

磁性與磁懸浮

進階學習

神奇的超導

超導是凝聚態物質里電子體系的一種宏觀量子凝聚現象，涉及凝聚態物理中的基本概念和最前沿問題。超導材料具有零電阻和完全抗磁性等一系列神奇的特性，在能源、科研、醫療、通訊等各個領域均有重要用途。已逾百年的超導研究，在無數聰慧的科學家推動下，依舊不斷綻放新的魅力！

超導磁懸浮的原理是利用了超導體的完全抗磁性（邁斯納效應）：進入超導態後，外部磁場的磁通線將被排出超導體外，因此當磁體靠近超導體時會受到很強的排斥力，當排斥力和重力抵消就實現了超導磁懸浮。

超導磁懸浮都是採用了高溫超導材料鈮鉕銅氧（屬於第二類超導體），通過液氮冷卻到超導臨界溫度以下，上方的小磁鐵就可以懸浮起來了。

超導體的Meissner效應：超導體進入超態後，外部磁場磁通線將被完全排出。

由於水具有一定的抗磁性，處於強磁場中的生物如青蛙、老鼠等都可以實現常規磁懸浮。若要實現更強的磁懸浮，就必須借助完全抗磁的超導體。像日本相撲選手這樣的體重，只要超導材料足夠大，是可以懸浮在磁平台上的。

單質超導元素：紅色為常壓下體超導的單質元素，綠色為高壓下超導的單質元素，黃色為特殊形態（如薄膜或納米管）下的超導元素。

各種超導材料的外觀形態

隨著技術的進步，氮氣、氧氣、氫氣、氖氣等各種氣體先後被液化，最終只剩下了氦氣未被液化，被當時認為是最難液化的氣體。荷蘭科學家昂尼斯以範德瓦爾斯方程為理論基礎，在荷蘭萊頓實驗室搭建了一套氦氣液化裝置，通過對氦氣的不斷節流膨脹，終於成功獲得了液態氦。液氦的沸點為4.2K，通過進一步節流膨脹可以獲得1.5K左右的低溫。液氦的成功獲得極大地推進了低溫物理學的發展。在隨後1911年昂尼斯等人測量了金屬汞的低溫電阻，發現了超導現象。

目前發現的超導材料主要可以劃分如下幾大家族：金屬和合金超導體、銅氧化物超導體、重費米子超導體、有機超導體、鐵基超導體以及其他氧化物超導體等。

圖中對應著幾種超導體的晶體結構：常規金屬超導體汞是密集堆積的立方晶格、銅氧化物高溫超導體鏷鉬銅氧是以銅氧面為基礎的層狀結構、重費米子超導體鈾鈷銮和鐵基高溫超導體鏷鐵砷氧都是具有層狀結構材料、有機超導體鉀3碳60（摻鉀足球烯）中鉀離子分布在C60分子間隙當中。

目前發現的一些典型的超導體及其晶體結構。橫軸為發現的年代，縱軸為超導臨界溫度，插圖為幾種超導體的晶體結構。1986年以來發現的銅氧化物高溫超導體在短時間內大大提高了 T_c ，如同烏龜慢慢爬升的 T_c ，在80年代坐上了火箭。目前最高紀錄 T_c 為汞-鉬-鈣-銅-氧在加壓下的 T_c 約164K。

新材料探索就像在費米海中釣魚。固體材料內部的電子體系構成了「費米海」，這些電子的可能組態決定了材料的宏觀性質。當你試圖用魚鈎釣到超導體的同時，其他「魚類」（材料）也可能被你找到。於是在新材料探索中，總是充滿驚喜和收穫！

圖下從左到右依次對應的材料為：超導、非傳統和傳統的近藤系統、准晶、Stoner系統、局域磁矩材料。(Nature Physics 4, 167 – 169 (2008))

華氏溫標、攝氏溫標和熱力學溫標之間的對應關係

前蘇聯科學家金茲堡和朗道建立的G-L超導唯象理論認為：外磁場並不是完全不可以進入超導體，實際上它穿透進入了超導體的表面。即使在超導臨界溫度以下，如果外磁場足夠強，那麼它也可以完全進入超導體而徹底破壞超導態，即恢復到正常態。採用磁光技術，我們可以直接觀測到磁通線是如何隨著磁場的增加逐漸穿透到超導體內部中去的。圖中樹枝狀即為已經進入超導體的磁通線，點狀為有序排列的量子化磁通。

阿布里科索夫從G-L方程導出，在第二類超導體中，磁場其實是以量子化的量子磁通渦旋進入超導體內部的，一個磁通量子為 $\Phi_0 = h/2e$ (約為 $2.067 \times 10^{-15} \text{Wb}$)。每個磁通量子中間是有磁場穿透的正常態，周圍被超導環流包圍。在低溫和低場下，量子磁通渦旋將有序地排列。隨著溫度和磁場的變化，磁通量子也會發生釘扎、跳躍、蠕動、流動等行為，有序排列的磁通格子將會出現固態、玻璃態、液態等各種狀態。

BCS理論認為：當一個電子在晶格中運動時，會由於庫侖相互作用而導致局域晶格畸變，這樣，當另外一個電子通過時，會感受到第一個電子通過時導致的晶格畸變的影響，從而在兩個電子之間間接產生吸引相互作用，相當於交換了虛聲子。所有的電子對在運動過程中能夠保持「步調一致」（物理上叫做相位相干，即具有相同相位），即使受到雜質等散射也將保持總動量不變，從而在外加電場作用下能夠不損失能量而運動——這就是零電阻態的起源。

當參與配對的兩個電子的動量大小相等，方向相反，且自旋相反時，對配對最有利。配對後的電子將打開一個能隙，在銅氧化物超導體中，這個能隙會隨著相對費米面的不同角度而變化，形成一個十字花瓣形。在反節點方向能隙最大，在節點處能隙為零，在90度範圍內能隙大小呈現「V字形」分布。不同能隙區域還會有相位符號的變化。

和銅氧化物超導體相對比，鐵基超導體也有類似的電子態相圖。鐵基超導體的母體也是反鐵磁體，但屬於金屬態。隨著空穴或者電子摻雜濃度的增加，反鐵磁轉變的奈爾溫度將逐步被壓制，最終出現超導。在非常過摻雜的材料中（即空穴或電子完全摻雜），甚至還存在另外一個小的超導區。

同樣和銅氧化物超導體類似，鐵基超導體也具有層狀化學結構。它的基本單元是Fe-As層或Fe-Se層，中間是稀土氧化物、鹼土金屬、鹼金屬或者其他更複雜的化學結構。和銅氧化物不同的是，鐵基母體材料中任何一個元素都可以被相近的元素所替代，形成化學內壓、空穴或電子摻雜等而形成超導。

超導的強電應用主要分三個方面：超導輸電線、超導磁懸浮和超導磁體。主要利用了超導體的零電阻性和完全抗磁性。目前超導磁懸浮列車還屬於試驗階段，尚未投入大規模應用。採用常規金屬合金製造的超導輸電線已經得到了廣泛的應用，包括超導磁體的繞制。而高溫超導材料製作的超導輸電線也即將投入市場。

超導磁體具有穩定性好、耗能低、磁場強等優勢。在生物學研究和臨床醫學上採用的高分辨核磁共振成像技術大都是採用超導磁體。在科學研究中超導磁體更是應用廣泛，比如常規實驗室測量設備、大型加速器的加速通道和探測器等。制約超導強電應用的因素主要是長期維持低溫環境的費用比較昂貴，另外超導體具有一定的臨界電流密度，對於 T_c 比較高的銅氧化物高溫超導體，其臨界電流密度很低，很難實現大規模強電應用。

歐洲大型強子對撞機LHC上的高能粒子探測器和強制加速隧道，其中都用到了超導磁體。

利用Josephson效應制備的超導量子干涉儀（SQUID）是最為精確的低磁場探測器之一，最高精度達到 5×10^{-18} T。利用SQUID可以進行高精度的磁測量，能夠檢測出地球磁場的幾億分之一的變化，也能探測 10^{-9} T到 10^{-6} T之間的生物磁場。基於SQUID技術，人們還可以設計超導量子比特器件，它是量子計算機的基本元件之一，而量子計算機的多通道快速並行計算將為未來的人類生產和生活帶來革命性的變化。



高溫超導磁浮的物理知識 及其在科學教育的應用

文/ 陳引幹、游麗卿

從力學的角度，只要能夠產生與地球重力場相反的作用力，就可以得到靜力為零的狀況，而浮在空中。萊特兄弟的螺旋槳飛機與近代的噴射引擎飛機或火箭，都是產生推力以克服地心引力而達到人類飛航夢想的成功例子。

廣受歡迎的魔幻電影「哈利波特」(Harry Potter)中最吸引人的一幕就是「飛天掃帚」穿梭縱橫天際的特殊能力。但是「飛天掃帚」似乎並未有這些產生推力的裝置，到底這是魔法、幻想、或是尚待發掘之未來科技也一直是許多青年學子心中之疑問。事實上大約二十年前高溫超導體的發現後，許多科技專業人士已預期可能性又向前邁進了一步。

1987年由朱經武及吳茂昆博士所領導的研究群，發現高溫超導體(High Temperature Superconductor, HTS) Y-Ba-Cu-O 材料的超導臨界溫度($T_c=93\text{ K}$)高於液態氮的沸點(77 K)，因而使得超導體的實用性大為提升[1]。首先，由於在液態氮環境下操作，維護成本較傳統超導體之液態氮大幅地降低；同時將超導零電阻特性應用於輸配電力上，還能夠大幅降低能源消耗，進而減低污染性能源的使用。因此對受過完整科學與工程教育訓練之理工學子，可以很容易理解為何超導科技被視為二十一世紀的極為重要綠色科技之一。

最吸引一般大眾注意的高溫超導體現象，是小

磁鐵可以「穩定地」浮在浸泡於液態氮的高溫超導體上的「磁浮現象」(圖一左)；另外一個引人注目的是在1988年，吳茂昆博士與其領導的研究群在高溫超導體材料改善後，發現的「磁懸掛」(圖一右)[2、3]，即其戲稱的「姜太公釣魚」現象。亦即，磁鐵不僅可以浮於超導體之上，亦可以完全沒有接觸地，被懸掛在超導體之下，猶如懸浮在半空中。這兩個現象都在沒有附加特殊推力裝置的狀況下，就浮在空中，與「飛天掃帚」有異曲同工之妙。

理工學子不一定能解釋磁浮和磁懸浮現象。作者因而從力學、電磁學、磁學、與熱學之角度來解釋這兩個現象，期望可以釐清其中所涉入複雜的物理現象[4]。

一、從力的平衡解釋磁浮與磁懸浮

超導的磁浮現象有磁浮和磁懸浮，主要的差異在支撐點不同。我們把支撐點在下方的稱為磁浮(如圖一左)，而把支撐點在上方的稱為磁懸浮(如

陳引幹

國立成功大學 材料科學及工程學系

E-mail: ingann@mail.ncku.edu.tw

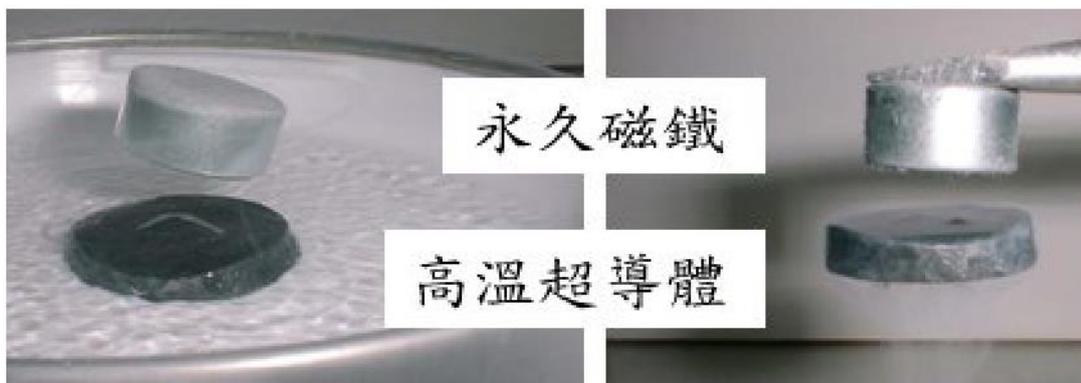
游麗卿

國立台南大學 教育學系

E-mail: ly11@mail.nutn.edu.tw

圖一右)。之所以會產生磁浮或磁懸浮是因為圖一左中懸空的磁鐵，和圖一右中懸空的超導體所受總力為零；也就是向下之重力與向上之磁浮力達到平衡的狀態。而向上之磁浮力是來自於超導現象與磁鐵所產生之磁力線之間的作用力，其中可以分為反磁力(排斥力)與鎖磁力(吸引力)。超導體與磁鐵之反磁力可視為一般所謂之「反磁效應」

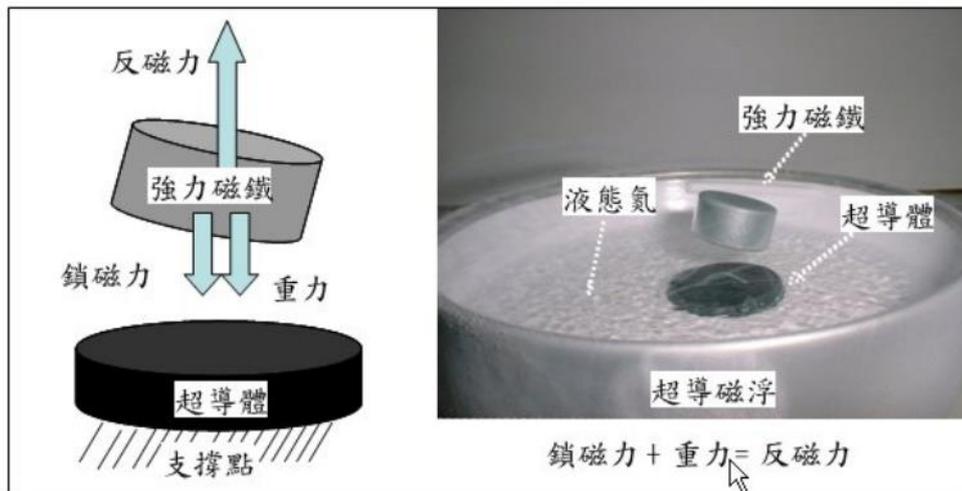
(*Diamagnetism*) 或「麥式效應」(*Meissner Effect*)。而鎖磁力可視為超導體與磁鐵之間的吸引力，這是因為第二類超導體中具有釘扎中心(通常為超導體中特殊的微結構)而形成之鎖磁現象。也就是說；高溫超導之所以會產生磁浮現象，是由於重力、反磁力(排斥力)、鎖磁力(吸引力)三個力量達到平衡。



圖一：磁浮現象包括磁浮(左)和磁懸浮(右)

以力的向量表示，箭頭代表力的方向，線段長短代表力的大小。圖二的磁浮現象力平衡圖中，若超導體置於在平面上，以懸空的磁鐵來說總和等於零時；(1) 超導體鎖磁力吸引在上方的磁鐵是向下的；(2) 加諸於磁鐵的重力方向是向下的；(3) 超導體的反磁

力排斥在上方的磁鐵是向上的。當向下的鎖磁力加上重力，等於向上的反磁力就達到平衡，也就是三力總和等於零時，磁鐵得以磁浮在超導體上方；即鎖磁力+重力的大小=反磁力的大小，而且鎖磁力與重力和反磁力方向相反。



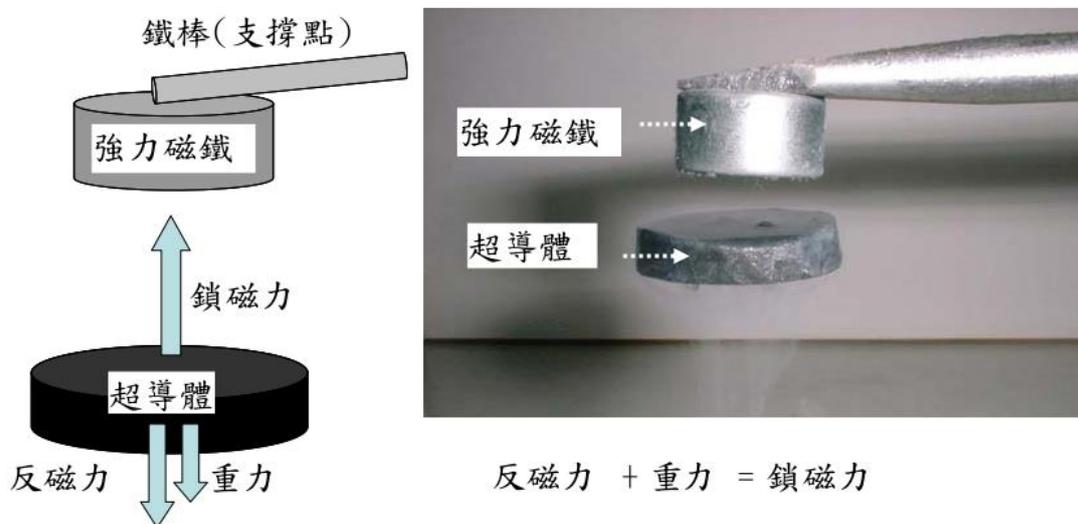
圖二：磁浮現象中磁鐵的力平衡圖

圖三的磁懸浮力平衡圖中，若以超導體懸空漂浮在固定之磁鐵下方來說，超導體總和力等於零時；(1) 超

導體鎖磁力吸引在上方的磁鐵是向上的；(2) 加諸於超導體的重力是向下的；(3) 超導體的反磁力排斥在上方

的磁鐵是向下的。當向下的重力加上反磁力，等於向上的鎖磁力就達到平衡，也就是三力總和等於零時，超導

體得以懸空漂浮在磁鐵下方；即重力+反磁力的大小=鎖磁力的大小，而且反磁力與重力和鎖磁力方向相反。



圖三：磁懸浮現象中超導體的力平衡圖

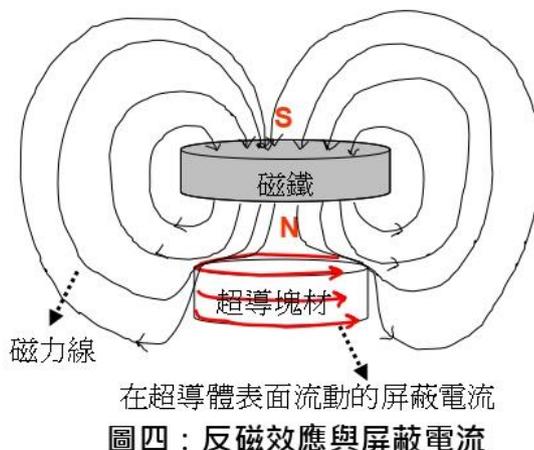
比較圖二與圖三可知：當磁浮或是磁懸浮的物體之重力不變時，磁浮現象中反磁力比鎖磁力大；而磁懸浮現象中鎖磁力比反磁力大。而且，磁浮或是磁懸浮中磁鐵與超導體的位置是可以互換的。也就是說，圖一中磁鐵也可以是在下，超導體在上。

二、從冷次定律解釋超導體與磁鐵間之反磁力

由於超導體具有「反磁效應」或「麥式效應」，磁鐵的磁力線僅能穿透過超導體極表層的地方（約 10^{-6} 米）；根據冷次定律(Lenz's Law)，感應電流的方向與大小是在反抗線圈內原有磁通量的變化。因此當

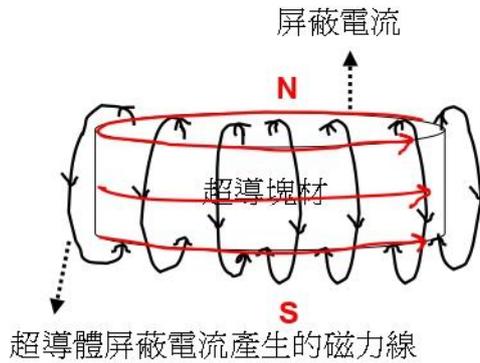
磁鐵之磁力線趨近超導體時，將產生感應電流，同時因為超導體零電阻效應，導致電流持續不斷的流動，通常稱為「屏蔽電流」，而產生排斥外加磁場的反磁排斥力。

以下用磁極、磁力線、磁力線方向來說明反磁效應。首先，假設磁鐵的N極如圖四在磁鐵下方，磁鐵的磁力線方向由N極往上繞到磁鐵上方的S極。其次，當磁鐵靠近超導體時，超導體極表層會因而產生屏蔽電流，如圖四中環繞在超導體外圍的紅色電流。



這些超導體表面的屏蔽電流的流動會產生磁場，它的磁力線方向會如圖五所示，由超導體上方的

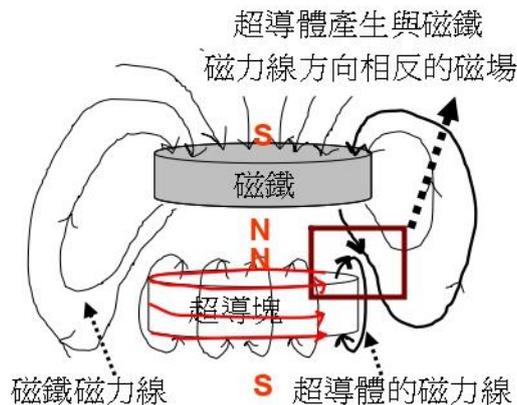
N 極往下到下方的 S 極。



圖五：超導體屏蔽電流的磁力線方向

超導體反磁效應是由於超導體外環磁場和磁鐵磁場相斥的關係。一方面，超導體和磁鐵兩者的 N 極是相對的；另外一方面，兩者磁力線的方向是相反的。從圖六中框出來的部份看出，磁鐵的磁力線方向

由磁鐵下方的 N 極往上走；而超導體的磁力線方向是由超導體上方的 N 極到下方的 S 極。超導體往下的磁力線與磁鐵往上跑的磁力線方向相反，導致超導體產生排斥磁鐵的反磁效應。

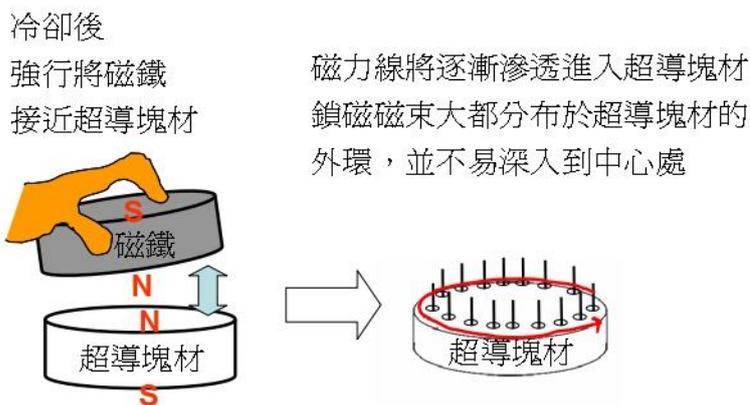


圖六：超導體與磁鐵的磁力線方向相反

三、從釘扎效應解釋超導體與磁鐵間之磁鎖力

如前節所述，將磁鐵靠近超導體，超導體的「麥式效應」會排斥由磁鐵來的磁力線而且無法貫穿超導體。但是，若強行將磁鐵靠近超導體，並使磁鐵來的磁力線強行加諸於超導體，將迫使磁鐵的磁力線滲透穿入超導體的外環，而且這些磁力線會被超導體內的

一些特殊微結構給釘扎住，稱為釘扎效應，而這些被釘扎住的磁力線，就稱為鎖磁磁束(如圖七之右圖)。若此時將磁鐵逐漸遠離超導體，加諸於超導體之磁力線也會逐漸變小。將磁鐵放開，磁鐵會「穩定的」磁浮在超導體之上。此時會有少量的鎖磁力如圖七所示。



圖七：零場冷下鎖磁的情況

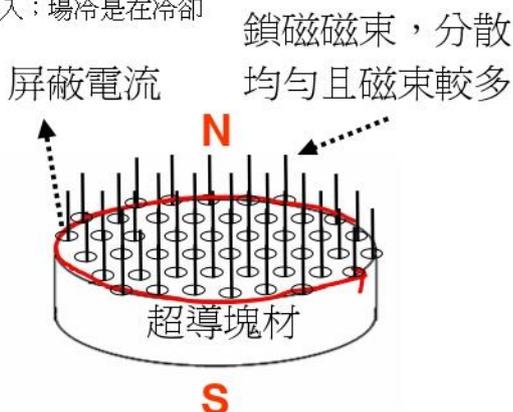
四、從熱平衡解釋塊材之冷卻與超導態的轉換

高溫超導塊材基本上是由 Y、Ba、Cu、O (鈹、鋇、銅、氧) 四種元素組合成的化合物，在室溫下是一個不良的導體，也不會被磁鐵吸引。當室溫下的超導塊材浸泡在液態氮中，液態氮和超導體在達到熱平衡過程之熱能交換下，逐漸沸騰，而產生大量白色之水蒸氣凝結成雲霧之現象；同時，超導體也隨著降溫，等到液態氮沸騰逐漸減少而且白色煙霧也變少時，代表超導塊材之已降到液態氮溫度 -196°C (77K)，高溫超導體已低於超導轉變溫度 -183°C (93K)，並具有特殊超導磁性(包括反磁與鎖磁)。然而當溫度升高到 -183°C 以上時，超導態的特質會消失，為了維持超導態就需要再加入液態氮。液態氮被使用來冷卻超導塊材，因為它的沸點 (77K) 低於單晶粒 Y-Ba-Cu-O 高溫超導的臨界溫度 (93K)。

冷卻超導體有零場冷和場冷兩種冷卻方式。零場冷的冷卻過程中，無外加磁場的介入；場冷是在冷卻

前，有外加磁場進入室溫下正常態的高溫超導塊材。前者冷卻步驟是把液態氮倒入裝有正常態的高溫超導塊材的容器中；後者是把磁鐵等具有磁力的物品，例如：永久磁鐵或電磁鐵，放在超導塊材的上方或下方，然後再加入液態氮冷卻超導體。

一般而言，零場冷下的鎖磁力較小，因為在冷卻前沒有外加的磁場介入，超導塊材內沒有已釘扎的磁力線；冷卻後才強行將磁力線逐漸滲透進入的鎖磁磁束，這些磁束大都分布於超導體的外環，並不易深入到超導體之內部之釘扎中心，如之前圖七所示。而場冷下的鎖磁力較強，因為在冷卻前已有外加的磁場介入，在正常態的塊材內已有大量且均勻分布的磁力線；冷卻後這些磁力線就轉移到，也均勻分布在塊材內的特殊微結構，而形成釘扎中心；如此，鎖磁磁束均勻分布於整塊超導塊材，如圖八所示，且數量遠多於僅分布於塊材外環之零場冷狀況，因此具有較強之鎖磁力。



圖八：場冷後，超導塊材內鎖磁磁束分布均勻且磁束較多

五、小結

從力學、電磁學、磁學，和熱學的觀點來說，重力的大小與方向不會隨著超導體與磁鐵的距離改變而變化，但是磁鎖力與反磁力則會隨著兩者的間距變化而改變，也就是隨著加諸於超導體的磁場大小而異。有趣的「姜太公釣魚」會將超導體與磁鐵「隔空」吸住，但是不會像兩塊磁鐵相吸時就緊密的吸住，就是因為當磁鐵與超導體距離減少時會使得反磁力增加，而破壞或改變了原先之力的平衡。

在零場冷的冷卻過程中，如果磁鐵與超導的間距過大，磁鐵的磁力線完全被超導體排開，磁鐵無法順利的磁浮於超導體上，會呈現完全反磁的狀態；第二種情況，當磁鐵與超導體保持合適的間距，有少數磁束可能會釘扎在超導體外環特殊的微結構內，如圖七所示。這些釘扎住的磁力線分佈在超導外環，雖數量不多，但也可能足夠使超導體與磁鐵相互吸引。由於超導體具有反磁力，在吸力與斥力同時存在下，磁鐵會磁浮在超導體之上。第三種狀況，當磁鐵與超導體間距持續減少，一方面超導體接收到由磁鐵發出之磁束密度增加，另一方面將磁場強壓進去之阻力也會變大，磁束之分布將由超導體外緣向中心移動，因而鎖磁力增加。

一般而言，場冷下的鎖磁力較強，因為在冷卻前已將強力磁鐵加諸於塊材內部，造成冷卻成爲超導態後具有較密且均勻分布的磁力線，如圖八所示，因而鎖磁力增加。總而言之，在場冷或零場冷的冷卻方式，超導體與磁鐵間的鎖磁效應都會發生。然而，在這兩個不同的冷卻方式下，鎖磁的效果有顯著的差異，並進而影響磁鎖力與反磁力相對的大小，也影響超導磁浮或磁懸浮的穩定性。

外加之力量可以影響磁鐵和超導體之間間距。若我們從外施加力量，會推動磁力線，使磁力線移進或是移出，超導相單位體積內的磁力線密度因而變大或變小。超導體與磁鐵之間的鎖磁力與反磁力亦隨之改變，因此磁浮間距亦隨之改變。但是因為磁鐵之磁場分布與間距是一個相當複雜的數學函數，因此外加力量改變間

距所產生之鎖磁力與反磁力的變化亦非常複雜，無法在此短文中詳述。

六、磁浮原理在科學教育的應用： 磁浮車模型與高中生超導磁浮創意競賽

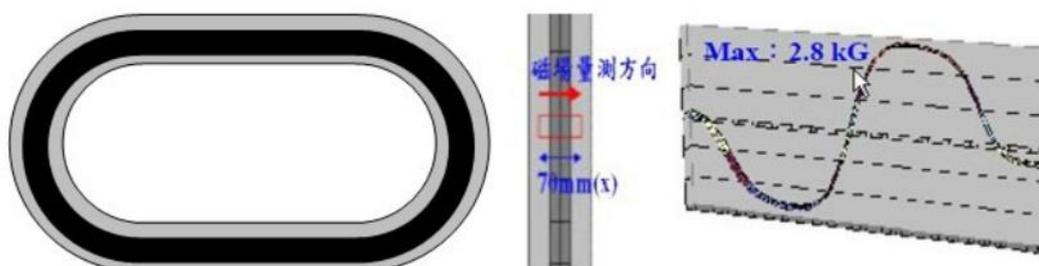
如何應用超導磁浮？最容易引起聯想的就是「磁浮列車」。目前已接近實用化之磁浮列車，都是利用傳統的主動式(Active)磁浮系統，需要感測器、脈衝電磁線圈、動態伺服控制電路系統等，才能達到「穩定磁浮」之狀態。德國與中國之系統利用永久磁鐵或是電磁鐵爲磁場源，磁浮高度較小，最高時速約四百餘公里/小時。日本之系統則利用低溫超導磁鐵爲磁場源，因爲磁場可以高達數萬高斯，磁浮高度較高，最高時速約五百五十公里/小時，遇到突發狀況時安全係數也較高。

高溫超導磁浮與上述之設計均不相同，因爲它同時具有相排斥之反磁力與相吸引之鎖磁力，因此會自動地達成「穩定磁浮」之狀態。圖九中所示就是利用上述之超導磁浮特性所製作之「高溫超導磁浮車模型」。超導磁浮列車模型可以完全無接觸地磁浮在空氣中，並且由於在模型車上加裝一遙控風扇，即可產生水平方向之推力，並控制磁浮軌道車的速度及行進方向。此一模型亦驗證垂直方向之反磁與磁鎖力與水平方向之推力是可以獨立操控的。高溫超導塊材置於車體的底部白色保麗龍容器內，並利用下方之磁鐵軌道當作磁場源，將液態氮注入時以場冷之方法降溫到超導臨界溫度之下後，與下方之磁鐵形成磁浮。其縱向截面力之示意圖與圖二類似，只是超導塊材在上方而磁鐵與支撐點在下方。

磁浮列車與軌道之間距的大小，與下方磁鐵之排列組合所產生之磁場大小以及分布有關[5、6]。一般而言，磁場愈強磁浮力愈強。圖十中所示爲下方的橢圓形磁鐵軌道以Nb - Fe - B強磁鐵排列而成，模型車延著橢圓形運動時所有之磁極都是相同的，因而形成幾乎無磨擦的磁浮運行狀況。軌道長爲160公分，寬爲80公分，磁鐵軌寬爲7公分，其中內側與外側之磁鐵磁極相反，以增強磁鐵軌道上方之磁場強度，在距離磁鐵間隔約0.5公分時約可達2800高斯(Gauss)。



圖九、高溫超導磁浮列車模型。



圖十、橢圓形磁鐵軌道。

上述的高溫超導磁浮列車模型是為了執行國科會科教處為推廣大眾科學教育所舉辦之「高中生超導磁浮創意競賽」(www.HiTcWorld.org) 而設計製作。此競賽活動之構想乃借重高溫超導之獨特磁浮與磁懸浮特性，引發高中生對新奇科技現象之好奇心，利用寒暑假舉辦教育訓練活動，並藉由教學網站提供具啟發性的超導基本知識，目的在營造激發創意與實作競賽活動的學習環境，期望激勵高中生發揮創造力與團隊研

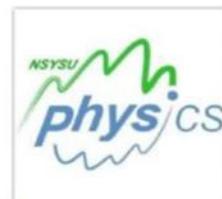
究精神，培養主動學習與科學探究的態度，團隊合作的知能，與問題解決的能力。主辦單位提供此一磁鐵軌道給參加超導競賽的高中生有實際操作玩弄的機會。作者與其研究團隊並結合上述之超導磁浮知識，製作了超導磁浮簡介，其中英文版已上傳於 Youtube [7]，目前(2008.12)已經超過五十萬人次點閱，受到熱烈討論與正面的迴響。最近並被 Wired Blog Network, Top 10 Amazing Physics Videos 中推薦為第二名[8]。

參考文獻

- [1] M.K.Wu, J.R.Ashburn, C.J.Torng, P.H.Hor, R.L.Meng, L.Gao,Z. J.Huang, Y.Q.Wang, and C.W.Chu, Phys. Rev. Lett., 58(1987)908.
- [2] P. N. Peters, R. C. Sisk, E. W. Urban, C. Y. Huang; M. K. Wu, Applied Physics Letters, Vol. 52 Issue 24, (1988)2066.
- [3] 陳引幹，“高溫超導材料與其磁浮上之應用”，物理雙月刊(廿七卷四期)2005年8月,P.609
- [4] 游麗卿、陳引幹、林伯芃、陳柏偉、陳柏豪、謝宜芳，“從學生和專家的知識發展電腦輔助教學課程：以高溫超導為例”(Developing A Basic Superconductor Curriculum for Computer Assisted Learning Program Based on Knowledge of High School Students and Experts)”，第二屆台灣數位學習發展研討會，臺南大學，MAY 19-20, 2006。
- [5] I.G. Chen, J.C. Hsu, G. Jamn, C.E. Lin, and M.K. Wu, Journal of Applied Physics, 81, 4272-4274, (1997).
- [6] I.G. Chen, J.C. Hsu, G. Jamn, C.C. Kuo, H.J. Liu, and M. K. Wu, Chinese Journal of Physics, 36, 420-427, (1998).
- [7] 「高溫超導體」英語教學短片網址：<http://youtube.com/watch?v=Z4XEQVnIFmQ>
- [8] Wired Blog Network, Categories: Education, Physics, Video, Top 10 Amazing Physics Videos, <http://blog.wired.com/wiredscience/2008/09/top-10-amazing.html>



國立中山大學 物理系 生活物理演示 服務市民



磁的吸引力

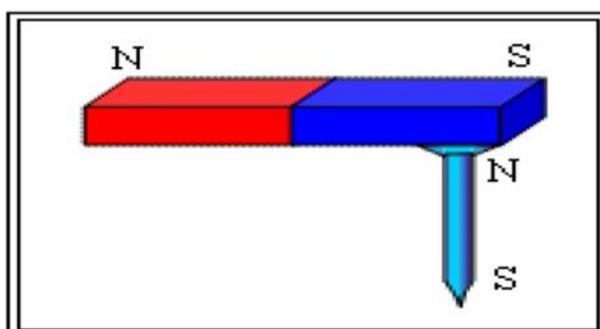
行動演示-1：手機的磁場實驗

高中生準備事項：帶有磁感應器的手機並下載 APP



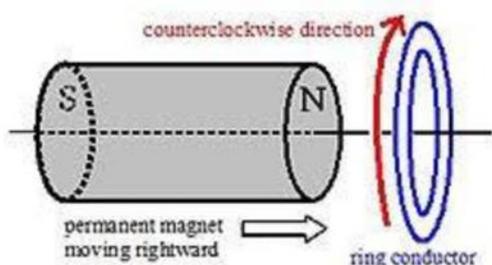
向民眾介紹手機上的應用程式，運用手機紀錄存在生活中的磁場。

行動演示-2：磁化實驗



向民眾講解軟鐵、硬鐵的差別，並藉由手機程式協助，演示磁化鋼材並反轉磁極。

行動演示-3：渦電流實驗

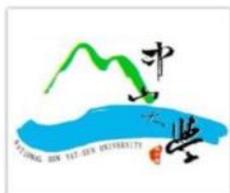


當磁鐵靠近金屬環或是導線時，將會使金屬環或是導線產生電流，其電流所產生的磁場必定恆抵抗磁鐵的運動

行動演示-4：磁場的偵測與磁阻材料



介紹金屬探測器程式以及金屬探測器的原理，到各演示組別偵測實驗器材所產生的磁場。



國立中山大學 物理系 生活物理演示 服務市民



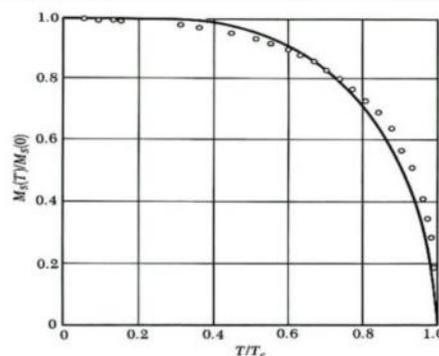
磁的吸引力

帳篷演示-1：磁碟機



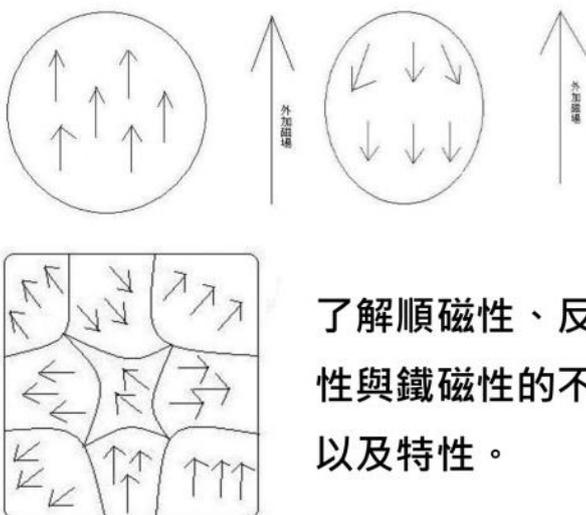
藉由磁場的變化以及介質磁導率的不同，讓通過線圈的磁場產生感應電流，並讀取波型。

帳篷演示-2：居禮溫度



將鎳棒加熱到其居禮溫度，觀察失去磁性與溫度降低時恢復磁性的現象。

帳篷演示-3：物質的磁性



了解順磁性、反磁性與鐵磁性的不同以及特性。

帳篷演示-4：手機的磁場實驗

高中生準備事項：帶有磁感應器的手機並下載 APP



運用手機上的應用程式，探索存在於生活中的磁場。