

中華科學叢書第十八種

低溫物理

絕對零點之探究

著者：K. Mendelssohn

譯述者：錢致榕 吳家瑋



臺灣中華書局印行

低溫物理

絕對零點之探究

著者：K. Mendelssohn

譯者：錢致榕 吳家瑋

臺灣中華書局印行

中華民國六十八年一月二版
中華科學叢書第十八種

低溫物理——絕對零點之探究（全一冊）

基本定價：叁元貳角正

著者 K. Mendelssohn
譯者 錢致瑋

中華科學叢書編輯委員（以姓氏筆劃爲序）

伍法岳 沈君山 沈慶春 李天培
林多樑 吳京生 吳家瑋 吳錦鉉
夏道師 浦大邦 許翼雲 趙曾珏
劉鑒 劉全生 鄭伯昆 錢致榕
瞿樹元



發行人 熊鈍
臺灣中華書局股份有限公司代表

本書局登記證字號
印刷者 行政院新聞局局版
發行人 營業字第捌叁伍號
臺灣中華書局印刷廠
臺北市重慶南路一段九十四號

甲書

No. 7716

（實・廠）

中華科學叢書序

近代物理學，可溯源於十九世紀末年之氣體導電，X光，放射性等之研究。六十餘年來，基本物理中劃時代之發展，如一九〇〇年之量子論，一九〇五年之相對論，一九一三年之原子結構理論，一九二四——一九二八年間之量子力學，一九三幾年之原子核物理，一九三九年之原子核分裂。一九四六年介子之發現，及近十餘年來之基本粒子物理及物理學中之對稱定律等。常言「一日千里」，實不足以形容物理學發展之迅速。即從事一部門物理研究工作之學者，對其他部門之新發展亦時感脫節。故各國各部門科學皆有專書及期刊，由各門專家著述，對各部門工作之結果及發展之情形，作綜合性之報告、檢討及分析。此類著作，不僅便利同儕而已。

年來國人對科學及技術於建國之重要，了解漸深，一般青年，對科學、工程技術之興趣亦日趨濃厚。然限於環境，時或有望洋興嘆之感。增強在臺學校中科學教程，固為一基本工作，但以中文著述，介紹科學之新發展，為學校課外之補充讀物實為一極重要、極有意義之事。

我國留美學者：伍法岳、沈君山、沈慶春、李天培、林多樑、吳京生、吳家瑋、吳錦鋐、夏道師、浦大邦、劉鑒、劉全生、錢致榕、瞿樹元諸先生有鑑於此，曾決定從事科學叢書之編譯，各就其專長，選定寫作部門，目前除計劃於近期內陸續出版關於**基本粒子、天文漫談、物理定律的特性、半導體裝置、現代物理**等等外，尚有**液態氦、高能加速器**等陸續出版，並擬擴大科學部門，廣邀各方面學者專家從事著述。

叢書編輯委員會諸君，皆年青學者，學有專長，茲能熱心從事著述，為我國科學教育及青年效勞；而中華書局亦以服務精神發行科學叢書。筆者年來對我國科學教育，未嘗忘懷，祇以力不從心，無善可述，茲聞此叢書行將陸續出版，謹向國人介紹，並致個人欽佩喜慰之感。

吳 大 猷

一九六六年十月



譯者序



一九六五年的夏天，我們正在耶魯及華盛頓大學分別忙着寫論文。第一次見面，很自然地就談到國內一般科學書籍的需要，因而相約翻譯或寫作一二本通俗的小書。

一年以後，碰巧同時到加州大學工作，雖在不同的分校，却常見面，兩人中有一個是吃低溫飯的，當時在寫一本有關液態氮的小書，覺得在討論液態氮前，不能不先替讀者在低溫之致取上打個根基。恰巧看到英國低溫物理學者孟德孫(Mendelessohn)所著的這本小書，深愛它的深入淺出、活潑流利，立刻決定一起翻譯。當時以爲一年中必可完工。

六年來，教書研究，東奔西跑——由東岸來的又回到了東岸，由中西部來的又回到了中西部。忙懶交加下，這本小書一再耽擱下來；等完工時，已斷斷續續花了四年多的光景翻譯及改寫。好在這幾年中，低溫物理雖有進展，却未脫胎換骨。再說，這兒談到的大半有關基本原則，輕易變化不了。這本小書看來還有它的價值。

液態氮一書，在這幾年中已給擴充成氮與多體物理，最近業已脫稿。低溫物理近年來的進展，會在這「續集」裏出現。

完稿時，正值海內外的青年朋友們，爲了保衛釣魚台列嶼的主權，奔走呼號。素來沉默的中國青年，爲了國事挺身而出，深覺是可喜可佩的現象。謹以此書，獻給海內外的青年朋友們。

一九七一年四月廿六日於華盛頓

已出版之中華科學叢書

書名	著譯者	冊別	新臺幣
基本粒子·····	楊振寧著 林多樑錢相譯	全一冊	12.00
天文漫談·····	沈君山著	全一冊	16.00
雷射與雷射·····	李天培譯	全一冊	12.00
半導體裝置·····	李述中譯	全一冊	18.00
甚麼是相對論·····	李榮章王華譯	全一冊	12.00
物理定律的特性·····	林多樑譯	全一冊	18.00
火箭推動淺說·····	夏道師著	全一冊	12.00
現代物理·····	錢相林多樑譯	全一冊	21.50
分子軌道·····	丁陳漢蓀譯	全一冊	25.00
天文新語·····	沈君山著	全一冊	17.50
化學反應如何發生·····	易定博譯 潘可傳	全一冊	22.50
漫談晶體·····	伍法岳譯 張青芝	全一冊	17.00
強韌的材料·····	葉湘濤編譯	全一冊	14.00
反物質與宇宙論·····	韓建珊譯	全一冊	17.00
博戲的理論與應用·····	趙慎餘譯	全一冊	15.00
形與流——帶阻力的流體力學	曹家政譯	全一冊	20.00
核子武器·····	林國樞譯	全一冊	20.00

XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX
低溫物理——絕對零點之探究 目錄
XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX

一、 <u>巴黎</u> ，一八七七·····	1
二、 <u>克拉考夫</u> ，一八八三·····	18
三、 <u>倫敦</u> ，一八九八·····	44
四、 <u>萊登</u> ，一九〇八·····	65
五、第三定律·····	79
六、量子化·····	97
七、不可定性·····	118
八、磁冷·····	142
九、超導電性·····	168
十、超流動性·····	195
大事年表·····	217
中英文對照表及索引·····	221

封面說明：清華大學物理中心之低溫固態物理實驗館，內有實驗室、圖

書館、電子計算機、氦液化裝置、演講室等。

（攝影：張信良）



一、巴黎，一八七七



氧的液化

我們的故事開場於一八七七年耶誕前夕，背景在巴黎的法國科學院。一週前就有謠傳，說在這次的集會中，有人會宣佈一項重要的新發現。這時候，會員們雖然在照老規矩執行各項事務，事實上却焦急地在等候這項宣佈。終於科學院的祕書站了起來，引用拉瓦西（Lavoisier）的一番話來為這項宣佈作開場白：

「太陽系統中有些區域非常炎熱，若地球被移置其中，其四周溫度可超越水的沸點。在這種情況下，我們日常慣見的液體甚至某些金屬，都會化成氣體混入大氣。反之，若地球被移置於極寒冷的地區，如在木星或土星隣近，則一切汪洋大川都會被凍成冰山；空氣本身也會局部液化，變成我們目前尚未有認識的新液體。」

到一八七七年，這位偉大的化學家的預言已出現近百年了，但實驗工作者還沒有能構製他所提起的「新液體」。這次集會中的大新聞正是氧氣的液化。在趨向絕對零點的征途上，這件事無疑是第一塊里程碑。

報告這消息的人是個新獲選入科學院的通訊會員。他是一位礦業工程師，名叫蓋勒德（Cailletet），原藉法國

塞因河畔的夏地龍鎮 (Chatillon sur Seine)。最初他所用的液化氣體的技巧跟別人也沒有什麼分別：在氣體上加極強的壓力。據他所知，在通常溫度下，一種叫乙炔 (C_2H_2) 的氣體只需 60atm (六氣壓之六十倍) 即可液化，所以他首先選擇了乙炔來作試驗。可惜他的儀器不夠結實，壓力未達 60atm 就給迸裂了！於是儀器中久受壓縮的氣體鑽縫破隙，一窩蜂地溜了出去。蓋勒德當時正好在留心觀察這儀器；這儀器是隻玻璃管，所以管內的動靜一目了然。當這些氣體大夥兒逃散時，一陣薄霧跟着出現，曇花一現後立即消失，却未能逃過蓋勒德的耿耿虎視。當時他的反應是：管內的乙炔不純，含有水汽；這陣怪霧只是凝結片刻的水分，並非什麼別的液體。爲了要確定這一點，他去找了一些極度純淨的乙炔，再把這實驗做了一次；這怪霧居然又露了臉。這次他改變了主意，另作結論：玻璃管破裂時，氣體衝出容器，內部壓力驟降；這突來的低壓使管內溫度降低，一部份腿慢的乙炔被這低溫液化；片刻後室溫克服了這局部的低溫，被液化了的乙炔又給打回原形。這場怪霧身世既明，塞翁失馬，蓋勒德憑空學來了一套新功夫。

當時他這行中最大的難題是怎樣液化大氣中的氣體；蓋勒德立刻運用他的新技巧來依樣葫蘆。因爲氧氣比較容易純化，他第一個目標是氧。他的做法是先把氧氣壓縮到 300atm 的高壓，然後把玻璃管放在二氧化硫氣中，使周圍的溫度降至 $-29^{\circ}C$ (攝氏零下 29 度)。最後他使壓力突降，又招來了一陣薄霧。這實驗重複多次後，他肯定地證實了這薄霧是液態氧，而不是什麼混入

氧氣中的雜質。巴黎科學院所收到的通訊就是他寄來的實驗報告。

然而這會議中令人驚喜的消息却不止一宗。蓋勒德的通訊才讀完，祕書先生又站了起來，說兩天前有位物理學者從日內瓦打了個電報來，內容是：「今日在320^{atm}及140『冷度』下用硫酸及碳酸液化氧氣成功。發報者：畢克德 (Raoul Pictet)。」與這電報同時收到的是數日前寄出的一封長信，詳述畢克德所用的方法。照時間來推算，一定是畢克德早料到了他自己的成功，所以先把詳情記錄後以平郵投遞。他的方法與蓋勒德不同，先液化了一連串不同的氣體，最後才輪到氧。這方式叫做「級聯」(cascade)，我們會在後文中細談。蓋、畢二人所用方法雖然大為相異，達到目標的時期却幾乎完全相同。

表面上看來這種事應是巧合，事實上在科學歷史上，二人或數人作同時而個別的發現是屢見的事。所謂「個別」當然是指他們並沒有互相窺探或抄襲。真正來說，我們應從大處着眼：在任何時代，科學工作者必全受當時科學發展的概況牽制，根本不能各持純粹「個別」的觀點。科學的進展也不必依靠意外的收穫；我們可以把這進展看為一種有機的生長：在每一階段，所需的新發現難免自動露面。蓋勒德若非有意在尋求乙炔之液化，必不會去理會這即聚即散的薄霧：科學的成熟地步還未到達需要這新發現的境界。既然科學已經成熟到了這地步，則蓋勒德的巧遇也非必要：假如他不了解這會事的本末，別人在短期內也自會注意到：畢克德正是這人，他用了另一條路走到了同樣的目的地。我們的故事雖以這

1877年耶誕前夕的雙喜來作開端，其實鑼鼓已響了很久，到這時候正戲也得開場了。

這些科學進展上難免的「巧遇」引起一個棘手的問題：當局者爲了功名常會爭先論後。在許多情形下所謂先後又着實難分。這盤棋的規則固然視時地而異，通常以正式發表之先後而定。在十九世紀的法國，所謂「正式發表」是指通訊於科學院。畢克德的電報發於十二月廿二日，蓋勒德的報告却到十二月廿四日才公佈。後者的實驗早在十二月二日已經成功，科學院雖在十二月三日及十七日都開過會，蓋氏却爲了一件不相干的事，未敢在十七日前發表他的成果。這件事有關他之獲選入科學院：原來「科學院通訊會員」是個人人豔羨的銜頭，每次選舉時競爭很強。蓋氏入選是十二月十七日的事，在這大日子前他不敢公佈此項駭人聽聞的新發現，怕投票者懷疑他的用意，倒起反感。若這公佈名義上是非正式的，不在科學院中舉行，別人就無法非難了；所以他在十二月十六日邀請了一班同事，當衆表演了一番氧的液化。於是次日科學院選拔了他，投票結果是23比19。他的正式公佈却被拖延到十二月廿四日，在畢克德電報之後。看來蓋氏給人取了頭籌！好在這段故事的結尾尚佳：在十二月二日實驗成功那天，他寫了一封長信給巴黎的一位好朋友，說起了這件事；這傢伙在十二月三日收到信，立刻拿去給科學院的永久祕書看。這位祕書先生鄭重其事，在信上署名證實，並註上日期，封了口。蓋勒德乃算正式化過他的報告，還是撈了液化氧氣的首功。

我們在這兒要討論的不是氣體之液化，而是怎樣獲

取低溫。畢克德的信中並未提到他當時所達的溫度。蓋勒德却有些估計，說溫度突降時降了約 200°C ；據我們現在所知，他的估計所差無多。當時沒有人對低溫之致取有多大興趣，所重的僅是用實驗方式來證實拉瓦西的預言。耶誕期間蓋氏繼續努力，一周後又公佈了氮氣的液化。空氣的主要成份是氮氣和氧氣，至此拉瓦西的預言終告實現。

絕對零點

首倡溫度有最低限度：「絕對零點」的似是十七世紀末葉的阿蒙頓 (Guillaume Amontons)。他比分別發現「空氣壓力與容積成反比」的波義耳 (Boyle) 與馬里歐 (Mariotte) 略為年青。阿蒙頓幼時失去聽覺，終生以研究及測量溫度為業。他發明的一種溫度計用空氣的體積為標準；在一隻玻璃管中放入某等分量的空氣，然後壓以水銀柱。溫度變化時，氣壓跟着變化；變化的程度可由水銀柱之高度測知。他用這方式注意到在水的沸點以下，溫度與氣壓成正比；既然氣壓降至零點時不能再降，他推論溫度之下降也必有限度：氣體或任何物質必不能被冷化到這限度之下。他推算這限度約是 -240°C 。阿蒙頓的研究比查理 (Charles) 和給呂薩克 (Gay-Lussac) 早了一世紀；後二者把這結果寫成一嚴格之定律：溫度每降低 1°C ，氣壓降低一固定的分量；這分量等於 0°C (水的冰點) 時氣壓之二百七十三分之一。所以最低溫度應是 -273°C ，這叫做「絕對零點」。

阿蒙頓在溫度及「熱」的看法上還有一深層的了解；

他認為在絕對零點時萬物盡趨靜止。那時候的科學家對溫度和熱的意義及測量還抱着很大的疑問：熱究竟是什麼東西？水放在火頭上燒，結果的性質（溫度、壓力和體積：都起了顯著的變化，好像有些什麼精靈由火頭上鑽入水底。術士把這精靈稱為「烈性的原素」或元氣。但是一塊燒紅了的鐵丟入水內也會使水溫增加，所以這精靈必諳「鐵遁」之術。當時的人就把這精靈叫做「熱質」（caloric）；熱質算是一種含有熱力的流體，能由一物流入另一物：由火入鐵時，鐵就熱了；由鐵入水時，水就熱了。溫度計所測量的就是這流體的分量。這流體正如一般物質的流體，會由分量多處流向分量少處。於是熱鐵在水中久浸後，鐵溫與水溫必趨相等；這也就是說二者所含熱質的分量終須相等。這學說的好處是：把熱看成物質後，「分量」就有了意義，可定下單位來直接測量。當時所定的單位叫做「卡路里」（calorie），或簡稱「卡」（cal）：一卡之熱能使一克（gram，千分之一公斤）的水增溫一度（ 1°C ）。這說法的壞處是「熱質」沒有重量：鐵給燒熱後重量並未增加；這種無重量的流體很難合入我們所熟悉的物質世界。這學說到十九世紀初葉終被否定；我們現在知道熱是能量之一種，並非一種自有個性的流質；但是「熱質」之說觀念簡單，用起來很得當，所以至今仍在流傳。阿蒙頓在早期即已注意到熱與物質運動之密切關係；在絕對零點時，他那「萬物靜止」之說是錯了，但是大致觀念却算正確。熱量和其他可測定的量：溫度、壓力和體積，合力造成了今日「熱力學」（thermodynamics）的基礎。

分子運動論和熱力學

熱力學可以說是一種純粹的「經驗理論」。從日常經驗中我們可以找出某些容易精確測量的「量」，分別定義，然後由測量的結果斷定這些量的相互關連，以公式表明。這般步驟下推出的公式，應用非常普及。熱力學解答科學及工程上種種問題的能力因此也特別大。從這兒開始，這本小冊子裏所討論的問題沒有一點不倚靠熱力學的觀念。

熱力學中最基本的量是溫度、壓力、體積和熱量，溫度可以直接用溫度計測量（最簡單的溫度計是我們的手指）；壓力是每單位面積所受之外力（用手掌壓破汽球沒有用針頭刺破容易，因為後者接觸的球面面積小，只需很微小的外力即可造成很強大的壓力）；體積就是大小，可用尺量（氣體在器皿中完全四散，其體積正等於器皿的容積）。這些量都是平時常用的，要討論它們不必先明白物質的結構。同樣，熱也是一種日常經驗中所熟知的量，我們可以談到熱量而不須懂得它究竟是什麼東西。反之若要明白這些量的來龍去脈，我們不得不由物質的基本結構出發，用原子或分子理論來另建一套基本學說：這叫分子運動論；我們要談談這理論在熱力學上的地位，和它與經驗理論的相互印證。

阿蒙頓談及絕對零點與萬物靜止時，他的對象決非那抽象的「熱質」，而是原子或分子。兩千年前底模基多士（Democritus）有個念頭，說構成萬物的原料必是極微小而無法分割的「磚塊」：原子。這學說的聲譽不斷上

落，但始終未被證實或否定。這當然是因為科學之進展尚在原始階段，這種問題尚無解答之必要。到十八、九世紀，它的重要性終於出現了：拿原子論來講解熱力學非常方便，只需當時所知的牛頓力學 (Newtonian mechanics) 即已足用；那「無重流體」之假定可以完全放棄。牛頓和阿蒙頓是同一時代的人；若有人把解釋天體運動已甚見效的力學原則，拿來應用於原子或分子運動，應非怪事。可惜阿蒙頓只輕描淡寫地提了一下熱與原子運動的關連，並未深究。一七三八年，瑞士的名數理家伯努利 (Daniel Bernoulli) 把這問題嚴格處理；在水力學一書中，他說所有「彈性流體」，包括空氣，都是由微粒構成。這些微粒不斷地作無規運動，互相衝擊，並與容器的牆相撞。每次的衝撞都是完全彈性的，所以此等微粒運動永不減慢。它們好像是皮球，彈來彈去，惟一的差異是樂此不疲，來來去去永無休止。我們若伸手去碰必會感到這連續不斷的衝擊；這感覺就是所謂的「熱」。伯努利的理論與阿蒙頓在一七〇二年實驗所獲的結果相符。

分子運動論的優點不在其簡單：應用起來這理論並不簡單，而在其與力學的直接關係。這種關係在讀物理的人的眼光中，大可稱為「美」事。因為科學的基本信條是：這花花世界必來自一套圓滿無缺，切合一致的藍圖；我們一切的觀察都是這藍圖中的小部份，一切基本研究工作都以發掘此藍圖為共同目標。目前科學研究尚在初期，我們還在為尋找新現象疲於奔命；即使有聰慧萬分的天才，也無法從幾件零零碎碎的現象中推出大自然的全盤計劃。科學研究有如小孩子在玩一具巨型及極