

清華水池式原子爐三維去極化中子儀－磁性材料內部磁區之量測

The Three-Dimensional Depolarization Neutron Beamline at Tsing Hua Open Pool Reactor for the Measurement of Magnetic Domain of a Bulk Material

李志浩、張烈錚

Chih-Hao Lee, Lieh-Jeng Chang

本文介紹一個量測磁性材料內部磁區之方法，磁性材料內部磁區之量測，目前僅有去極化中子測量之方法可以得之。清華水池式反應 W-3 實驗站建立了一部三維去極化中子儀，可以觀察極化中子通過磁性材料過程中受到材料內部磁區的擾動，使得極化中子向量的方向與大小改變，進而可以分析材料內部的平均磁區大小、平均感應磁化量，以及磁區平均的平方方向餘弦等資訊。

We introduce a technique of neutron depolarization measurement to observe interior magnetic domains of magnetic materials. An apparatus of three-dimensional depolarized neutron beam has been setup at W-3 beamport of Tsing Hua Open Pool Reactor. When polarized neutrons pass through a magnetic material, the existence of magnetic domains will alter the direction and magnitude of the polarized neutron vector. This alternation would provide useful information of the average domain size, the averaged strength of the induced field, and the mean square directional cosine of the material.

一、前言

三維去極化中子儀 (three-dimensional neutron depolarization beamline) 是利用極化中子穿透磁性樣品時，極化中子受到樣品內部磁區的擾動而發生去極化 (depolarized)，進而藉由去極化的現象計算出樣品內部磁區和磁化量大小、平方方向餘弦等資訊及內部磁區結構⁽¹⁻⁹⁾。一般分析磁區的工具有⁽¹⁰⁾，如：畢德法 (Bitter method)、磁力顯微鏡

(magnetic force microscopy, MFM)、磁光柯爾顯微鏡 (Kerr microscopy)、磁圓偏振雙色光電子顯微鏡 (magnetic circular dichroism-photoemission electron microscopy, MCD-PEEM)、自旋極化掃描式電子顯微鏡 (scanning electron microscopy with spin-polarized analysis, SEMPA) 再加上極化電子偵檢器 (Mott detector) 等儀器皆是量測表面磁區之檢測技術，無法量測塊材內部磁區。也有許多技術可以量測到磁性塊材內部的磁結構，比如說勞倫茲電子顯

微鏡 (Lorentz TEM)，但穿透式電子顯微鏡的樣品限制很多，譬如說樣品厚度必須小於數百奈米，樣品所在環境需要高真空等，三維去極化中子儀對於樣品的厚度與量測的環境都比較不受到限制。

而法拉第顯微鏡 (Faraday microscopy) 之應用，當然只限於透明之材料，然而金屬磁性材料絕大部分是非透明的。能夠測量材料內部磁區的訊息相當重要，因為根據磁區之理論，為了降低外漏磁力線，材料表面必須形成若干小磁區，連結成封閉之迴路，此一表面磁區之大小及方向與材料內部是不同的，因此若僅運用畢德法或磁力顯微鏡等觀察表面之工具，研究磁區與電子傳輸之性質是不足的。

觀察材料內部磁區與觀察材料內部晶粒是不同的，觀察材料內部晶粒可以將材料切開，再用表面工具詳加觀察，磁區在材料切開之後，立即重組表面新磁區，正如一塊長條磁鐵切斷後，會變成兩塊磁鐵一樣，使得表面觀察工具不易測量到真正內部磁區。中子之穿透力約在數 mm 範圍，並且可以從事三維的全像攝影技術 (tomography)，以觀察材料內部磁區之三維影相，對於表面磁區非常不敏感，可以忽略，是一部相當有價值之工具。

去極化中子理論最早源於 1941 年，Halpern 和 Holstein⁽¹¹⁾ 提出一個物理模型，開啟了這項先機，其物理模型描述磁性材料內部的磁區和極化中子作用時，極化中子因為磁區的擾動而發生去極化的現象，利用去極化的現象推導磁區的大小。到 1973 年時，M. Th. Rekveldt⁽¹²⁾ 發表第一篇三維去極化中子理論，並且於荷蘭 Delft 大學 2 MW 之原子爐架設一部三維去極化中子儀，架設至今已經有上百篇重要的研究論文發表。我國清華大學於 2000 年為配合國家大型研究用核反應器之籌建計畫 (Taiwan Research Reactor-II, 20 MW)，於清華原子爐 W-3 出口架設一條培訓中子束用戶之中子束，可供簡易中子繞射實驗及儀器測試使用。2007 年開始，著手加裝一部三維去極化中子儀，目前已有 4 篇文獻發表⁽¹³⁻¹⁶⁾。以下我們將簡單介紹此三維去極化中子儀之原理、構造及測試結果，最後說明其可能的運用以及前途與展望。

二、去極化中子儀的原理

去極化中子儀的原理是利用極化中子在穿透樣品的過程之中，極化中子受到材料磁區的大小或是方向不同的影響，而造成極化中子去極化。去極化中子儀可以觀察動態或靜態的磁區大小和材料內部平均磁區大小、平均感應磁化量與磁結構平均平方方向餘弦 (mean square direction cosine)，其中磁結構平均平方方向餘弦代表所有磁區磁矩的平均方向，亦即磁區之織構 (texture) 結構。圖 1 是極化中子經過材料內的磁區後，發生去極化現象的示意圖。

當極化過後的中子向量進入磁性塊材內部的那一刻，極化向量會繞著每一磁區之磁場產生進動，可以下列式子來表示：

$$\frac{d\mathbf{S}}{dt} = \gamma(\mathbf{S} \times \mathbf{B}_i) \quad (1)$$

上式中， \mathbf{S} 為自旋運算子 (spin operator)， \mathbf{B}_i 則表示為樣品中第 i 個磁區內的局部感應磁場，而這就是所謂的拉曼 (Larmor) 進動。當中子在穿透磁性材料內部連續且不斷的進行拉曼進動的同時，中子的極化向量大小會因材料內不同磁區間的變化影響而變亂，我們稱之為去極化。藉由觀察極化向量的大小及旋轉方向的改變，以了解材料內部的磁性結構，就是所謂的去極化技術。量測極化中子行經磁

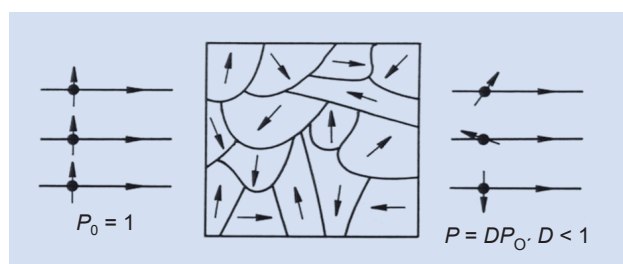


圖 1. 極化中子經過材料內的磁區後，發生去極化現象的示意圖。極化中子向量的大小會因經過材料內不同的磁區大小或是方向不同，而使極化向量的大小或是方向改變，這種現象稱為去極化。藉由觀察極化中子向量的改變可以推出材料內部的磁結構特性。

性材料時因材料內部之局部磁場的擾動而產生之磁相干長度 (magnetic correlation length)，此相干長度即可被視為磁區之大小。一般來說，此種技術可量測的相干長度範圍介於 10 nm 至數個毫米。

在去極化中子的實驗中，可得到下列式子：

$$P_N = D(n_N, \tau_N) \dots D(n_i, \tau_i) \dots D(n_1, \tau_1) P_0 \quad (2)$$

其中 P_0 與 P_N 分別為入射前與通過 N 個磁區後的極化中子向量， τ_i 為極化中子與第 i 個磁區作用的時間，透過 P_0 與 P_N 這兩個向量所得到的去極化因子 D (depolarization factor)，可解出材料中的磁相干長度大小，也就是所謂的平均磁區大小。

根據上述原理，在 1941 年時 Halpern 和 Holstein⁽¹¹⁾ 提出一維模型來描述磁性材料內部中子自旋磁矩進動的現象。藉由此模型我們可將中子極化向量 P 及穿透過材料後去極化向量 P' 以下列式子表示：

$$\frac{P'}{P} = \prod_i \left[1 - \frac{4}{3} \sin^2 \left(\frac{1}{2} \gamma B_i \tau_i \right) \right] \quad (3)$$

其中 τ_i 為中子穿透過塊材內部第 i 個磁區所花的時間，當 $(\gamma B_i \tau_i) / 2 \ll 1$ 時可將上述式子簡化為：

$$\begin{aligned} \frac{P'}{P} &= \exp \left(-\frac{1}{3} \gamma^2 \langle \Delta B^2 \rangle T \bar{\tau} \right) \\ &= \exp \left(-\frac{1}{3} \gamma^2 \langle \Delta B^2 \rangle \frac{d \delta}{v^2} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

上式中， T 為中子以 v 的速度通過厚度為 d 的樣品所需的時間， δ 和 $\bar{\tau}$ 為樣品中平均磁區的大小及中子所通過單一個磁區所需的平均時間。三維去極化中子分析遠較一維複雜，圖 2 是三維去極化中子儀系統的示意圖。

極化中子經過樣品前的三維翻轉器時，極化中子向量可以翻轉到 X 、 Y 、 Z 軸上，然後依序入射到樣品內，因為樣品的磁區造成極化中子發生去極化的現象，其方向也起了改變，然後我們再使用樣品盒後的第二個三維翻轉器將 X 、 Y 、 Z 軸上的極化中子向量依序翻轉到與分析晶體的磁化方向平行

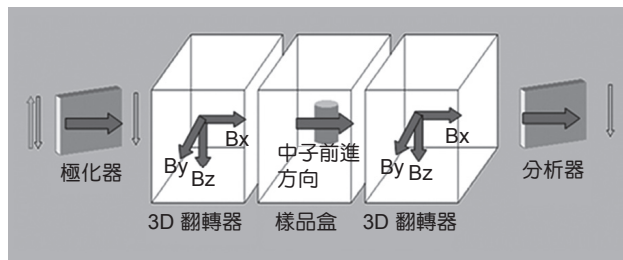


圖 2. 三維去極化中子儀系統的示意圖。

或是反平行，分析極化中子向量在 X 、 Y 、 Z 軸上的分量，形成去極化矩陣 (depolarization matrix)，如以下之方程式：

$$D(n, t) = \begin{Bmatrix} D_{xx} & D_{xy} & D_{xz} \\ D_{yx} & D_{yy} & D_{yz} \\ D_{zx} & D_{zy} & D_{zz} \end{Bmatrix} \quad (5)$$

$D(n, t)$ 是 3×3 去極化矩陣，去極化矩陣是九個去極化元素所構成。由於去極化矩陣含有磁區磁化量各方向性之統計平均，因此可以獲得渠磁區之非等向織構狀況。1990 年荷蘭 Delft 大學 R. Rosman 和 M. Th. Rekveldt⁽¹⁷⁻²⁰⁾ 提出三維去極化中子的通解，詳細之公式請參考文獻 (20)。其分析較為繁複，不在此說明。

去極化中子儀為一個介觀尺度之研究工具，它可以研究尺度在 10 nm – 10 μ m 不均勻磁化量。因此若不均勻磁矩分布為原子尺度，例如類似真正自旋玻璃態，其介觀尺寸平均之磁化量為零，無法讓極化中子產生拉曼進動，則無去極化作用。同樣的，若磁性材料在順磁狀況，也不會有中子去極化現象產生，因為此時電子自旋跳動太快 (皮秒以上)，遠超過中子穿透磁區之時間 (微秒範圍)，也無去極化作用。因此去極化中子儀為測量磁矩形成磁區或形成團簇 (cluster) 時方可以量測，為一研究磁性介觀物理上有利之工具。

三、去極化中子儀之構造及測試結果

在此將先介紹中子源，再介紹三維去極化中子儀所包含的元件，例如中子過濾器、中子極化器、中子翻轉器與偵檢器。

1. 清華原子爐 W-3 中子源

清華水池式核子反應器，俗稱為原子爐，目前功率可達 2 MW，爐心結構與研究極化中子著名的荷蘭 Delft 大學之 2 MW 核反應器相同。圖 3 為清華水池式原子爐之俯視圖，圖右邊為高功率水池，黑色方塊部分為原子爐之位置。清華原子爐擁有 10 條垂直照射管，可供中子活化⁽²¹⁾ 與材料中子照射實驗，以及同位素製造如碘-131、磷-32 等。最右側為熱中子柱 (thermal column)，為硼中子捕獲治療之用 (boron neutron capture therapy, BNCT)⁽²²⁾，目前已有六位頭頸癌之病人接受過治療，效果不錯。另外有七條水平中子束 (E-1,2,3 與 W-1,2,3 以及貫穿管)，E-1 與 E-2 引出中子做為儀器測試之用；E-3 具有快速氣送照射管，可於數秒內將試樣推入爐邊活化並快速送回量測，可以研究短半衰期之核種活化分析；W-1 照射管擁有瞬發加馬射線活化分析 (prompt gamma activation analysis, PGAA) 之能力，它可以引出中子在爐外照射樣品，直接測量照射樣品產生之瞬發加馬射線。它的純鍺偵檢器具有康普吞散射抑制之能力，可以量測低含量的氫含量或硼含量等。W-2 具有中子照相之能力⁽²³⁾，若於重元素外殼中含有輕元素材質，具有觀察輕元素材質的能力，如引擎內機油流動情形，直接甲醇燃料電池中甲醇流體之變化或砲彈中引信完整性照相檢查等。

W-3 中子具有中子分光能力，引出三種不同波長之中子，可供中子繞射散射研究之用。W-3 中子管中加入 18 cm 厚藍寶石單晶晶體，此晶體

的截止波長為 0.12 nm，可以濾除快中子及超熱中子，並加入鈹屏蔽，以減少爐心加馬射線外溢。分光晶體採用石墨晶體 (highly oriented pyrolytic graphite crystal, HOPG) 之 (0002) 面分光。分光屏蔽鼓 (monochromator shielding drum) 具有三個開口，分別提供 0.47 nm、0.237 nm 與 0.181 nm 中子源，可供中子散射研究。三維去極化中子儀即建置於 0.237 nm 中子出口，如圖 4，其波長解析度為 4.7×10^{-3} nm，能量約為 14.6 meV。使用石墨晶體分光之同時，除了繞射選定的中子波長 λ 會通過晶體之外，還有高諧 (high harmonic) 項的中子波長 ($\lambda/2$ 、 $\lambda/3$) 也會符合布拉格繞射定律，一併分光過來。我們再使用 4 cm 厚的石墨晶體作為濾波晶體，散射掉高諧波長 $\lambda/2$ 、 $\lambda/3$ 等，而對於 0.237 nm 波長通過率為 80%，分光後中子之通率約為 3×10^4 neutrons/cm²·s⁽¹³⁾。

2. 極化中子的方法

中子有 $\pm 1/2$ 的自旋量子數，利用極化器可以讓中子束只有一個自旋態，稱之為極化中子。極化後的中子在外加磁場的定義下，中子磁矩方向與磁場平行時稱之為 (+)；反平行稱之為 (-)。極化過濾器是經選擇性的移除入射中子束之其中一個自旋態，並允許另一個自旋態穿透，自旋選擇過程可藉由優選的散射或吸收來達成。

國際上極化中子之方法有四種^(24, 25)，(i) 利用鐵磁材料過濾器，(ii) 利用磁性單晶中子繞射法，(iii) 利用磁性鏡面全反射，以及 (iv) 利用氦三

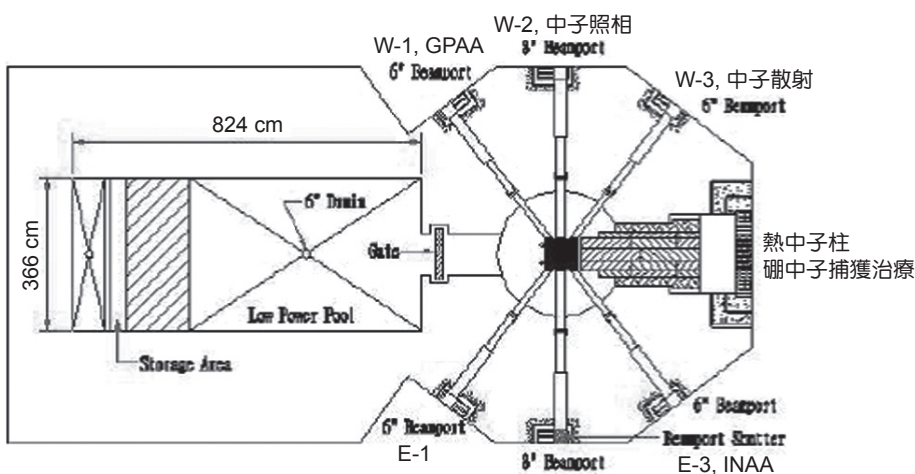


圖 3. 清華水池式核反應器之俯視圖。

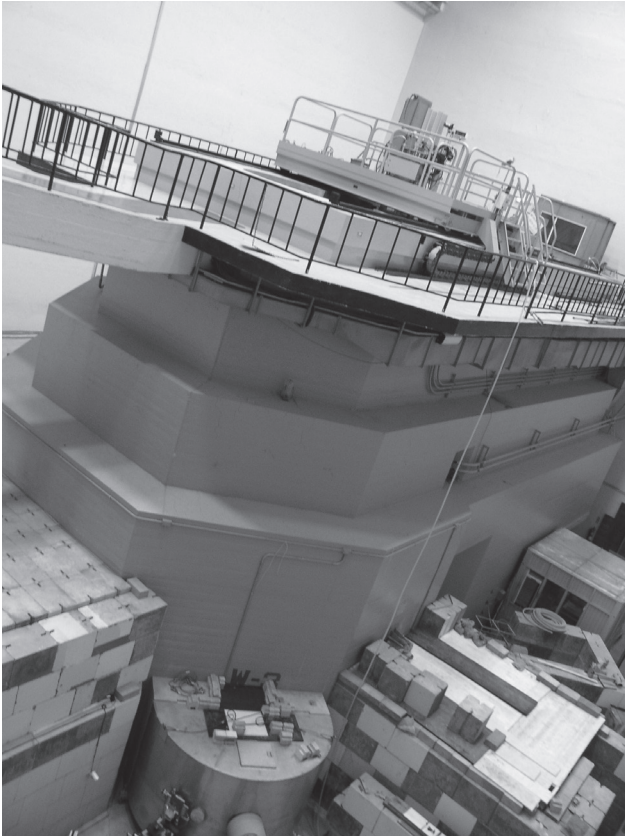


圖 4. 清華原子爐中子源 W-3 中子束位置圖。

(^3He) 中子自旋過濾器。其中，利用鐵磁材料過濾器為最老的方法，中子損失大，國際上多已不採用。磁性單晶中子繞射法與磁性鏡面全反射法發展相當成熟，為眾多極化中子束採用。然而，近年來各國相繼投入氦三中子自旋過濾器之發展，亦即探討中子束穿過核自旋極化的氦三氣體以使中子極化之研究，獲得最多的關注。我國也不例外，也於清華原子爐建造了一部氦三中子自旋過濾器之雛形機⁽¹⁵⁾。

磁性單晶中子繞射法多採用鐵磁性 Heusler 合金單晶 (Cu_2MnAl) (111) 面做布拉格反射，利用對自旋 (+) 和 (-) 的中子有不同作用截面與結構因子而極化中子，一般可以達到 96% 的中子束極化率。但是它於設定某一個入射角時，只能用於單一能量之中子。

磁性鏡面全反射法則利用中子的外部全反射臨界角 (critical angle) 之不同而選擇特定中子自旋方向。磁化的磁性材料 (例如： FeCo) 折射率對於自

旋 (+) 和 (-) 的中子是不同的。利用搭配磁性層與非磁性基板的折射率，中子的某一自旋態能夠穿透界面，另一個自旋態則在界面處會被反射，選擇性地來極化中子。中子的全反射對材料種類很敏感，其臨界角的上限總是很小，一般在 0.2 度以內，因此只限於冷中子使用，對於波長較短之熱中子，因其臨界角正比於波長，鏡片之長度必須再加長，成為工藝上挑戰，價錢也高。磁性鏡面全反射法對長波長的冷中子非常有效，所有波長在臨界角以下之中子均可以通過，可提供超過 98% 的極化率，並且對欲獲得的自旋態有超過 90% 的穿透率。

氦三中子自旋過濾器⁽²⁵⁾ 靠著氦三原子激發態時對某一自旋中子具有很高的吸收截面，而達成極化中子之效果，此一方法可以應用於冷或熱中子的極化。在世界各中子重要研究機構已經發展出的氦三中子極化過濾器，即是藉著氦三核與自旋相關之中子吸收來運作。反平行自旋捕獲的截面與全部的截面之比率經測量為 1.010 ± 0.032 。因此當中子束穿過激發態的氦三氣體時，反平行自旋之中子的吸收截面極大，可以獲得淨自旋平行的中子束，而反平行之自旋的中子較傾向被氦三氣體吸收，此法的極化率理論上可以達到 100%。相較於利用磁性鏡面全反射法和 Heusler 單晶單光器作為極化器，氦三穿透過濾器有下列優點：

- (1) 可以極化較寬波長範圍的中子，包含短的波長。
- (2) 對於中子束角度發散不會有選擇性。
- (3) 對於中子束的極化十分均勻。
- (4) 有著可預測的穿透係數。
- (5) 對於中子束發散的額外貢獻是最小的 (不會使中子束偏折)。
- (6) 低的 γ 射線背景。

因為上述特性，氦三中子自旋過濾器可以應用於需要大角度範圍的極化分析實驗，例如：極化中子照相與漫散射研究等。另外，它可以同時讓不同之中子波長通過，十分適合用於飛行時譜量測 (time of flight)。發展氦三極化過濾器的主要挑戰為：長時間 (數小時) 保持氦三原子在激發狀態，以達到高且均勻的氦三核極化率。清華大學所建造的氦三中子自旋過濾器之雛形機已有數小時之半衰

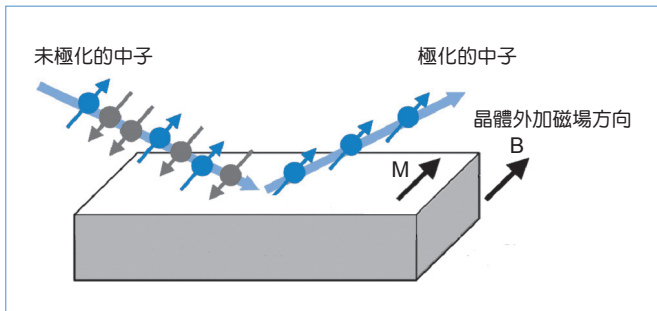


圖 5. 磁單晶布拉格反射方式極化中子的示意圖。

期，也達實用水準。它利用雷射激發鉀蒸氣原子，再將激發態之鉀原子與氦三原子碰撞，以使氦三原子呈激發態，用以極化中子^(15, 25)。然而近年來因美蘇冷戰結束，核武材料停產，由氬衰變氦三氣體之供應量逐減少，形成世界上一項隱憂。

W-3 中子束目前之實驗系統所使用的極化晶體是 Heusler 晶體 Cu_2MnAl (111)。圖 5 是磁單晶布拉格反射方式的示意圖。當中子自旋為 (+) 或 (-) 態入射至晶體的時候，其散射截面分為 $\sigma^+ = (b + p)^2$ 或 $\sigma^- = (b - p)^2$ ，其中 b 為核散射長度 (nuclear

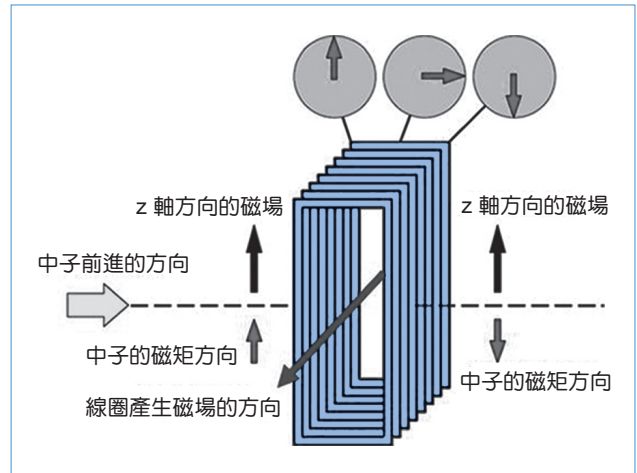


圖 7. 使用 Mezei 型磁矩翻轉器翻轉中子磁矩的方向，改變中子自旋狀態的示意圖。

scattering length), p 為磁散射長度 (magnetic scattering length)，經 Cu_2MnAl (111) 繞射時，其核散射長度與磁散射長度大約相等，因此極性為 (-) 之中子， $\sigma^- = (b - p)^2 = 0$ 並不繞射，只把極性為 (+) 的中子散射出來，使中子束只有一種自旋狀態，Heusler 合金繞射峰之反射率約有 20% 通過。

3. 三維去極化中子儀構造

圖 6 是三維去極化中子儀的俯視圖，其中 (1) 狹縫，(2) 中子極化器，(3) 樣品盒前的梯度磁場，(4) 樣品盒前之中子翻轉器 (spin flipper)，(5) 樣品盒，(6) 樣品盒後之中子翻轉器，(7) 樣品盒後的梯度磁場，(8) 磁場屏蔽盒，(9) 中子分析器，(10) 中子偵檢器， \odot 是指向 Z 軸方向的磁場，實線是極化中子前進的路線。中子極化器為 Cu_2MnAl 單晶，磁化的方向垂直於地面，此方向定義為 Z 軸，我們沿 Z 方向外加 0.5 T 之磁場將 Cu_2MnAl 單晶磁化達到飽和，即可以當做中子極化器。最後之中子極化分析器採用與極化器相同的構造。而極化中子離開極化器至翻轉器之間路徑時，必須外加少量朝 Z 軸方向的磁場 (約 30 Oe)，來保持極化中子的磁矩方向朝向 Z 軸，以免環境中的背景磁場與地磁干擾。同樣的，在第二翻轉器與極化分析器的行程中，也需外加 30 Oe 磁場以保持其極性方向。在兩個翻轉器之間，亦即樣品盒位置，我們以高導

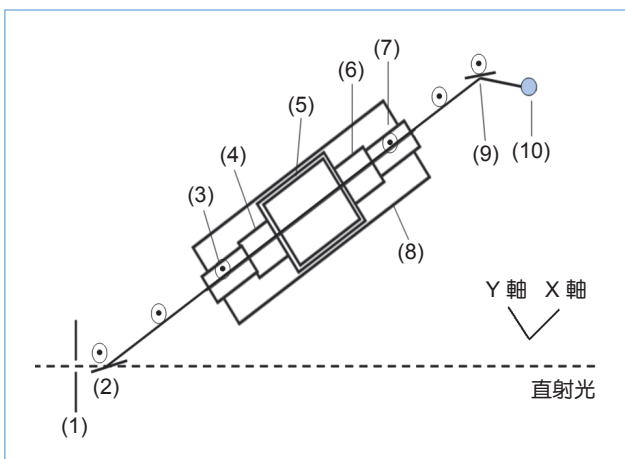


圖 6. 三維去極化中子儀的俯視圖，其中 (1) 狹縫，(2) 中子極化器，(3) 樣品盒前的梯度磁場，(4) 樣品盒前中子翻轉器，(5) 樣品盒，(6) 樣品盒後中子翻轉器，(7) 樣品盒後的梯度磁場，(8) 磁場屏蔽盒，(9) 中子分析器，(10) 中子偵檢器， \odot 是朝 Z 軸方向的磁場，實線是極化中子前進的路線。

磁率的 μ 金屬 (坡莫合金) 隔絕地磁及外界磁場之干擾。樣品前後加裝的梯度磁場，使屏蔽盒內之磁場逐漸降為零，而中子磁矩保持朝 Z 軸方向。極化中子進入樣品盒前的翻轉器，翻轉器產生磁場使極化中子的向量翻轉到 X、Y、Z 軸上，以獲得 3×3 之去極化矩陣。

圖 7 是使用 Meizei 型磁矩翻轉器翻轉中子磁矩方向而改變中子自旋狀態的示意圖，圖中只繪出一個與 Z 軸垂直的磁場，三維翻轉器則有三個互相垂直的磁場，分別是 X、Y、Z 軸。偵檢器為 ^3He 圓柱狀比例計數器，直徑為 25 毫米，長度為 200 毫米，填充氣壓為 4 巴耳 (bar)、對熱中子的敏感度為 18 cps/nv，且加馬射線 (γ -ray) 量測敏感度 $< 5\%$ 。由於加馬射線本身是造成雜訊的來源之一，所以使用 ^3He 中子偵檢器可以降低加馬射線對整個實驗在計數時所帶來的影響。在偵檢器外圍必須再加裝中子屏蔽盒，用來屏蔽背景中子。屏蔽盒的組成為碳化硼 (B_4C)，用來熱化及吸收快中子。且於偵檢器外圍再圍上一圈 1 mm 厚的鎘片，並留下狹縫讓中子通過加以偵檢。所有的儀控系統均以 LabVIEW 寫成，透過 GPIB 控制每一個元件。

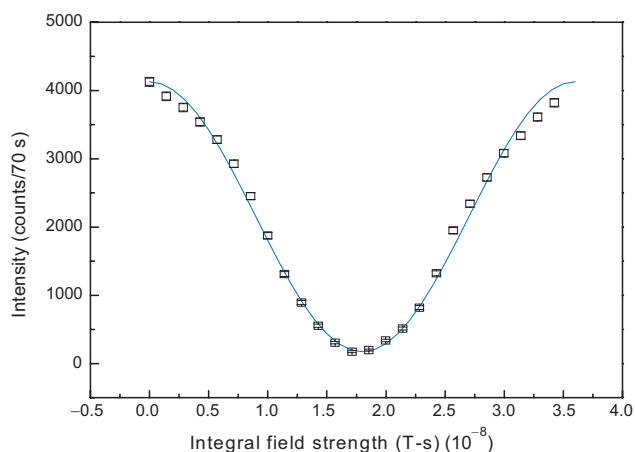


圖 8. Heusler 晶體上的磁場中心點位置達到 0.27 T 時，扣掉背景值後所量測出來的極化曲線圖，圖上的 X 軸為翻轉器的磁場積分，圖上的 Y 軸為中子計數，圖上的極化率為 92%，實線為模擬的曲線，方塊空心為實際量測的中子計數。

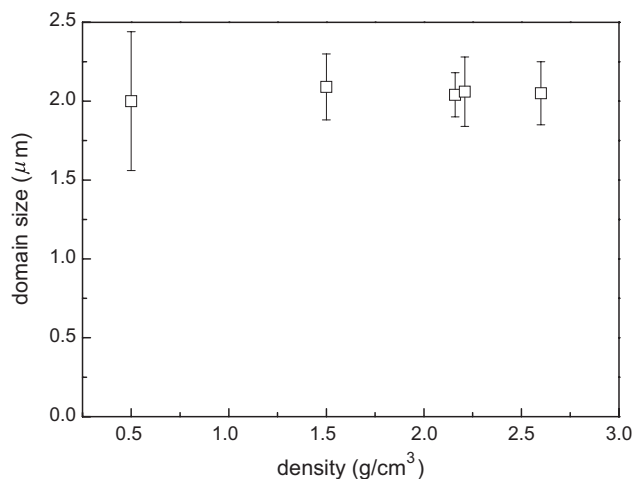


圖 9. 不同樣品密度的內部磁區大小圖。

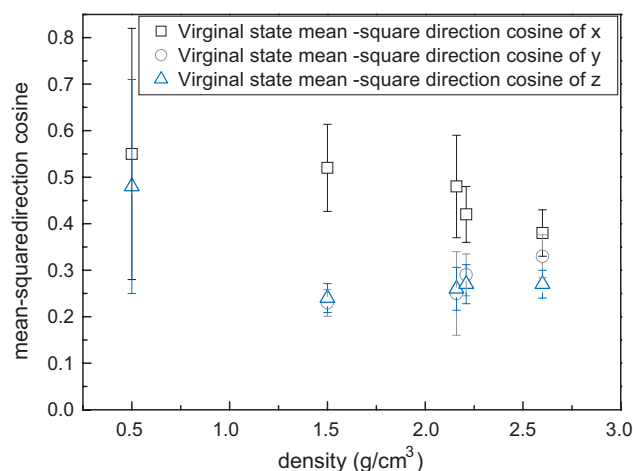


圖 10. 不同樣品密度的磁結構平均平方方向餘弦的圖。

4. 三維去極化中子儀測試

W-3 三維去極化中子儀中子極化率測試之步驟為先將極化器及分析器調為平行，讓所有自旋為 (+) 的中子通過，然後再以第二翻轉器逐步將極性調向反平行方向，觀察極化中子的強度。所測得之結果如圖 8 所示，其極化率為 92%，中子通率於偵檢器約為 1000 neutrons/s，已達到實用階段。理論上若極化率為 100%，則極化器與分析器在反平行時，中子計數率應該為零。

我們並且使用三維去極化中子儀量測一塊鎳鐵氧體的內部磁區，氧化磁體的顆粒為 $2 \mu\text{m}$ 。在淨磁場等於零的條件下，改變鎳鐵氧體的密度，其結果如圖 9 及圖 10^(14, 16)。量測出內部磁區大小約為

2 μm 左右 (如圖 9)，並使用 MFM 觀察到的表面磁區與三維去極化中子儀量測到的內部磁區大小做比較，其結果大致相同，所以本樣品鎳鐵氧體粉末的表面磁區和內部磁區大約相等。但是當粉末經燒結至密度接近 100% 時，粉體顆粒密合，其內部磁區變大，成為 10 μm 。

圖 10 是不同密度的鎳鐵氧體磁結構平均平方方向餘弦，在密度 1.5 g/cm^3 和 2.16 g/cm^3 時，磁結構沿 X 、 Y 、 Z 方向 (中子沿 X 方向行進) 之平均平方方向餘弦平方大約是 $\gamma_x = 1/2$ ， $\gamma_y = \gamma_z = 1/4$ 。此一結果與文獻 (20) 計算磁等向性的磁結構平均平方方向餘弦是吻合的，而密度 2.3 g/cm^3 和 2.6 g/cm^3 時，磁結構平均平方方向餘弦平方已有 30% 之變化，顯示其磁區磁化方向分布已經不成磁等向性，而有發展成為長柱形纖構之趨向。

四、三維去極化中子儀之運用與展望

三維去極化中子儀可以研究磁性結構的靜態或動態變化⁽¹⁾。在實驗條件方面，將來三維去極化中子儀上可以加裝變溫系統，或是加裝變磁場系統，在變溫、變壓與變磁場的條件下，相信可以觀察到許多更有趣的磁特性現象。若能夠加上影像的取得，二維磁場變化或是三維全像攝影術之加入可以觀察材料內部磁區之空間分布，讓看不見的磁場得以透視，更有價值。茲舉些許例子如下。

1. 磁區受應力影響

M. de Jong 等人⁽²⁾ 研究非晶形磁性材料磁伸縮量、應力與磁區之關係。

2. 磁的相轉變

在 Gerben P. Krielaart 等人發表文獻中⁽³⁾，探討鐵的 α 相與鐵的 γ 相在高溫下相變的研究，去極化中子之結果與小角度中子散射、熱機械分析儀與中子繞射等塊材量測的方法作比較，用去極化中子這項技術，因為拉曼進動對於微弱的磁場感應是非常靈敏的，與熱機械分析儀相比較，運用熱機械分析儀如果相變前後材料的熱膨脹係數差不多，就很難有明顯的差異。

3. 觀察磁的臨界現象

S. V. Grigoriev⁽⁴⁾ 使用去極化中子這項技術觀察磁的臨界現象，量測在磁性居禮溫度附近，磁區之大小隨著溫度的變化等。Struesser 等人⁽⁵⁾ 則測量接近居禮溫度時磁區尺度之臨界指數 (critical exponent)。

4. 應用在微小粒子系統

P. T. Por 等人⁽⁶⁾ 使用去極化中子這項技術在微小粒子上可以得到平均磁力、磁結構 (magnetic texture) 與平均平方方向餘弦。在殘磁狀態下，觀察磁粒子外形與磁的相干性關係。Van der Zaag⁽⁷⁾ 研究不同大小鎳鋅鐵氧體粉末晶粒中含幾個磁區，釐清磁區大小與材料晶粒大小之關係。

5. 動態的磁區探討

F. J. van Schaik 等人^(8,9) 利用去極化中子技術對於矽鋼材料做動態磁區變化的觀察。在高通量的中子束之下，做動態磁區變化的觀察，其時間的解析度約可以達到 5 μs ，可以測量在經由不同退火溫度下鋼材中磁壁運動之速度。

6. 三維全像攝影術

使用影像學技術再加上去極化中子方法，可以觀察人類看不到的磁力線強度變化，利用全像攝影術更可以實際重建磁區在材料內部之磁矩大小及方向之空間分布。此一方法可以觀察超導體中磁力線集中成束之狀況，或複晶中不均勻三維空間之磁區分布。^(26,27)

五、結語

清華大學於過去十年來陸續地投資了將近 600 萬台幣，建置了一條三維去極化中子儀，以供研究磁區之用。經由分析極化後的中子在穿透過磁性樣品所產生的去極化變化，可反映出材料內部的磁相干長度與平均感應磁化量之大小與其纖構結構。本儀器為其他只能量測表面磁區之量測工具所無法比擬，十分歡迎各界研究學者使用。

誌謝

本儀器之建置要感謝清華大學原子科學技術發展中心裴晉哲博士等同仁之幫忙。多位研究生蘇暉家、胡芝瑋、張信豪與吳宇瀚之論文工作。德國 JCNS 中子研究中心 Dr. Alexander Ioffe 及 Mr. K. Bussmann 的幫忙，荷蘭 Delft 技術大學 W. H. Kraan 博士之協助測試，均以誌謝。經費方面，主要經費來自清華大學校內經費補助，以及原子能委員會經費協助，部分經費由國科會支持，也一併誌謝。

參考文獻

1. M. T. Rekveldt, *Physica B*, **267**, 60 (1999).
2. M. de Jong *et al.*, *Mater. Sci. Eng.*, **A179**, 341 (1994).
3. G. P. Krielaart, M. T. Rekveldt, C. M. Brakman, and S. van der Zwaag, *Z. Metallkd.*, **85**, 10 (1994).
4. S. V. Grigoriev *et al.*, *Physica B*, **267**, 84 (1999).
5. N. Stuesser *et al.*, *Phys. Rev. B*, **33**, 6423 (1986).
6. P. T. Por, G. N. Coverdale, R. W. Chantrell, M. T. Rekveldt, Ahart, and D. A. Parker, *J. Magn. Magn. Mater.*, **155**, 70 (1996).
7. P. J. van der Zagg *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, **69**, 2927 (1996).
8. F. J. van Schaik and M. T. Rekveldt, *Phys. Rev. Lett.*, **41**, 767 (1978).
9. M. T. Rekveldt and F. J. van Schaik, *J. Appl. Phys.*, **50**, 2122 (1979).
10. 盧志權, 金重勳主編, 磁性技術手冊, 臺灣磁性技術協會, 519 (2002).
11. O. Halpern and T. Holstein, *Phys. Rev.*, **59**, 960 (1941).
12. M. T. Rekveldt, *Z. Phys.*, **259**, 391 (1973).
13. H. C. Su, C. W. Hu, J. J. Peir, and C. H. Lee, *Chinese J. Phys.*, **45**, 374 (2007).
14. C. H. Lee, H. H. Chang, H. C. Su, Y. H. Wu, C. W. Hu, L. J. Chang, A. Ioffe, K. Bussmann, and T. Brückel, *Physica B*, **404**, 2565 (2009).
15. L. J. Chang, C. H. Lee, H. C. Su, A. Ioffe, K. Bussmann, S. R. Parnell, and S. Boag, *Chinese J. Phys.*, **47**, 159 (2009).
16. H. C. Su, C. H. Lee, H. H. Chang, Y. H. Wu, C. H. Hu, L. J. Chang, A. Ioffe, and W. H. Kraan, *AIP Conference Proceedings*, **1202**, 54 (2009).
17. M. T. Rekveldt, *Textur. and Microstr.*, **11**, 127 (1989).
18. R. Rosman, H. Frederikze, and M. T. Rekveldt, *Z. Phys. B*, **81**, 149 (1990).
19. R. Rosman and M. T. Rekveldt, *Z. Phys. B*, **79**, 61 (1990).
20. R. Rosman *et al.*, *Phys. Rev. B*, **43**, 8437 (1991).
21. 郭正典, 科儀新知, **22** (3), 6 (2000).
22. 薛燕婉, 開執中, 鄧永宏, 劉鴻鳴, 科儀新知, **22** (2), 62 (2000).
23. 袁立基, 科儀新知, **4** (3), 76 (1983).
24. L. Dobrzynski and K. Blinowski, *Neutrons and solid state Physics*, London: Ellis Horwood (1994).
25. F. Tasset, *Physica B*, **213**, 735 (1995).
26. M. Hochhold *et al.*, *J. Mag Mater Mag.*, **157**, 575 (1996).
27. N. Kardjilov *et al.*, *Nature Phys.*, **4**, 399 (2008).



李志浩先生為國立清華大學核子工程博士，現任清華大學工程與系統科學系教授、核子工程與科學研究所合聘教授及國家同步輻射研究中心合聘研究員。

Chih-Hao Lee received his Ph.D in nuclear engineering from National Tsing Hua University. He is currently a professor of the Department of Engineering and System Science and affiliated professor of the Institute of Nuclear Engineering and Science, National Tsing Hua University. He is also an affiliated scientist of National Synchrotron Radiation Research Center.



張烈錚先生為英國華威大學物理博士，現任國立成功大學物理系助理教授。

Lieh-Jeng Chang received his Ph.D in physics from University of Warwick, UK. He is currently an assistant professor of the Department of Physics, National Cheng Kung University.