

淺談磁學—無所不在的人與磁的關係

紀錄：周志勳

主持人：

我跟金教授八年前在楠梓一家金屬工業研究所的同事，後來他回成功大學當教授，我在兩年後也回成功大學材料系當教授。我們在材料系是同事，所以我們做的東西也都是磁性；金教授從研究所畢業到現在一直都是從事磁性領域工作，在成大當完教授之後，金教授轉到清華大學材料系當系主任，後來在清華大學材料中心當主任，之後又主持了自強科學中心，然後到聯合大學當校長，現在他回到清華大學繼續做磁性材料領域的研究。二、三十年的過程之中，他的研究及著作非常傑出，得過國科會的傑出獎不談，還在外面得過一些工業界的獎，像工程師學會的傑出工程師獎，還有亞太材料學院的院士，可說是集榮譽於一身；他的論文著作也非常多，在我們材料界是有目共睹的。今天我不佔各位的時間，我們請金教授來幫我們講解無所不在的磁與人的關係，我們的生活之中都會碰到磁，只是各位不覺得跟磁有發生什麼關係；其實我們日常的每一件事都會碰到磁，只是各位本身並不知道而已。我們今天請金教授來就是解開各位的謎以及磁學當中有很多跟我們人有很密切的關係，讓我們鼓掌歡迎金教授。

主講人：

非常謝謝張炎輝張教授給我做的詳細介紹。其實我今天做磁學，也是張教授帶著我入門的，一路走來他都是我最好的老師，今天其實應該是由他來講，我來主持，可能會更合適一點，所以待會兒如果我講的不妥當，或各位的問題太艱深，我還煩請張教授來幫我擋一擋。

在正式演講之前，我有一個東西要讓大家親手去摸，親手去感覺，把物理放在你的手上，把磁學放在你的手上；鋁片不會被磁鐵吸住，因為它沒有鐵不會被磁鐵吸引，但它會順著磁鐵表面慢慢滑落，一離開磁鐵後就迅速往下墜。讓大家親身體驗看看，當你一放開鋁片時它會慢慢往下掉，但是你可以感覺到它跟磁鐵間好像有空氣的存在一樣。各位可以感覺到那個力，事實上那個力在各位學過的物理裡頭叫做楞次定律，各位看的就是磁、電、磁力的一個表現。

其實今天要講的東西非常多，內容比較難拿捏，既怕太淺，又怕太深，不過我很感佩在座的現場觀眾，今天是禮拜天，你們沒有出去郊遊，願意來這邊聽一些科學的新知，是相當不容易的。首先，我會介紹磁的基本定義，第二我會介紹一年三百六十五天時時刻刻都在我們周遭的地磁，再來就是進入物理來談磁是什麼東西，然後我們再談磁性材料，接下來我會介紹跟磁性技術有關的應用，再介紹磁跟我們人體有著什麼樣的關係，最後再做一個簡單的總結。

第一節我要講的就是磁的簡介及定義。一開始我要先談一部電影，第二個來談電與磁之間的交互關係，第三個談磁的基本現象，第四個是要介紹靜磁、交流磁場及瞬間磁場，最後談磁的基本量。可能在座很多人都看過地心毀滅（The Cord）這部電影，這部電影用很誇張的手法來敘說地球的核心因為某一種不明的原因開始慢慢停擺，不動的結果導致地磁逐漸的減緩，減緩之後地磁對地球產生幅射線的保護也慢慢消失，因此造成了許多的災難；我們稍微看一下這個電影的片段，當地磁消失後，鴿子開始迷航到處亂飛，然後外面的幅射線開始照射進來，羅馬競技場產生聚焦的作用，雷電跟幅射大量的照射進來，結果都造成很嚴重的災難，如鳥被幅射直接照射而被燒死，海水被加熱開始沸騰，導致水中的魚被燙死浮上水面，金門大橋更因為幅射的照射而被燒斷成二半，當然這只是一部電影，電影是無所不用其極，極盡其誇張的手法把這些災難放大到一萬倍、十萬倍甚至一百萬倍。地磁是存在的，如果地磁不存在，我們可能會受到這些影響，這些影響可大可小，因為我們人類還沒有遇到地磁消失這種狀況，所以這些都只是我們想像出來的，如果你沒有看過這部電影，那你可以去看看，還蠻有趣的。磁跟生物體的行爲非常有關，各位都知道綠鱷龜每年生孩子都要跑到很遠的地方生，牠是如何記得原來出生的那塊地呢？根據科學家的研究了解，牠是靠著地球磁場來引導，鮭魚、鯨魚、鴿子及候鳥這些生物基本上都是循著地磁在活動，蜜蜂也是循著牠感應的磁場來圍巢，甚至我們到最後面會介紹健康檢查的時候有一種東西叫 MRI

(核磁共振造影)，MRI 是利用人身上的磁來感受、來做腫瘤的篩檢，非常的好用；日常生活上面，其實我們天天都在用到磁，譬如說指南針，出門時我們的車上都有指南針，冰箱開門的時候會有一個吸力，那是冰箱門的磁封，有時我們會磁鐵把字條吸在白板或冰箱上面，我們身上的磁卡，它可以讓你進門的時候有感應，防盜門有感應器，喇叭後面有一個很大的磁鐵，馬達上面有磁鐵，還有比較新型車子裡面估計它的磁鐵是超過一公斤的，因為有各種各樣的馬達，你的椅子上面前進後退的馬達，車窗的馬達，全部都是用磁鐵，所以磁是非常常見的，那麼磁到底是怎麼回事？我們先來看電。

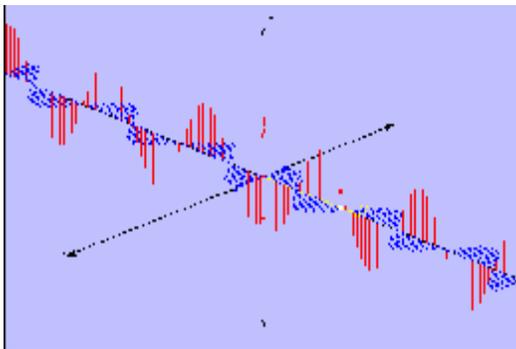
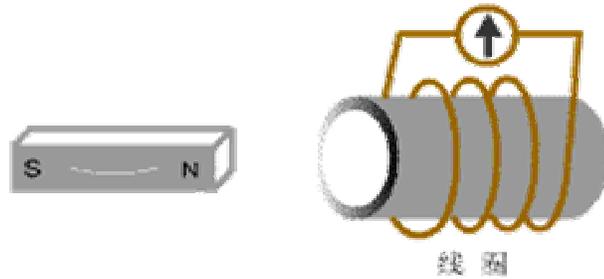
右圖表示一個人被電到，頭髮通通都豎起來了，這是靜電，圖裡的機器是一個靜電高壓產生器，圖中的人站在一個絕緣的地板上，一摸這機器的話，人的電位跟靜電產生器的電位相等，頭髮每一根都有靜電，靜電的電位一樣，所以頭髮就豎起來了，而且每一根都分開，相信在座很多觀眾都有被電到的經驗，但是在座有沒有人被磁到？常常遲到是你不守時遲到，但是沒有人被磁而磁到。



左圖是一個中國古代的指南針，下面這一塊是銅器，上面是一個鐵做的湯瓢，放在銅器上面湯瓢就會轉到指北；其實你在冬天穿毛衣的時候，一脫衣服就會聽到劈劈啪啪的聲音，事實上你的頭髮也是豎起來的，但是磁沒有這樣子的效果。還有一點不一樣的地方就是，電如果拿一個導線把高壓引導進去就會產生電流，電會循著導線流走，但是磁就不同了，如果有一塊磁鐵，你即使用根鐵把它引導，磁力線也沒有辦法把它

引導流走，這就是兩者不一樣的地方。我們來看電跟磁之間的關係，電可以生磁，磁亦可生電，事實上電磁是一體的，因此最後有了一門電磁學。舉例來說，有一個導線流過一個電流，周圍就會產生磁力線；要怎麼樣來看磁力線呢？很簡單，灑一些鐵粉在上面，電流一通，鐵粉就會磁化並沿著磁力線排列起來，所以可以很明顯的證明這條導線的周圍確實是有磁場，這是電生磁。接下來，我們來看磁生電，下圖就是一個線圈和一個磁鐵，只要把磁鐵插進去它這邊就有電流，就好像

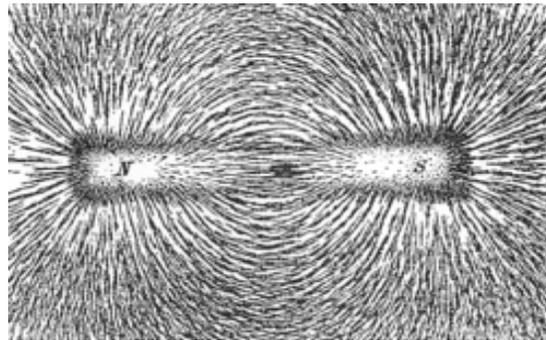
剛才有一個磁鐵不動，但是這邊有一個導體是動的，那麼你剛才在手上玩的時候，你看不到電流，但電流就在鋁的導體上面，所以 **檢流計** 由磁也可以生電，電磁本一家。



在日常生活中，天天都被太陽光照射，因此天天都在感受電磁波，電磁波有哪些呢?有 X 光、可見光還有微波也是電磁波，包括你在打大哥大的時候，放射出去的也是電磁波，電磁波的樣子是長成這樣(如左圖)，紅色是磁的分量，藍色是電的分量，電跟磁互為 90 度，是一起前進不能分割的，所以電磁不僅是地

磁這種永久磁性的磁性你感受的到，事實上你天天在照射的光，也都是在接受電磁波。

那麼磁到底是什麼東西？這邊有一個磁鐵，上面放一張紙，紙上灑一些鐵粉，你看到這邊有一條條的線，這就叫做磁力線。換句話說，磁鐵都有兩極，假設它是多極磁鐵，你可以用充磁的方式，使這個圓盤狀的磁鐵充成八極，十六極，三十二極，一百



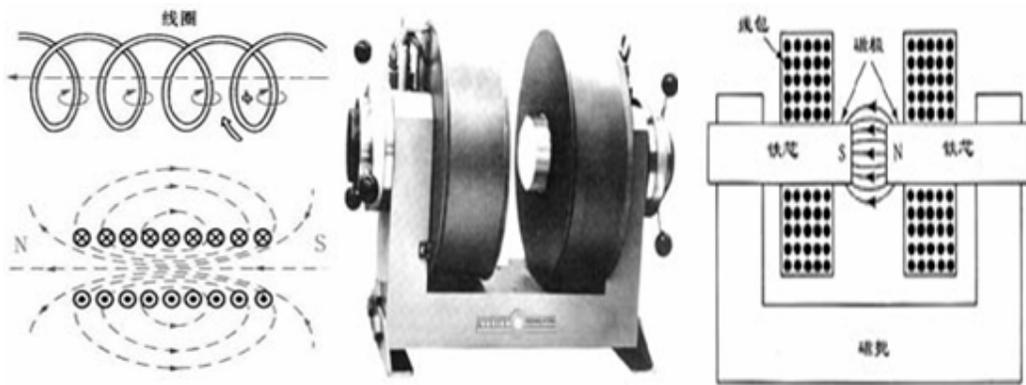
二十極，像在做一些步進馬達，它要有多極的磁鐵，控制每次前進的角度。這是一個最簡單的棒狀磁鐵，它有 N 跟 S 兩極以及磁力線。因此，我們來看磁的基本的現象，如果我們把這個磁鐵切一半，切一半，再切一半，切到最小最小的一個單元，哪怕是一個原子，甚至是一個電子，他就算到最小單元，一定有兩極，一個 N 一個 S，那 N 跟 S 是對等的，沒有說 N 比較大或 S 比較大，另外呢，北極是指北的，南極是指南的，那這個是我們以地磁的南北來看，事實上你一個電磁在自轉的時候，他 NS 就沒有什麼南北了，就是一個 N 一個 S，同極一定相斥，異極一定相吸，這個各位一定都知道。那麼磁力僅對磁性材料或導體產生作用這點

很重要，磁力不會對木頭、樹葉或對一些沒有磁性或不是導體的東西產生作用，因此磁力線的產生，中間就不能有一個非導體來阻隔，這是一個非常基本的觀念，很多人在設計的時候常常會疏忽。

磁力是屬於超距力，假設這裡有一塊磁鐵，有一個儀器很敏感的話，你在很遠的距離都可以感受的到它，不像電，電如果是靜電，靜電跟磁比較接近，那麼這個磁力的力雖然會產生磁力線，你沒有辦法用某一種磁的導線，把它變成一個磁流，然後把它引導到第二個地方去用；充磁以後，軟磁性材料它會像硬磁一樣，因為軟磁性材料會飽和，它就會吸別的磁性材料，通磁的電，它的線圈會變成一個磁鐵，剛才這樣的一個說明，那麼在通流線圈放入鐵的話，線圈會增加磁性，這個我們等下後面會說明；導體如果切割磁場會產生電流，各位手上在玩的那個玩具，就在顯示這樣的一個現象；你的一塊鋁，雖然它不會被吸引，因為它是一個順磁性的一個東西，只是它在磁場上切割的時候會產生電流，根據楞次定律它就會排斥運動的方向，那麼帶電的顆粒或是導線在跟磁場平行的方向裡面移動，它就沒有受力，導線跟電荷都是平行就沒有受力，垂直的話就有受力，斜的話就會有一個 \cosine 的力。如果在座經常讀一些科學資料的話，你會注意到有一個東西叫「磁單極」，這個磁單極跟我剛才講的把磁鐵一再切割，再怎麼小，哪怕是一個電子，也都有 NS 兩極，看起來好像是矛盾的，事實上不是這樣的，磁單極並不是磁鐵，磁單極是在 1930 年代一個偉大的物理學家叫做狄拉克，他在 1933 年獲得諾貝爾獎，他去分析馬克斯威爾的電磁學方程式，這個方程式是人類有始以來最偉大的方程式之一，他發現到電跟磁這兩個方程式是不對等的，他認為這個東西不應該是這樣子，所以提出一個理論說磁應該是有單極的存在；磁單極它不是磁鐵，它是屬於物質的基本粒子，是一個基本的質子，它只有 N 的磁單極或 S 的磁單極，因此它是一個磁荷，就好像一個電荷一樣，到此為止都還只是理論。根據理論的計算，磁單極非常重，一顆的重量就好像小行星那樣的重，因此如果它從外太空過來穿到你的頭頂，那麼它一路從你的身體通過到達地心，然後再穿過地心從地球的另一端出去走到宇宙的另一端，所以這個磁單極是一個很特殊的東西。七十年來，有狄拉克這個偉大的科學家，包括我們楊振寧教授也提出一個磁單極的理論存在；人類只觀察到兩次似乎是磁單極，後來大家認為其可能性不高。比較被認可的是 1982 年 2 月 12 號在史丹佛大學的 Blas Cabrera，他用了一個非常精密的儀器，坐在儀器前面總共守候了一百五十一天，日夜不停的對太空捕集這些顆粒，結果他的儀器紀錄到一些令人非常興奮的東西，把它放大後發現有一個磁極通過了這樣的信號，然後又過了二十幾年，科學家不斷努力地捕獲磁單極，不過到現在為止還沒有再被發現過，任何人再發現磁單極的話，那 Blas Cabrera 就要拿到諾貝爾獎了，所以這個還是存疑。

接下來介紹「靜磁」，交流磁跟瞬間磁，既然磁場那麼重要，我們來看磁場的種類跟產生。第一個是地磁，它無所不在，鐵做完後在地磁裡被磁化，多多少少都會有一些磁性，永久磁鐵有磁場，直流線圈產生磁場，交流線圈也會產生交流磁場，那麼瞬間大電流它可以產生瞬間非常大且時間非常短的磁場，那麼直流線

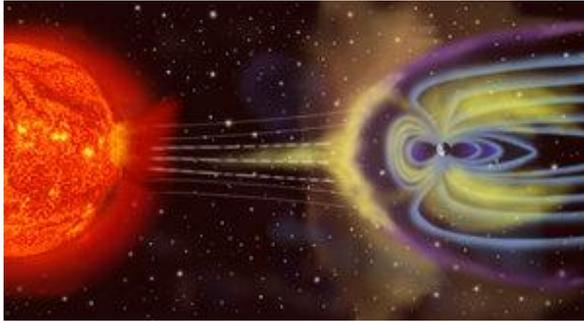
圈可以用一般的線圈也可以用超導的線圈，超導線圈的電流可以流過非常大，如果在線圈裡面插入鐵芯則變成電磁鐵。



這是一個線圈(上圖左)，只要通過電流就會有磁場，假設這個線圈你把它做的很密，磁場的磁力線分佈就像圖中所表示的。這個是你在實驗室裡面經常看到的一個電磁鐵(上圖中)，你把它剖開來看就是像這樣子(上圖右)，這個叫二鐵，事實上是軟磁性的，然後兩側是線圈，中間就會產生非常非常大的磁場。磁的基本量，我們看的是磁場的大小，一萬高斯約等於一個 T，但這些都不是 MKS 的單位，在座各位同學，MKS 是每米有多少安培，磁矩是每米平方有多少安培，所以假設有一個小的電流在這邊流動的話，它基本上就會產生一個磁矩，也就是有 NS，只要有一個小電流非常非常小，甚至是原子的一個電子在軌道上運動，電子在軌道上運動基本會產生 NS。有多少磁矩被磁化呢？就把它單位體積裡面所含的所有磁矩加起來，就是磁化的總量。矯頑磁力是在磁化曲線的時候，我們看到它的 HC。導磁率的定義是磁導除以磁場，多少磁場產生多少感應的磁數密度，磁化率則是把物質被磁化後的磁化量除以當時磁化量的磁場。磁伸縮又叫做磁歪，指任何磁性材料在磁場裡面被磁化的時候體積都會變化。各位在路上走路時，如果旁邊有一個變壓器，那麼你會聽到“轟轟轟”的聲音，這個就是因為變壓器裡面的磁鐵被 60HZ 的交流電在那邊磁化，因此產生了 120 次的震動，60HZ 的加倍；那麼剛才的那一根導線，如果流過的電流是 i ，在距離 r 的地方，感受到的磁場強度就是 $2i/10r$ ，單位是 G，所以各位看到這種磁場大小事實上它的分母是 m，分子是 A，安培每米有多大呢？ $1\text{ G} = 79.6\text{ A/m}$ ，一個高斯雖然不大，但是要產生一個高斯，必須在導線裡通 79.6 安培的電流，我們通常把它化簡成 80 安培，通了 80 安培的電流，然後在一米的地方量測到它是一個高斯，所以這一高斯雖然不大，但是這個電流是很大的，那麼各位在傳閱中的那個磁鐵，他表面的磁力線密度大概是 6000 個高斯，你有那個磁鐵，你就不需要通 80×6000 安培那麼大的電流，你就享受到那麼大的磁鐵，所以電跟磁的關係是非常密切的。

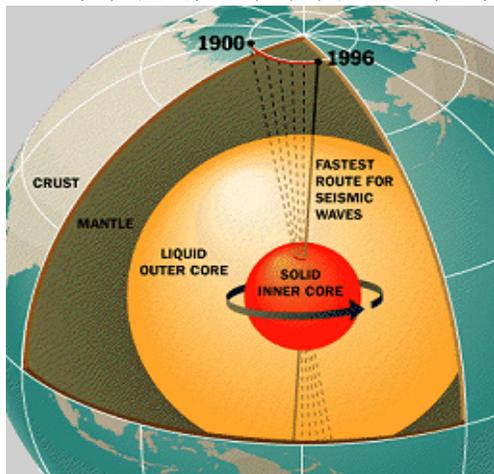
剛才講的是基本的觀念，接下來看地磁，也就是我們周遭的磁，地磁我分成四個部份；我們再回去看地心毀滅，然後在看地磁的成因，地磁的變遷，還有地磁的未來。電影歸電影，電影只是誇張的情節，是要讓你感到興趣，感到故事性，

事實上沒有錯，地球確實產生一個磁場，這是太陽，這是地球，地球就像一個小點，雖然地球很小，但磁場影響的範圍非常非常大，各位看這太陽產生的太陽風暴，它噴射出非常多放射性的粒子，絕大多數都被地球的磁場阻擋在非常非常遠的外太空，然後繞過地球跑到別的地方去，這些是太陽風引起的游離幅射。如果沒有地磁，我們地球就受不了太陽的風暴不斷的侵襲。



地球基本上就不可能有任何的生物；地表的磁場大小其實量起來不大，大概 0.05 到 0.1 個高斯，但是你想它從多深以內跑出來的話，內部的磁場是很大的，即使是這麼不大的磁場，對地球的影響是夠大的。地球磁場在外面產生的一個磁性層，它可以在外面產生一個 Ven Allen 帶，可以把太陽風暴擋在外面，把這些宇宙的游離幅射通通阻隔，然後把他引導，因此可以避免對生物體造成的災害。在 2003 年十月，在兩年多前，有非常嚴重的太陽風暴噴射到地球，因此在那一個月紀錄到非常多漂亮的北極光。我們這一節的目的其實是在介紹地球的地磁是怎麼產生，它的原因及它的演變以及它的影響。

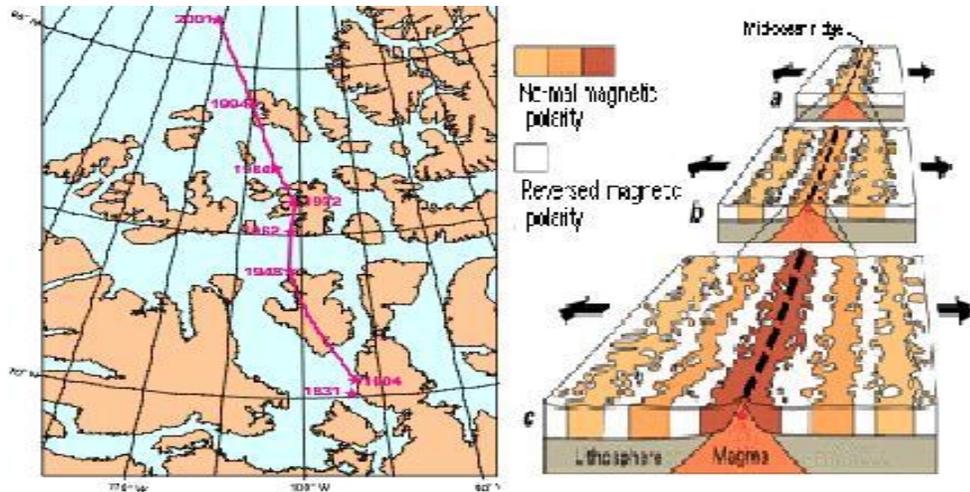
這是一個模型，地球的組成是這樣的，最裡面有一圈核心是鐵，這個鐵是固態的，它的溫度基本上跟太陽表面的溫度是一樣高的，這個心的外面是一層很厚很厚的海洋，這一層海洋也是鐵，是液體的鐵，溫度還是非常非常高，這個是比較低溫可是還是很高，這些是導電的流體，這些導電的流體它在整個電磁的理論裡是一種磁流體，所以在這裡面的電荷只要有不平衡，這邊就會產生很大的電流。事實上地磁的成因至少有十一種學說，最古典的就是古代人認為地球的內部有一個永久的磁鐵，這當然是不可能的，目前比較認可的是地磁的成因是因為這一圈非常厚的鐵的海洋在裡面不斷旋轉，不斷的運動，因為地球不停的在自轉，所以帶動裡面的鐵旋轉，這裡面既然是海洋，裡面當然也是波濤洶湧，很多的亂流，所以實際上我們看到地球的磁場並不是都很均勻；地球的磁場從 0.05 到 0.1 之間，每個地方都不一樣，有的地方地磁會稍微強一些，不過基本上是有個 NS 的方向，地球的磁場跟地球本身的軸心是有一個偏角，而且這個軸的方向隨時在變動，它就好像是一個永久磁鐵一樣，它的磁力線就往外冒，往外冒的結果就跟這些磁場，跟這些太陽風暴作用就產生兩個游離帶，這就叫做 Ven Allen 帶，有內 Ven Allen 帶，有外 Ven Allen 帶，這些地磁所造成的游離場，就是能夠阻擋太陽風暴的主要原因。地磁其實不是固定的，它一直在變，沒有長時間穩定的，有的地方會變小有有的地方會變大，



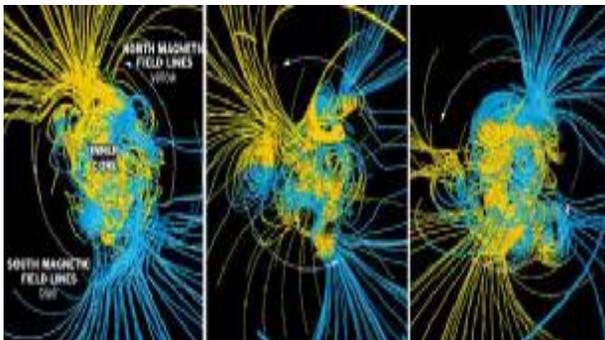
有的地方地磁會稍微強一些，不過基本上是有個 NS 的方向，地球的磁場跟地球本身的軸心是有一個偏角，而且這個軸的方向隨時在變動，它就好像是一個永久磁鐵一樣，它的磁力線就往外冒，往外冒的結果就跟這些磁場，跟這些太陽風暴作用就產生兩個游離帶，這就叫做 Ven Allen 帶，有內 Ven Allen 帶，有外 Ven Allen 帶，這些地磁所造成的游離場，就是能夠阻擋太陽風暴的主要原因。地磁其實不是固定的，它一直在變，沒有長時間穩定的，有的地方會變小有有的地方會變大，

有的地方地磁會稍微強一些，不過基本上是有個 NS 的方向，地球的磁場跟地球本身的軸心是有一個偏角，而且這個軸的方向隨時在變動，它就好像是一個永久磁鐵一樣，它的磁力線就往外冒，往外冒的結果就跟這些磁場，跟這些太陽風暴作用就產生兩個游離帶，這就叫做 Ven Allen 帶，有內 Ven Allen 帶，有外 Ven Allen 帶，這些地磁所造成的游離場，就是能夠阻擋太陽風暴的主要原因。地磁其實不是固定的，它一直在變，沒有長時間穩定的，有的地方會變小有有的地方會變大，

而且磁極也可能會變動，甚至 NS 極在地球歷史裡面經常在轉換，經常北變南，南變北，這個是在北極圈紀錄到，都有年有月，例如說 2001 北極的極性在這裡，然後 94 年在這邊，84 年在這邊，1962 年在這裡，1948 年在這，1904 年在這裡，1831 年在這，所以它是隨時都在運動的。



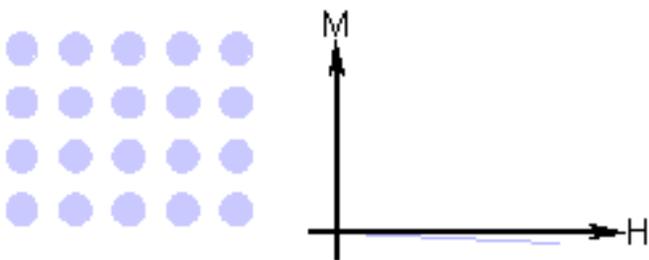
上圖是一種海洋地磁學，這邊是地心的岩漿由內往外湧出，這是經過幾百萬年，湧出來之後，他這邊就產生新的地層往外推擠，然後又有一些海洋深處的岩漿冒出來之後，再把這些地殼再往外擠，所以一層一層的。地質學家去考察的結果發現到這裡面的磁場，假設白色的區域是南，有顏色的是北，而且不同顏色的量代表不同的強度，事實上這些是好幾百萬年造成的地層，新生地層的極性是每隔一定的年線就有一次的反轉，經過像這種年線的推引，大約 70 幾萬間會有一次反轉。



左圖是用高速電腦把地球組成的模型，把他跟太陽一樣熱的這種固態鐵的核心，外面是用液態鐵的海洋，然後設定各種的流動模式，用大型的電腦去計算，算出來的結果發現到，當裡面的流動有變化的時候，這是正常狀態，它的南跟北是有一個比較明確的方向，但還是有一些地方是不均勻的，當它在轉換的過程，南跟北會有一個非常混亂的情形，這時不再是一南一北，可能有兩個南極一個北極，或兩個北極在地球內部的鐵的流動下，它也會在不同的位置產生，現在有高速電腦所以可以做這樣子的模擬，那到底是不是真的，當然有待印證。關於地磁的未來，不同的資料顯示，有的說五十年反轉一次，有的說七十或八十年反轉一次，每一次從 N 到 S 不是說一天就反轉過去，基本上地磁要一千年到七千年它才會反轉完畢，這個模式不是固定的，比如說恐龍時代有三千五百年，地磁從來沒有反轉過，那一

百五十年前，科學家開始紀錄地球的磁場，一直到今天地球每個地方的磁場都一直在減弱，10% ~ 15%，最近減弱的速度一直在增加。在好幾年前科學上的大新聞，上次反轉大概是在七十八萬年以前，那時人類的祖先才剛走出洞穴，才在學習怎麼樣製作石器，理論上地球的磁場反轉對自然及社會當然會有影響，那這就是剛才南極的極性反轉的情況，科學家甚至猜測，在白堊紀第二紀到第三紀之間有一個現象叫物種大滅絕，很多這種貝殼的年代都被滅絕掉，可能是跟地磁的反轉有關，反正找不到原因就把所有的可能猜進去，這是其中可能的一個原因，那一般認為地磁之間偏地磁會減弱大概 10% ~ 50%，所以科學家預測到 50 ~ 150 年之間地球會再次反轉。

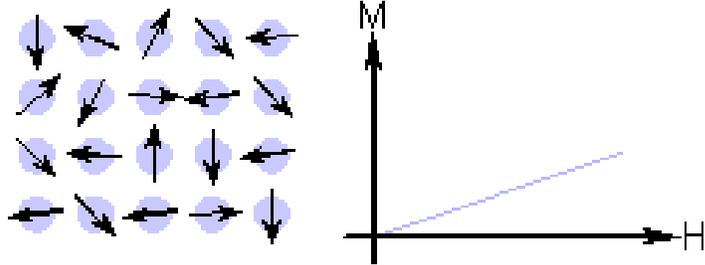
第三個部份來介紹物理上的磁性，我分成所謂的物質磁性的現象，然後介紹反磁跟順磁，接著介紹鐵磁及其起源假說的典範，再介紹反鐵磁性跟亞鐵磁性，最後是超順磁性。我經常跟一些年輕人在談磁，我發現一個很大的問題就是大家覺得電可以很容易量的到，可以被電到，可以被摸到，所以覺得電是很容易學的，磁看不到摸不到，又不會被磁到，覺得無法捉摸，然後名詞一大堆，還沒搞懂後面的，前面的就先忘掉了，所以覺得說磁實在是很難學，我今天其實不是要你把它通通學會，而是要你有一些基本的概念。在物理上任何物質都是磁性物質，只不過屬於哪一種磁性，是反磁性？順磁性？還是鐵磁性？還是其他的？我們常說的磁性材料是狹義的，是指對磁場有強反應的，像鐵磁性或是亞鐵磁性；物質的磁現象主要是因為電子的自旋，電子也有軌道運動的，主要是因為有非常非常少量是因為它原子荷內部的質子或中子的貢獻。本節主要是介紹物理學家對磁的分類，還有更重要的是一百年來科學家怎樣把它解謎？對磁性物質的劃分根據兩個量，一個是它在 H 磁場裡面被磁化到多少的量，這是磁化量，另一個則是以斜率大小來表示。因此，我們定義在一個磁場裡面，有一個物質被磁化到 M ，磁化率定義為 X ，如果 X 小於 0 而且不隨溫度變化，溫度在上升下降 X 都是一樣，這叫做反磁性； X 小於 0 等於說磁化減少，換句話說你的東西放到磁場裡面，結果磁化量比磁場還要更小，這叫做「反磁」又叫做抗磁，反磁由沒有磁性的原子組成，原子本身的電荷都是對稱，所有電子的軌域都是填滿的，所以都是對稱的，因此它本身沒有靜的磁矩。當它在磁場被磁力線切割的時候，電子的運動多多少少受到一些楞次定律的作用而減小，它的磁化量也就減少了，像銅、金、鋅、矽、二氧化矽以及外面號稱磁場很強的石英晶體、炭還有各種有機組織，各位的身體組織都是反磁性。



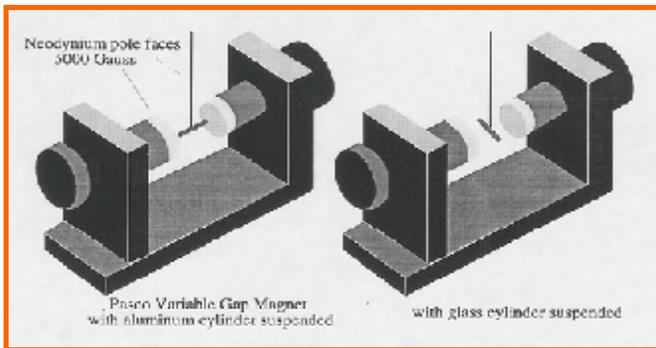
我們如果用一個圖來表示，這是一個原子，這原子沒有任何的磁性，如果用 M 代表它的磁化量， H 代表它的磁場，這時這裡的斜率是負的，往下走的。換句話說， M 減小，在磁場裡面一面給

它磁場它不磁化反而減磁，這磁化率看起來很大，其實很小，只有百萬分之一。換句話說這個東西這磁場裡面減少的程度非常非常小，反過來說如果 $X > 0$ ，但是 X 很小，這就是順磁性，會被磁場略微磁化，順磁性的物質基本上是由磁性的原子所組成，舉例有鋁，鋁，鉍，陶瓷等。

用一個簡單的圖來表示，這些順磁性組成的分子或原子都具有磁性，但是彼此的磁性非常混亂，會抵消，統計上完全看不到，如果在磁場裡面磁化，那它的



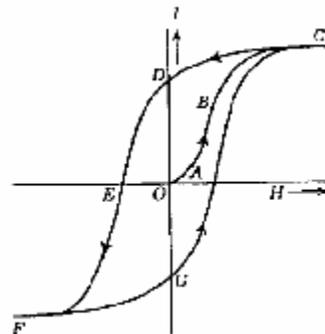
M 會上升，可是它的值還是很小，也差不多是百萬分之一，非常非常小，所以這個 X 很小，錫跟白金這兩個還是有很大的差距，大概差了一百倍，如果我們把順磁性物值跟反磁性物值放到一個磁極中間，順磁性會順著磁場的方向，所以我們說它是順磁性，這是最早科學家所定義的順磁，反磁或抗磁。



如果你是一個反磁性的物質，把它懸吊在磁場裡面，它會轉 90 度，也就是抗磁。左圖一個示意圖，那鐵磁是什麼東西？它是一種強磁，它的 X 甚大於 1，換句話說鐵它的 X 是十萬，剛才順磁性的 X 是百萬分之一，所以這兩者的差距約十的十一次方，它每一

個原子都是磁性原子，而且它的排列非常整齊，這是它的特色，它的例子有鐵、鈷、鎳、釷。

在室溫之下可以看的到它有磁性，特點是它在磁場裡面磁化的時候會具有磁滯的現象，從這裡磁化上來這裡飽和，回來的時候不會走原路，它會走這條路，這叫做滯後，是磁化滯後的現象，因此把它定義為磁滯現象，這個地方會有一個矯頑磁場，這兩個就是剛才有了定義了，假設這裡是一個永久的磁鐵的話，這一個面積是代表 $M \times H$ ，這是一個能量的積，在某一個一定的溫度以上，任何鐵磁性的物質都會轉為順磁，這個溫度點叫做居禮點。譬如說鐵的居禮點約 770 度，鈷的居禮點約 1038 度，所以有些物質可以承受非常高的溫度，它原子的排列都不會被分解掉，所以它的磁性非常強，那麼磁鐵的磁性到底怎麼來的？這個問題

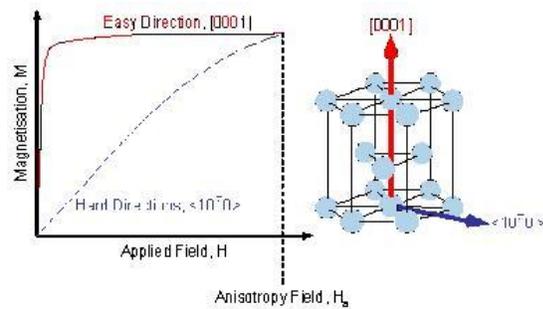


從古代就很想要得到答案，因此這個問題困擾著科學家已經有好幾個世紀，居禮先生的學生魏司在一百年前繼居禮先生後去研究順磁跟鐵磁，因為所有鐵磁在高於居禮溫度之後都會變成順磁，所以它從高溫冷卻下來又變鐵磁，他就舉出一個非常大膽的假說；因為假說不對的話就變胡說，對的話就變成學說，就變成世界上非常重要的科學家。魏司就是這樣的一個先生，他在 1906 年還不知道物質是由原子組成，所以他的假說叫做分子場，事實上這名子本身還是用錯的，不過我們為了紀念他，所以現在還是叫分子場。他當時舉出假說鐵磁性的物質內部有非常強的分子場，強到低於居禮點以下時不需要外加磁場，內部就會自己磁化，但是他這樣假設後遇到一個非常大的麻煩，假如說任何一根鐵把他從 800 度冷卻下來它自己磁化就會變成磁鐵。為什麼平常一個鐵吸不起另一個鐵？你需要繞幾個線圈，通了電流後才吸的起來呢？因此他為了自圓其說，就另外再提出一個假說，這些物質的內部都可劃分成許許多多的區塊，每一個區塊有磁化的方向，每一個區塊都是磁化到飽和，沒有外加磁場它也可以磁化到飽和，因此這些區塊雖然很多但互相混亂，所以每一個區塊的磁就相互抵消掉，所以就看不到磁，這個假說真的是相當大膽，或許是因為磁看不到也摸不到，所以他才敢提出這樣子的假說，有了這個假說後，他就可以解釋為什麼有分子場卻看不到磁的問題，如果你外面給它一個磁場，它的磁區就互相整併，互相統一，甚至旋轉磁場方向，所以它就會飽和。因此他提出這樣一個假說，其實充磁的時候並沒有使它的磁增加，只是把這些磁區移動及旋轉，讓磁化的方向跟外面是一致的，這個是魏司一百年前提出的假說。今天我們對於鐵磁性已經了解的相當透徹了，因為我們有量子力學作為根據以及很多精密的儀器跟工具，我們實際上看到這些磁區的存在，更覺得他們當年的偉大，我們今日的了解鐵磁性是電子在物質組成的原子，它的軌道運動或者是自旋的運動，我把自旋放在前面表示電子自旋產生的磁更重要，我看到在座很多同學已經開始在學量子，量子化的物理，量子化的概念，你學過包立不共容原理，任何一個次軌域最高容納兩個電子，所有電子都不能具有同樣量子數，所以最後這兩個電子一定要有一個自旋向上一個自旋向下，同一個版裡面所有的磁通通都抵消。韓德定理是在 20 世紀的初期一些偉大的科學家提出來的，他們說過度元素的第一軌域，次軌域，他有五個次軌域，它的填充是第一個填滿就填第二個，填到第五個再回到第一個，以圖形來看磁就是因為電子的軌道運動或自旋運動，以韓德定律來說，每個軌域有兩個電子，它自旋向上向下是抵消的，如果在過度元素的鐵、鈷、鎳，事實上沒有完全抵消掉，會有空軌域存在，這兩個多出來的就是靜磁距。以現在的了解，分子場其實是一種交換力，並不是鐵磁性才有，任何一種固體只要結合就有交換力，只要夠近就有交換力，交換力其實是氫原子結合成成氫的分子，當靠的夠近的時候，你的電子變成我的，你的分子中有我，我的分子中有你，大家共用那個電子，是兩個分子交換著用。交換力其實是不是鐵磁性的東西，絕大部份的東西的交換力是負值，只不過鐵磁性的東西的交換力是正值；科學家發現交換力變成正值是因為原子跟原子有一個適當的距離，差一點點都不行，只要靠的太近就會變成負的，拉的太遠也會變成負的，所以鐵

磁性物質就只有鐵、鈷、鎳等，反鐵磁其實是一種很強的磁，因為結晶排列的關係，讓它每個相鄰原子的方向相反，因為它交換力非常強，一個非常強的負交換力，它的 X 值大約也是十的負六次方，萬一你組成的原子種類稍微不一樣，造成他們一長一短的話，會導致於隔壁的磁矩不會互相抵消，就會看到靜的磁矩，這叫做「亞鐵磁性」。反鐵跟亞鐵這中間是有很大的差異，在 1948 年尼爾在研究反鐵物質的時候發現，從 M 跟 H 來量看起來很像一個順磁，但是它在很低溫的時候還會在升上來，反鐵性物質事實上非常多，像 Cr 、 Mn ，它們磁矩都很強，但交換力是負的，所以變成反鐵磁，還有很多氧化物，硫化物，金屬…等。

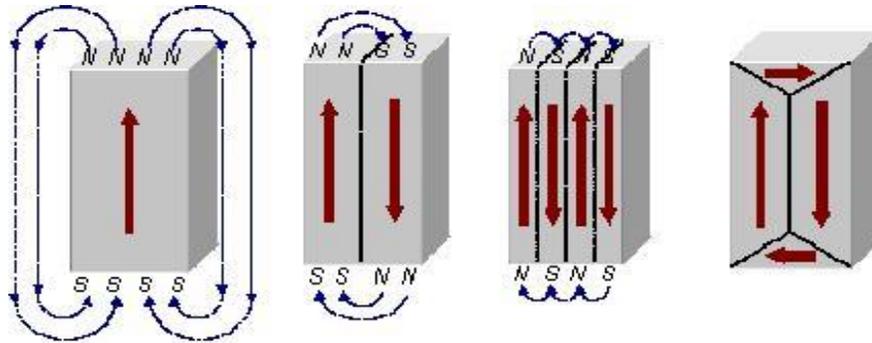
在二十前，大家可能認為反鐵磁沒有什麼用，可是今日很多磁紀錄跟磁物品都會用到反鐵磁，像一些鐵氧體都是亞鐵磁，亞鐵就是它沒有完全抵消，兩個大小不一樣，所以沒有完全抵消，譬如說它的 X 大概是 3，如果把它統整合理一下，我們可以用 X 的倒數隨溫度的關係，反磁性跟溫度無關它是負值，順磁因為它 X 很小所以把它倒數就變得很大，隨著溫度它會上升。對於鐵磁而言，它在低溫的時候， T_c 以下它有一個很強的磁化，它的相鄰原子都磁化到一個方向，它的倒數到高溫以後就跟順磁性一樣。法國科學尼爾去推導出反鐵磁性，由反鐵磁性找到亞鐵磁性，所以一路上物理磁性是這樣來的。

任何物質包括人體、樹葉，你把它放到磁場裡面都可以把它歸類為反鐵磁或順磁的其中一項，對於一個磁性材料來講，假設一個鈷的原子的排列，這是一個六方密集的排列，這個結晶軸的方向是 0001 ，這個是 $10-10$ 的方向，先不管這個方向怎麼定出來的，單結晶你記住它有不同結晶方位，它延著軸向的方向來磁化，一點點的磁場就可以把它磁化到飽和，可是延著這個方向來磁化你就很難達到飽和，這就是一種異方性，各種不同方向，隨著方向不一樣它性質不一樣就叫做「異方性」，這是一種磁結晶的異方性，這是一個異方性的場，中間的面積代表它是一個能量，這個相乘是一種能量，因此延著結晶材料磁性結晶的不同方向磁化，其程度不一樣，這就叫做磁晶的異方性，對磁性材料來講，它就有易磁化軸跟難磁化軸。



第二個要介紹的現象叫「磁伸縮」，鐵磁性或亞鐵磁性的物質被磁場磁化後，它的長度有一邊會伸，有一邊會縮，這就是為什麼電壓器會發出聲音，因為它隨著 60Hz 一秒鐘有 60 次的磁化反轉，產生 120 次的震動，因此它就有聲音，它就會有伸縮的現象。為什麼會有磁區？我們從實際的理論來看，為什麼會有磁區的產生。假設磁化的飽和一邊 N 一邊 S ，完全是一個單磁區，但是這個能量是很高的，所以假如你把它分成兩個磁區，磁化的時候磁彈性能因為它會伸長，所以磁彈性能變得非常大，一個往這邊伸長，一個往另一邊伸長，這時它的磁彈性能就會減少，因此你如果繼續把它分成很多的磁區的話，它的磁彈性能就會減小，我

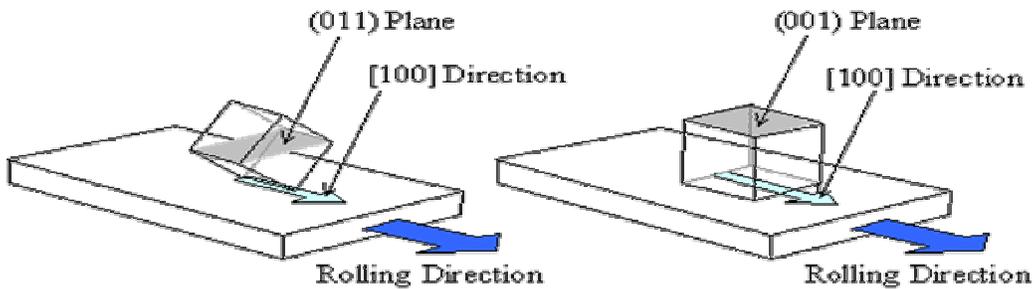
們知道一個物系一定要往低能量的方向走，如果有多一個方向的易磁化軸，它實際上是喜歡形成一個封閉的磁區，另外一個能量是靜磁能，這個靜磁能很大，這個靜磁能卻減小，磁區跟磁區間有一個東西叫「磁區壁」。



上圖左磁區是往上，紅色這邊磁化是往下，中間是一個從上這樣轉轉轉的轉換，磁區壁的厚度通常是 10 幾個奈米左右。我實驗室裡面做的 NdFeB-Fe 複合材料，用原子顯微鏡去看它的顆粒大小，它的顆粒約 10 幾個奈米，可是如果你用磁粒顯微鏡去看的話它的磁區是一陀一陀的，所以它是很多很多的顆粒組成一個磁區。你把它磨的非常平，然後你在上面灑一些磁性的顆粒用顯微鏡去看，這些顆粒它會跑到磁區壁，因此每一個磁區就可以看的出來，事實上你看到的線條是磁區壁。事實上，是可以去解出它磁化的方向，一個磁壁磁化的方向，這是一種叫「科爾」顯微鏡，用科爾顯微鏡可以看它表面的磁區構造，而且你可以看到在顯微鏡之下，磁場等於 0，然後磁場到 9.2Oe，然後磁場到 13.8Oe，你可以看到這邊是黑白相等，所以 h 等於 0，它是沒有靜磁化，到 9.2 的時候白的增加黑的減少，13.8 的時候白的就更多了，你可以從這裡去估算它的磁化，像這裡磁化到負的飽和就會完全黑掉，所以各位看到磁區是存在的，一百年前科學家在沒有任何根據的時候他憑他的想像力，他就可以把這些東西解開，這樣子的精神才是今天在座各位學子要去學習的，倒不是說這個內容有什麼東西，最後一個要介紹的是超順磁，超順磁是怎麼回事？超順磁是鐵磁材料，我們看到都是很大的，一塊磁鐵都是很大的，可是如果你把它做的很小，像一個小的顆粒，當它的顆粒尺寸越來越小的時候，它的大小有機會接近一個單磁區的大小，這個單磁區的大小約幾十個奈米，因此當它顆粒減小到單磁區的時候，它磁性是最強的，可是超過單磁區再減小的話它的磁性就會掉下來，到某一個程度後磁化就變得混亂，也就是大塊的鐵磁把它加溫，它會變成順磁，反之在室溫之下你把它切割到非常小的時候，它就變成超順磁，但是它的本質是鐵磁性的材料，為什麼會這樣？實際上是因為這些交換力這些作用是受到熱能的影響，所以物理學家很喜歡把物系冷卻到非常低溫，把它隔絕熱能的影響，然後才去研究，因此有這公式，推導過程我們就不管了，基本上它的臨界體積是跟溫度跟 kT 跟 Ka 有關，鈷的臨界大小大概是 8 個奈米，這個有影響，影響非常非常大，主要是因為我們的磁紀錄；各位都有電腦，裡面有很多硬碟，這磁紀錄隨隨便便買一個硬碟就是 60G 或 80G 甚至 100 多 G，非常非常大，這些紀錄的密度越來越高，但是每一個 bit 越來越小，小到最後就變

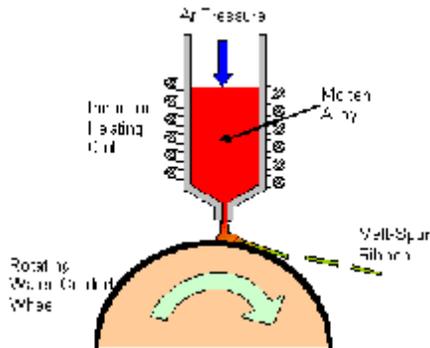
成一個順磁，到了超順磁它就不能做紀錄了，所以這是有問題的，一定要介紹。

接下來介紹磁性材料，分成軟磁，硬磁，磁性薄膜，理想的反磁是超導體，還有磁性半導體是最近很熱門的一種東西，磁性材料的劃分呢，第一個是軟磁，它的矯頑磁力非常小，小於 1000 A/m，把它除以 80 的話約 12 點多個 kOe，它非常容易磁化也很容易消磁，導磁率像純鐵一樣非常高。硬磁的矯頑磁力很高，越高越好，這個是 1000kA/m，好幾百好幾千 kA/m，磁能積是磁滯曲線第二象限，要越大越好，這時候它儲存在裡面的能量每充磁一次，它儲存的能量就越高，像各位手中傳遞的磁鐵就是釹鐵硼磁鐵，介於中間就是半硬磁，除了這樣劃分外還有一些特殊的磁性材料，譬如說巨磁伸縮材料，它的伸縮量是傳統磁性材料的一千倍以上，還有巨磁阻材料、非晶質磁性材料等等。軟磁性材料我們以鐵來講，不同的鐵的單結晶的方向，譬如 100 是它最容易磁化的方向，111 是它最難磁化的方向，110 是其中的一個方向，軟磁性材料的特色是當它放到磁場後它會把磁力線大幅的吸收到它的內部，因為它磁化了，正中心的磁場就減弱，所以這個可以做為一個磁的粒子。粒子像純鐵、矽鋼片還有坡莫合金。



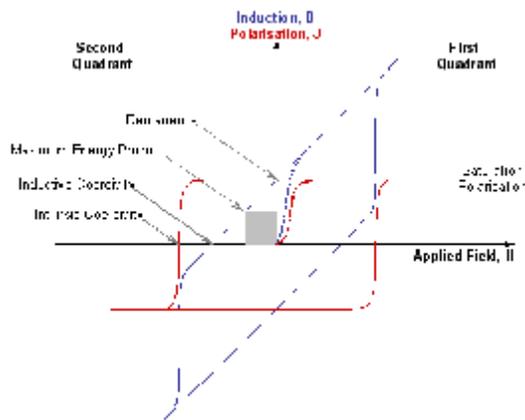
【上圖是矽鋼片經過滾壓以後各種結晶的示意圖】

鐵是我們常常看到的，它的初導磁率就有 200，最大導磁率 5000，飽和約 2 萬一千多個高斯，矽鋼片的導磁率比它大很多，坡莫合金更高。所以有的磁場雖然很小，但可以產生很大的磁化量，這就是軟磁的特別功用；它應用有變壓器、電磁遮蔽或磁鐵軛及馬達鐵心。



非晶質的材料事實上在 1970~1980 年之間逐漸開發出來，它的材料成份是鐵、矽加上硼。它是用這樣子的一個裝置(如左圖)，這邊有一個高速旋轉的轉輪，它的速度每秒鐘高達 35 米以上，然後這邊把這個金屬，像鐵矽硼的金屬把它融化，然後用氧氣的壓力把它噴出來，碰到高速旋轉的轉輪後它噴出來變成一個 30 微米的薄帶，30 微米多大？各位頭髮的直徑就是 60 微米，所以這些薄帶的厚度約是頭髮直徑的一半。它的特色是有非常低的磁損，用來做變壓器可以大幅節省能源；據說如果把台灣所有的變壓器都用這種非晶質的軟磁做成的輸配電變壓器，台灣就可以少蓋一個火力發電場，因為它

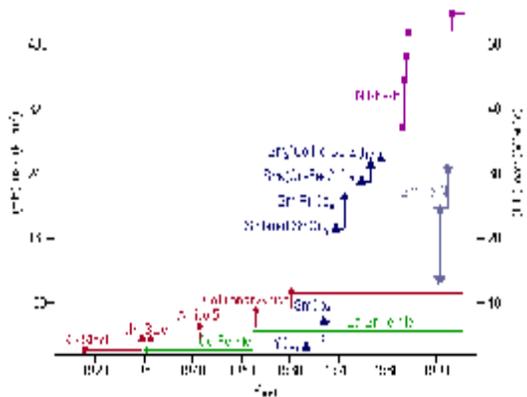
非常省電，能量的耗損非常小。這個是我的實驗室還有國內很多教授，以前張教授也做了不少，這個是很薄 60 微米的，我們現在實驗室也在做大的直徑可高達 2mm 到 4mm 的塊狀非晶質。



硬磁性材料的特色是它的磁滯曲線的第二象限非常大，各位可以在左圖看到這一條叫做 MH 曲線，斜的這條叫 BH 曲線， $B = H + 4\pi M$ ，B 這邊看起來就會比較高，那 BH 曲線下面這一個面積我們就稱它為磁能積，這是一個典型的磁滯曲線，磁能積大概是 1，鈹鐵硼磁鐵的磁能積大概是 45，所以最傳統冰箱的門上這些關門的磁鐵大概是 1，而鈹鐵硼是 45

到 55 之間。

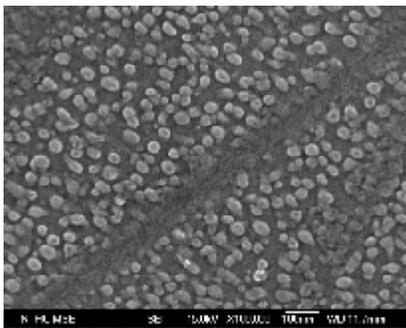
右圖是從 1920 年代到現在 2000 年的永久磁鐵的轉換，各位看到它每隔一定的時間都有一個量子跳躍，這些有的都沒有鐵，但是它磁性非常強，各位看這個磁能積像 Ferrite 只有 1~5 之間而已，但是鈹鐵硼一路進步，一路跳躍到現在最高已經 55，還有 58 的，所以這一路發展上來是非常的驚人。



左圖是鈹鐵硼磁鐵，它可以吸引重量比它重 150 倍的東西，因此每一克鈹鐵硼磁鐵可以吸的重量是 1.5 公斤，每 1 公斤可以吸 1.5 噸，因此就有人設計一個人變成蜘蛛人，不是用蜘蛛絲，是手上跟腳上裝上鈹鐵硼的吸盤，大概用 40 克鈹鐵硼磁鐵就可以撐的住你的重量。假設你的重量是 60 公斤的話，40 克的鈹鐵硼就可以稱的住你的重量，你就可以設計一個開關讓你的鈹鐵硼轉一個方向，這時候磁力線從這裡上去就可以爬這個鐵壁，銅牆不能爬能爬鐵壁，水泥牆也不能爬，還是只能爬鐵壁，那你轉一個方向，磁力線上來你就可以吸的住，再轉一個方向磁力線在這裡封閉，你那隻手或那隻腳就可以脫開然後上去。因為這樣強的磁鐵使得馬達越做越小，功率越來越強，現在有很多直流馬達，很多變頻馬達，變得非常的厲害，很小的馬達就可以發出 1~2 馬力出來，它的應用非常多像是用

來吸，做直流馬達、無刷馬達，用來做磁記錄、硬碟片上面的磁記錄層、感應器、致動器，喇叭上面的磁鐵…等等。磁性薄膜就是看怎樣的磁性材料鍍成的薄膜，像各位在用的硬碟機它用的薄膜是鈷銻白金，這成份很多，這只是其中一個例子，它厚度只有 30 奈米，非常薄，就可以做很多的磁記錄，軟磁性薄膜像 Ni-Fe 薄膜，它是用來做各種軟磁性的應用，像是用來做很多的電子零件，巨磁伸縮薄膜則是用它產生磁的伸縮來做致動器，那巨磁阻薄膜、龐磁組薄膜，其他像反鐵磁薄膜；反鐵磁薄膜現在都跟軟磁薄膜來搭配，做成很多各種各樣的應用，譬如說這個就是一個鐵磁跟反鐵磁介面的作用，平常你的 MH 曲線在中心是對稱的，可是如果你外面有一層反磁層，把最上面這層鐵磁兩個互相釘住，那 MH 曲線就會往左邊偏，這個早在 1957 年就已經被科學家發現了，當初沒有什麼用，可是現在是很多磁性原件的原理。

接下來要介紹的是理想的反磁性，也就是超導體，一般的這種導體一直到低溫，它的金屬會隨著溫度降低它的電阻，超導體溫度下降到某一個溫度的時候它電阻變成 0，電阻變成 0 它就變成超導態，超導態的時候是一種理想的反磁，所有的磁力線都不會通過它，一定會迂迴而過，可是一旦有這樣的情況，任何一個超導體它都有一個臨界溫度如 YBaCuO 約 90K 左右，這些東西都存在一個臨界磁場，也就是它允許流過的電流密度是有一定的大小，它不能無限制，因為電流大到一個程度以後，磁力線就開始進入，一旦進入超導體它就變成常導而不是超導，理論上按照歐姆定律它的電流可以無限大，可是自然界沒有給你這麼好的，自然界限定一個材料所能流過的電流密度對等於它的最大磁場。磁性半導體是一種半導體，但是它裡面磁的原子可以造成長程的耦合，也就是它電子的自旋假設一端是正的，經過半導體的轉換後它還是正的，從頭到尾都是，譬如說 As 是三五族，一個很有名原件發光的半導體，如果加上 Mn 它就變成磁性半導體，GaN 是一種藍光的半導體，也是三五族，加了 Mn 號稱可以到室溫，氧化氫是二六族，加了鈷，Si 是四族的，Ge 也是四族的，加了 Mn 號稱也是可以變成磁性半導體；它應用潛力在哪裡呢？我們現在用的這些 IC 它只用了電子的電荷，但是到了未來的 IC 有了這種磁性半導體以後，你還可以應用電子的這種的 Spin up 或 Spin down 來記錄 0 或者是 1，所以最近在國外還有我們國內這方面的研究很多，我自己是有主持一個國科會的國家型的計劃在做這個，它的中心問題點在於 Tc，目前確認的 Tc 它的臨界溫度還太低，約 110K 左右，那譬如說這是我的實驗室用 MBE 長在 GaAS 上面很多很多的量子點，量子點是說它是一沓的原子，它的大小可能是幾個奈米到十幾個奈米，它的行為就像原子一樣，是一種人造的原子。

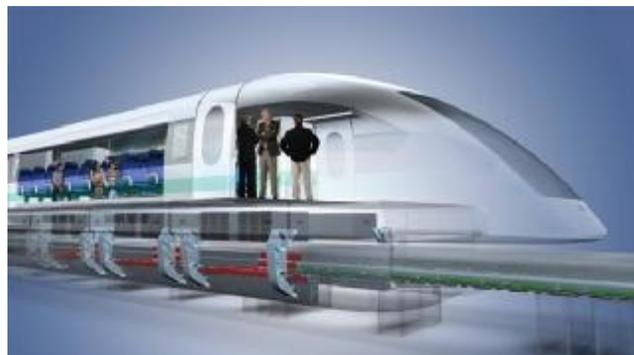


這個是用 SEM，用掃描室電子顯微鏡把它切開用電子元件去看的話，這一個就是相對於這裡的一個量子點，這裡面因為太亮了，所以事實上是看到很多很多的原子面，這個是我們做出來的剛才那個量子點，添加不同的錳的量，我們實驗室可以做到它的 Tc 可以大於 300K，這是一些

很令人振奮的進展，它因為是一個磁性材料，當然就要有磁滯曲線，5K 在低溫量到的，跟在 300K 量到的，300K 當然熱的影響會減小，但是它還是有很漂亮磁滯曲線。

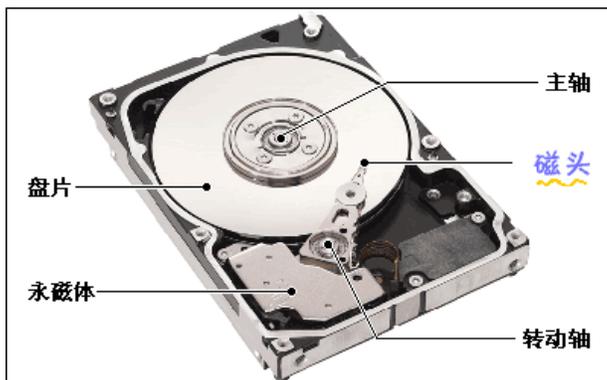
接下來我來跟各位介紹磁性的技術，因為時間不夠，我很快介紹一下，磁性的技術事實上隨時都在我們身邊，那我在這裡稍微舉例一下，最常見的就是馬達，各種的馬達，像這邊這個就是直流馬達，你把它的殼打開以後事實上是兩片磁鐵，也有這邊是鐵然後磁鐵放在裡面，這邊有一些線圈，然後這邊有電刷，在這裡直流電進來轉一圈換一下極性，因此它可以一直在這邊轉動，我們沒有時間去詳細說明這裡面的電場磁場怎麼樣的互相作用，但是很多年輕的朋友你們在物理書裡面這個都是有的，這個是感應馬達，也就是不用永久磁鐵，這兩個是鐵芯，軟磁性的鐵芯，在這裡繞線以後呢，你給它通磁場，藉著電流的相位差，這裡面也有鼠籠式，像是老鼠籠的繞線，你可以讓它產生轉動，磁浮是一種新的發展，這個照片是不要給各位看富士山，是給各位看富士山下面的鐵路，這個叫做日本的超導的試驗線，你到日本去的話，你要去之前你可以上他們的網站去排隊，去試乘這種時速超過 500 公里的超導磁浮。

德國在上海建了一套這種電磁式的永久磁鐵，他們把它稱為陸地飛行，這個電磁式的意思是它在這邊用的是一種電磁鐵，這是一個電磁鐵，這是一個鋼軌，不是扁扁的是寬寬的鋼軌，那麼這個電磁鐵呢，基本上跟鐵軌之間的距離只有



一公分非常地小，它的磁鐵是抱住那個鋼軌，左右兩邊抱住，然後它事實上是藉由這邊的線圈來控制吸上去或是掉下來，所以它整個技術的精華就是這些自動控制，因為這種電磁鐵擺在一起彼此會互相搶，如何去讓它能彼此妥協不要你爭我奪，然後能維持一個全車十公尺左右呢？它都是一公分左右的間距，這個時候它就沒有阻力，再利用埋藏在鐵軌裡面的這種三相電流的線圈產生線性馬達，來把車子推動，所以它裡面沒有帶馬達，馬達是埋在地上，一路上往前跑，那麼這個是超導體的磁鐵，像超導的磁鐵它是一種自動的，因為它超導的磁鐵是這個磁鐵跟超導體之間它是被排斥的，所以它不需要一個自動控制，它本身就會自動懸浮在上面，日本的超導磁鐵的磁浮就是用這種方式做的，德國的系統它是用電磁鐵，而我們台灣也做磁浮，就是在清華大學，不過現在已經沒錢做了，當年大概在八年前我是這個計劃的主持人，我們用的是永久磁鐵來擔任這樣的一個工作。我們現在設計的一個車廂是 60 噸，除以 1500 的話，大概 40 公斤的永久磁鐵就可以把 60 噸的車廂吸到鐵軌上面，那麼我們在這裡一樣的就是擺了一些線圈，我們把它加一個負的磁場，這個磁性減弱呢，讓這個車廂掉下來，掉到一個程度再把這個負的把它減弱，它又會被吸上去，因此達到一個自動控制；最佳的條件的時

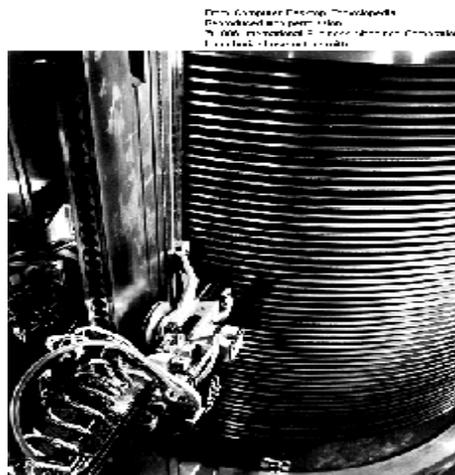
候，這個吸的力量我們已經做到幾乎是零功率，就是整個車廂在吸的時候是不需要功率的。



接下來的應用是磁記錄，各位都看過硬碟機，只是你可能不捨得把它拆開，拆開裡面是這樣的，這是磁碟，這是一個音圈馬達，這是一個磁頭，硬碟機就可以高速旋轉，因此磁頭在這裡可以記錄，那這個是讀寫，寫的時候這裡通一個信號，就可以寫進去，讀的時候這裡就有磁力線感應，就有信號出來 0101。

應，就有信號出來 0101。

右圖是它的示意圖，世界第一顆硬碟是 1956 年，相當地大，大概是書櫥那麼大，只能夠寫入一百萬個字元而已。

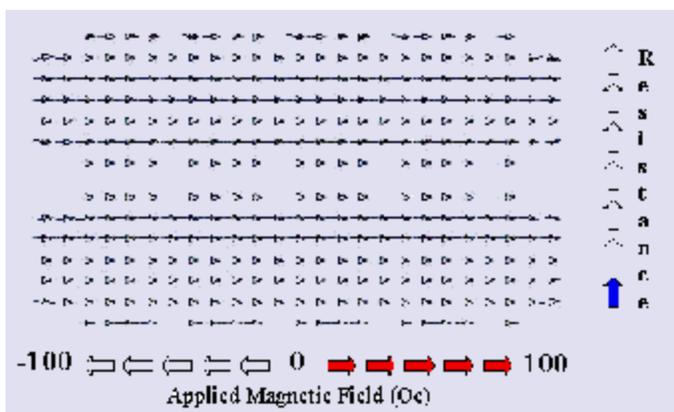


今天這麼小小一個硬碟，各位可以從這裡看到，這是一個骰子，這個一吋的硬碟可以 3 個 Giga，這個簡直是不得了的。磁記錄一開始是用水平記錄，也就是躺在平面上，各位看到，當它大的時候沒有問題，可是到它很小的時候，它這個越來越密的時候呢，等它小到一個程度就進入所謂的超順磁，所以科學家就設計，如果不要讓它躺下來讓它垂直，垂直磁化，不是向上就是向下，那這時它就可以縮的更小，因此就

有所謂垂直的記錄。

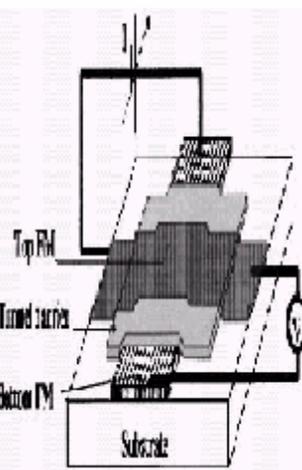
最後的應用要介紹的東西就是磁性的隨機記憶的記憶體，RAM 是各位經常都在用的，一關掉所有的資料通通就沒有，所以很怕停電，可是未來假設用這種 MRAM 的話，它是磁電阻特性儲存記錄資訊的非揮發性隨機記憶體，也就是說你

今天工作到一半，你高興去打球就把它關掉，下次一開所有的資料通通在那邊。接下來講 MRAM 就要先講所謂的巨磁阻效應，在 1992 年有一個美國科學家做這樣的研究，就是把鐵磁鍍成多層的薄膜，結果他去研究後發現隨著鍍了很多層約 11 層，隨著中間這個磁是橘色的，中間這個磁的厚度如果是一個很小的厚度只有 1~2 個 nm，這樣它是一個鐵磁耦合，也就是所有的鐵基本上都是同向的磁化，然後到某一個厚度以後，它就突然變成反鐵磁，突然反向，所以這個就是一個非常有名的實驗，這也證明就是我剛才提到的就是這種鐵磁之間交換率的作用，其實跟距離有非常密切的關係，而且它這樣鐵磁耦合，反鐵磁耦合，同向磁化或者反磁化事實上是隨著厚度有一個振盪的關係，到它很厚的時候就等於分開了，這種東西在磁場裡面有很奇特的效應就是一個巨磁阻的效應，它隨著磁場增加它的電阻就會越來越小，像鐵 30 層 35 層 60 層，層數越多下降就越高，這個就叫做巨磁阻(GMR)的效應。



這裡可以看到在磁場裡面，這個是一個低電阻，這個藍色的是一個高電阻，這是一個相對的比較高的電阻，上面這一層薄膜磁化是這個方向，下面這層薄膜磁化是這個方向，所以反向磁化是高電阻，然後我們再看一下，這個是相對比較低的電阻，各位看到它的磁化方向

都是同一個方向，這是磁場，下面是代表磁場。



這是一個自旋閥的結構，也就是在基板上面去鍍一個自由旋轉層，然後鍍一個隔離層就像剛剛那個磁一樣，上面再鍍一個釘著層就是這個層是被反磁層把它釘住不讓它動，要動的只有這個自由層，讓它可以轉，所以這是一個叫做自旋閥，它的磁滯曲線變得非常奇特，它有兩段，一段是在中間的自由層，一段是被釘住的釘著層，因此你就可以在這裡有兩個信號，一個是這邊的，一個是這裡的，這樣的兩個信號，因此有這樣的多層的磁膜，有很多這種半導體的結構，你就可以做成自旋的電子元件，比如說這個就是上層的鐵磁層，下面的

自由層，一段是被釘住的釘著層，因此你就可以在這裡有兩個信號，一個是這邊的，一個是這裡的，這樣的兩個信號，因此有這樣的多層的磁膜，有很多這種半導體的結構，你就可以做成自旋的電子元件，比如說這個就是上層的鐵磁層，下面的

鐵磁層，中間的氧化物叫做一個穿隧的氧化物，你就可以在這裡做成一個 MRAM 基礎的單元，那麼比較新式的就是 Hybrid，是把舊的跟最新的這種磁性半導體的中間層，未來磁性半導體開發成功後，就不需要這麼麻煩做很多層只要單一的就可以做這些記錄的元件。

最後一節是要來介紹磁跟人，在座很多人可能只是爲了磁跟人來這個演講，不過你來也沒關係也聽了很多物理，磁跟生物其實有很密切的關係，我們一開始就開宗明義的介紹說生物依賴磁場定向，如果沒有磁，生物就茫茫然，像是鴿子、侯鳥、龍蝦、綠蠵龜…等等非常地多。聽說有科學家解剖人類發現太陽穴這兩邊有一些比較強的磁性物質存在；在清華有一位教授曾經有一陣子跟我合作研究蜜蜂的磁鐵，他養了一大群蜜蜂，然後把蜜蜂的磁鐵拿出來去研究，結果發現裡面有???而且是超順磁的顆粒，這個論文後來發表在 science 上面，曾經幾千年來人類就想利用磁鐵來做爲治療之用，但是這個在正統醫學裡面一直沒有被完全認可，雖然也沒有辦法完全否認。

我們這一節大概介紹比較被大家認可的東西，一個是核磁共振造影做爲醫學檢驗，一個是利用磁性的顆粒的熱療法，還有用磁性顆粒做藥物輸送，核磁共振造影這個其實在化學上是經常在用的，他們經常用核磁共振來研究化學物質結構的分子結構，把它拿來做人體的檢驗的時候呢，事實上依賴的是一個很大很大的超導磁鐵，最近慢慢的鈹鐵硼磁鐵這樣的大磁場也已經慢慢的問世，價格就是把它從幾千萬壓縮到一千萬以內，這裡其實是一個非常非常大的磁場，裡面有很多的 RF 線圈，RF 就是射頻的線圈，它主要就是去偵測我們人體的內部組織的水份，水裡面的氫它的核子，原子核事實上是質子，對這樣一個很強的磁場在 RF 激盪的時候呢的一共振的迴波，然後把這個訊號取出來以後呢，去做成各種影像的處理，你可以去觀測你髖骨的兩側，重點是它可以一層一層的做斷層的掃描，你什麼地方有病兆，你就在那個病兆的部位一層一層的切，一層一層的看，它的組織上面的磁性的變化，也可以看膝蓋骨周圍的韌帶有沒有變形，你可以看大腦的某一個區，某一個斷面，它的組織有沒有什麼樣的異變，也可以看側面，大概是這個橫面，也可以側切看他這個腦的結構，所以這個是一個非常好的利器，是利用人對磁場的感應，直流的磁場加上射極的磁場的這種作用就可以去取出這些影像。磁性的醫療比較被認可的第一類叫作熱療法，熱療法是用來治療癌症的，癌症如果發現的早，第一個是先切割掉，切割完以後現在的做法是用化學治療以及放射線治療，放射線治療一個最糟糕的地方是它從體外往內照，壞的殺好的也殺，而且是從外面到裡面通通破壞掉，所以是非常嚴重的副作用。如果你手術切割完以後，放了一些磁性的微粒當作熱源，然後把它縫合起來，這個時候你在體外用像你在用的電磁爐一樣，電磁爐煮水就會熱，你把電磁爐放在你病兆的部位，每天醫生規定你照三餐，一次 20 分鐘，看電視的時候就一面放在那邊，它就會發熱，就把那些磁性的顆粒發熱，作爲磁性材料的科學家我們就要去設計這些磁性材料，第一它這個顆粒不能有毒性，第二顆粒在人體裡面要能夠穩定不能被分解掉，第三個也是最重要的磁性顆粒它的居禮點最好在 45 度~48 度之間，太熱人體受不了，

溫度太低癌细胞不会死，癌细胞据估计是 45 度以上就死，所以你的居禮溫度把它定在 45~48 度之間，那你用一個電磁爐在你身體的外部去加熱的話，那部位的癌細胞就會受到磁性顆粒的加熱到 45~48 度之間，溫度高於那個它就不是磁性材料了，外面的東西對它就沒有作用，低於那個它就會發熱，這樣就是熱療法，這個目前在國際間的研究非常熱門，所以為什麼要把它調整溫度 45 度 C，主要是這個溫度人體受得了，那麼磁標靶藥物就是把藥接枝在磁性顆粒上面，可以用很多種方式，可以用抗體把它接上去，然後在後藥的根跟基把它接上去，然後用磁場磁鐵引導的方式把這個藥引導到你要治療的部位去，這個叫磁標靶藥物。另一個就是基因載體，基因需要載體，過去的基因載體都是用病毒，病毒本身就是一種會治病的東西，所以科學家想要用磁性的顆粒 來當做基因療法的基因載體，時間的關係我必須要趕快總結不然各位就沒有時間問問題了，我們這個演講從一部電影開始，由地磁的存在與否來說明磁的重要，那麼電跟磁是相依的，由電生磁由磁生電，在電磁波的時候這兩個是連體嬰，沒辦法切割，磁的基本現象非常多，今天談的磁牆，磁矩，磁化量，磁歪等等，任何物質都具有某一種物理上的磁性質，磁性材料很多有軟磁，硬磁，特殊的磁性材料，磁性應用有很多，馬達，磁記錄還有磁浮，我相信以後陸上飛行的磁浮一定是交通的重點，那麼磁跟醫療有關，還在蓬勃發展中。

最重要的，我是希望在座的，尤其是年輕的學子不是在這裡學到多少磁的東西，而是去追隨這些先賢他們怎麼一步一步去剝開磁的神秘，剝開磁的事實真相，剝開裡面很多都是通性而不是磁特有的現象，這樣的科學精神，你要勇於面對，大膽的假設，小心的求證，你學到多少磁其實不是重點，學到多少想像，偉大的科學家愛因斯坦說想像比知識更重要，用這句話呢，我最後這一張是這個，這個是什麼意思呢？這個是蟹，這是蟹，這個是豬，這個是我學生養的小刺蝟，合起來就是謝謝諸位，謝謝。

Q&A

Q1：我們生活當中面對著經濟發展，生存安全或享有生活的方便，剛剛老師提到的內容當中，不管是發電機或者我們生活當中的發射台也好，我們在住家的場所或公共的場所，您的看法，我們官方、人民、學者對我剛剛所提的問題，請金老師給我們金言玉語？

A：這位先生關切的就是我們日常生活的電磁輻射，尤其是發射台，基地台，我不夠資格來做這樣評論，有兩個理由，第一個我不是電磁波電磁輻射的專家，第二個我從來沒有做過相關的實驗，我雖然可以做很多假設，但是我沒有求證之前我不能給你任何的答案，不過電磁波確實是需要一些法規的規定做一些適當的管理，這是政府該做的事情，政府應該要找相關的專業學者來做真正的實驗，來確定這樣的法規做適當的管理。

Q2：碳鋼材料的表面，經過摩擦之後量到的磁場大概 18 高斯，沒有辦法再上去，想請問您剛剛報的鐵磁性材料會有磁滯現象，那這個磁滯現象有沒有說一定會很大或者是 18 高斯就是摩擦磁滯有沒有可能？

A：其實摩擦基本上會讓材料的表面硬化，事實上我們剛剛講到的軟磁硬磁是早年在 20 世紀初期在研究鋼鐵，他把它熱處理變得很硬，或是加工把它變得很硬，這時它的矯頑磁力就會變得很大，而轉換成硬磁，如果加熱後它硬度變得很軟變成軟磁，那一般講起來軟磁你量到高斯計甚至你量不到 18 高斯，可能也就是幾個高斯，那麼為什麼你摩擦以後它可以量到 18 高斯？從專業來判斷，是因為你摩擦以後對它表面造成加工，它已經被你加工硬化，因此它表面已經具有正的永久磁性，所以你量到的 18 高斯其實是不小的，因為那只是一個普通的鐵材，裡面並沒有含鈷並沒有含其他的任何東西，所以你量到 18 高斯是不小的，你要量到更大的話就必須要有一個小小的磁鐵放在上面，這時候逼它的磁力線漏出去，這時磁力線就會很強，現在有一種設計是一個德國人設計的，就是故意用兩個銅像，N 對 N 的鈹鐵硼去逼軟性的磁鐵，這時因為 N 對 N 的排斥性使得它的磁力線被大幅度的擠壓出來，在整個電機的設計上面非常非常有用，所以這個部份可能附帶跟你做一個這樣的答覆。

Q3：我的問題是關於這個電磁波，像是手機對人體的影響，還有包括剛剛提到的基地台，當然你剛剛有提到這方面在國內誰的研究比較那個？第二點就是也有人在說這個太極拳或是冥想對人體的磁場也有影響，是不是這方面你所知的？

A：第一個問題是國內哪些人電磁波研究比較多？其實電磁波研究最多的就是上次來演講的朱國瑞朱院士，他是全世界電磁的專家，可是電磁波對

生物體，電磁波對人體這方面就我的了解，並沒有哪個教授一直做這方面做了幾十年，多半都是從國外拿一些數據來，即使是他號稱他做了很多，很多也是從國外的一些研究數據，而這些數據本身事實上是有很大的差距，我個人的了解是這樣，假設一個高壓電塔，141Kv 或 345Kv 這種高的電壓電塔，它的危害是很容易理解，因為它會把周圍空氣的水的分子游離，你在附近吸太多這種分子進到你身體，進入你的血液循環，所以那種地方的危害是立即的，像白血病等等，但是對於電磁波這東西其實各種說法都不一樣，我實在沒有資格來回答你這個問題，因為這個頻率高到那種程度，然後強度，各種的情況都是不一樣，第二個問題我就更沒辦法回答，因為我也不會打太極拳也不冥想，那人體有沒有磁場這個從科學上來講我自己也不相信人體有磁場，這是沒辦法因為我是做磁的，一天到晚都跟磁鐵作用，我們是研究物理，所以對於冥想對於太極拳的改變磁場我沒有辦法回答，但是我知道我們很多朋友打太極拳身體是很好的，是不是跟磁場有關，如果要跟磁場有關，可能到店裡去買那種磁鐵很強的，那種磁場更大，看你怎麼擺，擺在哪個方位，然後在你在哪裡靜坐，可以做實驗嘛，我們講說做實驗嘛，做實驗你天天記錄然後你看看你的血壓啦你的血糖啦有沒有什麼影響，這個或許是可以嘗試的。

Q4：我有兩個問題要請問教授，第一個就是我們生活上，我們白版上面黏的吸鐵，用久了就會變沒有磁力了，那要怎麼用才可以使它的磁力一直保持很強？

A：假設你的冰箱上面的磁鐵沒有力了，處置方法就是把它丟掉再買一個新的，因為那個太便宜了，當然也有解決的方法，我們是做科學的，我們就把它拿去充磁機，那充磁機一台就是 30~40 萬，買來一充它就變得很強了，所以假如你這種吸著的磁鐵太弱了，就把它丟了再買一個新的。

Q5：我們常常在聽媒體報導說有的人身上會吸好多鐵阿，什麼湯匙或調羹都往身上吸，那麼人體真個是一個磁場嗎？

A：很抱歉這個問題我也不會答，我也不會吸，我也不知道他怎麼吸，因為那個叫特異功能，凡是歸入到特異功能的都是只可以看，不知道怎麼解釋，不然就不叫特異功能了，我想那應該也跟磁沒什麼關係，應該不是。

Q6：今天有講到磁跟人，我想問的問題是說我們人的能量能不能測量，然後它可以經由什麼儀器來測量？

A：很抱歉這個又跟磁無關，這個人體的能量看你是要用什麼方式來測量，你可以用拳頭去打那個磅秤，那個是代表你有多少力量，力量在把它轉換成能量，再看你的距離，力乘以距離就是能嘛，不過這個當然是有點

開玩笑，其實人體有各種工具可以測量人的各種行為，事實上我剛剛講的裡面，用磁來量人的事實是有各種儀器，譬如說有一種叫做腦磁儀，事實上可以量腦的各個部位的磁的量，這個是非常非常少的量，它是十的負十或負十一次方這種的量，但是事實是有這種東西，但是它跟你剛剛要問的人的身體的能量，很抱歉這個我實在很難回答，因為我不知道你講的身體的能量到底是什麼東西，如果你把你身體的重量乘上脂肪，脂肪可以發出多少熱量，這也是身體的能量，按照物理來看應該是這樣。

Q7：我身邊有一個玩具它用磁鐵吸一吸的話就會發出聲音，那可不可以講解一下裡面的原理大概是怎樣？

A：用磁鐵吸一吸發出聲音有一個很重要的理由就是磁鐵一吸它的開關就開了，它的開關本來就是有一個彈簧，它彈簧本來是把它拉開的，磁鐵一吸就把它吸住了，它的電就通了就會發出聲音，要不然就是你用一般交流的磁鐵沒辦法產生磁伸縮，交流磁伸縮就會發出轟轟轟的聲音，所以我從你這樣來說，應該是用磁開關。

Q8：我有兩個問題想請問教授，第一個問題就是說應用在電腦裡面那種磁性材料，它應該具備哪些特質，就是說它的矯頑磁力阿，上面的磁感應強度要多少比較適合來做電腦的磁性材料，第二個問題就是能不能舉個例子就是我從磁滯曲線的這個能積，能不能說一個實際的例子？

A：第一個是電腦的硬碟片上面它的矯頑磁力阿，它的磁感應要多少？一般來講過去的水平記錄大概 **2000** 高斯的矯頑磁力，但是在超高密度就要上升到 **4000**，尤其是在垂直記錄的話大概要 **4000~6000**，它的磁感應當然值要大於 **1** 萬高斯就可以用，當然越高越好，第二個問題是磁滯曲線的磁能積怎麼算，其實磁滯曲線的磁能積的計算方法是第二象限不是有一個這樣下來的，那它每一個點把它畫下來事實上就是一個矩形，這條曲線任何一點你把它對下來，左邊對過去就有一個面積，這個面積事實上會有一個最大的點，最大的磁能積，那 $B \times H$ 就是一個每立方米的焦耳數，這是一個能量， $B \times H$ 就是能量，所以它就是一個磁能積，所以你如果有一個曲線呢，是有第二象限的曲線，你在上面取點就會找到一個最大乘積的值，其實現在量這些東西都是用電腦量，量完馬上就出來了，不是用手算的，用手算也是可以，你用對的用雙曲線，你這邊做一個 $B \times H$ 的各個不同的量，用雙曲線你一放上去看到，哪一條會跟它對的到？