Paramagnetismo

- Se coloca un átomo con momento magnético $\bar{\mu}_B$ en un campo externo $\bar{H}$. La energía del sistema es:

$$\bar{E} = -\bar{\mu} \cdot \bar{H}$$

- Cuánticamente, el momento magnético sólo tiene dos valores posibles: paralelo o antiparalelo al campo

$$\varepsilon = -\mu_B H \quad y \quad \varepsilon = \mu_B H$$

- La función de partición es

$$Z = e^{\mu_B H/kT} + e^{-\mu_B H/kT}$$

$$= 2\cosh\left[\frac{\mu_B H}{kT}\right]$$

- El número de spines paralelos al campo será

$$N_\uparrow = \frac{e^{-\mu_B H/kT}}{Z} \cdot N$$

y el de spines antiparalelos:

$$N_\downarrow = \frac{e^{\mu_B H/kT}}{Z} N$$

- La magnetización será la diferencia entre entre los spines $\uparrow$ y $\downarrow$

$$N_\uparrow - N_\downarrow = \frac{N}{Z}\left[e^{-\mu_B H/kT} - e^{\mu_B H/kT}\right]$$

$$= \frac{2N}{Z} \operatorname{senh} \frac{\mu_B H}{kT}$$

- Reemplazando por el valor de Z:

$$M = (N_\uparrow - N_\downarrow)\mu_B = N\mu_B \tanh \frac{\mu_B H}{kT} \quad (1)$$

- La energía libre de Helmholtz resulta:

$$F = -NkT \ln Z$$

$$= -NkT \ln\left[2\cosh \frac{\mu_B H}{kT}\right]$$

- Hay que recordar de termodinámica que $M = -\left(\frac{\partial F}{\partial H}\right)$

$$M = N\mu_B \tanh \frac{\mu_B H}{kT}$$

que coincide con (1)

- Analicemos los límites. Si $\mu_B H \gg kT$ (campo muy intenso ó temperatura baja) entonces $\tanh\left(\frac{\mu_B H}{kT}\right) \rightarrow 1$ y

$$M = N\mu_B$$

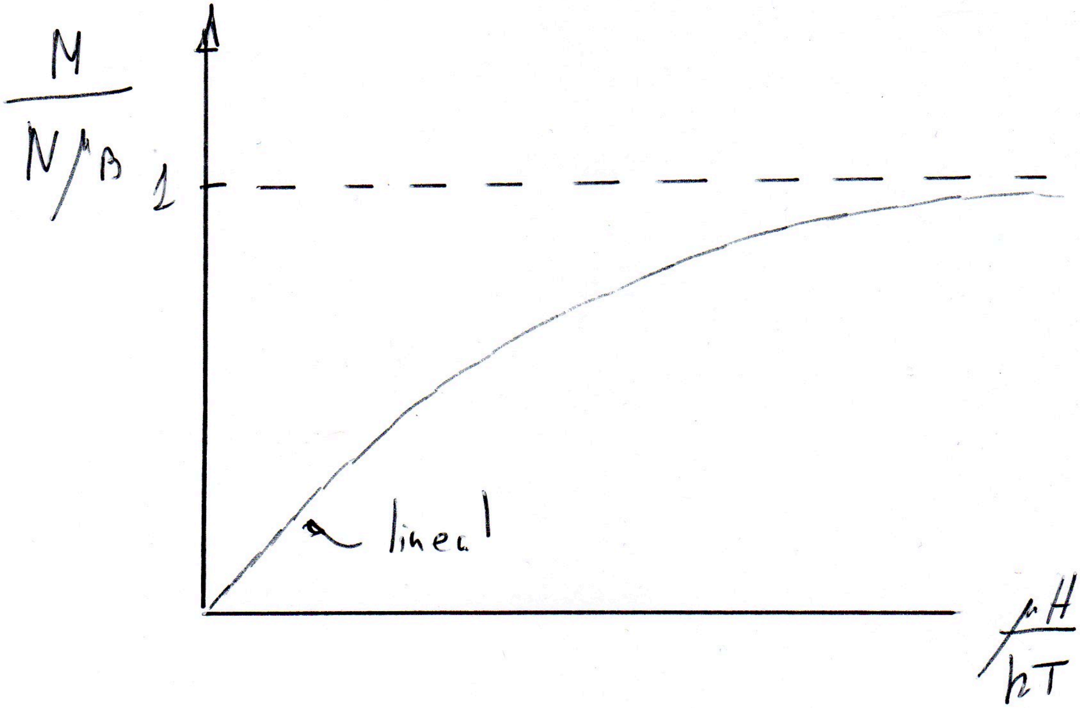
Se dice que la magnetización satura.

- Si $x \rightarrow 0$, entonces $\tanh x \sim x$

$$M = N\mu_B \cdot \frac{\mu_B H}{kT} = C_c \frac{H}{T}$$

Esta es la ley de Curie conocida empíricamente y que ahora se puede deducir:

$$C_c = \frac{N\mu_B^2}{k} = 0.376 \frac{m^3 K}{mol}$$



- La energía será:

$$E = N k_B T^2 \left(\frac{\partial \ln Z}{\partial T}\right)_H$$

$$= -N k \left(\mu_B H\right) \tanh\left(\frac{\mu_B H}{kT}\right)$$

- El calor específico resulta trivialmente

$$C_H = \left(\frac{\partial E}{\partial T}\right)_H = N \left(\frac{\mu_B H}{kT}\right)^2 \operatorname{sech} \frac{\mu_B H}{kT}$$