



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

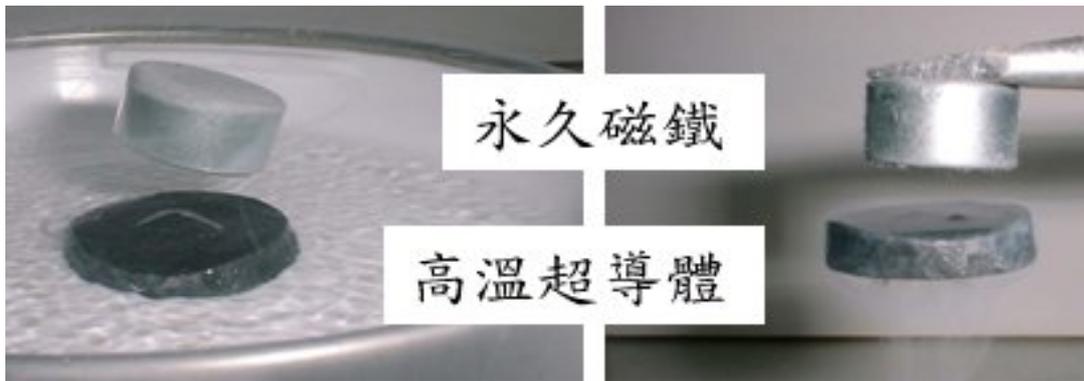
游麗卿

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」

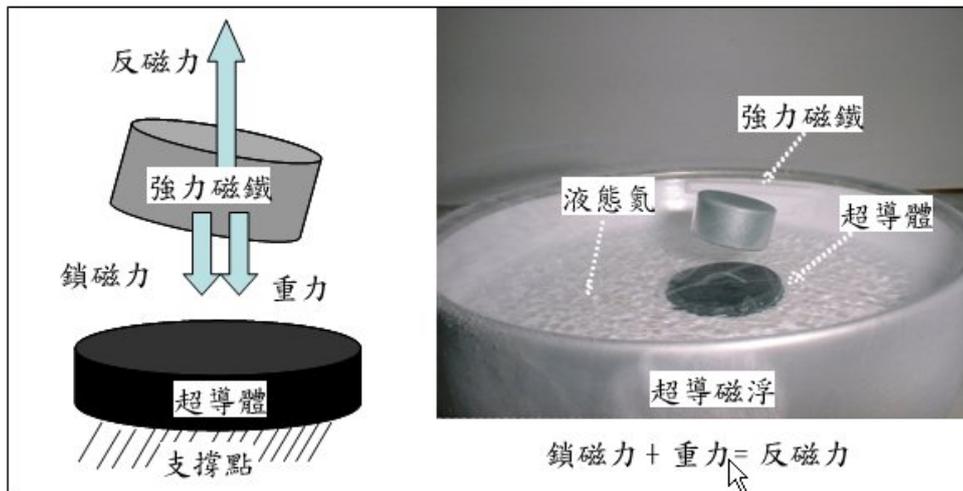
(Diamagnetism) 或「麥式效應」(Meissner Effect)。而鎖磁力可視為超導體與磁鐵之間的吸引力，這是因為第二類超導體中具有釘扎中心(通常為超導體中特殊的微結構)而形成之鎖磁現象。也就是說；高溫超導之所以會產生磁浮現象，是由於重力、反磁力(排斥力)、鎖磁力(吸引力)三個力量達到平衡。



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。



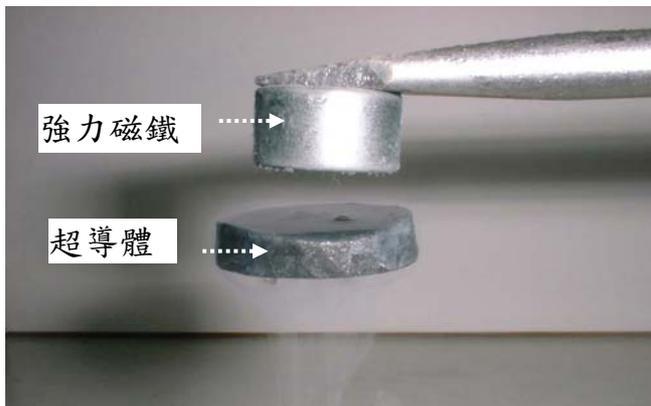
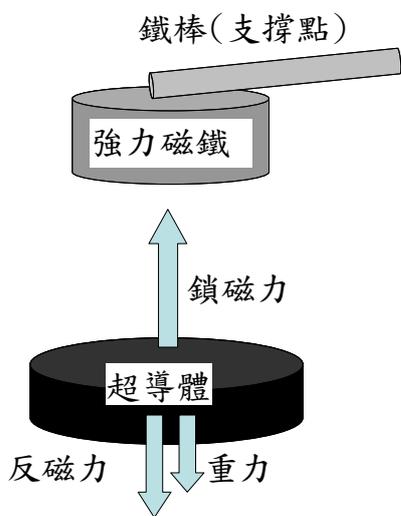
圖二：磁浮現象中磁鐵的力平衡圖

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。



$$\text{反磁力} + \text{重力} = \text{鎖磁力}$$

圖三：磁懸浮現象中超導體的力平衡圖

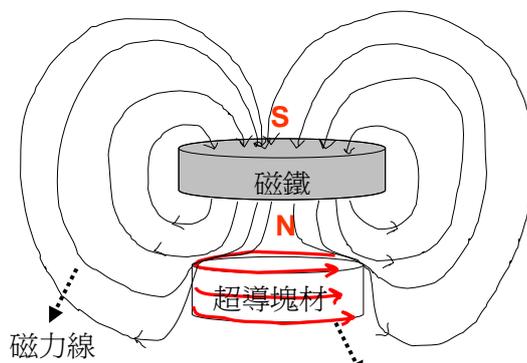
比較圖二與圖三可知：當磁浮或是磁懸浮的物體之重力不變時，磁浮現象中反磁力比鎖磁力大；而磁懸浮現象中鎖磁力比反磁力大。而且，磁浮或是磁懸浮中磁鐵與超導體的位置是可以互換的。也就是說，圖一中磁鐵也可以是在下，超導體在上。

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。

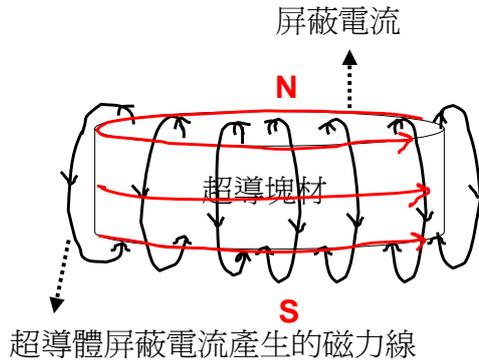
以下用磁極、磁力線、磁力線方向來說明反磁效應。首先，假設磁鐵的N極如圖四在磁鐵下方，磁鐵的磁力線方向由N極往上繞到磁鐵上方的S極。其次，當磁鐵靠近超導體時，超導體極表層會因而產生屏蔽電流，如圖四中環繞在高溫超導體外圍的紅色電流。



在超導體表面流動的屏蔽電流
圖四：反磁效應與屏蔽電流

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

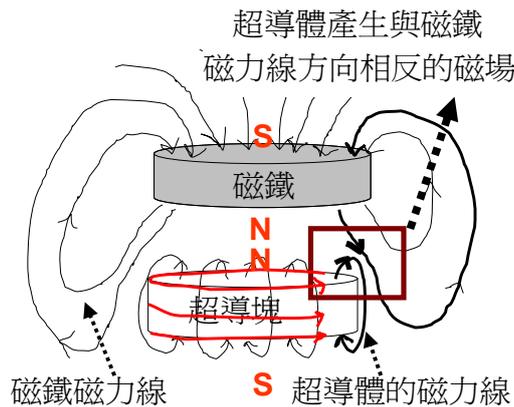
N 極往下到下方的 S 極。



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。超導體往下行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。

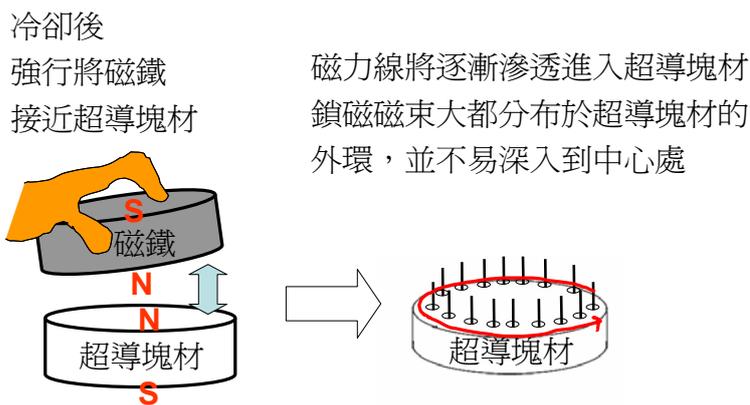


圖六：超導體與磁鐵的磁力線方向相反

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

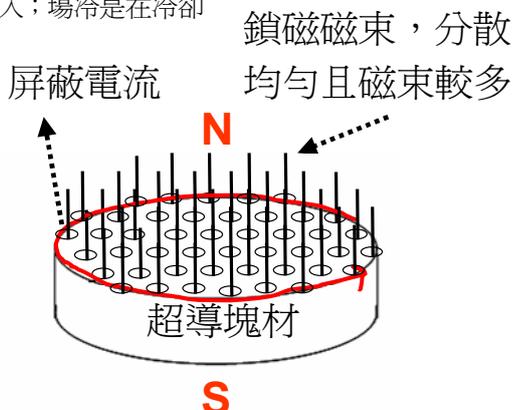
四、從熱平衡解釋塊材之冷卻與超導態的轉換

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的問題。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

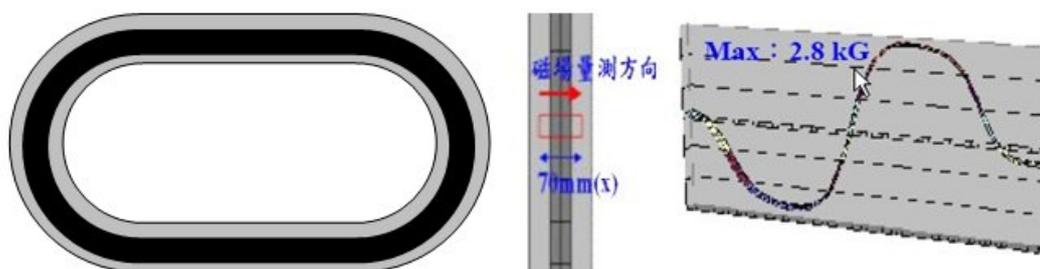
如何應用超導磁浮？最容易引起聯想的就是「磁浮列車」。目前已接近實用化之磁浮列車，都是利用傳統的主動式(Active)磁浮系統，需要感測器、脈衝電磁線圈、動態伺服控制電路系統等，才能達到「穩定磁浮」之狀態。德國與中國之系統利用永久磁鐵或是電磁鐵爲磁場源，磁浮高度較小，最高時速約四百餘公里/小時。日本之系統則利用低溫超導磁鐵爲磁場源，因爲磁場可以高達數萬高斯，磁浮高度較高，最高時速約五百五十公里/小時，遇到突發狀況時安全係數也較高。

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爲了執行國科會科教處爲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啓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 中推薦爲第二名[8]。

參考文獻

- [1] M.K.Wu, J.R.Ashburn, C.J.Tomg, 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：以高溫超導爲例”(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=ZAXEQVnIFmQ>
- [8] Wired Blog Network, Categories: Education, Physics, Video, Top 10 Amazing Physics Videos, <http://blog.wired.com/wiredscience/2008/09/top-10-amazing.html>