

TERMODINÁMICA y FÍSICA ESTADÍSTICA I

Tema 3 - CALORIMETRÍA Y TRANSMISIÓN DEL CALOR

Capacidad calorífica y su medida. Calor específico. Calor latente. Transmisión del calor. Conductividad térmica. Ley de Fourier. Convección del calor. Radiación térmica del cuerpo negro. Ley de Stefan-Boltzmann y ley de Wien. Técnicas experimentales de calorimetría y de medida de la conductividad térmica.

BIBLIOGRAFÍA RECOMENDADA:

- Zemansky, Capítulo 4.

The logo for Cartagena99 features the text 'Cartagena99' in a stylized, green, serif font. The '99' is significantly larger and more prominent than the 'Cartagena' part. Below the text is a horizontal orange and yellow gradient bar.

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

Capacidad calorífica y calor específico

CRITERIO DE SIGNOS:



CAPACIDAD CALORÍFICA (variable extensiva): energía calorífica que hay que suministrar a un cuerpo para aumentar un grado su temperatura:

$$C = \lim_{\Delta T \rightarrow 0} \frac{Q}{\Delta T} = \frac{\delta Q}{dT}$$

Unidades: cal/°C ó J/K

1 caloría: energía calorífica necesaria para aumentar un grado la temperatura de 1 gramo de agua pura. [→ de 14.5°C a 15.5°C]

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

Capacidad calorífica y calor específico

CRITERIO DE SIGNOS:



CALOR ESPECÍFICO (variable específica): energía calorífica por unidad de masa o por mol de sustancia que hay que suministrar a un cuerpo para aumentar un grado su temperatura:

$$c = \lim_{\Delta T \rightarrow 0} \frac{1}{m} \frac{Q}{\Delta T} = \frac{1}{m} \frac{\delta Q}{dT}$$

Unidades: cal/(g·°C) ó J/(kg·K)

$$c = \lim_{\Delta T \rightarrow 0} \frac{1}{n} \frac{Q}{\Delta T} = \frac{1}{n} \frac{\delta Q}{dT}$$

Unidades: cal/(mol·°C) ó J/(mol·K)

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

Capacidad calorífica y calor específico

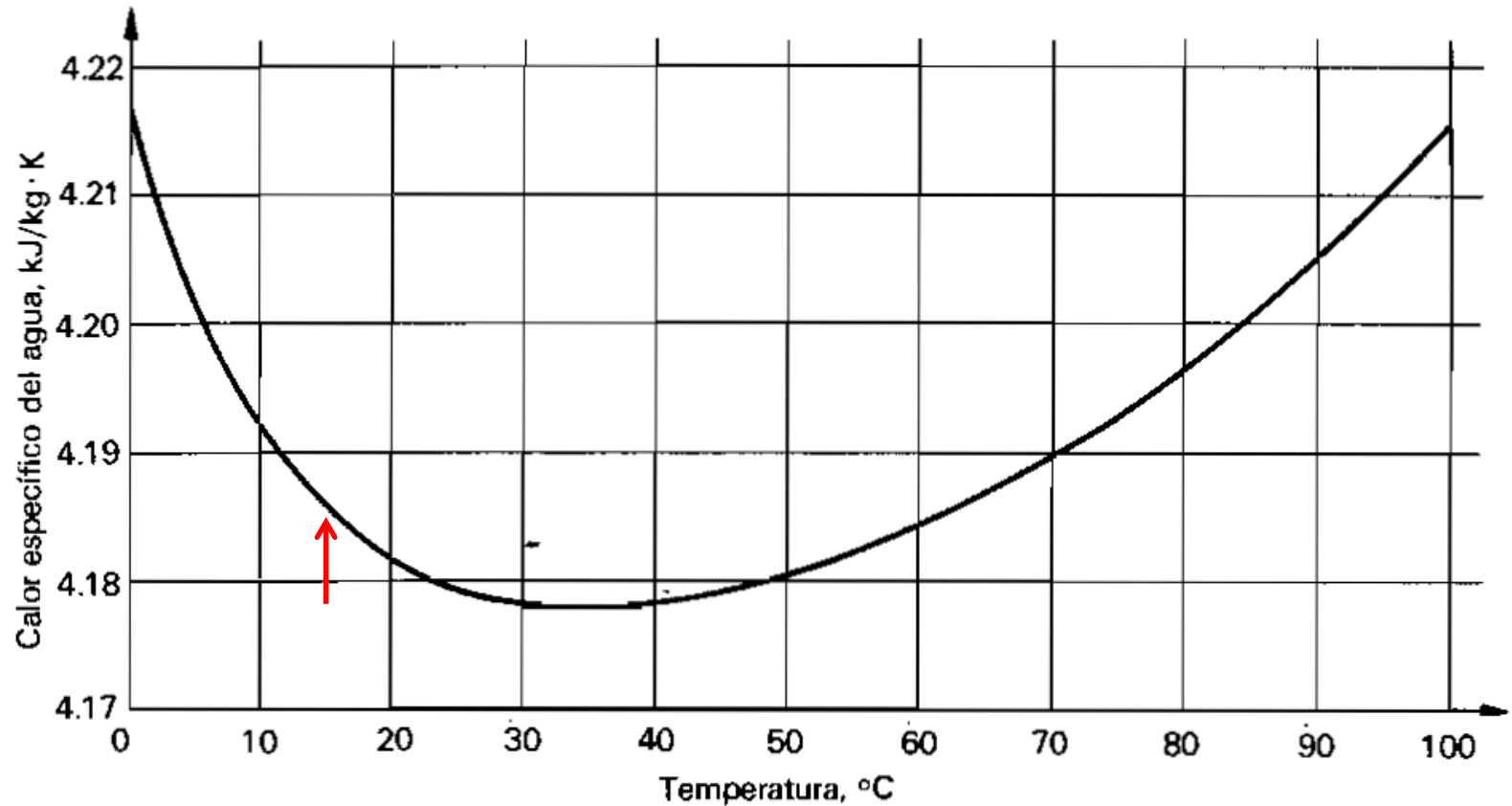


Figura 4.5. Calor específico del agua.

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

Capacidad calorífica a volumen o a presión constante

$$\delta Q = dU + PdV$$

$$C = \frac{Q}{\Delta T}$$

$V = \text{const.}$

$$Q = \Delta U$$

$$C_V = \left(\frac{\delta Q}{dT} \right)_V = \left(\frac{\partial U}{\partial T} \right)_V$$

$P = \text{const.}$

$$Q = \Delta U + P\Delta V$$

$$C_P = \left(\frac{\delta Q}{dT} \right)_P$$

$$C_P = \left(\frac{\delta Q}{dT} \right)_P > C_V = \left(\frac{\delta Q}{dT} \right)_V$$

En sólidos, $-W_{\text{dilatación}} \ll \Delta U \Rightarrow C_P \approx C_V$

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

Calorimetría

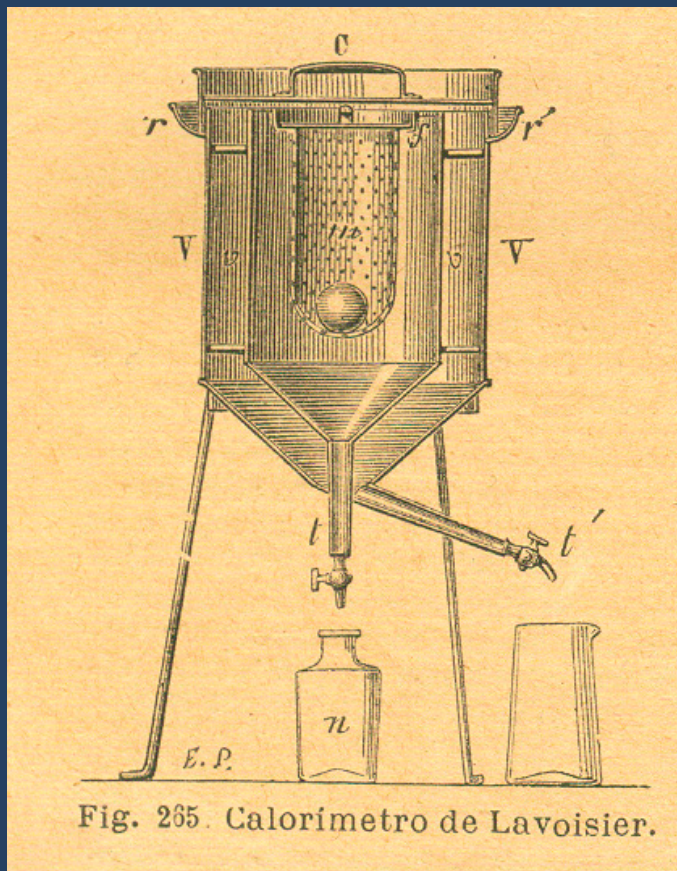


Tabla 16-1 Calor específico y capacidad calorífica para varios sólidos y líquidos a 20°C

Sustancia	c , kJ/kg·K	c , kcal/kg·K o $^{\circ}\text{C}$	C_m , J/mol·K
Agua	4,18	1,00	75,2
Alcohol etílico	2,4	0,58	111
Aluminio	0,900	0,215	24,3 !
Bismuto	0,123	0,0294	25,7 !
Cobre	0,386	0,0923	24,5 !
Hielo (-10°C)	2,05	0,49	36,9
Mercurio	0,140	0,033	28,3
Oro	0,126	0,0301	25,6 !
Plata	0,233	0,0558	24,9 !
Plomo	0,128	0,0305	26,4 !
Tungsteno	0,134	0,0321	24,8 !
Zinc	0,387	0,0925	25,2 !

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

(Principio de equipartición de la energía)

En equilibrio, todos los grados de libertad de un sistema que contribuyen a su energía total, y que dependen cuadráticamente de una variable independiente, aportan una energía de $\frac{1}{2} k_B T$ por partícula ó $\frac{1}{2} RT$ por mol.

$$[R = N_A k_B = 8.314 \text{ J/mol}\cdot\text{K}]$$

- Gas ideal monoatómico: $U = \frac{1}{2} m v_x^2 + \frac{1}{2} m v_y^2 + \frac{1}{2} m v_z^2 \rightarrow 3/2 nRT$

$$\Rightarrow c_V = \frac{1}{n} \left(\frac{dU}{dT} \right)_V = \frac{3}{2} R$$

- Gas ideal diatómico: $U = \frac{1}{2} m v_x^2 + \frac{1}{2} m v_y^2 + \frac{1}{2} m v_z^2 + \frac{1}{2} I_x \omega_x^2 + \frac{1}{2} I_y \omega_y^2 \rightarrow 5/2 nRT$

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

(Principio de equipartición de la energía)

En equilibrio, todos los grados de libertad de un sistema que contribuyen a su energía total, y que dependen cuadráticamente de una variable independiente, aportan una energía de $\frac{1}{2} k_B T$ por partícula ó $\frac{1}{2} RT$ por mol.

$$[R = N_A k_B = 8.314 \text{ J/mol}\cdot\text{K}]$$

- Sólido de 3 dimensiones: LEY de DULONG y PETIT

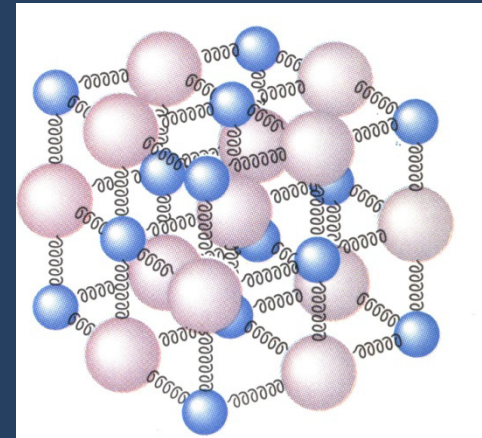


Figura 16-17 Modelo de un sólido en el que los átomos están conectados entre sí mediante muelles. La energía interna del sólido se compone de las energías de vibración cinética y potencial.

CLASES PARTICULARES, TUTORIAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVIA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

Cartagena99

• Sólido de 3 dimensiones: LEY de DULONG y PETIT

$$U = \frac{1}{2} m v_x^2 + \frac{1}{2} m v_y^2 + \frac{1}{2} m v_z^2 + \frac{1}{2} k x^2 + \frac{1}{2} k y^2 + \frac{1}{2} k z^2 \rightarrow 6/2 nRT$$

$$\Rightarrow c_V = \frac{1}{n} \left(\frac{dU}{dT} \right)_V = 3R = 24.9 J / mol \cdot K$$

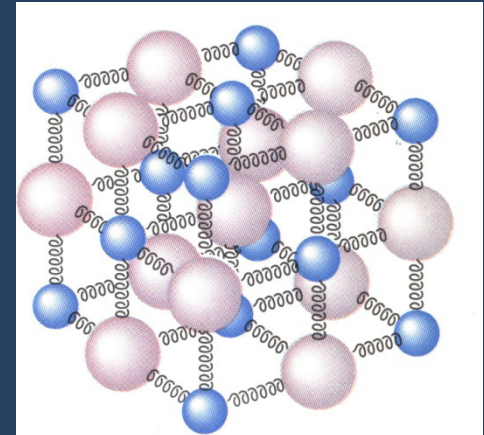
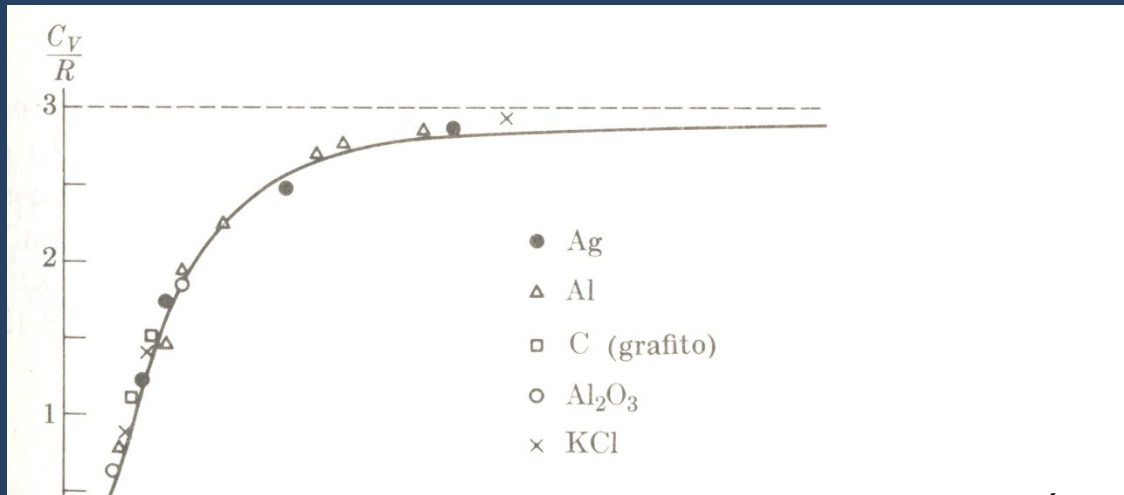


Figura 16-17 Modelo de un sólido en el que los átomos están conectados entre sí mediante muelles. La energía interna del sólido se compone de las energías de vibración cinética y potencial.

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

Transiciones de fase: calor latente

Durante una TRANSICIÓN de FASE, un cuerpo absorbe calor ($Q > 0$) mientras que su temperatura permanece constante ($T = \text{const}$)

⇒ ¡El calor específico “aparente” diverge!

CALOR LATENTE: cantidad específica de energía térmica necesaria para cambiar de fase una sustancia a su temperatura de transición:

$$L = Q / m \quad [\text{J/kg}]$$

Tabla 16-2 Punto de fusión normal (PF), calor latente de fusión L_f , punto de ebullición normal (PE), y calor latente de vaporización L_v para varias sustancias a 1 atm

Sustancia	PF, K	L_f , kJ/kg	PE, K	L_v , kJ/kg
Agua	273,15	333,5	373,15	2257
Alcohol etílico	159	109	351	879
Azufre	388	38,5	717,75	287
Bromo	266	67,4	332	369
Cobre	1356	205	2839	4726
Dióxido de carbono	—	—	194,6*	573*
Helio	—	—	4,2	21
Mercurio	234	11,3	630	296
Nitrógeno	63	25,7	77,35	199

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

a 1 atm.

Calorimetría de transiciones de fase

DSC (Differential Scanning Calorimetry)



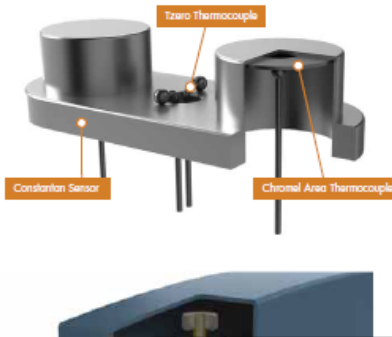
Q SERIES™ DSC TECHNOLOGY

Tzero® Cell Design

The Tzero cell is designed for excellence in both heating and cooling. The heat flow sensor is machined for symmetry from a single piece of durable, thin wall, high response constantan and directly brazed to the silver heating block. Design benefits include faster signal response, flat and reproducible baselines, superior sensitivity and resolution, improved data precision, and unmatched ruggedness.

A chromel/constantan Tzero thermocouple is located symmetrically between the sample and reference sensor platforms, and acts as an independent measurement and furnace control sensor. Matched chromel area thermocouples are welded to the underside of each sensor platform, providing independently measured sample and reference heat flows that result in superior DSC and MDSC® results.

Auto Lid

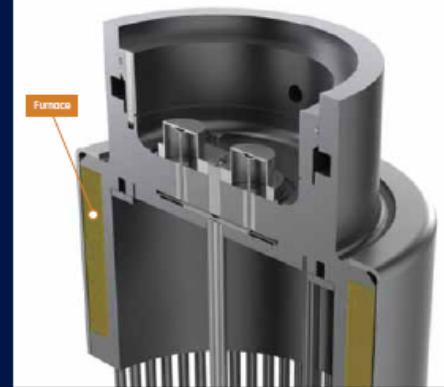


Cooling Rods & Ring

The unique design features an array of nickel cooling rods that connect the silver furnace with the cooling ring. This design produces superior cooling performance over a wide temperature range, higher cooling rates and better agility from heating to cooling operation. Lower sub-ambient temperatures and faster turnaround times can be obtained with our expanded range of cooling accessories in isothermal, programmed or ballistic cooling, and MDSC® experiments.

Furnace

The Tzero® transducer is enclosed in a high thermal conductivity, silver furnace, which uses rugged, long-life Platinel™ windings. Purge gases are accurately and precisely metered by digital mass flow controllers, and preheated prior to introduction



Cartagena99

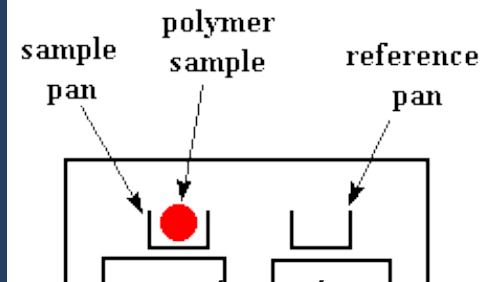
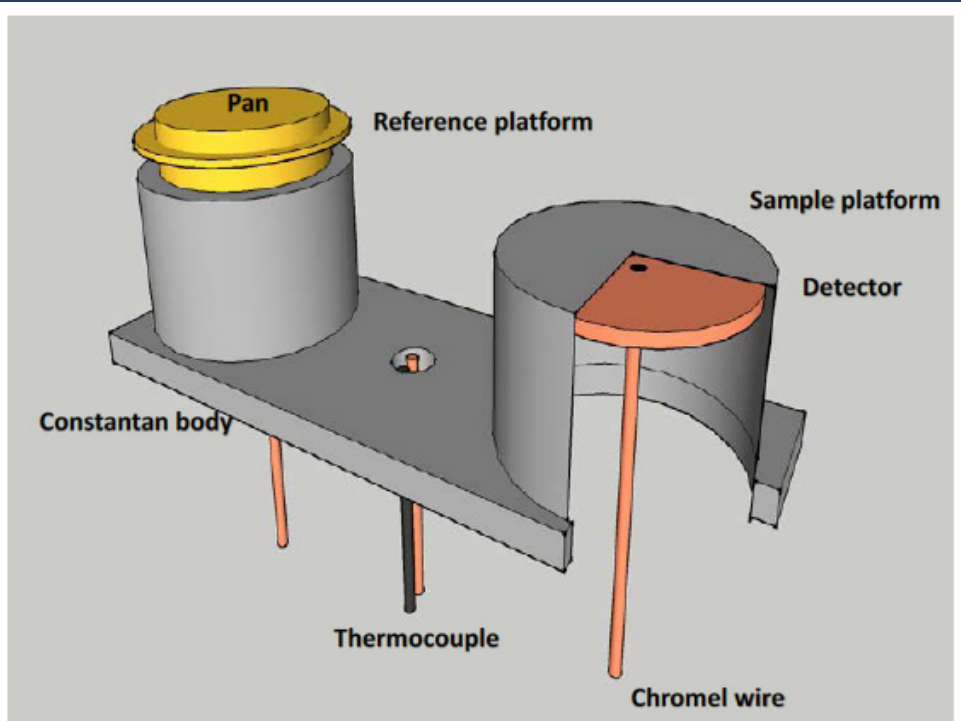
CLASES PARTICULARES, TUTORIAS TECNICAS ONLINE
LLAMA O ENVIA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

Calorimetría de transiciones de fase

DSC

(Differential Scanning Calorimetry)



Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORIAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVIA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

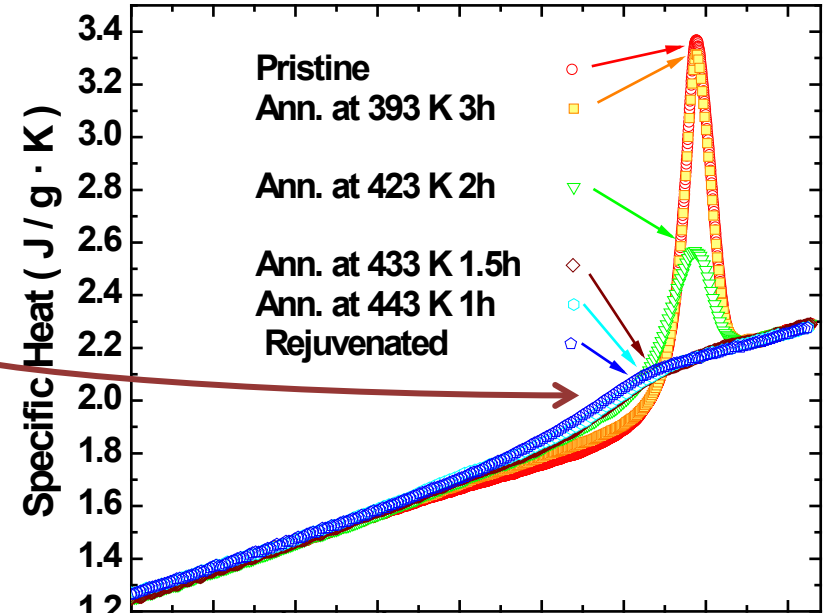
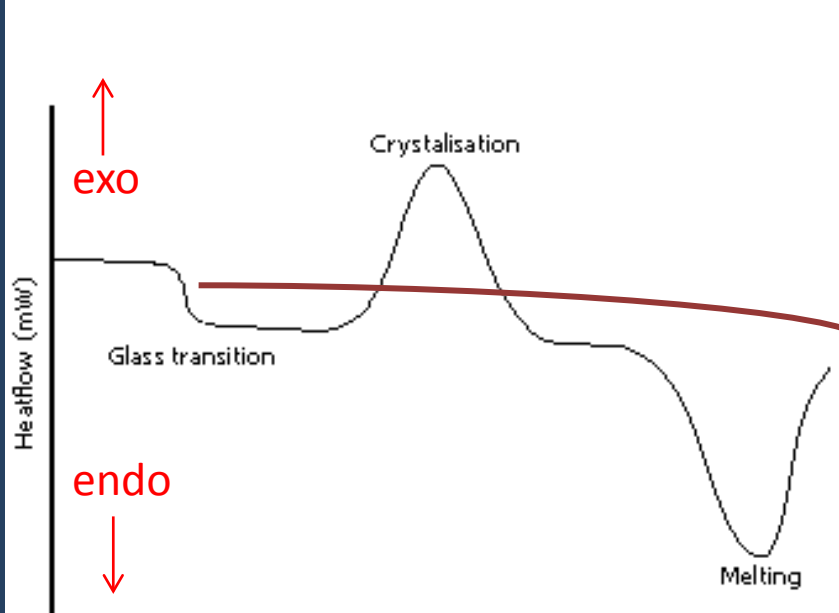
and regulate heat flow

Calorimetría de transiciones de fase

DSC

(Differential Scanning Calorimetry)

Features of a DSC curve



CLASES PARTICULARES, TUTORIAS TECNICAS ONLINE
LLAMA O ENVIA WHATSAPP: 689 45 44 70

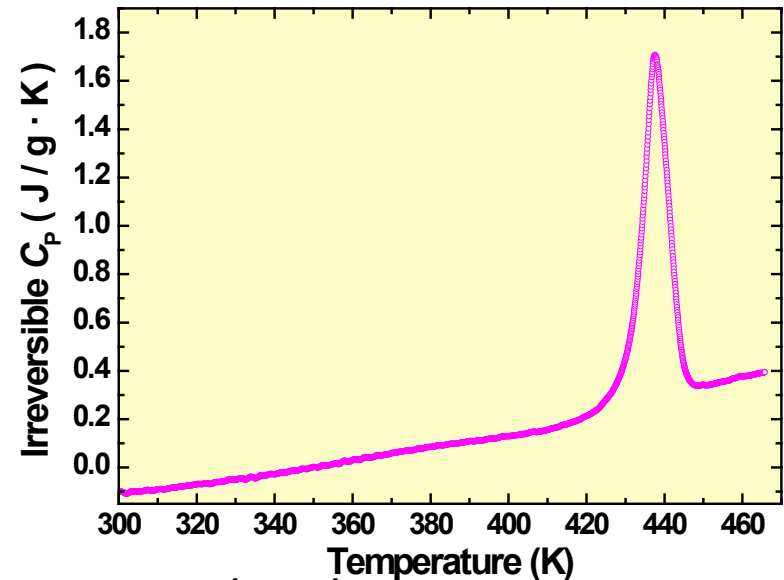
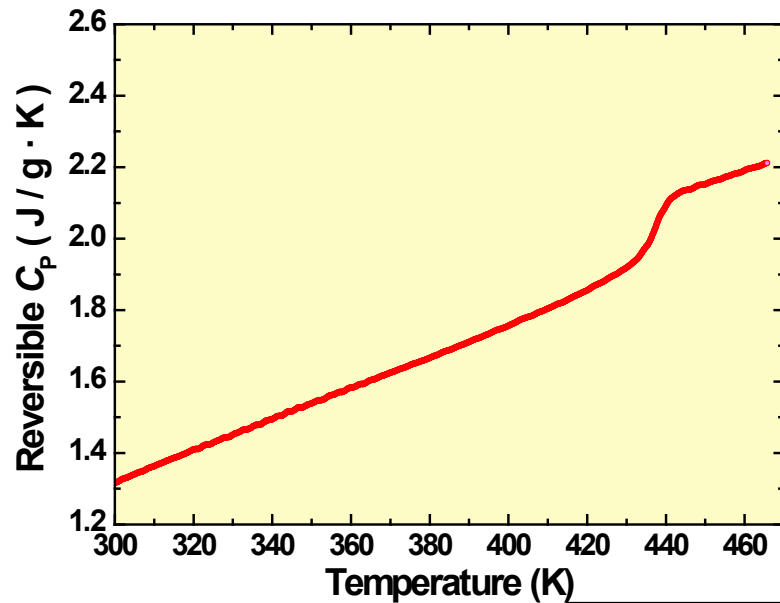
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

Cartagena99

Calorimetría de transiciones de fase

TM-DSC

(Temperature-Modulated Differential Scanning Calorimetry)



Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

Transmisión del calor

- CONDUCCIÓN TÉRMICA

(consecuencia de las interacciones entre átomos o moléculas que están vibrando; se transmite energía pero no masa)

- CONVECCIÓN TÉRMICA

(movimiento macroscópico de la masa de un fluido)

- RADIACIÓN TÉRMICA

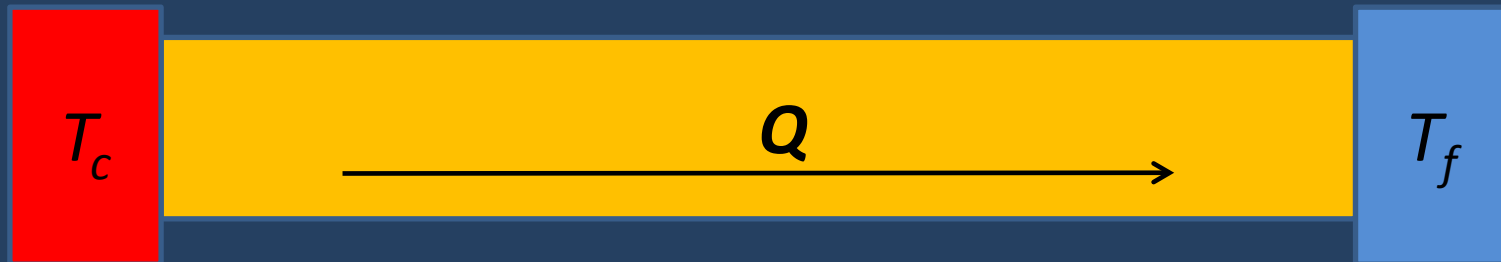
(radiación electromagnética emitida por la superficie de un cuerpo a $T > 0$)

The logo for Cartagena99 features the text 'Cartagena99' in a stylized, green, serif font. The '99' is significantly larger and more prominent than the rest of the text. Below the text is a horizontal orange and yellow gradient bar.

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

Transmisión del calor: conducción térmica



En estado estacionario:

$$|\dot{Q}| = \frac{\delta Q}{dt} = \kappa \cdot A \cdot \left| \frac{\Delta T}{\Delta x} \right| \quad (\text{LEY de FOURIER})$$

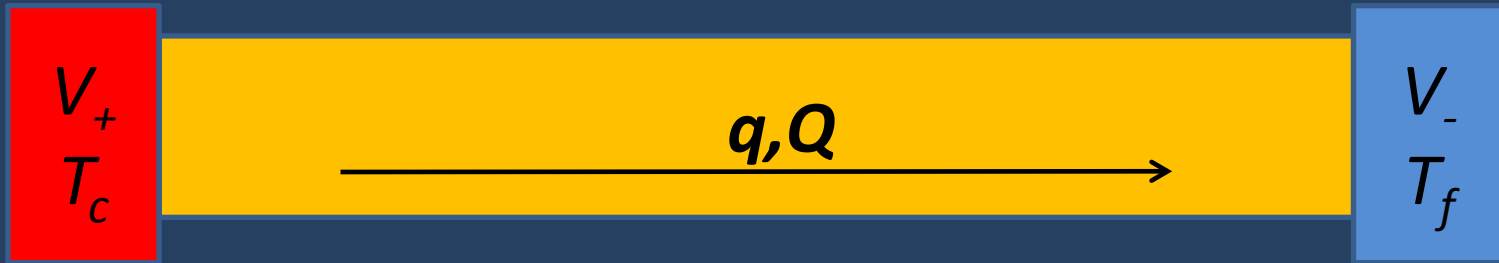
Coefficiente de conductividad térmica κ : watt/(m·K)

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

Analogía entre la conducción térmica y la conducción eléctrica



LEY de FOURIER

$$|\phi| = \frac{\delta Q}{dt} = \kappa \cdot A \cdot \left| \frac{\Delta T}{\Delta x} \right|$$

$$\vec{j}_t = -\kappa \cdot \vec{\nabla} T$$

$$R_t = \frac{l}{A} \frac{1}{\kappa}$$

LEY de OHM

$$|I| = \frac{dq}{dt} = \sigma \cdot A \cdot \left| \frac{\Delta V}{\Delta x} \right|$$

$$\vec{j}_e = -\sigma \cdot \vec{\nabla} V$$

$$R_e = \frac{l}{A} \frac{1}{\sigma}$$

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

Cartagena99

Transmisión del calor: convección térmica

- **CONVECCIÓN TÉRMICA:** movimiento macroscópico de la masa de un fluido

Corriente de convección: corriente de un fluido que absorbe calor en un lugar y luego se desplaza a otro donde se mezcla con una porción más fría del fluido cediendo calor

$$|\dot{Q}| = \frac{\delta Q}{dt} = h \cdot A \cdot \Delta T$$

h: Coeficiente de convección

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

Transmisión del calor: radiación térmica

R : potencia radiante emitida/absorbida por unidad de área:

$$R = \varepsilon R_{cn} \quad (\text{Ley de Kirchhoff})$$

emisividad
(= coeficiente de absorción)

potencia radiante emitida por un “cuerpo negro”

Ley de Stefan-Boltzmann: $R_{cn} = \sigma T^4$

Constante de Stefan $\sigma = 5.6705 \times 10^{-8}$ watt/(m²·K⁴)

**Calor neto absorbido por un cuerpo a temperatura T
en un entorno a temperatura T_0 :**

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

Transmisión del calor: radiación térmica

Ley de Stefan-Boltzmann:

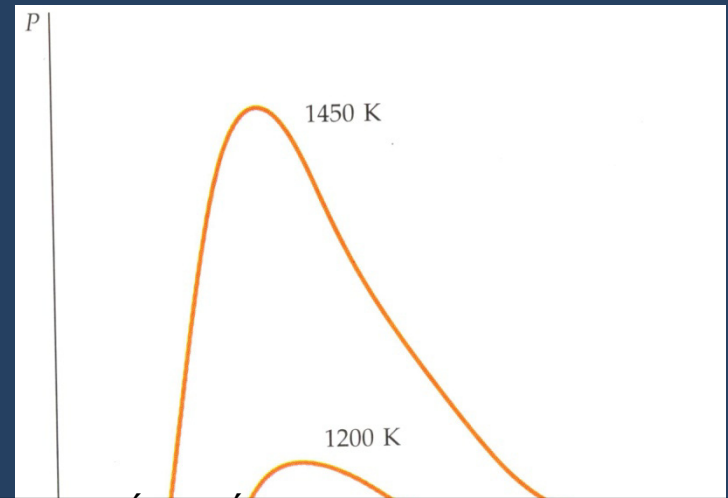
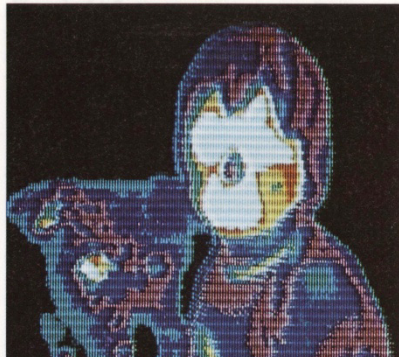
$$R_{cn} = \sigma T^4$$

Constante de Stefan $\sigma = 5.6705 \times 10^{-8}$ watt/(m²·K⁴)

Ley “de desplazamiento” de Wien:

$$\lambda_{\max} = \frac{2.898 \text{ mm} \cdot \text{K}}{T}$$

termografías



Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

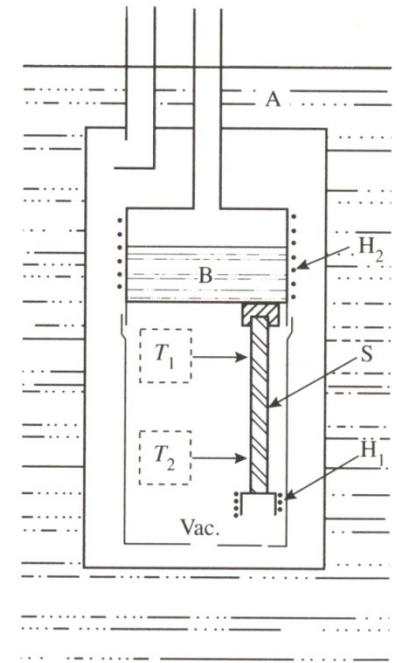
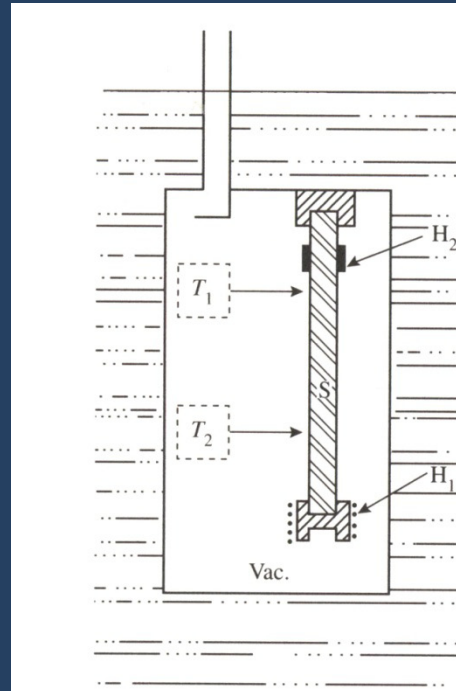
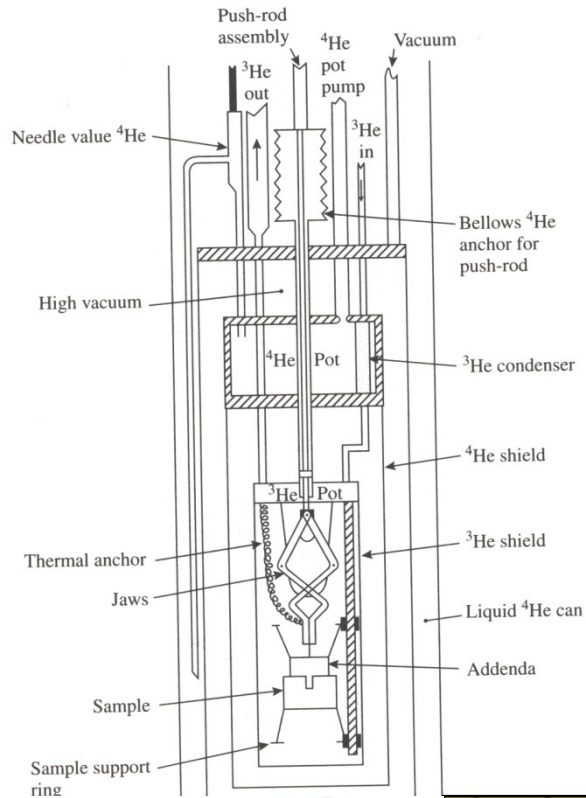
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

(a)

(b)

λ

Técnicas experimentales de medida del calor específico y de la conductividad térmica a bajas temperaturas

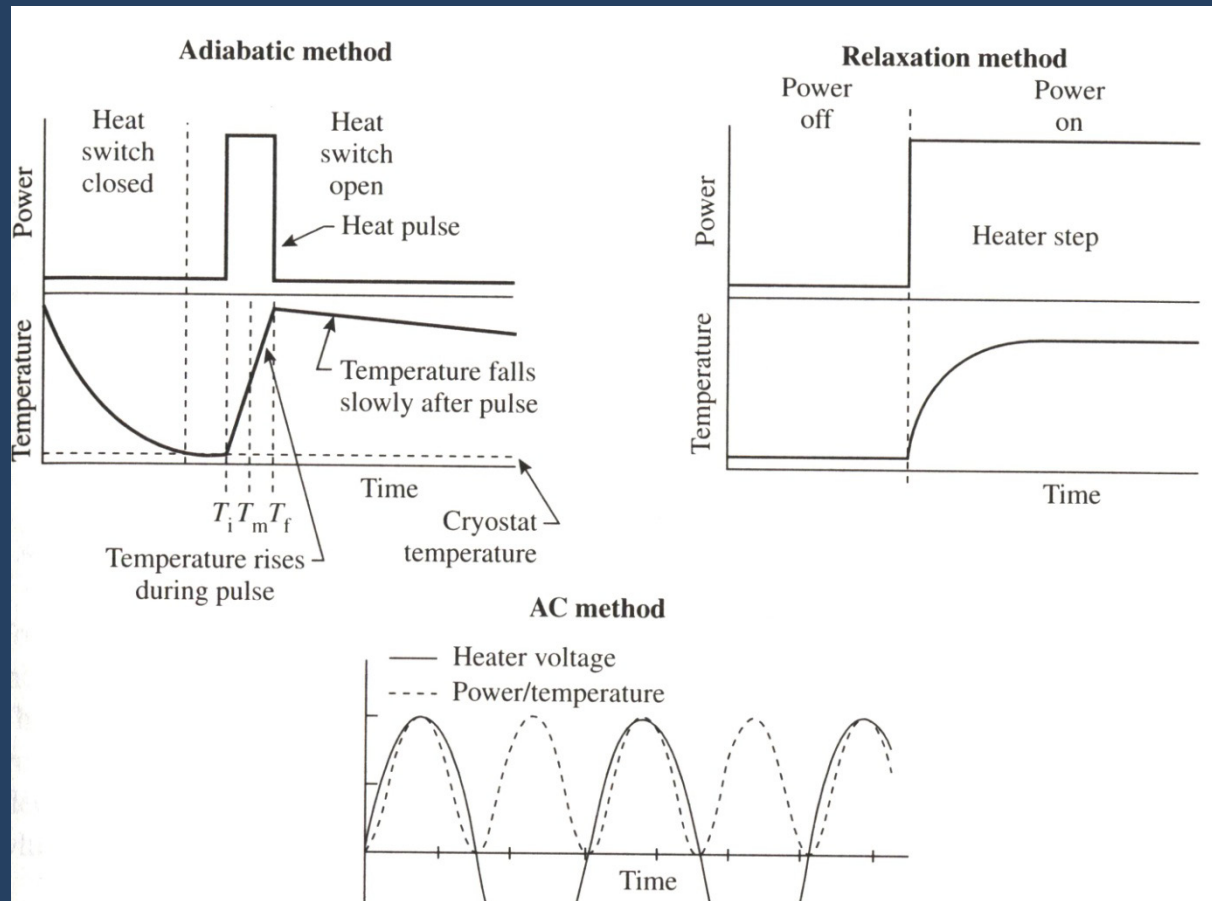


Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

Calor específico a bajas temperaturas: Métodos de medida

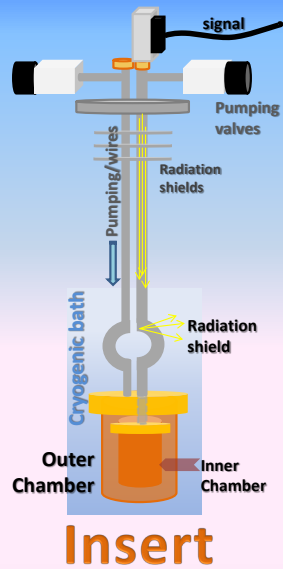
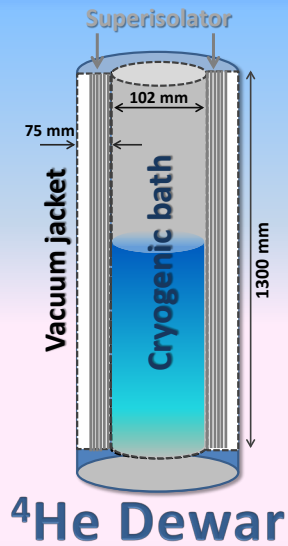


Cartagena99

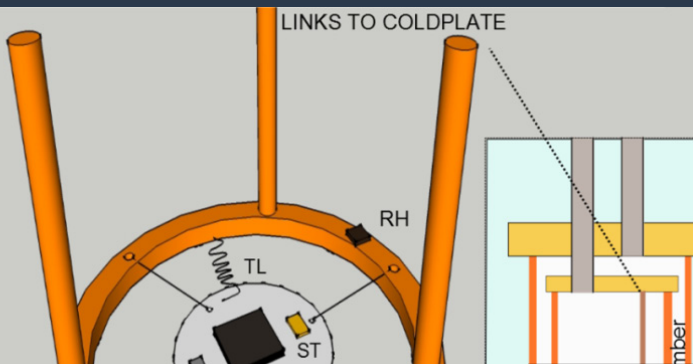
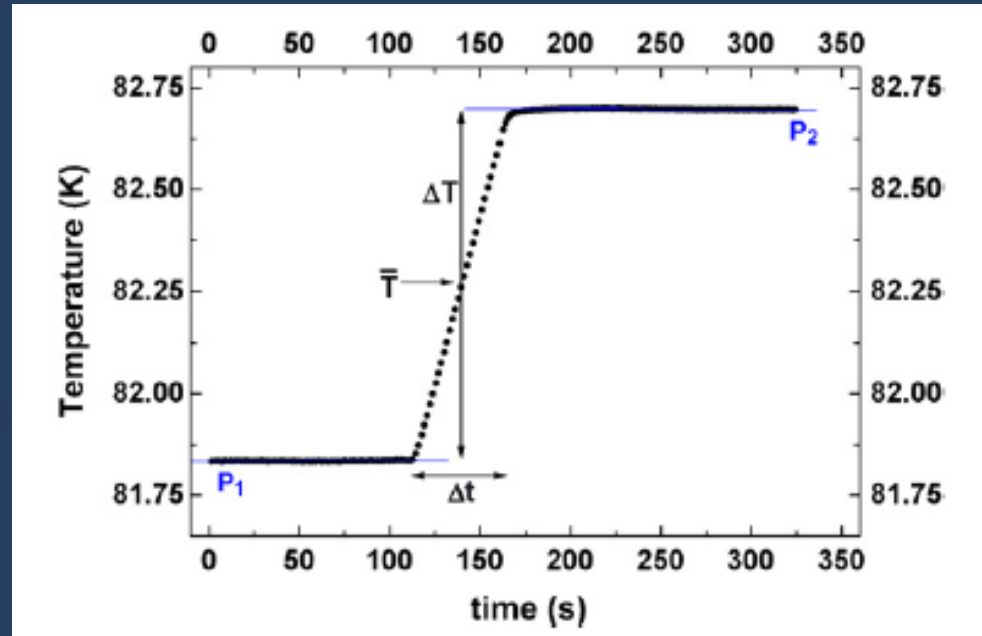
CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

Calor específico a bajas temperaturas: Métodos de medida



MÉTODO ADIABÁTICO ó de NERNST



$$Q = \frac{1}{\rho} \rho Q$$

$$Q = V \cdot I \cdot \Delta t$$

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
 LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

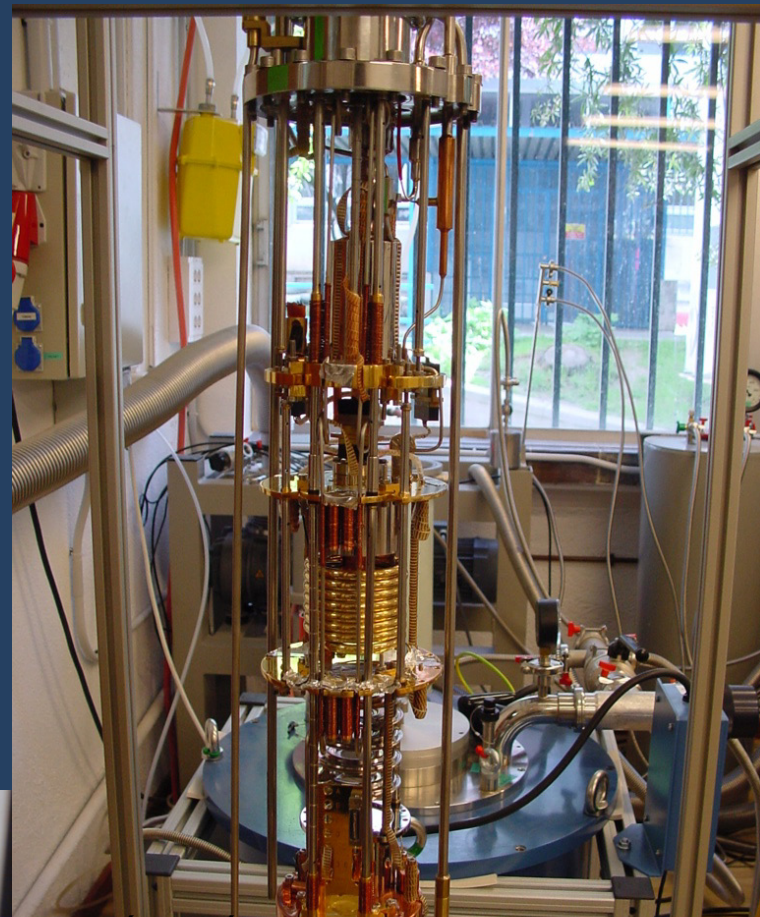
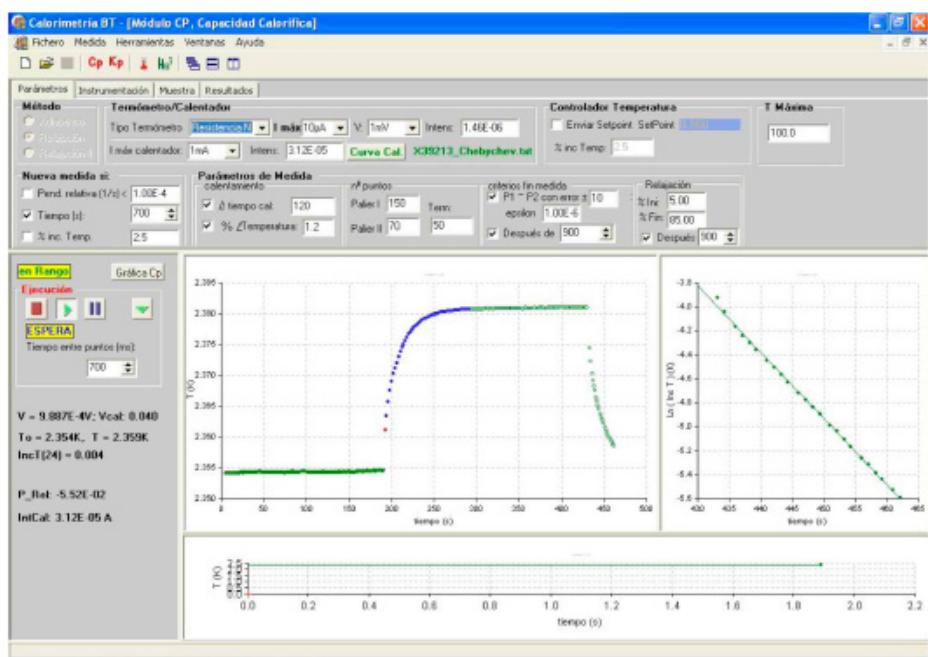
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
 CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

Cartagena99

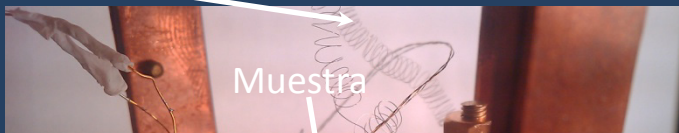
Calorimetría a bajas temperaturas

Refrigerador de dilución ^3He - ^4He : 10mK - 2K

MÉTODO de RELAJACIÓN TÉRMICA



Contacto térmico



Termómetro

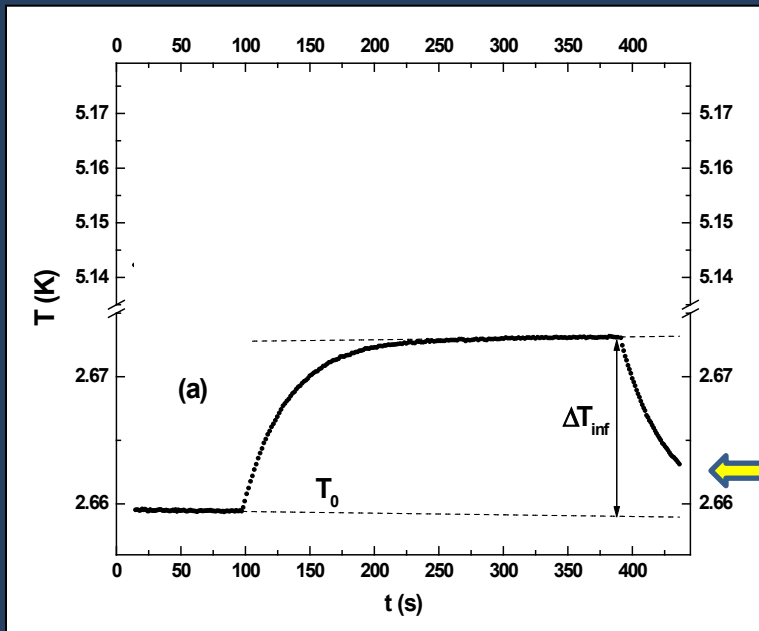
Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORIAS TECNICAS ONLINE
LLAMA O ENVIA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

Calentador

Calor específico a bajas temperaturas: Métodos de medida



$$T(t) = T_0(t) + \Delta T_{\infty} \exp(-t / \tau)$$

$$\tau = RC$$

← RELAJACION (I)

$$C_p = K \cdot \tau$$

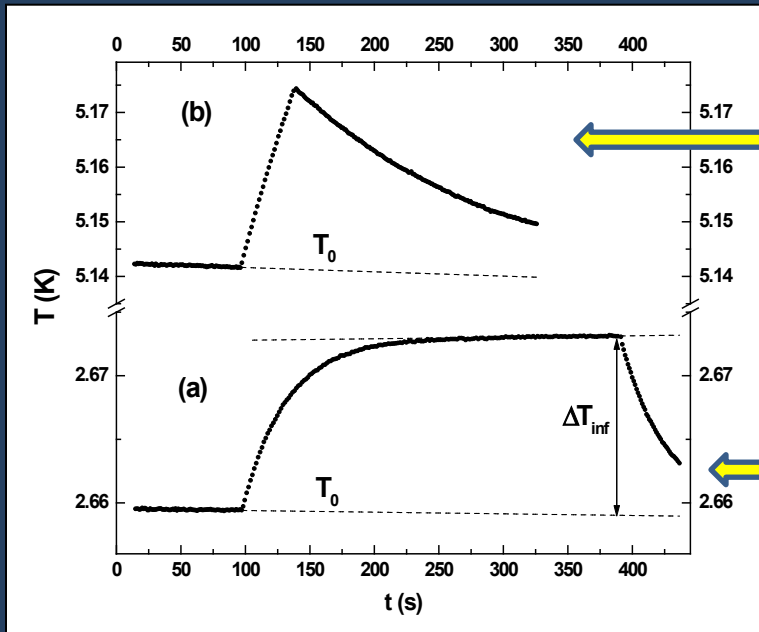
$$K = \frac{V_h I_h}{\Delta T_{\infty}}$$

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORIAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

Calor específico a bajas temperaturas: Métodos de medida



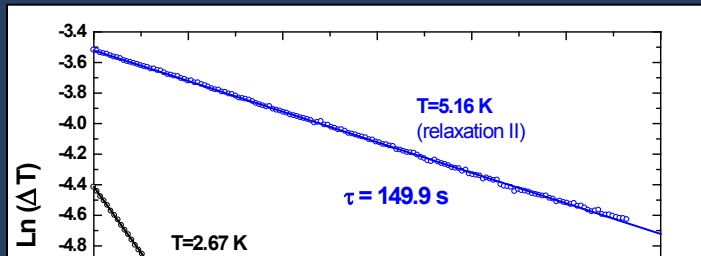
RELAJACION (II)

$$T(t) = T_0(t) + \Delta T_{\infty} \exp(-t / \tau)$$

$$\tau = RC$$

RELAJACION (I)

$$C_p = K \cdot \tau$$



CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

Cartagena99