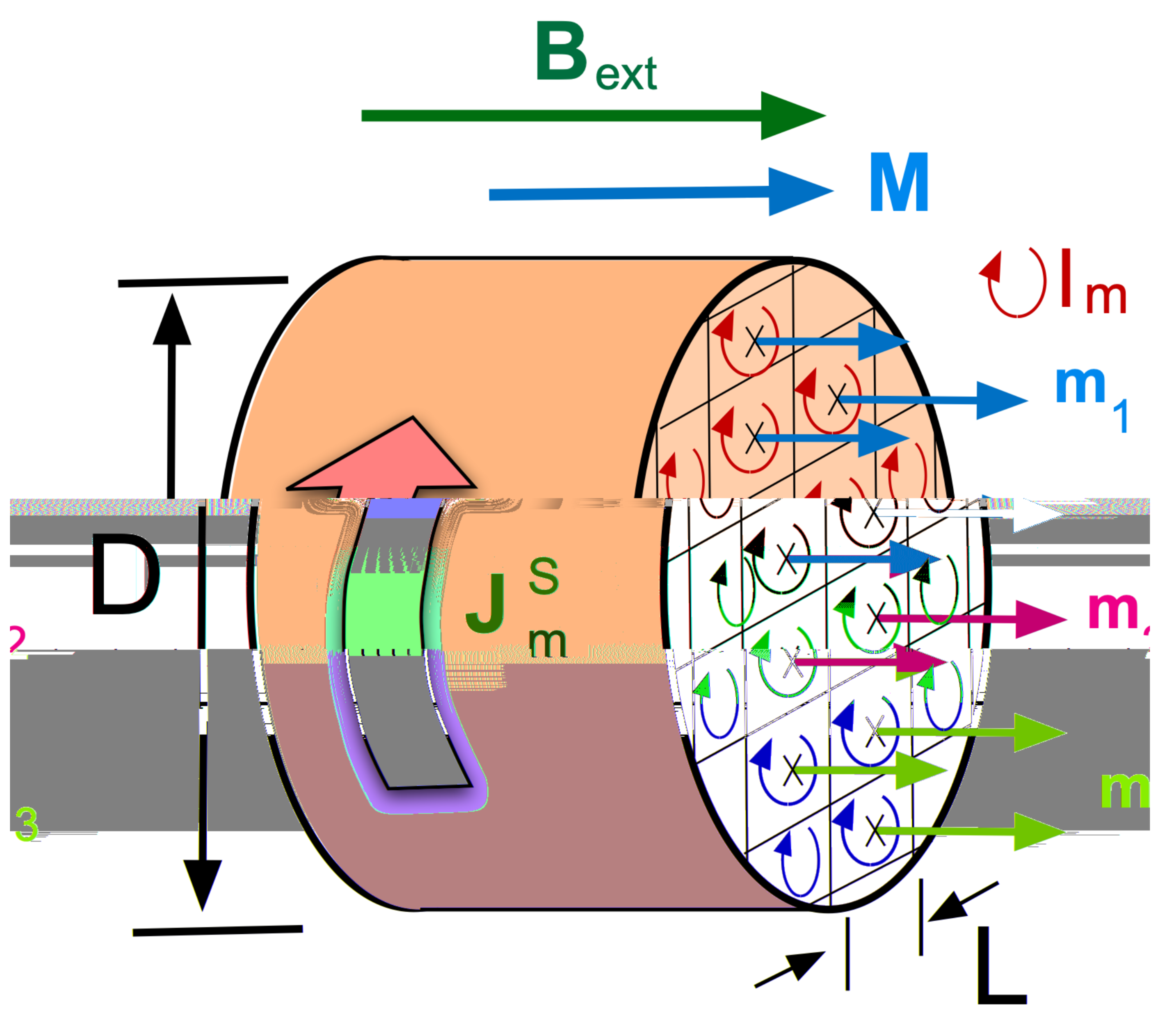
Vector magnetización



Empleando la suma vectorial $\mathbf{M}_{tot}$ de los momentos magnéticos $\mathbf{m}_j$ de las $j \quad 1 \quad N$ moléculas del material se define el vector de magnetización como el momento magnético por unidad de volumen,

$$\boldsymbol{M}_{tot} = \sum_{j=1}^{N} \boldsymbol{m}_j$$

$$\boxed{\boldsymbol{M}(\boldsymbol{r}') = \frac{d\boldsymbol{M}_{tot}}{dv'} = \lim_{\Delta v' \to 0} \frac{1}{\Delta v'} \sum_{j=1}^{N} \boldsymbol{m}_j}$$

en el punto $\mathbf{r}'$ del volumen del material V' de la figura y en el vacío se tiene **M** $\quad 0$

Las corrientes de magnetización volumétrica $\mathbf{J}_m^v$ y superficial $\mathbf{J}_m^s$ se obtienen a partir de la magnetización **M**,

$$\left\{ \begin{array}{ll} \boldsymbol{J}_m^v = \nabla \wedge \boldsymbol{M} & \text{(volumétrica)} \\ \boldsymbol{J}_m^s = \boldsymbol{M} \wedge \boldsymbol{n} & \text{(superficial)} \end{array} \right.$$

Para considerarlas en las ecuaciones de la magnetostática de materiales se introduce la intensidad de campo magnético **H**

$$\boxed{H = \frac{B}{\mu_o} - M}$$

Ecuaciones de la magnetostática de medios materiales, donde $\mathbf{J}_c$ son las corrientes de conducción (transporte de cargas).

$$\left\{ \begin{array}{l} \boxed{\nabla \wedge \boldsymbol{H} = \boldsymbol{J}_c} \\ \boxed{\nabla \cdot \boldsymbol{B} = 0} \end{array} \right.$$

En general: $\nabla \cdot \boldsymbol{H} = -\nabla \cdot \boldsymbol{M} \neq 0$

La relación entre **M**(**H**) entre la magnetización **M** y **H** es una ecuación constitutiva, característica de cada material. En los materiales lineales **M** $\simeq \chi_m$ **H** y se tiene,

$$B = \mu_o(H + M) = \mu_o\,(1 + \chi_m)\,H = \mu_o\,\mu_r\,H$$

$$\boldsymbol{B} = \mu_o\,\mu_r\,\boldsymbol{H}$$

$$\boldsymbol{B} = \frac{\mu_r - 1}{\mu_o\,\mu_r}\,\boldsymbol{M}$$

Materiales

Vacío	$\mu_r = 1$	**M** = 0
Paramagnéticos	$\mu_r > 1$	(**B**, **M**) paralelos
Diamagnéticos	$\mu_r < 1$	(**B**, **M**) antiparalelos
Ferromagnéticos	**M**(**H**)	Expresión compleja

Cálculo de la intensidad de campo magnético

Teorema de Ampère

$$\oint_c \boldsymbol{H} \cdot d\boldsymbol{l} = \int_{S(c)} \boldsymbol{J}_c \cdot d\boldsymbol{s}_c = I_c$$

Para un material lineal donde **B** $\mu_o\,\mu_r$ **H** podemos emplear la ley de Biot-Savart;

Si $\mathbf{J}_c$ es la densidad de corriente de transporte de cargas

$$\boldsymbol{H}(\boldsymbol{r}) = \frac{1}{4\,\pi\,\mu_r} \int_{V'} \frac{\boldsymbol{J}_c(\boldsymbol{r}') \wedge (\boldsymbol{r} - \boldsymbol{r}')}{|\boldsymbol{r} - \boldsymbol{r}'|^3}\,dv'$$

Si I_c es la corriente en un hilo conductor

$$\boldsymbol{H}(\boldsymbol{r}) = \frac{1}{4\,\pi\,\mu_r} \oint_c \frac{d\boldsymbol{l}_c'(\boldsymbol{r}') \wedge (\boldsymbol{r} - \boldsymbol{r}')}{|\boldsymbol{r} - \boldsymbol{r}'|^3}$$