

选择题

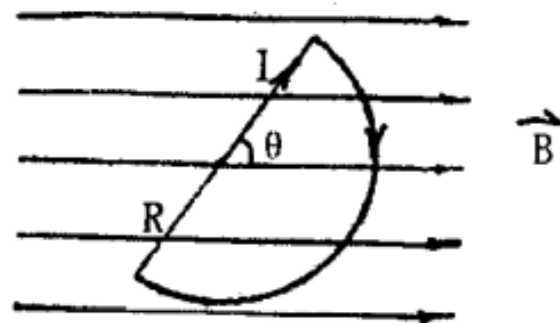
7. 半圆形载流线圈半径为 R 电流为 I 与 \vec{B} 共面且直径与 \vec{B} 夹角为 θ ，则线圈所受的磁力矩大小为

(A) 0

(B) $\frac{IB\pi R^2 \sin \theta}{2}$

(C) $\frac{IB\pi R^2 \cos \theta}{2}$

(D) $\frac{IB\pi R^2}{2}$



第十三章 磁场中的磁介质

第十三章 磁场中的磁介质

13-1 磁介质 磁化强度

磁介质——能与磁场产生相互作用的物质

磁化——磁介质在磁场作用下所发生的变化

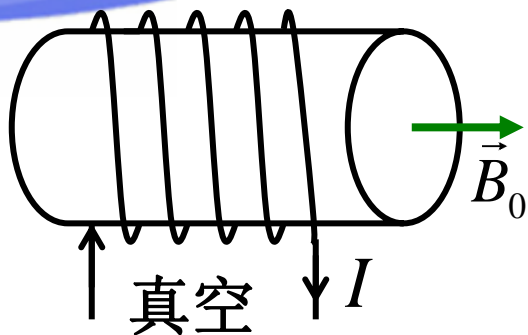
一、物质磁性的概述

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}'$$

附加磁场

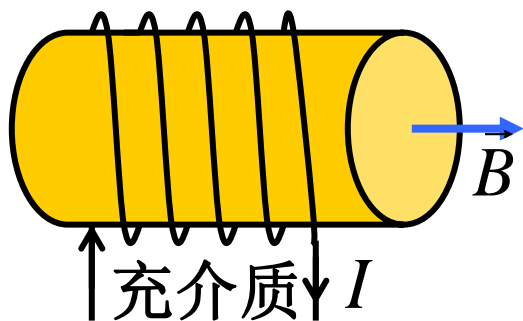
根据 \vec{B}' 的大小和方向可将磁介质分类

实验:



无磁介质时

$$B_0 = \mu_0 n I$$



$$B \neq B_0$$

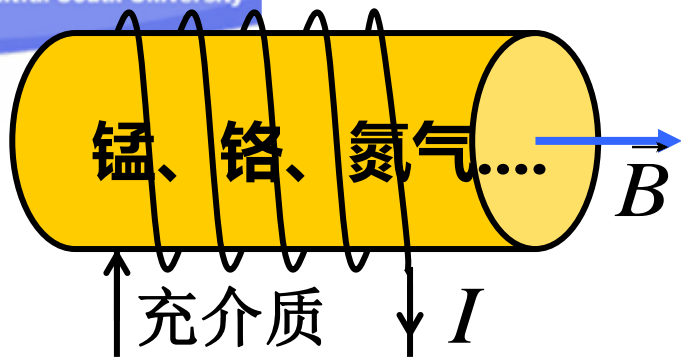
说明介质对磁场有影响

对不同介质，可能出现三种情况：

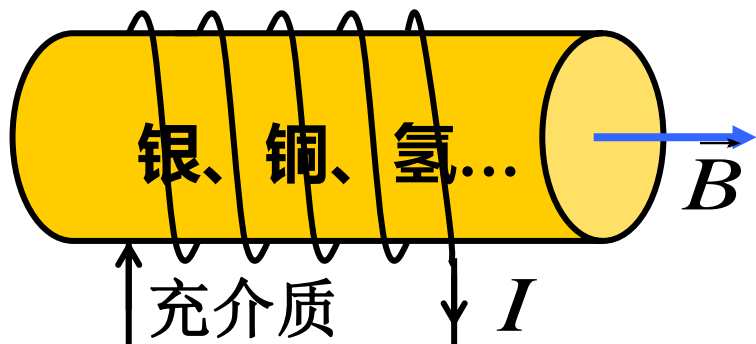
$$\begin{cases} B > B_0; & B < B_0 \\ B \gg B_0 (Fe, Co, Ni \text{等}) \end{cases}$$

撤去 I ，磁性消失

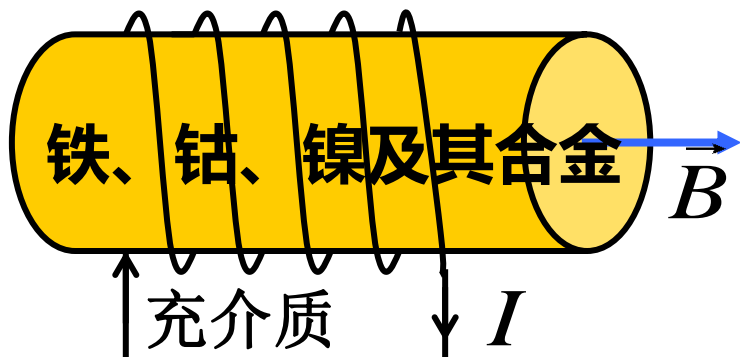
撤去 I ，磁性保留



1) $B > B_0$ 顺磁质



2) $B < B_0$ 抗磁质



3) $B \gg B_0$ $B' \approx B$
铁磁质

二、介质的磁化微观机理

分子磁矩 — { 轨道磁矩 —— 电子绕核的轨道运动
 — 自旋磁矩 —— 电子本身自旋

自旋的故事 ➡ 相干性 ➡ 量子纠缠 ➡ 跨越时空

《雨霖铃》

--童传佳

明妃抚弦，西子浣纱，未若神颜。玉皇见我垂怜，
特赐伊，临净凡间。六月廿八契定，姻缘一纸签。五千
载，书生佳人，岂独今生聚情缘。

由来与卿量纠缠，更记否，誓不退相干。惜天地有
时尽，喜此情万世犹绵。愿执子手，笑看山无棱乾坤颠
。便纵有江水为竭，欲与卿同眠。

等效于圆电流——分子电流

分子磁矩在外磁场中受到**磁力矩**，使它向**磁场方向**偏转，且按统计规律取向

$$\vec{p}_m = IS\vec{n}$$

$$\vec{M} = \vec{p}_m \times \vec{B}$$

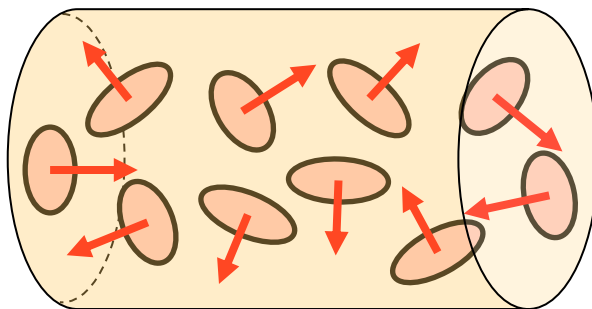


三、磁介质的顺磁性与抗磁性

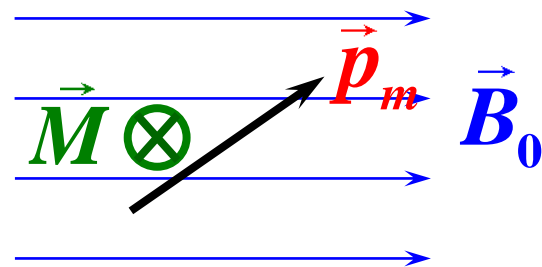
1. 顺磁质及其磁化

顺磁质物质分子的固有磁矩不为零 $\vec{p}_m \neq 0$

在无外磁场作用时，由于分子的热运动，分子磁矩取向各不相同，整个介质对外不显磁性。

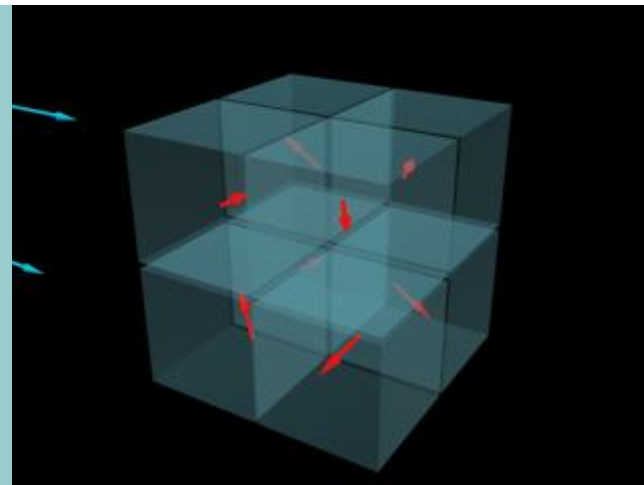
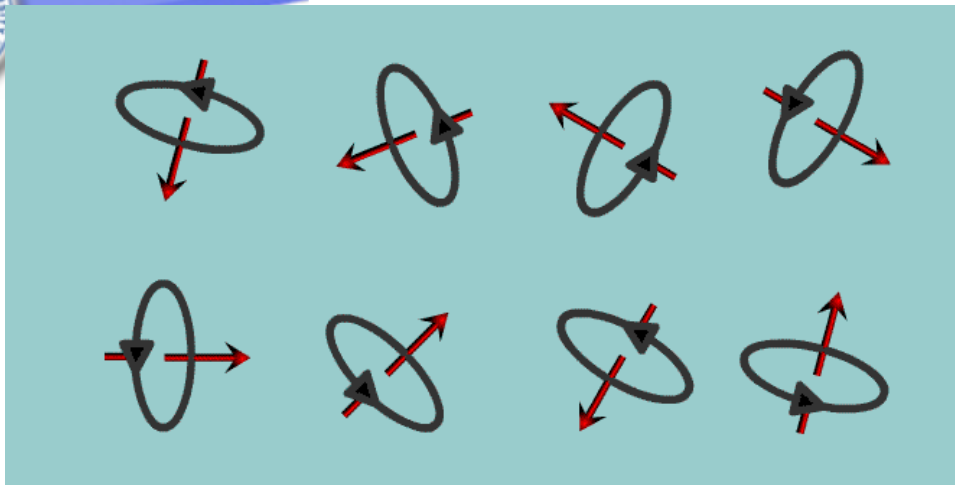


有外磁场时，分子磁矩受到磁力矩的作用，使分子磁矩转向外磁场的方向。



$$\vec{M} = \vec{p}_m \times \vec{B}_0$$

中南大学



分子磁矩转向过程中，由其产生的磁场，在方向上逐渐和外磁场方向趋同，这就是顺磁质的磁化过程。

磁化结果，在顺磁质中形成附加的磁化场，使介质内部磁场增强。

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}'$$

$$B > B_0$$

2. 抗磁质及其磁化

抗磁质分子的固有磁矩为零 $\sum \vec{p}_m = 0$

在外磁场中，抗磁质分子会产生附加磁矩 $\Delta \vec{p}_m$

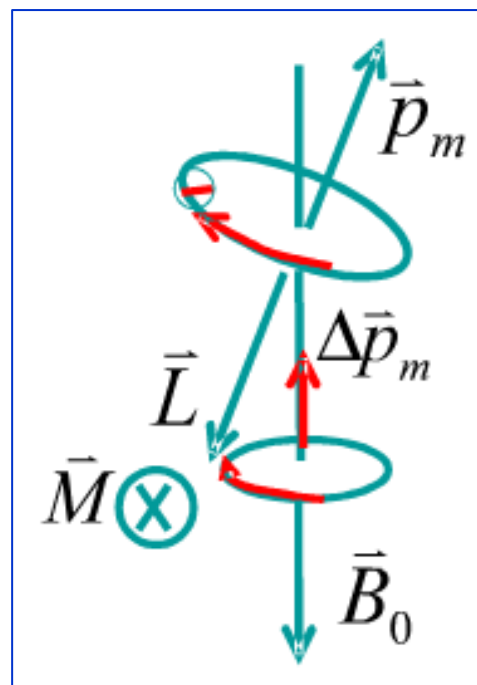
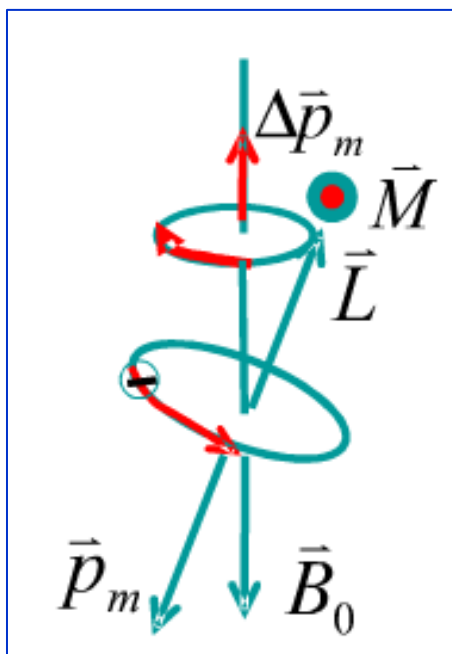
可以证明： $\Delta \vec{p}_m$ 总是与外磁场反向

电子在磁场中运动的附加磁矩总是削弱外磁场的作用
使 $B < B_0$

抗磁性是一切磁介质共同具有的特性。在顺磁质物质中，同样具有抗磁质效应，只不过这种抗磁质效应低于顺磁质效应。

* 二、磁化机理

抗磁质效应的简略解释



使电子绕核运动的轨道平面产生绕外磁场方向的进动称为**拉莫进动**。

3. 介质磁化的过程如下：

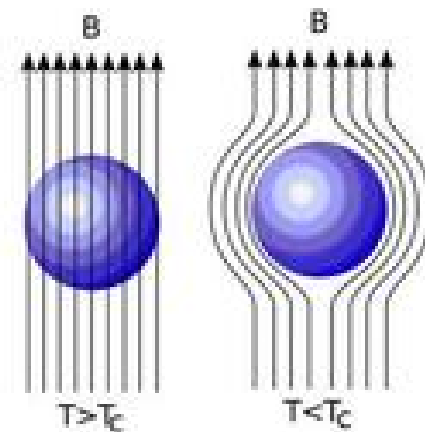
介质磁化的过程如下(知道结论)：

顺磁质	抗磁质	铁磁质
$\vec{p}_m \neq 0$	$\vec{p}_m = 0$	$\vec{p}_m \neq 0$
在外场中 $\vec{p}_m \gg \Delta\vec{p}_m$	在外场中 $\Delta\vec{p}_m \neq 0$	在外场中 $\vec{p}_m \gg \Delta\vec{p}_m$
\vec{p}_m 取向与 \vec{B}_0 一致	$\Delta\vec{p}_m$ 取向与 \vec{B}_0 反向	\vec{p}_m 取向与 \vec{B}_0 一致
$\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}' > \vec{B}_0$	$\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}' < \vec{B}_0$	$\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}' \gg \vec{B}_0$

都有抗磁性，但是对于铁磁和顺磁材料， $\Delta\vec{p}_m \ll \vec{p}_m$ 抗磁性不重要！

超导体： T_c 以下， $R=0$.（零电阻效应）
体内磁场永远为0，完全抗磁性， $B = B_0 - B' = 0$
（迈斯纳效应）

超导体在磁场中产生宏观表面感应电流，附加磁场
抵消外磁场



问:

1. 把两种不同的磁介质放在磁铁的两个不同名磁极之间，磁化后也称为磁体。但两级的位置不同，如图a和b所示，试指出哪一种是顺磁质，哪一种是抗磁质？



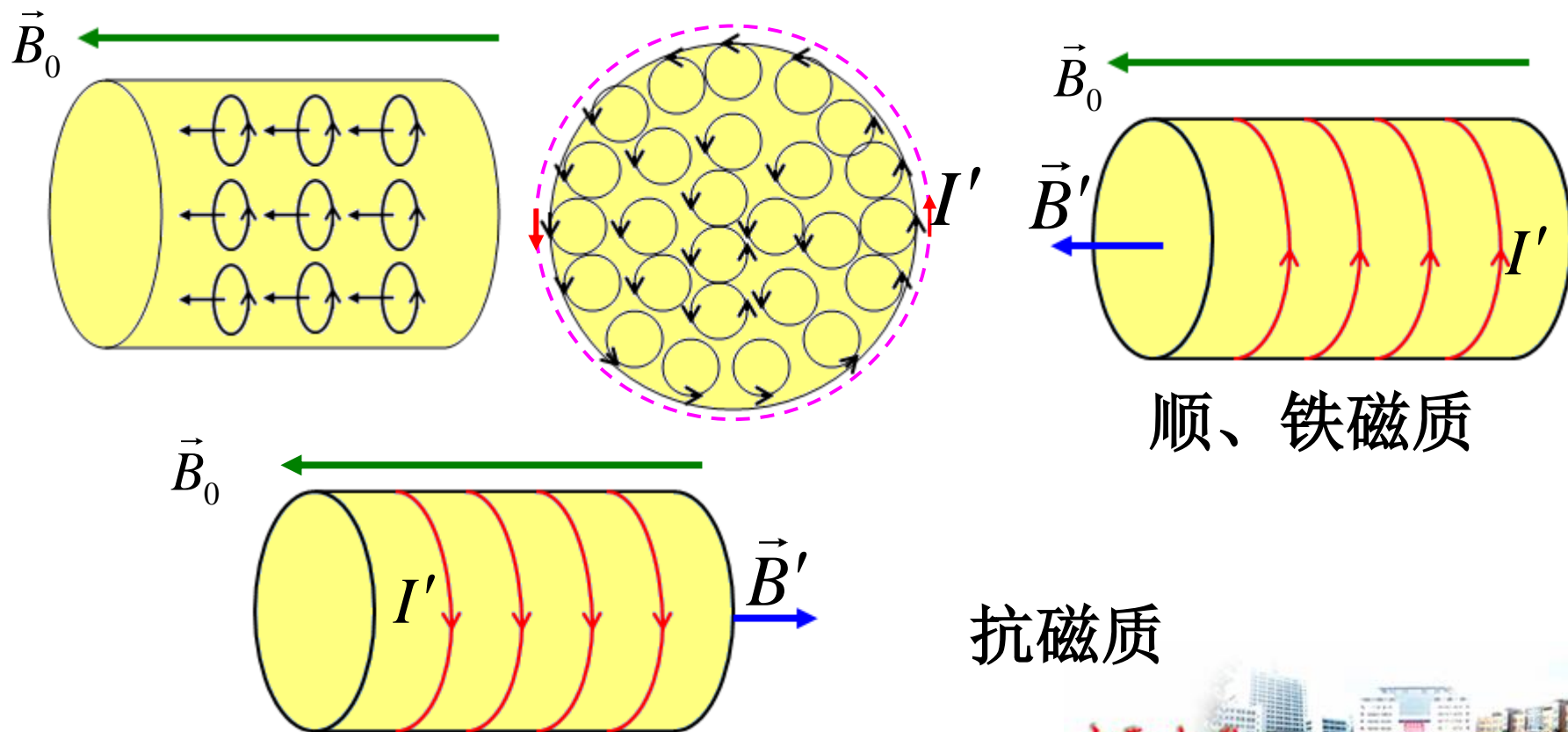
(a)



(b)

四、磁化电流 I' (类似于极化电荷 q') 和磁化强度

当介质磁化时，磁矩将定向排列，宏观上出现表面环形电流。这种因磁化而出现的表面电流叫做**磁化电流或束缚电流**。用 I' 表示。

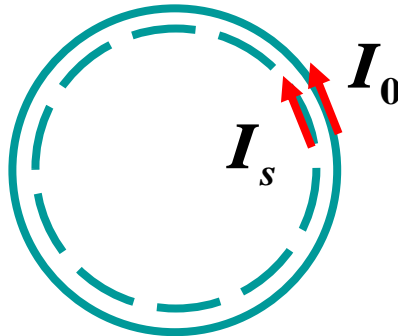
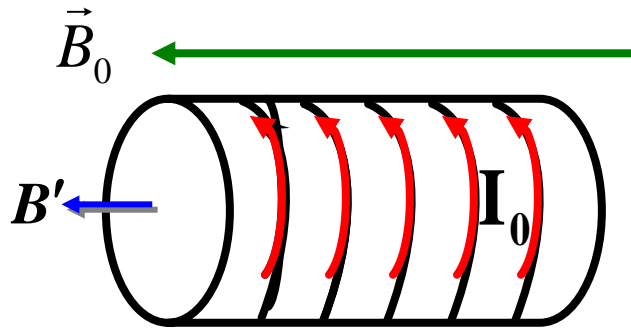


注意:

I' 是分子电流整齐排列在表面未被抵消的集体效应
非电荷宏观运动形成，不同于传导电流
但激发磁场的规律与传导电流相同。 $I' \rightarrow \vec{B}'$

定义：磁化强度

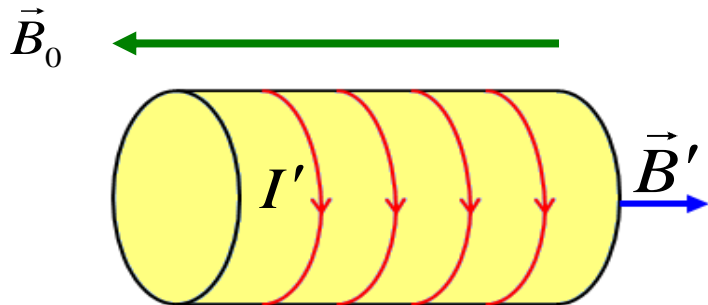
$$\vec{M} = \frac{\sum \vec{p}_{mi} + \sum \Delta \vec{p}_m}{\Delta V} \approx \frac{\sum \vec{p}_{mi}}{\Delta V} \quad \text{顺磁质}$$



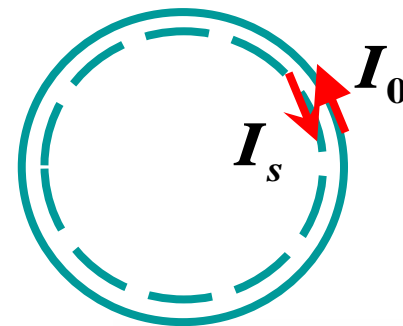
I_s ——磁化电流

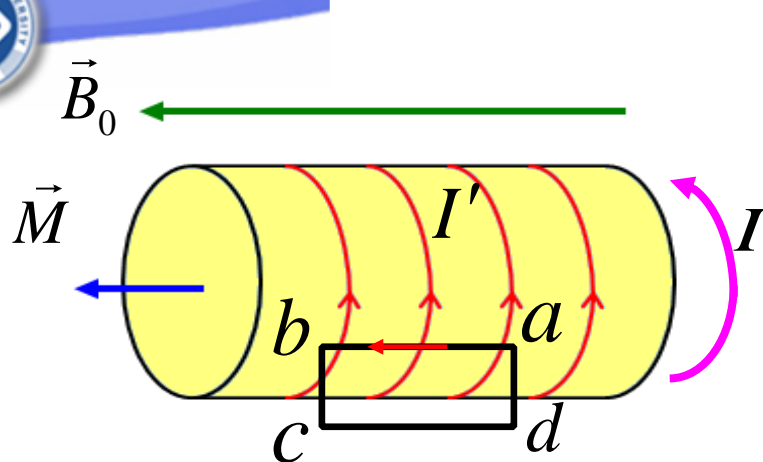
$$\vec{M} = \frac{\sum \vec{p}_{mi} + \sum \Delta \vec{p}_m}{\Delta V} = \frac{\sum \Delta \vec{p}_m}{\Delta V}$$

抗磁质

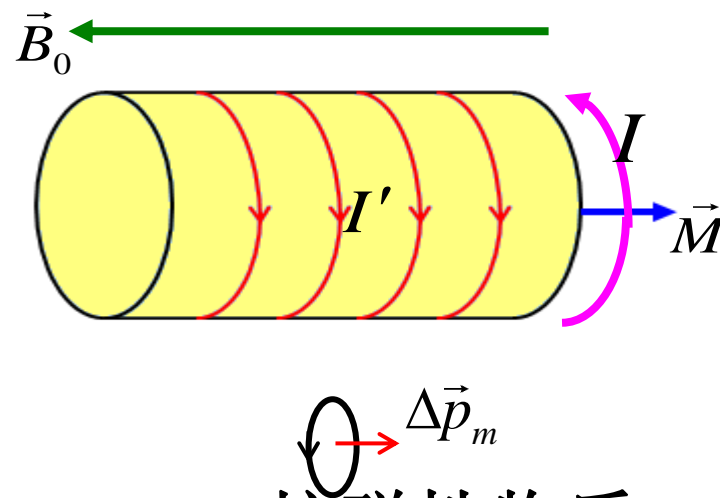


抗磁质





顺、铁磁性物质



抗磁性物质

α_s ——沿轴线单位长度上的磁化电流
(磁化面电流的“线”密度)

$$|\vec{p}_m| = I_s S = \alpha_s L S \quad M = |\vec{M}| = \frac{|\vec{p}_m|}{V} = \frac{\alpha_s L S}{L S} = \alpha_s$$

磁化强度 \mathbf{M} 在量值上等于磁化面电流的线密度。

$$\oint \vec{M} \cdot d\vec{l} = \alpha_s l = I_s$$

磁化强度对闭合回路 L 的线积分，等于穿过以 L 为周界的任意曲面（ L 围住的）的磁化电流的代数和。

一、磁介质中的高斯定理

$$\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0 \quad \vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}'$$

$$\oint_S \vec{B}_0 \cdot d\vec{S} = 0 \quad \oint_S \vec{B}' \cdot d\vec{S} = 0$$

$$\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = \oint_S (\vec{B}_0 + \vec{B}') \cdot d\vec{S} = 0$$

磁介质中的高斯定理

通过磁场中任一闭合曲面的总磁通量为零

二、磁介质中的安培环路定理 $\because \oint_L \vec{M} \cdot d\vec{l} = \sum_L I_s$

$$\oint_L \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \sum_L (I_0 + I_s) = \mu_0 \sum_L I_0 + \mu_0 \oint_L \vec{M} \cdot d\vec{l}$$

$$\oint_L \left(\frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M} \right) \cdot d\vec{l} = \sum_L I_0$$

令 **磁场强度** $\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M}$

介质中的安培环路定理

$$\oint_L \vec{H} \cdot d\vec{l} = \sum_{(L \text{ 内})} I_0$$

只与穿过 L 的传导电流代数和有关。

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M} \quad \oint_L \vec{H} \cdot d\vec{l} = \sum_{L \text{ 内}} I_0$$

1) \vec{H} 是一辅助物理量，描述磁场的基本物理量
仍然是 \vec{B} (\vec{B} \vec{H} 名称张冠李戴了)

2) $\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M}$ 是一普遍关系式

各向同性磁介质实验规律: $\vec{M} = \chi_m \vec{H}$

磁化率

由 $\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M}$

$$\begin{aligned}\vec{B} &= \mu_0 (\vec{H} + \vec{M}) = \mu_0 (1 + \chi_m) \vec{H} \\ &= \mu_0 \mu_r \vec{H} = \mu \vec{H}\end{aligned}$$

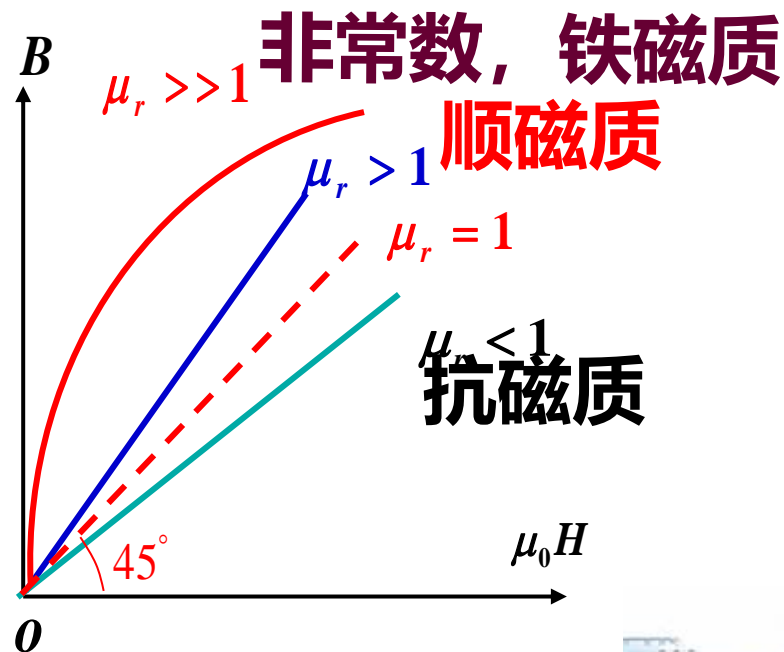
真空磁导率 μ_0

介质相对磁导率

$$\mu_r = 1 + \chi_m$$

介质磁导率

$$\mu = \mu_0 \mu_r$$



讨论

比较磁介质与电介质



比较

电介质

磁介质

其它对应关系

$$\vec{P} = \chi_e \varepsilon_0 \vec{E}$$

$$\varepsilon_r = 1 + \chi_e$$

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \vec{E}$$

$$\vec{M} = \chi_m \vec{H}$$

$$\mu_r = 1 + \chi_m$$

$$\vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H}$$

求解思路

(1) 对称性分析，
选高斯面

(2) 由 $\oint_s \vec{D} \cdot d\vec{S} = \sum_{(S内)} q_0$

求 \vec{D}

(3) 由 $\vec{E} = \vec{D} / \varepsilon_0 \varepsilon_r$

求 \vec{E}

(1) 对称性分析，选安培环路

(2) 由 $\oint_L \vec{H} \cdot d\vec{l} = \sum_{(穿过L)} I_0$

求 \vec{H}

(3) 由 $\vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H}$ 求 \vec{B}

$\vec{B}, \vec{H}, \vec{M}$ 之间的关系

$$\vec{M} = \chi_m \vec{H}$$

$$\vec{H} \equiv \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M}$$

$$\vec{B} = \mu_0 (1 + \chi_m) \vec{H}$$

$$\mu_r = (1 + \chi_m)$$

$$\vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H} = \mu \vec{H}$$

μ_r 称为相对磁导率

$\mu = \mu_0 \mu_r$ 磁导率

$\vec{P}, \vec{D}, \vec{E}$ 之间的关系

$$\vec{P} = \chi_e \epsilon_0 \vec{E}$$

$$\vec{D} \equiv \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P}$$

$$\vec{D} = (1 + \chi_e) \epsilon_0 \vec{E}$$

$$\epsilon_r = (1 + \chi_e)$$

$$\vec{D} = \epsilon_r \epsilon_0 \vec{E} = \epsilon \vec{E}$$

ϵ_r 称为相对电容率
或相对介电常量

磁介质中的 安培环路定理

$$\oint_L \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \sum_L I_0 + \mu_0 \sum_L I_s$$

$$\oint_L \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \sum_L I + \mu_0 \oint_L \vec{M} \cdot d\vec{l}$$

$$\oint_L \left(\frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M} \right) \cdot d\vec{l} = \sum_L I$$

$$\vec{H} \equiv \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M}$$

$$\boxed{\oint_L \vec{H} \cdot d\vec{l} = \sum_L I_0}$$

电介质中的 高斯定理

$$\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{1}{\epsilon_0} \sum_S (q + q_i')$$

$$\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{1}{\epsilon_0} \sum_S q - \frac{1}{\epsilon_0} \oint_S \vec{P} \cdot d\vec{S}$$

$$\oint_S (\epsilon_0 \vec{E} + \vec{P}) \cdot d\vec{S} = \sum_S q$$

$$\vec{D} \equiv \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P}$$

$$\boxed{\oint_S \vec{D} \cdot d\vec{S} = \int_V \rho_e dV}$$

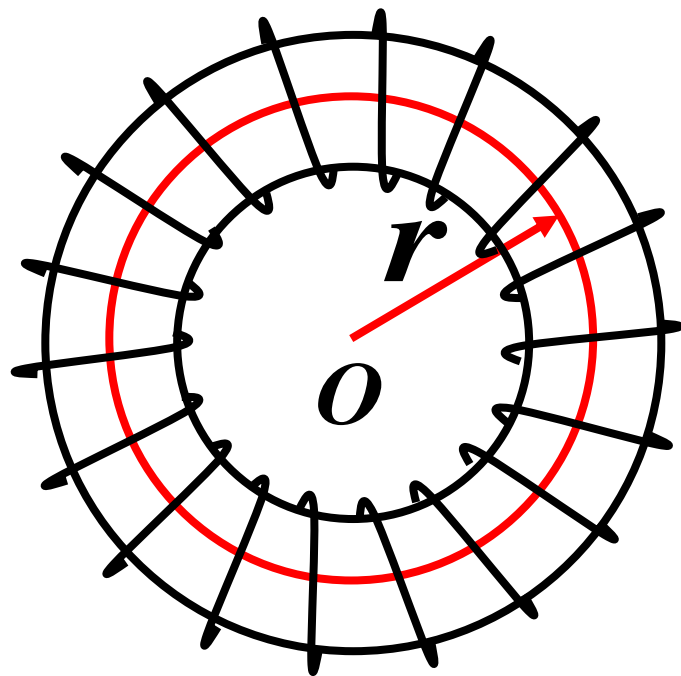
例1 一环形螺线管，管内充满磁导率为 μ ，相对磁导率为 μ_r 的顺磁质。环的横截面半径远小于环的半径。单位长度上的导线匝数为 n 。

求：环内的磁场强度和磁感应强度

解：
$$\oint_L \vec{H} \cdot d\vec{l} = H 2\pi r = NI$$

$$H = \frac{NI}{2\pi r} = nI$$

$$B = \mu H = \mu_0 \mu_r H$$



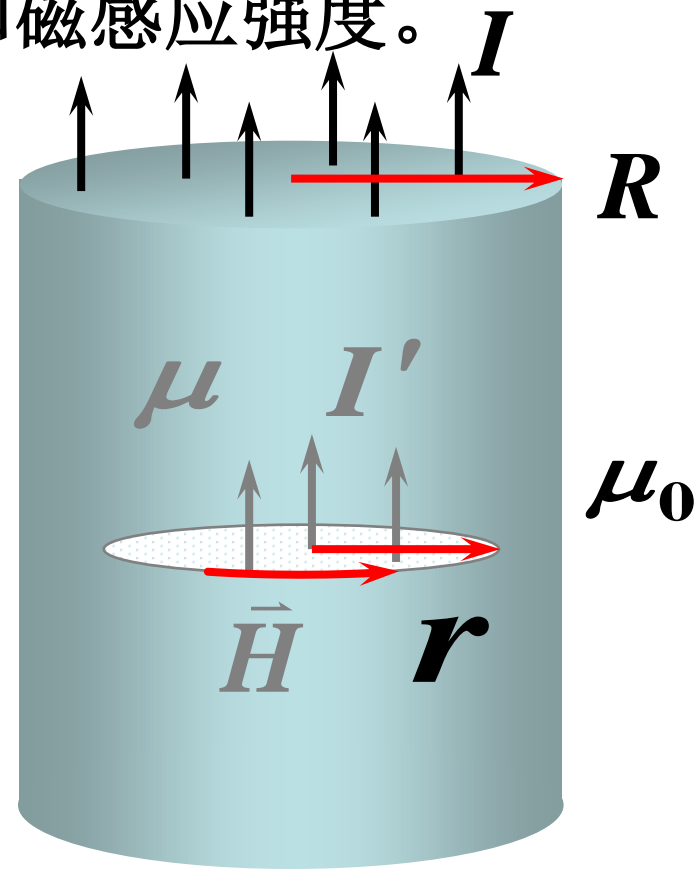
例2 一无限长载流圆柱体，通有电流 I ，设电流 I 均匀分布在整個横截面上。柱体的磁导率为 μ ，柱外为真空。

求：柱内外各区域的磁场强度和磁感应强度。

解： $r < R$

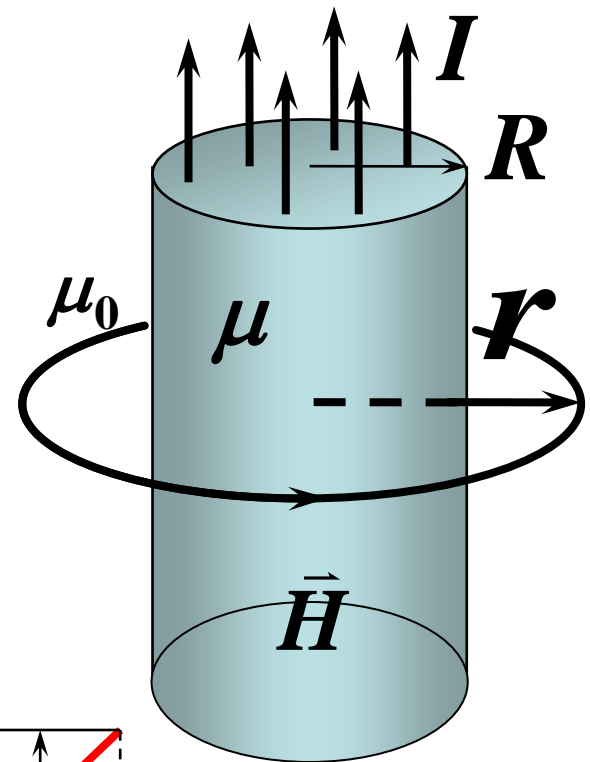
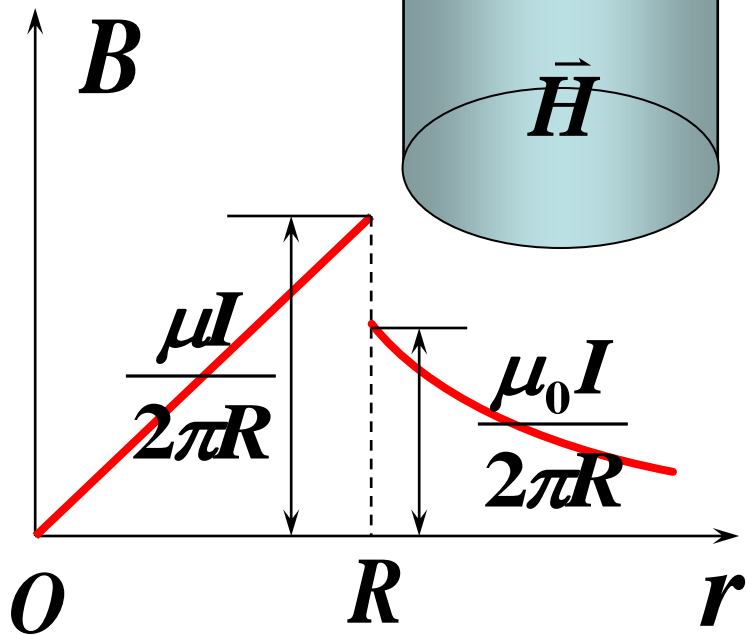
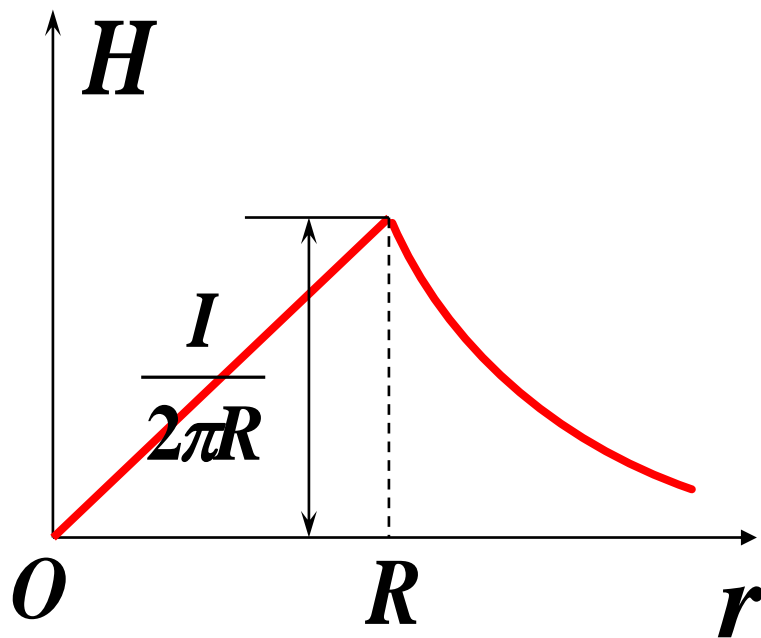
$$\oint_L \vec{H} \cdot d\vec{l} = H 2\pi r = I'$$
$$= \frac{r^2}{R^2} I$$

$$H = \frac{Ir}{2\pi R^2} \quad B = \frac{\mu Ir}{2\pi R^2}$$



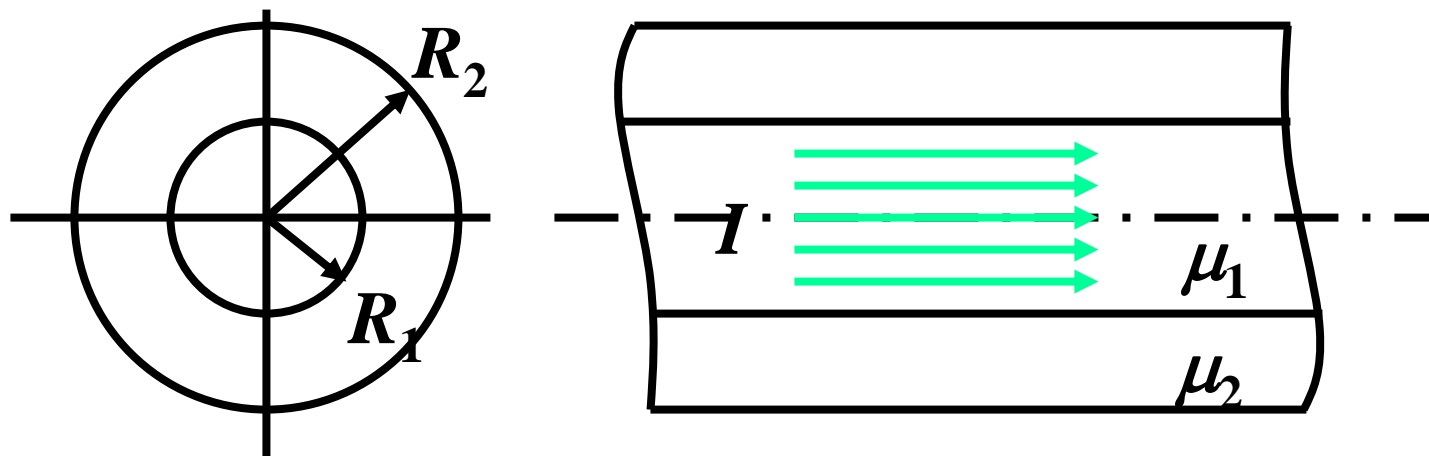
$$r > R \quad H 2\pi r = I$$

$$H = \frac{I}{2\pi r} \quad B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$$



在分界面上 H 连续, B 不连续

练习 一磁导率为 μ_1 的无限长圆柱形直导线，半径为 R_1 ，其中均匀地通有电流 I 。在导线外包一层磁导率为 μ_2 的圆柱形不导电的磁介质，其外半径为 R_2 ，如图所示。求磁场强度和磁感应强度的分布。



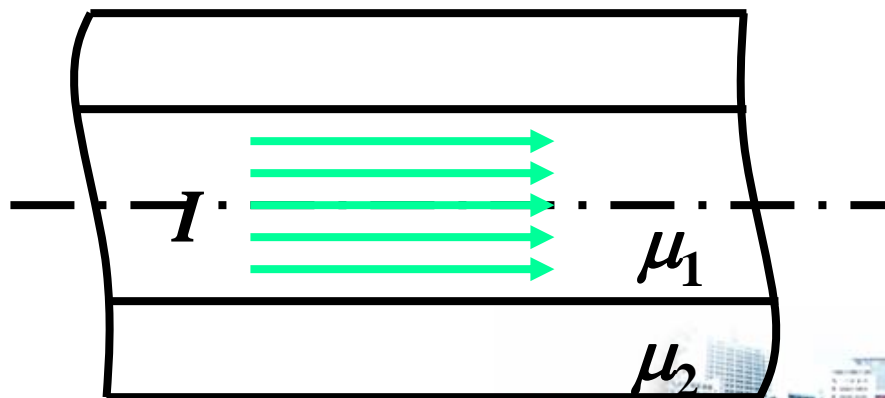
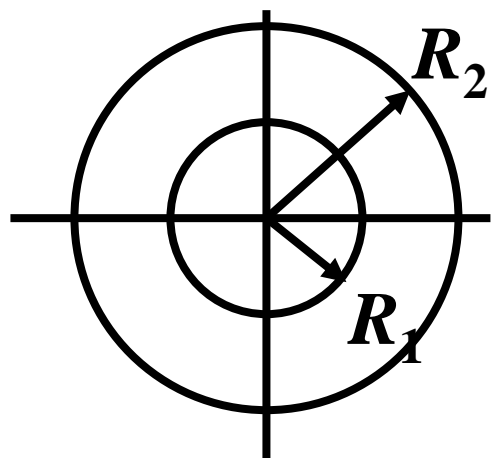
解：由安培环路定律

$$\oint_L \vec{H} \cdot d\vec{l} = \sum I_i \quad H \cdot 2\pi r = \sum I_i$$

$$r < R_1 \quad H = \frac{Ir}{2\pi R_1^2} \quad B = \frac{\mu_1 Ir}{2\pi R_1^2}$$

$$R_1 < r < R_2 \quad H = \frac{I}{2\pi r} \quad B = \frac{\mu_2 I}{2\pi r}$$

$$r > R_2 \quad H = \frac{I}{2\pi r} \quad B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$$



均匀磁介质中磁场的毕-沙伐定律

$$d\vec{B} = \frac{\mu}{4\pi} \frac{Id\vec{l} \times \vec{r}}{r^3}$$

$$\vec{B} = \int_l d\vec{B} = \int_l \frac{\mu}{4\pi} \frac{Id\vec{l} \times \vec{r}}{r^3}$$

电 流 模 型	H	B
无限长直电流的磁场	$H = \frac{1}{2\pi} \frac{I}{a}$	$B = \frac{\mu}{2\pi} \frac{I}{a}$
圆电流中心的磁场	$H = \frac{NI}{2R}$	$B = \frac{N\mu I}{2R}$
长直螺线管电流中部的磁场	$H = nI$	$B = \mu nI$
细环形螺线管中部的磁场	$H = nI$	$B = \mu nI$



静电场与稳恒磁场的比较

静电场

稳恒磁场

对应量

$$\vec{E} \quad \vec{D} \quad 1/\epsilon$$

$$\vec{B} \quad \vec{H} \quad \mu$$

高斯定理

$$\oint_S \vec{D} \cdot d\vec{S} = \sum q_0$$

$$\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0$$

环路定理

$$\oint_L \vec{E} \cdot d\vec{l} = 0$$

$$\oint_L \vec{H} \cdot d\vec{l} = \sum I_0$$

性质方程

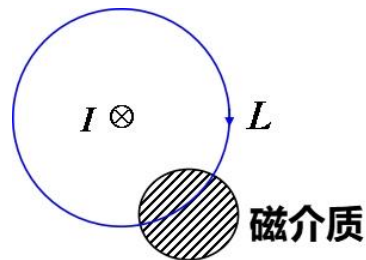
$$\vec{E} = \vec{D}/\epsilon$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H}$$

选 择 题

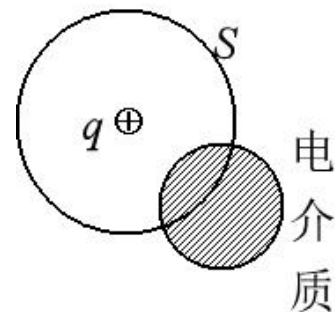
(2021) 在一无限长载有电流 I 的直导线产生的磁场中，一块磁介质如图放置，以导体上一点为圆心作一圆环回路 L ，则对此圆环回路 【 】

- (A) $\oint_L \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I$ 成立，且可用它求出回路 L 上各点的磁感应强度
- (B) $\oint_L \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I$ 成立，但不能用它求出回路 L 各点的磁感应强度
- (C) $\oint_L \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I$ 不成立，但通过回路 L 上的磁场强度的环流与磁介质无关
- (D) L 上各点磁场强度与磁介质无关，其大小仍等于 $H = \frac{I}{2\pi r}$ ，但磁感应强度与磁介质有关



选 择 题

(2020) . 在一点电荷 q 产生的静电场中, 一块电介质如图放置, 以点电荷所在处为球心作一球形闭合面 S , 则对此球形闭合面()

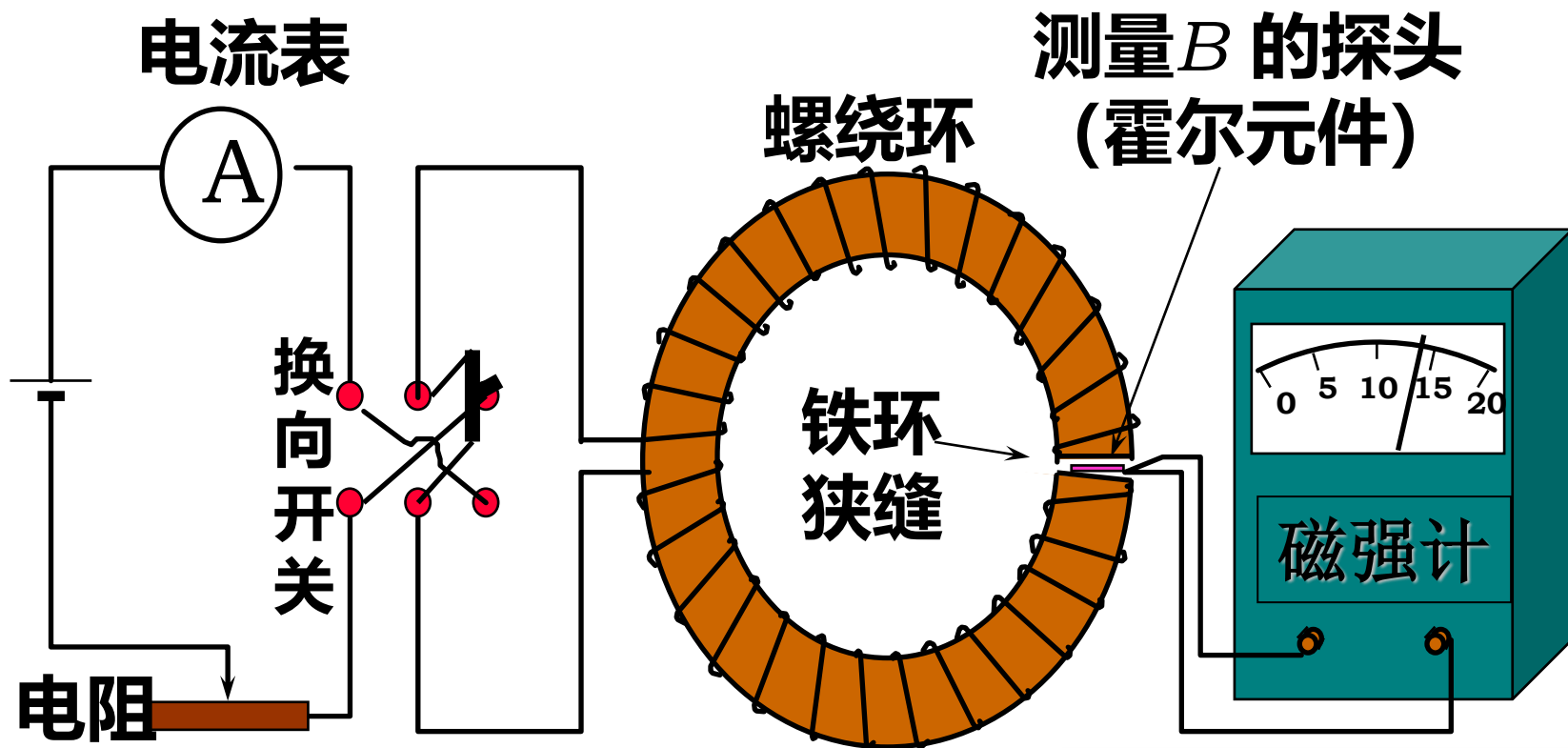


- (A) $\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = q/\epsilon_0$ 成立, 且可用它求出闭合面 S 上各点的场强
- (B) $\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = q/\epsilon_0$ 成立, 但不能用它求出闭合面 S 上各点的场强
- (C) $\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = q/\epsilon_0$ 不成立, 但通过闭合面 S 的电位移通量与电介质无关
- (D) 闭合面 S 上各点的电位移矢量与电介质无关, 其大小仍等于 $\frac{q}{4\pi r^2}$, 但场强与电介质有关

13-3 铁磁质

— 铁磁质的磁化规律

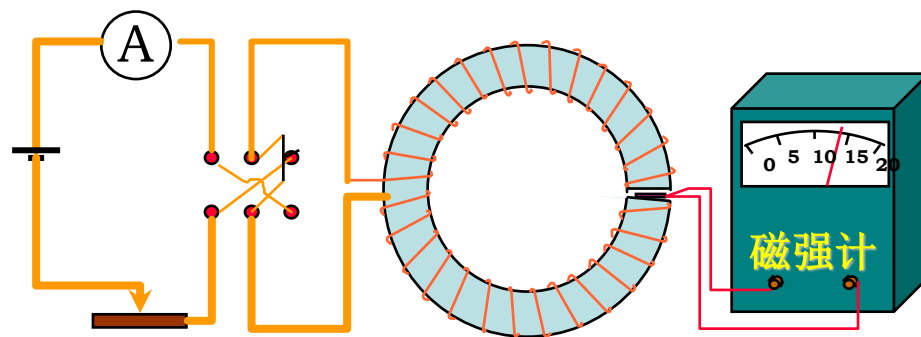
测量磁滞回线的实验装置



1、磁化曲线

原理：励磁电流 I ;
用安培定理得 H

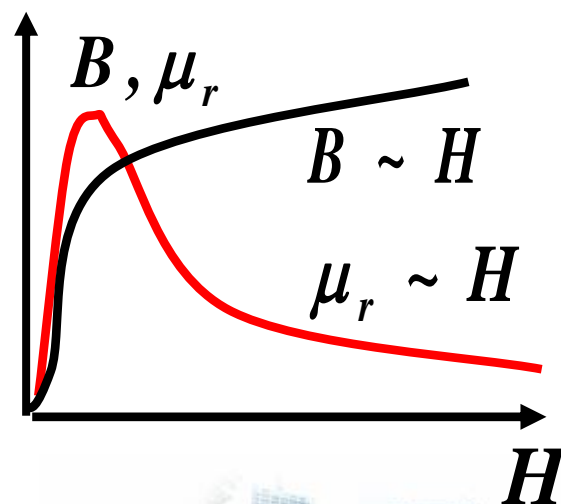
$$H = \frac{NI}{2\pi R}$$



磁强计测量 B , 如用感应电动势测量
或用小线圈在缝口处测量;

由 $\mu_r = \frac{B}{\mu_0 H}$ 得出 $\mu_r \sim H$ 曲线

铁磁质的 μ_r 不一定是个常数,
它是 H 的函数



2、磁滞回线

B_s — 饱和磁感应强度

B_r — 剩余磁感应强度

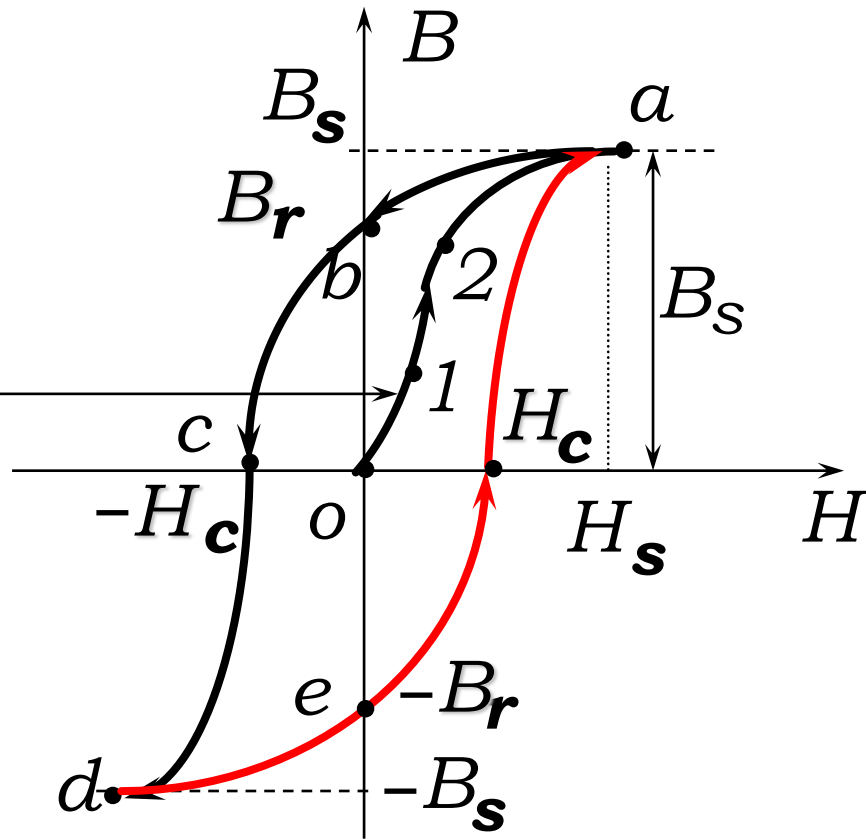
H_c — 矫顽力

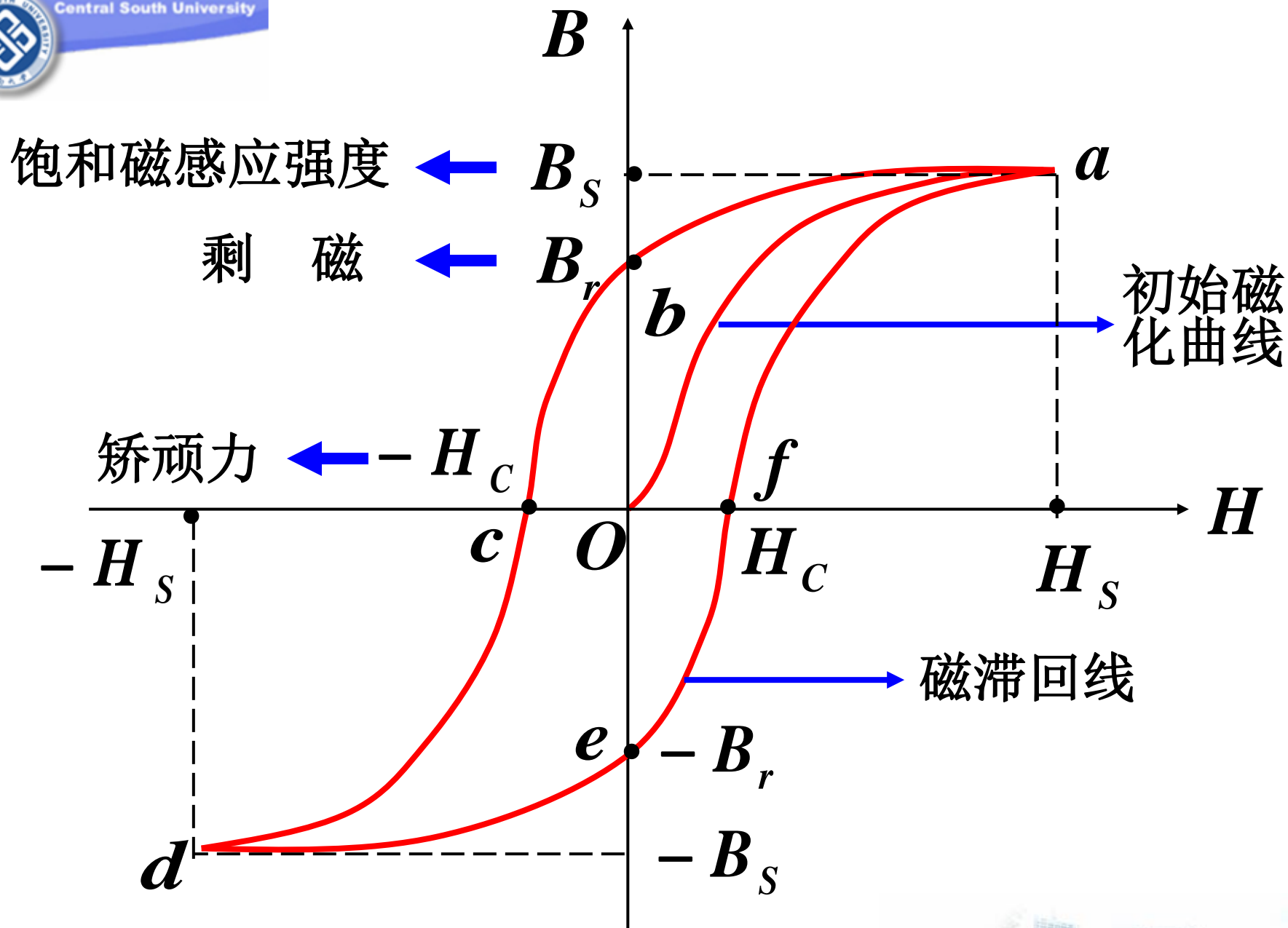
初始磁化曲线

铁磁质的磁化规律

磁滞现象： B 滞后于
 H 的变化

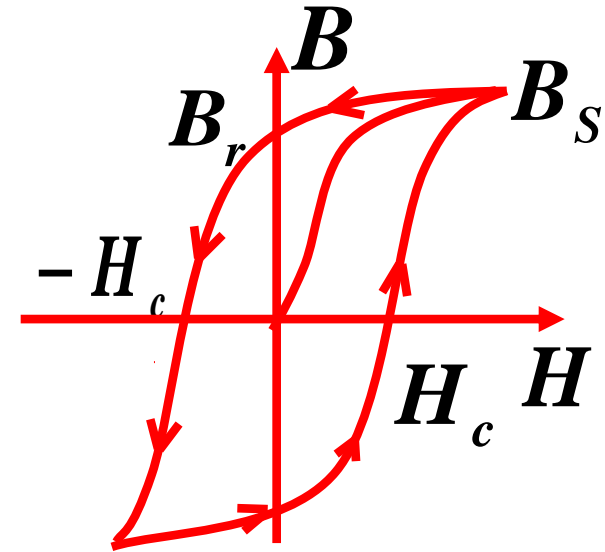
磁滞回线





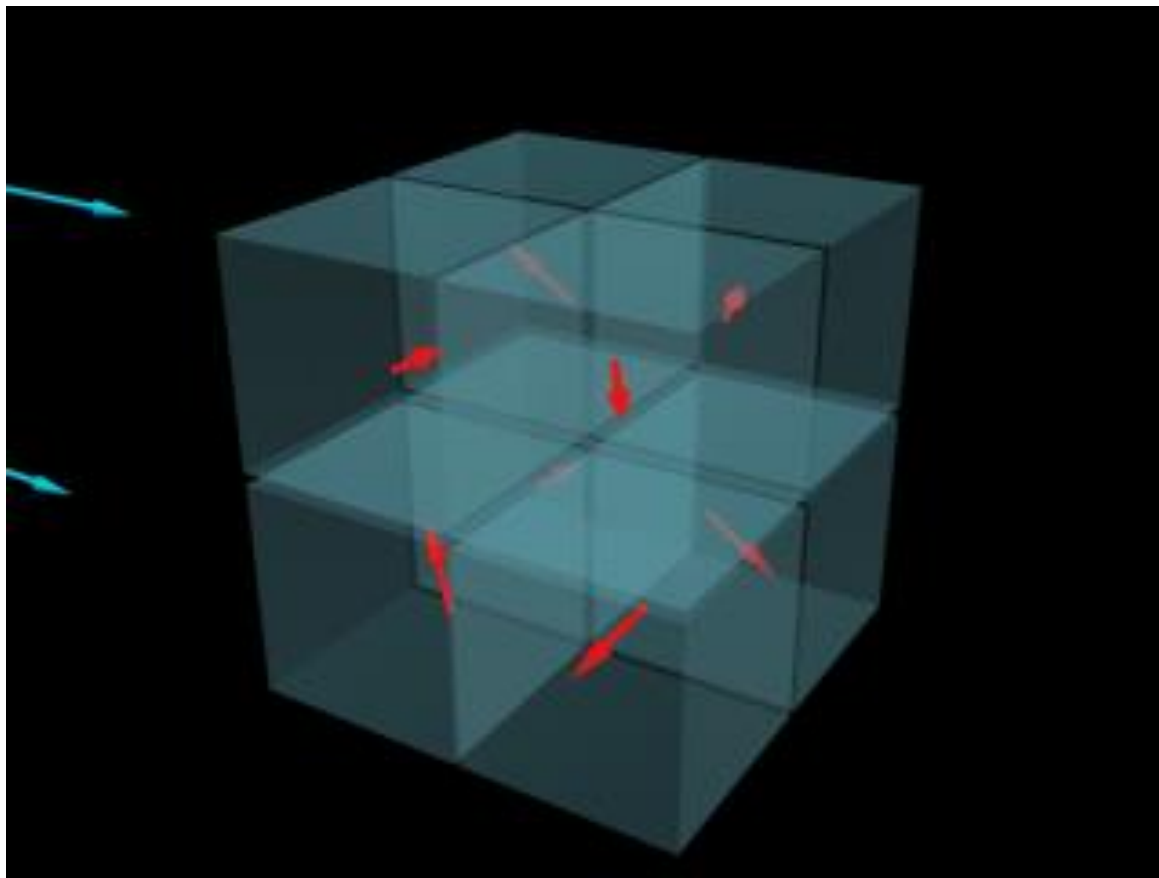
磁滞回线--不可逆过程

B 的变化落后于 H ，从而具有剩磁，即**磁滞效应**。每个 H 对应不同的 B 与磁化的历史有关。



在交变电流的励磁下反复磁化使其温度升高的
磁滞损耗与磁滞回线所包围的面积成正比。

下面是铁磁质在外磁场磁化过程的示意图：



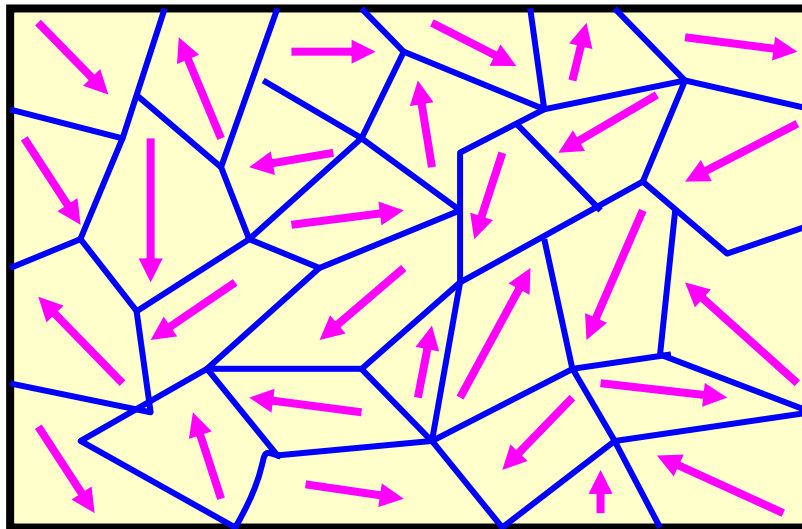
二、铁磁质内的磁畴结构

(1) 在无外磁场时，电子自旋磁矩能在小区域内自发地平行排列，形成自发磁化达到饱和状态的微小区域“磁畴”

无外磁场时，各磁畴的磁矩取向混乱，整体不显磁性。

$$\sum \vec{P}_{\text{畴}} = 0$$

多晶磁畴结构
示意图

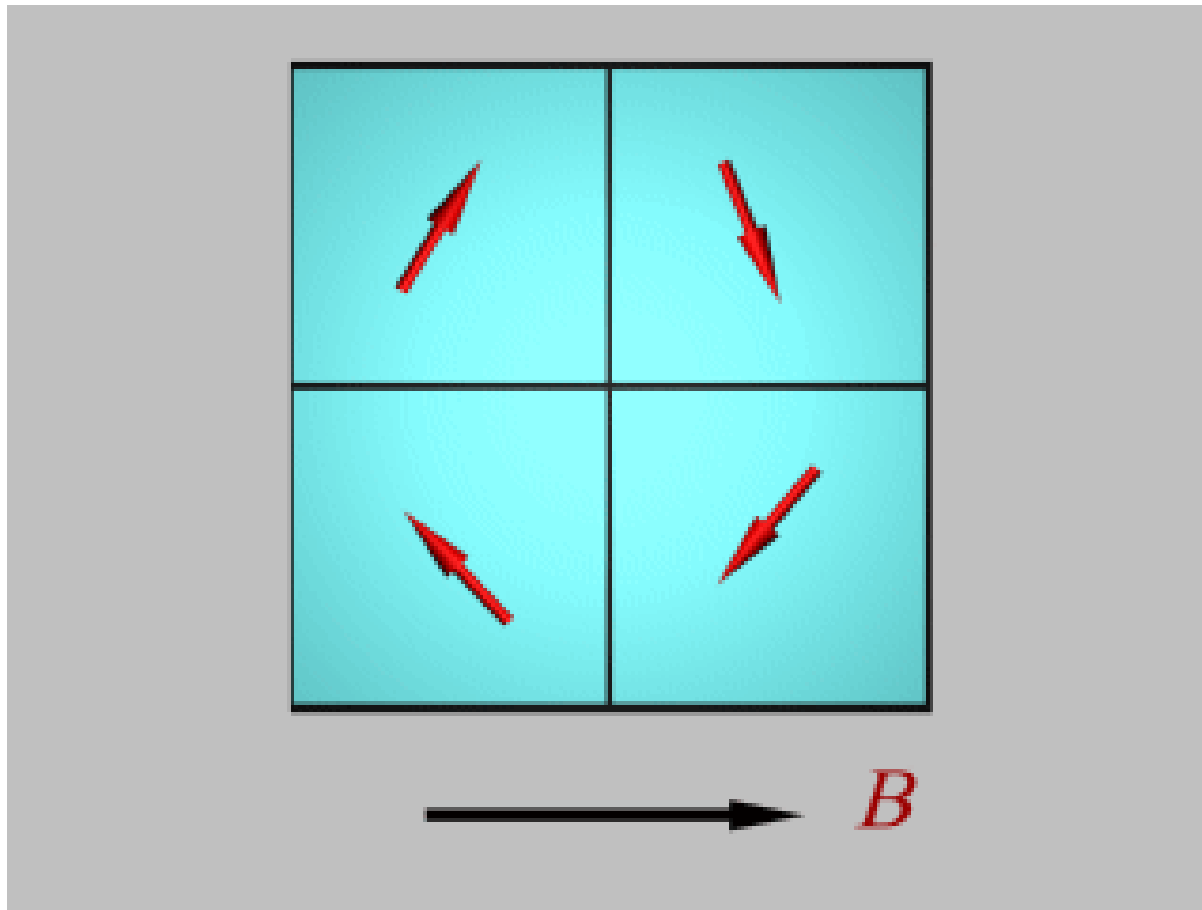


(2) 在外磁场作用下，磁畴发生变化。分两步：

A 外磁场较弱时，凡磁矩方向与外磁场相同或相近的磁畴都要扩大（畴壁向外移动）。

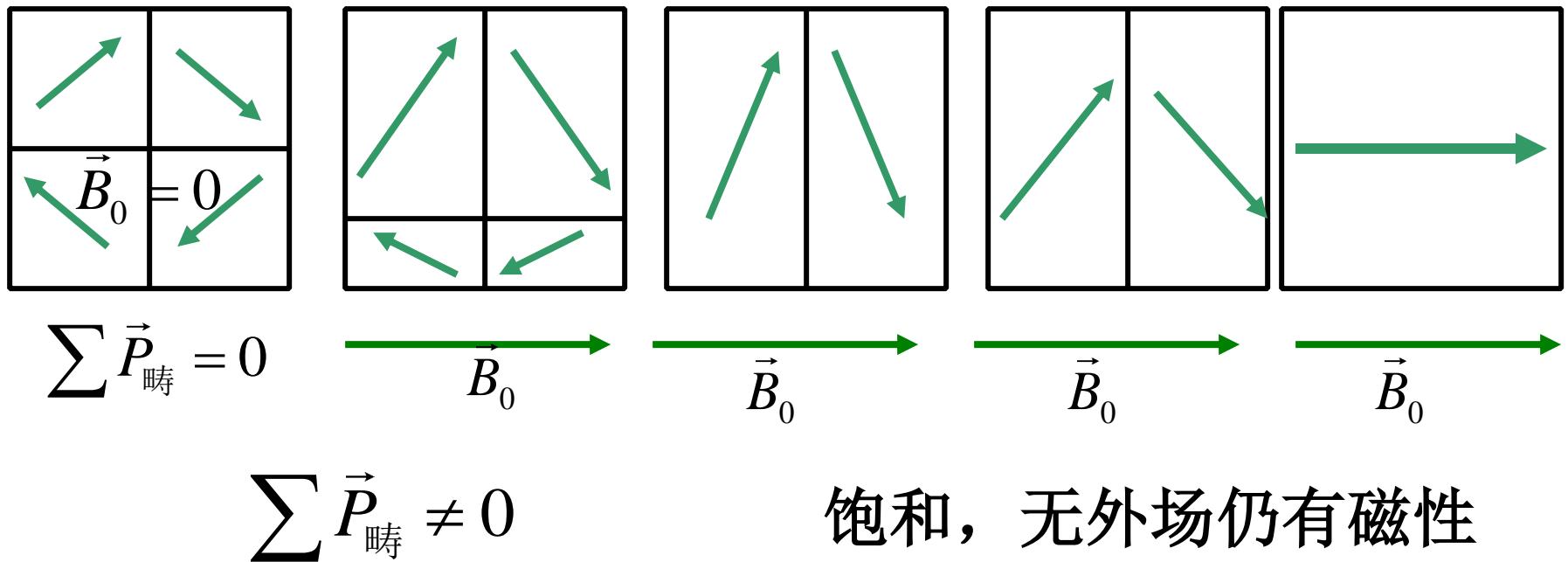
B 外磁场较强时，每个磁畴的磁矩方向都程度不同地向外磁场方向靠拢（即取向）。外磁场越强，取向作用也越强。

此上两种变化都导致单位物理小体积内磁矩矢量和（即磁化强度 \mathbf{M} ）从零逐渐增大，其方向与外场相同。外磁场越强， \mathbf{M} 也越强，这便是起始磁化曲线的成因。



箭头指向表示磁畴方向。

铁磁质磁化过程示意图



当再加外磁场时， \mathbf{M} 不再增加，磁化达到饱和（**WHY?**）

（3） 畴壁的外移及磁畴磁矩的取向是不可逆的，当外磁场减弱或消失时磁畴不按原来变化规律逆着退回原状。这解释了磁滞的原因。

（4）既然磁畴起因于电子自旋磁矩的自发有序排列，而热运动是有序排列的破坏者，因而当温度高于某一临界时，磁畴就不复存在，铁磁质就变为普通顺磁质。这一临界温度叫居里点。 T_c

$$Fe : T_c = 770^\circ C; Ni : T_c = 358^\circ C$$

把一块有剩磁的铁磁质加热至居里点以上再冷却，其剩磁会完全消失。

三种磁介质起因的比较

顺磁性 来自分子的固有磁矩。

抗磁性 起因于电子的轨道运动在外磁场作用的变化。

铁磁性 起因于电子自旋磁矩的自发有序排列。



铁磁质的特性

1. 磁导率 μ 不是一个常量，它的值不仅决定于原线圈中的电流，还决定于铁磁质样品磁化的历史。
 B 和 H 不是线性关系。
2. 有很大的磁导率。
放入线圈中时可以使磁场增强 $10^2 \sim 10^4$ 倍。
3. 有剩磁、磁饱和及磁滞现象。
4. 温度超过居里点时，铁磁质转变为顺磁质。

问:

1、 在工厂搬移烧到赤红的钢锭，为什么不用电磁铁起重机？



三 铁磁质的应用

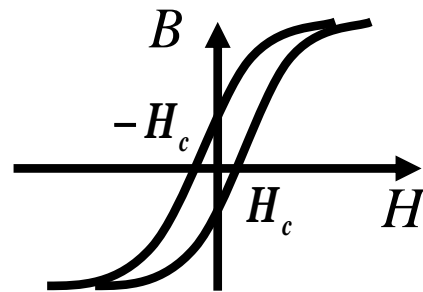
(1) 软磁材料

软磁材料作变压器的铁芯。

纯铁，硅钢坡莫合金 (Fe, Ni)，铁氧体等。

μ_r 大，易磁化、易退磁（起始磁化率大）。饱和磁感应强度大，矫顽力 (H_c) 小，磁滞回线的面积窄而长，损耗小 (HdB 面积小)。

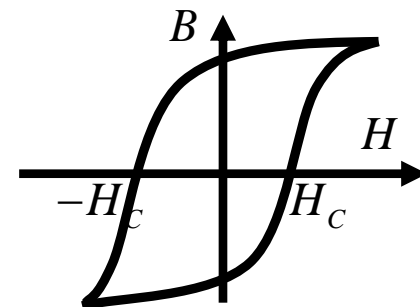
还用于继电器、电机、以及各种高频电磁元件的磁芯、磁棒。



(2) 硬磁材料——作永久磁铁

钨钢，碳钢，铝镍钴合金

矫顽力 (H_c) 大 ($>10^2 \text{A/m}$)，剩磁 B_r 大
磁滞回线的面积大，损耗大。



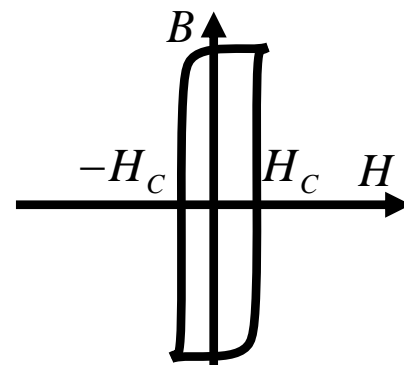
还用于磁电式电表中的永磁铁。
耳机中的永久磁铁，永磁扬声器。

(3) 矩磁材料——作存储元件

锰镁铁氧体，锂锰铁氧体

$B_r = B_s$ ， H_c 不大，磁滞回线是矩形。

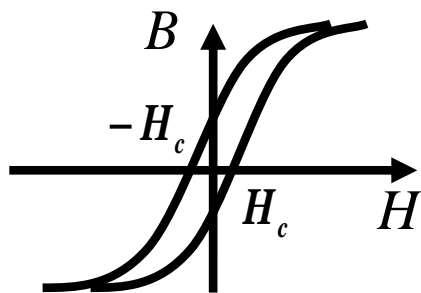
当+脉冲产生 $H > H_c$ 使磁芯呈 $+B$ 态，则 - 脉冲产生 $H < -H_c$ 使磁芯呈 $-B$ 态，可做为二进制的两个态，用于计算机 **记忆元件**。



小 结

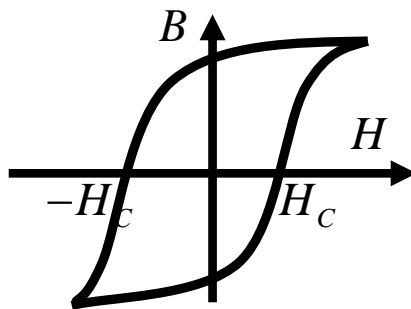
A 软磁材料

作变压器的铁芯



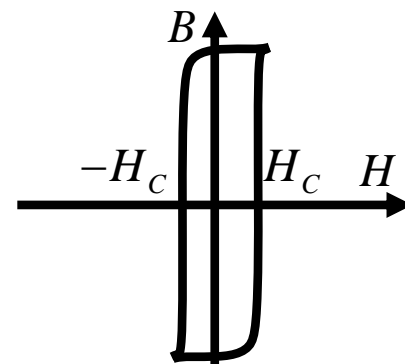
B 硬磁材料

作永久磁铁



C 矩磁材料

作存储元件



2. 如图，曲线 I、II、III 分别表示三种不同磁介质的 B-H 关系。请判断那一条代表抗磁质或顺磁质？

