

課本提到，鐵的自發磁化率隨著溫度的變化，可以用梅斯堡效應跟核磁共振兩種方法來量，請分別說明是什麼原理。

已思考 4s >

課本這裡講的應該是鐵的自發磁化強度 $M_s(T)$ ，不是一般線性響應意義下的磁化率 χ 。重點是：在鐵這類鐵磁體中，原子磁矩有自發排列；溫度升高時，熱擾動使有序磁矩變小，接近居禮溫度時消失。梅斯堡效應與核磁共振都不是直接拿磁力計量整塊樣品的磁矩，而是利用原子核感受到的內部超精細磁場來反推電子磁矩的大小。

1. 梅斯堡效應：看核能階的超精細分裂

以鐵最常見的是 ^{57}Fe 的梅斯堡光譜。梅斯堡效應的核心是：原子核可以無反沖地吸收或放出非常窄線寬的 γ 射線。因為線寬很窄，所以核能階受到很小的位移或分裂也能被看出來。

在鐵磁態中，鐵原子核所在的位置有一個內部磁場，通常稱為超精細磁場 B_{hf} 。這個磁場主要來自周圍電子磁矩，特別是鐵原子的 $3d$ 電子磁性以及核心電子極化。這個內部磁場會使核自旋能階發生 Zeeman 分裂。

所以梅斯堡光譜中，原本單一的核躍遷線會裂成多條線。對 ^{57}Fe 而言，在鐵磁態下常見的是六條線，也就是所謂的磁超精細六重峰。

可以用簡化圖像來說：

$$\text{電子磁矩有序} \Rightarrow B_{\text{hf}} \neq 0 \Rightarrow \text{核能階分裂} \Rightarrow \text{梅斯堡譜線分裂}$$

而且分裂大小大致滿足

$$\Delta E \propto B_{\text{hf}}.$$

由於

$$B_{\text{hf}}(T) \propto M_s(T),$$

所以只要量不同溫度下梅斯堡譜線的分裂大小，就可以得到自發磁化強度隨溫度的變化。

物理圖像是：原子核像一個非常精密的局部探針，它不直接量整塊鐵的總磁矩，而是量自己所在位置感受到的內部磁場。這個內部磁場反映了鐵原子電子磁矩的有序程度。

當溫度升高時，電子磁矩的長程有序變弱， B_{hf} 變小，梅斯堡六重峰的分裂距離逐漸縮小。到了居禮溫度以上，鐵變成順磁態，長程自發磁化消失，磁超精細分裂也消失。

2. 核磁共振：看原子核在內部磁場中的進動頻率

核磁共振，NMR，利用的是原子核自旋在磁場中會發生 Larmor 進動。共振頻率滿足

$$\nu = \frac{\gamma_n}{2\pi} B_{\text{eff}},$$

其中 γ_n 是核的旋磁比， B_{eff} 是原子核感受到的有效磁場。

在一般 NMR 中，常常需要外加磁場 B_0 。但是在鐵磁體中，即使沒有外加磁場，原子核也會感受到很大的內部超精細磁場 B_{hf} 。因此鐵磁體可以做所謂的**零場 NMR**或**低外場 NMR**。

對鐵來說，原子核的共振頻率大致由內部超精細磁場決定：

$$\nu(T) \approx \frac{\gamma_n}{2\pi} B_{\text{hf}}(T).$$

而同樣因為

$$B_{\text{hf}}(T) \propto M_s(T),$$

所以量到不同溫度下的 NMR 共振頻率，就等於間接量到自發磁化強度的溫度變化。

換句話說：

電子磁矩有序 $\Rightarrow B_{\text{hf}} \Rightarrow$ 核自旋以特定頻率進動 \Rightarrow NMR 共振頻率

溫度升高時，磁有序降低，內部超精細場變小，NMR 共振頻率也會下降。接近居禮溫度時，代表自發磁化的內部場趨近於消失。

兩種方法的共同核心

兩者其實都靠同一個物理關係：

$$B_{\text{hf}}(T) \propto M_s(T).$$

也就是說，鐵原子核感受到的超精細磁場，可以當作電子自發磁化的局部量尺。

差別在於：

方法	觀察量	反映什麼
梅斯堡效應	γ 射線吸收譜線的超精細分裂	核能階被內部磁場分裂
核磁共振	原子核的共振頻率	核自旋在內部磁場中進動
共同點	都量 $B_{\text{hf}}(T)$	間接得到 $M_s(T)$

給學生的直觀說法

可以這樣講：

鐵磁體中的電子磁矩排列起來後，會在鐵原子核位置產生一個內部磁場。原子核本身像一個小磁針或小鐘擺，它的能階分裂或進動頻率都會受到這個內部磁場控制。梅斯堡效

應看的是核能階分裂，NMR 看的是核自旋進動頻率。兩者雖然實驗技術不同，但都在量同一件事：鐵原子核感受到的超精細磁場，而這個超精細磁場正比於鐵的自發磁化強度。

所以這兩種方法量的都是原子核所感受到的平均磁場大小，可以這樣理解嗎？

可以，作為第一層理解是對的：兩種方法量到的核心量，都是鐵原子核位置所感受到的局部平均超精細磁場 B_{hf} 。

但要補兩個精確化：

第一，它不是空間上「整塊樣品的平均磁場」，而是某一類原子核所在位置的局部有效磁場。在純鐵中，所有等價的 ^{57}Fe 核大致感受到相同的超精細磁場；若是合金、缺陷、不同晶格位置，可能會出現多種 B_{hf} ，譜線也會展寬或分裂成多組訊號。

第二，它不是單純的巨觀磁場 $B = \mu_0(H + M)$ 。原子核感受到的是超精細場，主要來自電子磁矩對原子核的作用，例如核心電子極化、接觸項、偶極項、軌道項等。因此更接近：

$$B_{\text{hf}}(T) \approx A \langle S(T) \rangle$$

其中 $\langle S(T) \rangle$ 代表局部電子磁矩的熱平均有序程度， A 是超精細耦合常數。所以它會跟自發磁化強度 $M_s(T)$ 成正比或近似成正比。

兩種方法的差別可以濃縮成：

梅斯堡效應：量 B_{hf} 造成的核能階分裂

NMR：量 B_{hf} 決定的核自旋進動頻率

所以可以跟學生說：

這兩種方法都是把原子核當成局部磁場探針。鐵的電子磁矩越整齊、越強，原子核感受到的超精細磁場越大；溫度升高使磁有序變弱，這個局部超精細場也變小。梅斯堡效應用譜線分裂讀出它，NMR 用共振頻率讀出它。

但更嚴格地說，量到的是核位置的超精細內場的熱平均值，而不是一般意義下外部磁場或樣品總磁場的平均值。