

escola de inverno do ifgw
julho de 2015

estudo dirigido

detecção acústica do
efeito magnetocalórico

antonio manojel mansanares

atividades propostas

- cálculo simples da variação da temperatura e da pressão provocada pela absorção de um feixe laser em uma célula fechada contendo gás;
- dedução e resolução da equação de difusão do calor em uma dimensão (meio semi-infinito sem fontes de calor);
- cálculo da amplitude de oscilação da temperatura na superfície de um metal (usar a mesma intensidade do laser e frequência de modulação do primeiro cálculo);
- cálculo de δT_S para o Gd usando-se $\delta H = 30 \text{ Oe}$;
- cálculo de ΔT_S e ΔS_T para o Gd usando-se $\Delta H = 50 \text{ kOe}$;
- vídeos sobre o efeito magnetocalórico e refrigeração magnética.

variação da temperatura provocada pela absorção de um feixe laser em uma célula contendo gás

ΔT ?

potência: 0,1 mW

duração: 5,0 ms

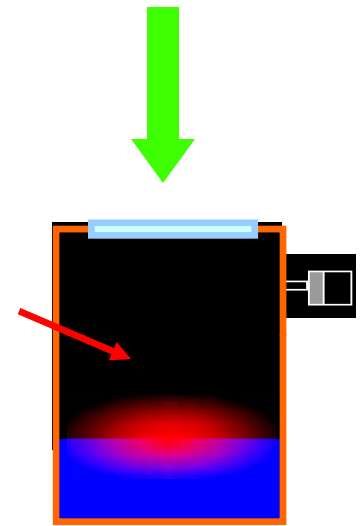
$Q = 5,0 \times 10^{-7} \text{ J}$

$Q = m c \Delta T$

$c_{\text{ar}} = 1,0 \text{ J / g } ^\circ\text{C}$

$\Delta T = 4,2 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}$

1,0 cm³ de ar
(1,2 x 10⁻³ g)



variação da pressão

ΔP ?

antes do pulso luminoso:

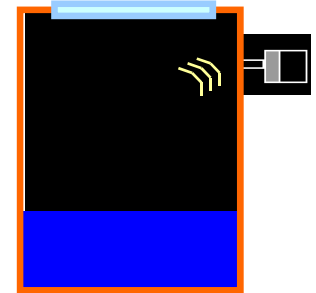
$$P_0 V = n R T_0$$

após o pulso:

$$(P_0 + \Delta P) V = n R (T_0 + \Delta T)$$

$$\Delta P = P_0 (\Delta T / T_0)$$

$$\Delta P = 4,0 \times 10^{-2} \text{ Pa}$$



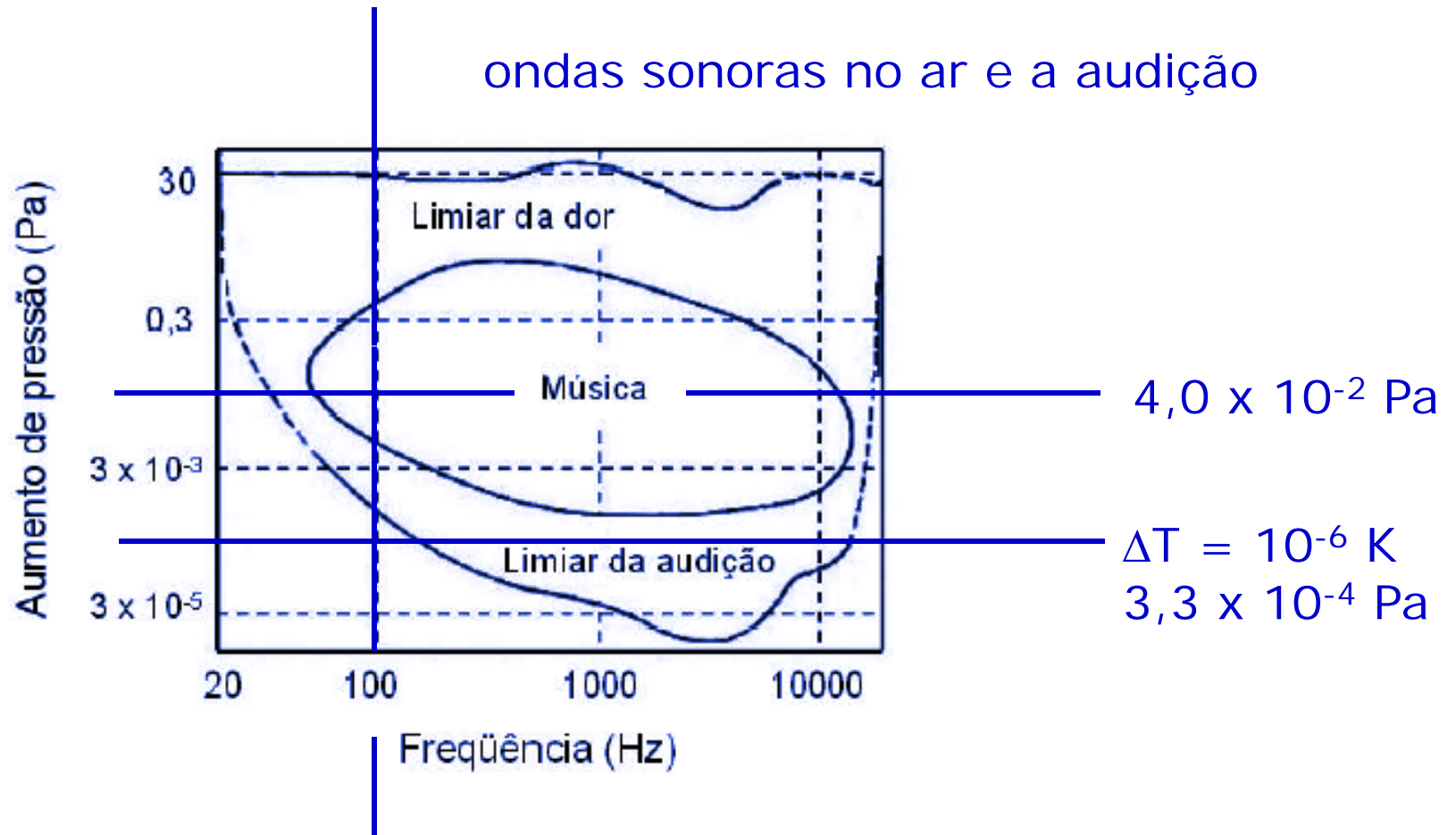
$$P_0 = 1,01 \times 10^5 \text{ Pa}$$

$$T_0 = 300 \text{ K}$$

$$\Delta T = 4,2 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}$$

variação da pressão

ondas sonoras no ar e a audição



5 ms (x 2)

dedução da equação de difusão do calor

Definição de calor específico:

$$Q = m c_p \Delta T$$

Volume infinitesimal dV :

$$\delta Q = dm c_p \Delta T = (\rho dV) c_p (T - T_0)$$

Derivando com relação ao tempo:

$$\delta \dot{Q} = (\rho dV) c_p \frac{\partial}{\partial t} (T - T_0) = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} dV$$

$$\dot{Q} = \int_{\text{vol}} \left(\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \right) dV$$

Sem fontes de calor no volume:

$$\dot{Q} = - \oint_{\text{sup}} \vec{J} \cdot \hat{n} da = - \int_{\text{vol}} \nabla \cdot \vec{J} dV$$

$$\text{Portanto: } \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = - \nabla \cdot \vec{J}$$

c_p é o calor específico a pressão constante
 \vec{J} é o fluxo de calor: calor/(área x tempo)

dedução da equação de difusão do calor

Lei de Fourier:

$$\vec{J} = -k \nabla T$$

Tomando-se o divergente:

$$\nabla \cdot \vec{J} = -k \nabla \cdot \nabla T = -k \nabla^2 T$$

$$-\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot \vec{J} = -k \nabla^2 T$$

$$\nabla^2 T - \frac{\rho c_p}{k} \frac{\partial T}{\partial t} = 0$$

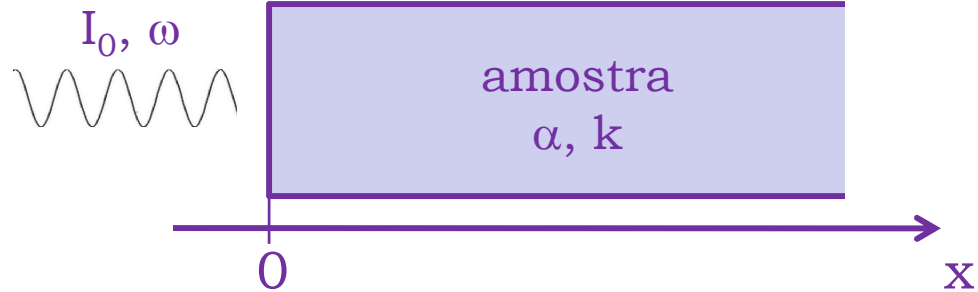
$$\nabla^2 T - \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} = 0, \quad \alpha = \frac{k}{\rho c_p}$$

k é a condutividade térmica

α é a difusividade térmica

solução da equação de difusão do calor

luz laser
modulada em intensidade
na frequência $\omega = 2\pi f$



$$\nabla^2 T - \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} = 0$$

$$T(x, t) = \theta(x) e^{i\omega t}$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = i\omega T$$

$$\nabla^2 T - \frac{i\omega}{\alpha} T = 0$$

$$\nabla^2 T - \sigma^2 T = 0$$

$$\nabla^2 \theta - \frac{i\omega}{\alpha} \theta = 0$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{i\omega}{\alpha}} = (1+i) \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}} = \frac{1+i}{\mu}$$

$$\mu = \sqrt{\frac{2\alpha}{\omega}}$$

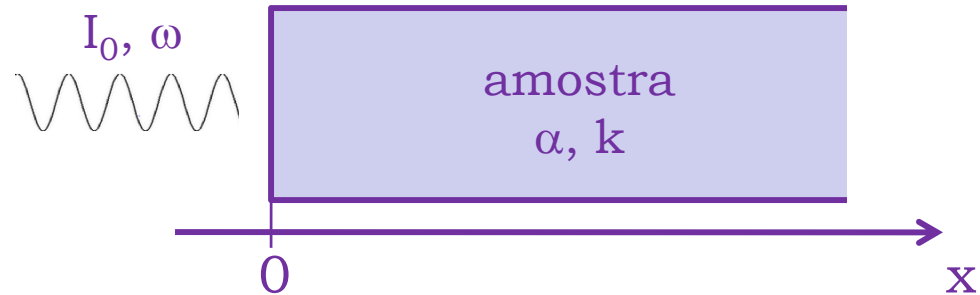
$$\theta(x) = A e^{\sigma x} + B e^{-\sigma x}$$

$$\theta(x) \text{ finito para } x \rightarrow \infty \Rightarrow A = 0$$

$$T(x, t) = B e^{-\sigma x} e^{i\omega t}$$

$$T(x, t) = B e^{-x/\mu} e^{i(\omega t - x/\mu)}$$

solução da equação de difusão do calor



Continuidade do fluxo de energia em $x = 0$:

$$I_0 = J|_{x=0^+} = -k \left. \frac{dT}{dx} \right|_{x=0^+} = -k (-\sigma B)$$

Assim, $B = \frac{I_0}{k\sigma} e$:

$$T(x, t) = \frac{I_0}{k\sigma} e^{-x/\mu} e^{i(\omega t - x/\mu)}$$

amplitude de oscilação da temperatura na superfície de um metal

Alumínio:

diâmetro do feixe laser: $2 \text{ mm} = 2 \times 10^{-3} \text{ m}$

$k = 200 \text{ W/mK}$

$I_0 = 0,1 \text{ mW}/(\pi \cdot 10^{-6} \text{ m}^2) = 3,1 \times 10^1 \text{ W/m}^2$

$\alpha = 8,4 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$

$\omega = 2\pi \times 100 \text{ Hz} = 628 \text{ rad/s}$

$$|\theta(x=0)| = \frac{I_0}{k|\sigma|}$$

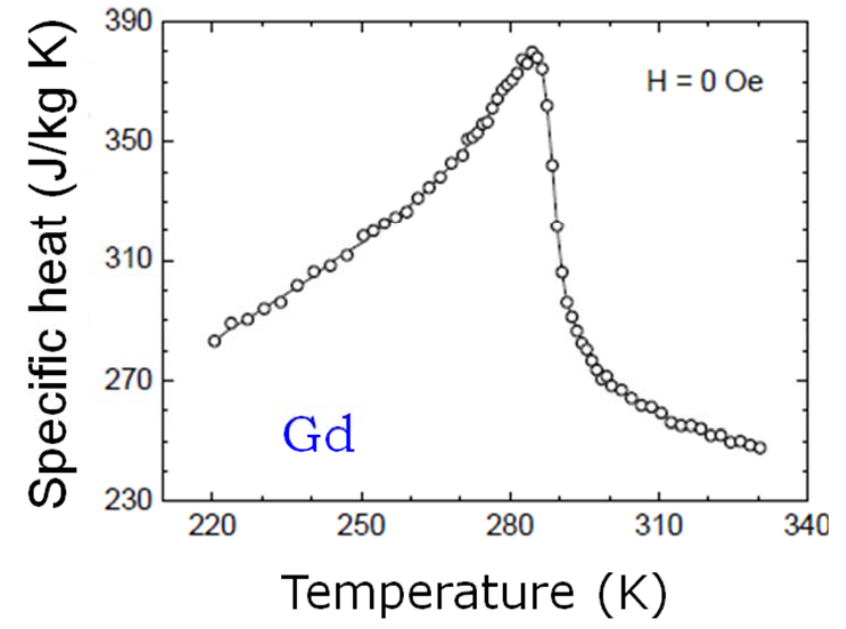
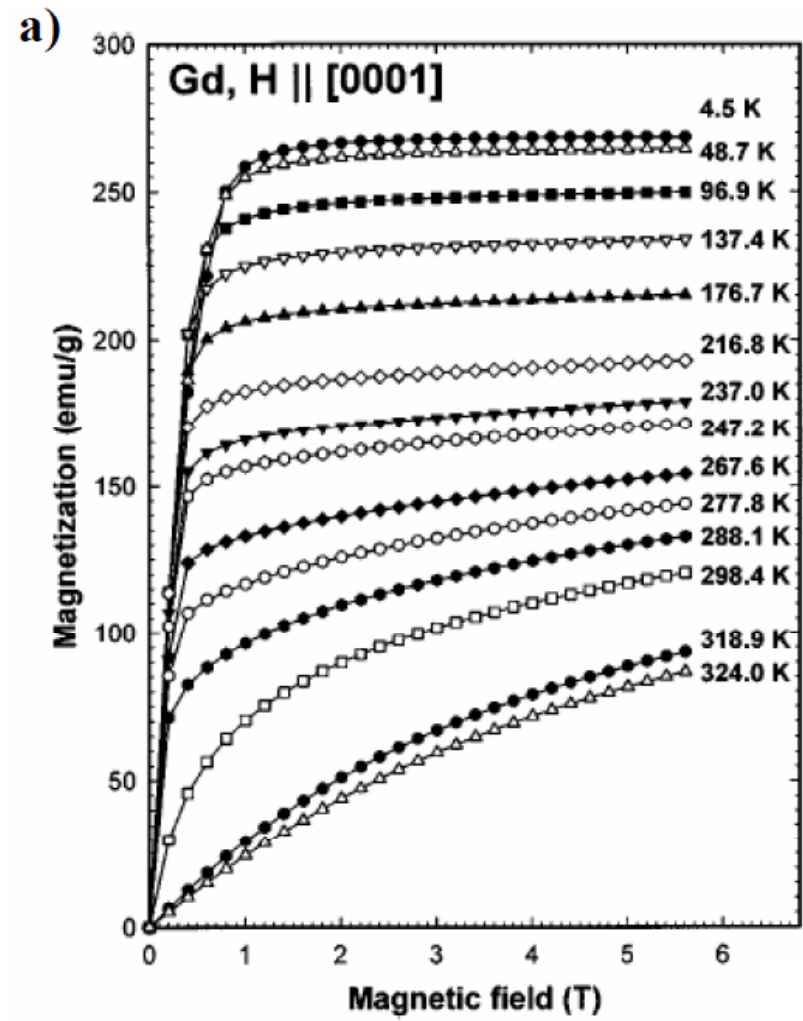
$$|\sigma| = \left| \sqrt{\frac{i\omega}{\alpha}} \right| = \sqrt{\frac{\omega}{\alpha}} = \sqrt{\frac{628 \text{ rad/s}}{8,4 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}}} = 2,7 \times 10^3 \text{ m}^{-1}$$

$$|\theta(0)| = \frac{3,1 \times 10^1 \text{ W/m}^2}{200 \frac{\text{W}}{\text{mK}} \cdot 2,7 \times 10^3 \text{ m}^{-1}} = 5,7 \times 10^{-5} \text{ K}$$

δT_s para o Gd

$$\delta T_s = -\frac{T}{C_H} \left(\frac{\partial m}{\partial T} \right)_H \delta H$$

$\delta H = 30 \text{ Oe}$



δT_s para o Gd

$$\delta T_s = -\frac{T}{C_H} \left(\frac{\partial m}{\partial T} \right)_H \delta H$$

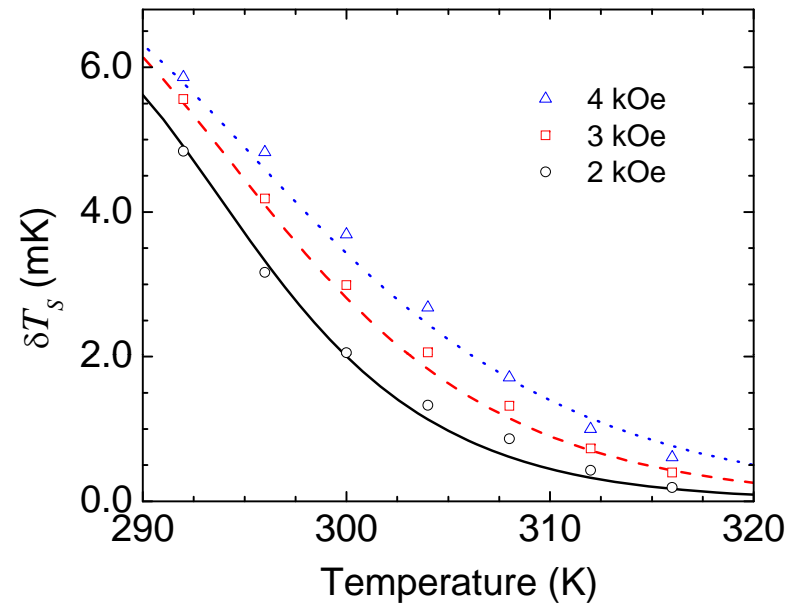
$$T = 290 \text{ K}$$

$$\delta H = 30 \text{ Oe}$$

$$-\left(\frac{\partial m}{\partial T} \right)_H \sim 2 \frac{\text{emu}}{\text{g K}}$$

$$C_H \sim 300 \frac{\text{J}}{\text{kgK}} = 3 \times 10^6 \frac{\text{erg}}{\text{g K}}$$

$$\delta T_s \sim -\frac{290 \text{ K}}{3 \times 10^6 \frac{\text{erg}}{\text{g K}}} \times 2 \frac{\text{emu}}{\text{g K}} \times 30 \text{ Oe} = 5,8 \text{ mK}$$



ΔT_S e ΔS_T para o Gd

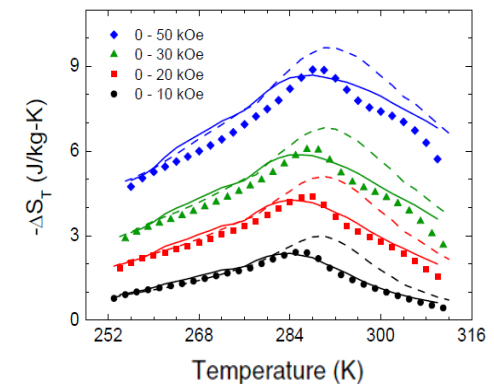
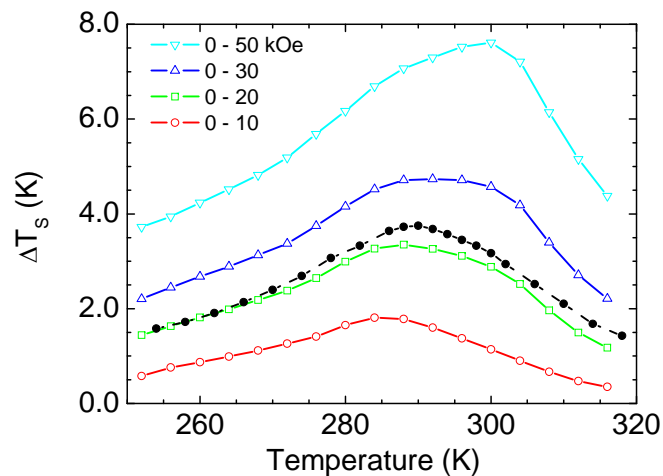
$$\Delta H = 50 \text{ kOe}$$

$$\Delta T_S \sim \frac{5,8 \text{ mK}}{30 \text{ Oe}} \times 50 \text{ kOe} = 9,7 \text{ K}$$

$$\Delta S_T \approx -\frac{C_H}{T} \Delta T_S$$

$$\frac{C_H}{T} \sim \frac{300 \frac{\text{J}}{\text{kg K}}}{290 \text{ K}} \sim 1 \frac{\text{J}}{\text{kg K}^2}$$

$$\Delta S_T \sim -1 \frac{\text{J}}{\text{kg K}^2} \times 9,7 \text{ K} = -9,7 \frac{\text{J}}{\text{kg K}}$$



vídeos sobre o efeito magnetocalórico e refrigeração magnética

Ames video:

<https://www.youtube.com/watch?v=WGtWKouzf2c>

BASF video:

<https://www.youtube.com/watch?v=xVhAvp17xJ8>

Oak Ridge video:

<https://www.youtube.com/watch?v=mAUrQG91OuU>

GE videos:

<https://www.youtube.com/watch?v=IynM3MBUqyc>

<https://www.youtube.com/watch?v=WlKKKMTA7XM>