

低溫與高磁場的世界



江佩勳／國立臺灣師範大學物理學系助理教授，
閒暇時愛攀岩、跳舞、彈鋼琴。

當我告訴朋友我的研究主題是低溫物理時，他們興致勃勃的談論起來。

「低溫物理？」榮尼說，「是不是像 FBI 那種從上鎖電腦中取出資料的手法？就是讓電腦在不斷電的情況下把它移到極低溫環境，將記憶體拔出來，迅速接到另一台電腦，在完全不流失資料的情況下將記憶體中的私密資料讀出來。這算是低溫物理的範圍嗎？」

小光笑道：「那個與超導體世界相比，應該算超高溫？」

的確，在我實驗室內的「致冷機」可降到「接近」絕對零度（0 Kelvin，相當於 -273°C ，Kelvin 可縮寫成 K），遠低於日常生活中遇到的低溫。不過，所有的低溫技術都是應用幾個相似的物理原理。就像以前我在美國國家高磁場實驗室裡認識的致冷機技師，也曾擔任沃爾瑪百貨食品冷凍部門的顧問。

上面提到的竊取電腦資料手法，稱作「冷開機攻擊」，操作者大多會用壓縮氣體噴灌來製造低溫。這噴灌隨處都買得到，通常被用來為電子元件除塵，把灰塵吹走。

噴灌裡面是因高壓液化的氣體（通常是碳氟化合物），當液體被噴出時，它會迅速汽化；此相變需要吸收潛熱才能進行，所以它能將環境溫度降低。

相變

相變是指物質在外部條件（如溫度、壓力、或其他條件）變化下，從一種相轉變成另一種相的過程。

相變分為「不連續的相變」和「連續的相變」。在不連續相變過程中，溫度會維持定值，潛熱會吸收或放出，並會牽涉到很突然的物質性質變化；例如液體在溫度達沸點時會吸收潛熱，從液相變成氣相，密度突然變得很小，而溫度在相變過程中維持在沸點。

在連續相變過程中，並不會牽涉潛熱的吸放，例如鐵磁材料在居里溫度以上會失去鐵磁性，這種相變不牽涉潛熱。至於超導態與非超導態之間的相變，它通常被認為是連續相變，不牽涉潛熱的吸放；但在有外加磁場下，可能會牽涉些微的潛熱吸放。

致冷機裡的相變

所有致冷機都需要靠冷媒進行「相變」，以達到降溫效果，就像日常生活中的冷氣機和冰箱也都需要冷媒。冷氣機和冰箱常用的冷媒多為各種碳氟化合物與其他材料的混合物，但實驗室裡接近絕對零度的致冷機所使用的冷媒則是「氦」。氦有兩種穩定的同位素：氦-4 (^4He) 與氦-3 (^3He)，在自然界所佔比例各為 99.9998% 和 0.0002%。在一大氣壓下，氦-4 的沸點是 4.2 K，氦-3 的沸點是 3.2 K；但如果對一小壺液態氦抽氣，降低其蒸氣壓，那麼氦-4 可以再降到大約 1 K，而純氦-3 可以降到 0.2 到 0.3 K。

若還嫌不夠，有一種致冷機叫做「稀釋致冷機（dilution refrigerator）」，它除了配備 1 K 的液態氦-4 壺，它還有一個最主要的結構叫「混合室（mixing chamber）」，其內會引入氦-4 與氦-3 特定比例混合物。此混合室在 1 K 壺和其他結構的協助下，可降溫到 0.87 K 以下；在這溫度下，原本均勻的混合物會形成明顯的「濃 ^3He 相（ $^3\text{He-rich phase}$ ）」和「稀 ^3He 相（ $^3\text{He-dilute phase}$ ）」兩相分層，此兩相分界叫做相界（phase boundary）。對混合室外上方溫度較高、仍均勻的混合物容器（英文稱作 Still）抽氣時，會誘發混合室內的氦-3 從「濃 ^3He 相」通過相界移入「稀 ^3He 相」，以補充「稀 ^3He 相」中的氦-3 回到其平衡態；此通過相界的過程須吸收能量，可以使周遭溫度降到約 10 mK 以下（ $1\text{ mK} = 10^{-3}\text{ K}$ ）。

如果我們把待測樣品放在致冷機裡的液態氦壺旁邊，讓它們之間有很好的熱傳導，那麼樣品就可以被降到低溫。但我們要怎麼保證致冷機裡面可以維持低溫、外界室溫的熱不會傳進去呢？看看廚房冰箱設計，其箱門一定是用很好的隔熱材料。至於實驗室致冷機，要求更高，其外側一定有「真空」層，防止熱傳導與熱對流；真空壁上也會使用良好的反射材料，以防止熱輻射。

低溫下的量子力學現象

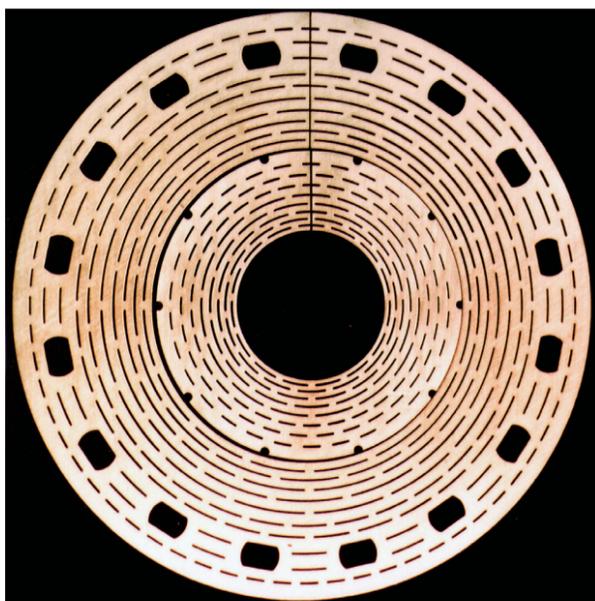
為什麼會有人想把樣品降到這麼低溫呢？這是因為科學家想要觀察一些量子力學的現象，那是原子層級、甚至

稀釋致冷機運作過程可參見美國國家高磁實驗室網頁的動畫說明：goo.gl/m0AdA1



圖一：致冷機外觀。此台溫度可降到 0.3 K。致冷機上有許多線路連接到測量儀器上，另有幾條管線連接到幫浦或壓縮機（幫浦與壓縮機未顯示在照片內）。致冷機裡面則有超導磁鐵和待測樣品。（江佩勳教授實驗室提供）

基本粒子層級的行為。在室溫下，微小的量子力學訊號通常無法被看見，因為「熱」本身代表原子在振動，這些熱振動訊號會蓋過量子力學訊號。所以我們須將想研究的材料降到極低溫，抑制原子的動能，才能觀察其量子力學訊號。我過去主要研究半導體二維界面上電子的「量子霍爾效應 (quantum Hall effect)」，這也是需要極低溫才能觀察到的量子力學現象。到了 2004 年，單原子層石墨 (graphene) 被成功以膠帶從石墨塊上黏撕下來後，科學家發現這個天生的二維材料上的電子系統會呈現一種異常的量子霍爾效應 (這與其特有的碳原子六角晶格結構有關)，與之前在半導體上觀察到的量子霍爾效應不太一樣。此相關研究使得研究學者海姆 (Andre Geim) 和諾沃肖洛夫 (Konstantin Novoselov) 在 2010 年拿到諾貝爾物理獎。單層石墨的異常量子霍爾效應有一個特殊性質：它的較低藍道能階 (Landau levels) 的間距比室溫熱能〔註一〕還大，意思就是：它呈現的量子化訊號很大，室溫下也可能觀察得到，不會被熱訊號掩蓋掉。但為了想看到更清晰乾



圖二：Bitter 盤，其上有許多狹長孔洞供冷卻水流過。
(National High Magnetic Field Laboratory 提供)

淨的量子力學訊號，研究單層石墨的科學家們還是常常將它降溫來測量。

文章開頭曾提到的「超導體」，也屬於極低溫才能顯現的量子力學現象。不過，降溫超導體不只是為了抑制熱訊號，更關鍵的是超導體有「臨界溫度」——必須降到這溫度以下，才能相變到無電阻的超導態，否則只是個普通導體，其導電率通常比銅還要差。超導體並非筆者研究主題，但我卻經常使用超導體進行實驗，因為量子霍爾效應須在低溫且高磁場環境下才能觀測到，而在我實驗室內的電磁鐵線圈就是用超導體做成的。所以我的超導磁鐵也必須跟樣品一起放在致冷機裡降溫，否則磁鐵無法達到超導態。

高磁場電磁鐵

為何我們不用一般良導體 (例如銅) 來製成電磁鐵呢？因為銅仍有電阻，有電阻就會耗電 (意即消耗功率)。電磁鐵線圈必須通以高電流才能達到高磁場；持續做高磁場實驗一個月後，你大概就會收到很可觀的電費帳單。以美國國家高磁實驗室 (National High Magnetic Field Laboratory) 為例，其每年花在電磁鐵上的電費就有 260 萬美金。難道高磁實驗室不用超導磁鐵來省電費嗎？他們當然有超導磁鐵，但是超導體還有一種性質是具有「臨界磁場」。在這磁場以上，超導態就會消失，於是超導磁鐵自己無法提供無限高的磁場。目前全世界最強的超導磁鐵可產生 23.5 特斯拉〔註二〕的磁場，而現在美國國家高磁實驗室正在建造 32 特斯拉的超導磁鐵。若還想比這磁場更高，我們就必須回頭仰賴一般良導體所做成的電阻磁鐵，讓超導磁鐵與電阻磁鐵合體，加出更高的磁場。當然，超導磁鐵得放在電阻磁鐵外圈；若放在內圈承受兩者加成的高磁場，一旦超過超導磁鐵的臨界磁場，它就立刻相變成一般導體。

目前全世界磁場最高的複合磁鐵在美國國家高磁實驗

室，有 45 特斯拉，是由 11.5 特斯拉的超導磁鐵和 33.5 特斯拉的電阻磁鐵組合而成。受技術限制，電阻磁鐵也無法製作到讓它磁場無限大，因為電阻磁鐵通電時會很熱 (功率可到百萬瓦等級)，須為它建造冷卻水路，不然電阻磁鐵會燙到融化。所以，不像超導磁鐵是用線圈繞成的，電阻磁鐵則是用一疊挖了許多小孔洞的銅盤或銅合金盤疊起而成。這種金屬盤叫做「Bitter 盤」，本身可通電流，而其上小孔設計是為了讓不導電的去離子水通過，藉以冷卻電阻磁鐵。此外，設計 Bitter 盤還須考慮電阻磁鐵通電時產生的強大勞倫茲力，電流在磁場下會受到勞倫茲力，使得 Bitter 盤承受一個沿半徑方向往外拉扯的強大力量，故 Bitter 盤本身必須夠堅固。早年的 Bitter 盤孔洞是圓形的；但後來磁鐵工程師發現狹長的孔洞比較能維持 Bitter 盤的堅固性，以承受更大力量 (於是才能通上更大的電流以產生更高磁場)，故新型 Bitter 盤的孔洞是狹長型的。

也許有人聽過比 45 特斯拉更強的磁鐵，但那些都是脈衝磁鐵，只能上衝到高磁場幾毫秒時間，又立刻降回零磁場，不像文章前幾段談的磁鐵都可提供穩定延續的磁場。目前全世界最強的脈衝磁鐵為 100 特斯拉。如果你還聽過比這更強的脈衝磁鐵，那它們一定是瞬間毀滅型——只為了做一次高磁場實驗而被製造出來，衝出一次超高脈衝磁場後就因強大勞倫茲力而立刻自爆。

另外，我們也來看一下超導磁鐵可能遇到的問題。超導磁鐵也許會因為缺陷或不小小心超過臨界磁場或臨界溫度而突然相變成一般導體，這種事件我們俗稱作「quench (熄滅)」，此時磁鐵線圈中的電流仍然很大，但電阻突然從零變大，於是產生極高的焦耳熱，整個致冷機立刻升溫。若這是一個泡在液態氮浴裡的致冷機，那麼液態氮會瞬間全數蒸發，聲音與畫面之壯觀，曾被許許多多科學家錄起來放在網路上分享 (用「magnet quench」做關鍵字便可搜尋而得)。影片中有時會伴

隨人們的驚呼聲——其實不少做低溫實驗的人，這輩子總會看過幾次超導磁鐵 quench，而每次都會忍不住驚嘆，雖然心裡可能在淌血 (尤其是付錢的那個人)，因為很貴的液態氮一下子都蒸發掉了，而且超導磁鐵 quench 後可能會受損。

現在我們知道，量子力學實驗研究通常需要極低溫環境，而其中某些現象還需要在高磁場下才能觀測而得。談了這麼多，也許有人會問：「研究量子力學要做什麼呢？既然它需要極度低溫的環境，那它好像很難應用在日常生活中。」這問題的答案難以一言蔽之。簡略舉例而言，除了研究量子力學各種現象、研發量子元件，科學家也同時尋找室溫下能展現量子力學特性的材料。其中一個科學界很期待未來能量產、能在日常生活中使用的量子力學科技產品，就是量子電腦。在目前的量子電腦研究中，有一種「拓撲量子電腦 (topological quantum computer)」，其量子位元候選物，正是之前所提到的量子霍爾效應中的一種特殊的準粒子〔註三〕。目前微軟公司有一計畫「Project Q」，其主要目標正是研究拓撲量子電腦。而 IBM 公司的量子計算研究團隊，則是把研究主力放在使用超導體量子位元的量子電腦。

100 年前的物理學家波耳曾說：「如果你沒對量子力學深感震驚的話，表示你還沒瞭解它。」而如今，科學家們已積極運用如此深奧的量子力學去研究和開發未來可能的日常生活科技。科技之日新月異，也十足令人驚奇。

[註一] 依據古典統計力學，溫度所對應的能量大約是 kT 等級，其中 k 為波茲曼常數 $1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ ， T 為溫度 (單位為 K)。故室溫 ($\approx 300 \text{ K}$) 所對應的能量大約是 $4.14 \times 10^{-21} \text{ J}$ ，或 0.027 eV 。

[註二] 特斯拉為磁場單位，1 特斯拉相當於 10000 高斯。地磁強度約為 0.25 到 0.60 高斯，可貼冰箱的小磁鐵約為 50 高斯。

[註三] 指分數量子霍爾效應 (fractional quantum Hall effect) 中「非阿貝爾式 (non-abelian)」的「任意子 (anyon)」。「準粒子」並不是指真正的粒子本身，而是一群有交互作用的粒子所呈現的集體狀態。