

3.6 様々な磁性体

- 常磁性体: $0 < \chi_M \ll 1$ であるような物質

通常，原子・分子の磁気双極子モーメントは，熱的ゆらぎでランダムな方向を向いている．しかし，磁場中では，

$$(1) \quad W = -m \cdot B$$

であるから，原子・分子の磁気双極子モーメント m は外部磁場 B の方向に揃う傾向がある．その結果，磁化 M も外部磁場の方向を向く．すなわち， $\chi_M > 0$ ．酸素の場合， $\chi_M \sim 2 \times 10^{-6}$ ．

- 強磁性体: $\chi_M \gg 1$

典型的には， $\chi_M \sim 10^3 \sim 10^4$ ．鉄，コバルト，ニッケルなど．

- χ_M は外部磁場の強さによっても変化する．

- 外部磁場をなくしても磁化が残る場合もある．

⇒ 永久磁化 (永久磁石) ．

- B と H の関係， M と H の関係は一意的ではない．(履歴による) ⇒ ヒステリシス曲線 ．飽和，残留磁場，保磁力 ．

○ 鉄: 残留磁場 $B \sim 0.4 \text{ T}$, 保磁力 $H \sim 50 \text{ A/m}$
(cf. 地球磁場 $\sim 50 \text{ A/m}$)

● 反磁性体: $\chi_M < 0$

磁化が磁場の逆を向く .

通常 , 固体で $\chi_M \sim -10^{-5}$. ビスマスなど .

○ すべての物質が反磁性をもつが , 常磁性や強磁性をもつ物質では反磁性は隠されて見えない .

○ 外部磁場の影響で電子の軌道運動による磁気モーメントが減少することが主な原因 .

○ ボーア (Bohr) の原子模型による説明

簡単のため水素原子を考える . 重い陽子 (電荷 $+e$) が原点に固定されており , 電子 (質量 m_e , 電荷 $-e$) が原点を中心とする半径 a の円周上を等速で回転している . 電子の軌道面を x - y 平面にとり , 電子の速度を v_0 とする . クーロン力が向心力であるから (クーロン力と遠心力が釣り合っているから) ,

$$(2) \quad \frac{-e^2}{4\pi\epsilon_0 a^2} = -\frac{m_e v_0^2}{a} .$$

z 軸方向に一様な外部磁場 H_0 をかけると，電子にローレンツ力 ($-e\mu_0\boldsymbol{v} \times \boldsymbol{H}_0$) が働き，速度が v に変化する．(Larmor の歳差運動．) 力の釣り合いは

$$(3) \quad -\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 a^2} - e\mu_0 v H_0 = -\frac{m_e v^2}{a}.$$

(半径 a は変化しない．) よって，

$$(4) \quad \frac{m_e v^2}{a} = \frac{m_e v_0^2}{a} + e\mu_0 v H_0.$$

$\Delta v \equiv v - v_0$ とし， H_0 を小さいとして， Δv の一次まで考えると，

$$(5) \quad m_e(v_0 + \Delta v)^2 = m_e v_0^2 + e\mu_0 a v H_0.$$

$$(6) \quad 2m_e v_0 \Delta v \simeq e\mu_0 a v H_0 \Rightarrow \Delta v \simeq \frac{e}{2m_e} a \mu_0 H_0.$$

一方，この電子の運動による円電流 I の磁気双極子モーメント m は， $m = IS = I\pi a^2$. また， $I = -ev/(2\pi a)$. v の変化による I の変化 ΔI は， $\Delta I = -e\Delta v/(2\pi a)$. m の変化 Δm は，

$$(7) \quad \Delta m = \pi a^2 \Delta I = -\frac{e}{2} a \Delta v \simeq -\frac{e^2}{4m_e} a^2 \mu_0 H_0 (< 0).$$

従って， H_0 によって， H_0 と逆向きの磁気双極子モーメント (Δm) が生じる . \Rightarrow 反磁性 .

● 超伝導体

極低温である種の物質は超伝導状態になり，電気伝導率 σ が無限大となる . このとき，オームの法則 $i = \sigma E$ から，(i が有限だから) $E = 0$. ファラデーの電磁誘導の法則 $\nabla \times E + \partial B / \partial t = 0$ から， $\partial B / \partial t = 0$. すなわち， B は時間的に変化しない . 実際は $B = 0$ となることが知られている . これを，マイスナー (Meissner) 効果という . 超伝導体表面に流れる電流が内部の磁場を打ち消していると考えられる . このとき， $H = B / \mu_0 - M$ より，

$$(8) \quad M = -H \Rightarrow \chi_M = -1 \quad \underline{\text{完全反磁性}}.$$