經過極狹的縫隙（寬度約為 1 微米）的流動來測量氦-II 的粘滯度時，發現它比那些較易流動的液體，例如水，其粘滯度要小十億倍。這樣的粘滯度在實際上可