

Termodinámica- Módulo Experimental

Luis Demetrio López–Carreño, Dr, Sc.

Grupo de Materiales con Aplicaciones Tecnológicas, GMAT
Departamento de Física
Facultad de Ciencias
Universidad Nacional de Colombia



Lista de Experimentos

- Sensores de temperatura
- Ley de Newton del enfriamiento
- Ley de Gas ideal
- Equivalente mecánico del calor
- Equivalente eléctrico del calor
- La expansión térmica
- Teoría de Debye
- Capacidad calorífica
- Conductividad térmica
- Radiación térmica
- Eficiencia de una maquina térmica

Ley de Newton del enfriamiento

- La transferencia de calor es el paso de energía térmica desde un cuerpo de mayor temperatura a otro de menor temperatura.
- Cuando un cuerpo, por ejemplo, un objeto sólido o un fluido, está a una temperatura diferente a la de su entorno u otro cuerpo, la transferencia de energía térmica, también conocida como transferencia de calor o intercambio de calor, ocurre de tal manera que el cuerpo y su entorno alcancen equilibrio térmico.
- La transferencia de calor siempre ocurre desde un cuerpo más caliente a uno más frío, como resultado del segundo principio de la termodinámica.

Ley de Newton del enfriamiento

Los modos de transferencia son diferentes procesos de transporte de calor, usualmente se agrupan en tres tipos según haya también transferencia o no transferencia de materia (o fotones) como los siguientes:

- **Conducción:** Es la transferencia de calor que se produce a través de un medio estacionario -que puede ser un sólido- cuando existe una diferencia de temperatura.
- **Convección:** Se caracteriza porque se produce por medio de un fluido (líquido o gas) que transporta el calor entre zonas con diferentes temperaturas. La convección se produce únicamente por medio de materiales fluidos.
- **Radiación:** En ausencia de un medio, existe una transferencia neta de calor debido a que todas las superficies con temperatura finita emiten energía en forma de ondas electromagnéticas.

Ley de Newton del enfriamiento

La transferencia de calor por convección se expresa mediante la ley de Newton del enfriamiento:

$$\frac{dQ}{dt} = hA_s (T_s - T_A)$$

- $h \rightarrow$ coeficiente de transmisión o intercambio de calor por convección o conductancia térmica unitaria.
- $A_s \rightarrow$ área superficial del cuerpo en contacto con el fluido.
- $T_s \rightarrow$ temperatura en la superficie del cuerpo.
- $T_A \rightarrow$ temperatura del medio ambiente.

Ley de Newton del enfriamiento

Si la temperatura del cuerpo es mayor a la del ambiente, entonces este experimenta una pérdida de calor, la cual será proporcional a la diferencia de temperatura:

$$dQ = -mcdT$$

- $m \rightarrow$ la masa del cuerpo.
- $c \rightarrow$ calor específico.
- El signo menos indica una pérdida de energía.

Ley de Newton del enfriamiento

Combinando las dos ecuaciones se puede expresar la ley de Newton del enfriamiento:

$$\frac{dT}{dt} = -\kappa (T - T_A)$$

- $\kappa \rightarrow$ constante de proporcionalidad conocida como parámetro de enfriamiento.

La solución de esta ecuación diferencial de primer orden es de la forma:

$$T(t) = A + B \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)$$

- A y B son constantes. El parámetro $\tau = \kappa^{-1}$ se mide en unidades de tiempo y representa el tiempo característico del enfriamiento.

Ley de Newton del enfriamiento

Teniendo en cuenta que en un tiempo $t = 0$ la temperatura es la temperatura inicial T_i y cuando $t \gg 1$, la temperatura tiende a la temperatura final T_f , la ecuación anterior se puede escribir como:

$$T(t) - T_f = (T_i - T_f) \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)$$

Ley de Newton del enfriamiento

- Estudie el proceso de enfriamiento de un cilindro metálico en función del tiempo. Para esto calientelo hasta la temperatura de ebullición del agua y luego tome los datos de su temperatura en función del tiempo.
- Mediante un análisis gráfico, encuentre el valor de la onstante que caracteriza el el enfriamiento (τ, κ) , así como el valor de la temperatura inicial T_i .
- Estudie el comportamiento de la constante de enfriamiento τ en función del área del cilindro.

Ley de los gases

- Las leyes de los gases establecen relaciones entre la presión, el volumen y la temperatura de una muestra de gas, en un sistema cerrado.
- Estos se comportan de forma similar en una amplia variedad de condiciones debido a la buena aproximación que tienen las moléculas que se encuentran más separadas, y hoy en día la ecuación de estado para un gas ideal se deriva de la teoría cinética.

Ley de los gases

- La ley de los gases ideales es la ecuación de estado del gas ideal, un gas hipotético formado por partículas puntuales sin atracción ni repulsión entre ellas y cuyos choques son perfectamente elásticos (conservación de momento y energía cinética). La energía cinética es directamente proporcional a la temperatura en un gas ideal.
- Los gases reales que más se aproximan al comportamiento del gas ideal son los gases monoatómicos en condiciones de baja presión y alta temperatura.

Ley de los gases

La ecuación que describe normalmente la relación entre la presión, el volumen, la temperatura y la cantidad (en moles) de un gas ideal es:

$$P \cdot V = n \cdot R \cdot T$$

- $P \rightarrow$ Presión absoluta
- $V \rightarrow$ Volumen
- $n \rightarrow$ Moles de gas
- $R \rightarrow$ Constante universal de los gases ideales
- $T \rightarrow$ Temperatura absoluta

Ley de los gases

Haciendo una corrección a la ecuación de estado de un gas ideal, es decir, tomando en cuenta las fuerzas intermoleculares y volúmenes intermoleculares finitos, se obtiene la ecuación para gases reales, también llamada ecuación de Van der Waals:

$$\left(P + \frac{a \cdot n^2}{V^2}\right) \cdot (V - nb) = n \cdot R \cdot T$$

- P , V , n , R , y $T \rightarrow$ Presión absoluta, volumen, moles de gas, constante universal de los gases ideales y temperatura absoluta.
- a y $b \rightarrow$ son constantes determinadas por la naturaleza del gas con el fin de que haya la mayor congruencia posible entre la ecuación de los gases reales y el comportamiento observado experimentalmente.

Ley de los gases

- Estudie la relación entre volumen y presión (a temperatura constante). Para ello deje una determinada cantidad de aire dentro de la jeringa. Con la jeringa fija en la pinza, añada pesas en la parte superior del embolo, mientras tanto vaya anotando el valor del volumen correspondiente. Repita este proceso para diferentes volúmenes y en lo posible para diferentes temperaturas.
- Relación entre presión y temperatura. Con una determinada cantidad de aire dentro de la jeringa, introduzca en el beaker lleno de agua. Caliente el agua e intente mantener fijo el volumen de aire mientras cambia la temperatura del aire dentro de la jeringa.

Ley de los gases

- Relación entre volumen y temperatura. Varíe la temperatura del aire en el embolo de la misma manera que en el caso anterior, pero ahora permita que el volumen cambie (manteniendo la presión constante).
- Utilice la ecuación propuesta por Van Der Waals para la descripción del comportamiento de los gases reales para hacer una simulación utilizando los datos experimentales y así poder calcular los parámetros que describen este modelo.

Equivalente eléctrico del calor

- De acuerdo con el principio de conservación de la energía, se puede afirmar que si *una cantidad de energía de algún tipo se transforma completamente en calor, la variación de energía interna resultante debe ser equivalente a la cantidad de energía entregada.*
- El concepto de equivalente mecánico del calor hace referencia a que el movimiento y el calor son mutuamente intercambiables, y que en todos los casos, una determinada cantidad de trabajo podría generar la misma cantidad de calor siempre que el trabajo hecho se convirtiese totalmente en energía calorífica.

Equivalente eléctrico del calor

- Consiste en un recipiente considerado idealmente como un sistema aislado.
- En este caso, este dispositivo contiene un líquido (generalmente H_2O), un termómetro y otros elementos como un agitador o una resistencia eléctrica.

Si por algún método suministramos una cantidad de calor Q al sistema, la temperatura de calorímetro aumentará en una cantidad ΔT . La expresión que relaciona estas cantidades es:

$$Q = (c_{H_2O}m_{H_2O} + c_{term}m_{term} + c_xm_x) \Delta T$$

Equivalente eléctrico del calor

$$Q = c_{H_2O} \left(m_{H_2O} + \left[\frac{c_{term} m_{term} + c_x m_x}{c_{H_2O}} \right] \right) \Delta T$$

$$Q = c_{H_2O} (m_{agua} + [M_{eq}]) \Delta T$$

- c_{H_2O} , c_{term} y $c_x \rightarrow$ son los calores específicos del agua, termómetro y agitador (u otro objeto dentro del calorímetro) respectivamente.
- m_{H_2O} , m_{term} y $m_x \rightarrow$ la masa del agua, termómetro y agitador (u otro objeto dentro del calorímetro) respectivamente.

$M_{eq} \rightarrow$ equivalente en agua del calorímetro.

Equivalente eléctrico del calor

Una forma simple de determinar el valor de M_{eq} consiste en utilizar dos volúmenes de agua a diferentes temperaturas.

- Una masa de agua m_1 a una temperatura T_1 (caliente, a una temperatura por encima de la temperatura ambiente, T_{amb}).
- Una masa de agua m_2 a una temperatura T_2 (fria, a una temperatura por debajo de la temperatura ambiente, T_{amb}), la cual está en el calorímetro junto con los demás elementos.
- Una vez medidas las temperaturas T_1 y T_2 , los dos volúmenes de agua se mezclan en el calorímetro, el cual se equilibrará térmicamente a una temperatura T_f .

Equivalente eléctrico del calor

El principio de conservación de la energía permite escribir:

$$Q = c_{H_2O} (m_1 + M_{eq}) (T_f - T_1) = c_{H_2O} (m_2) (T_2 - T_f)$$

De donde se tiene que:

$$M_{eq} = m_2 \left(\frac{T_2 - T_f}{T_f - T_1} \right) - m_1$$

Debido a que el calorímetro no está totalmente aislado se recomienda que:

$$T_2 - T_f \approx T_f - T_1$$

lo cual significa que en promedio, el calor que el medio entrega al sistema en la primera parte del proceso, es devuelta por el sistema al medio en la segunda parte.

Equivalente eléctrico del calor

En esencia la práctica consiste en suministrar energía eléctrica a un conductor (resistencia eléctrica) rodeada de agua dentro de un calorímetro, y medir el calor transferido en este.

- La potencia eléctrica suministrada a un sistema está dada por $P = IV$
 - I es la corriente
 - V la diferencia de potencial
- La energía suministrada (trabajo eléctrico) a la resistencia en un determinado tiempo t será:

$$W_{elec} = \int_0^t I(t) \cdot V(t) dt \approx P_{elec} \cdot t$$

lo cual es valido si se mantienen I y V aproximadamente constantes.

Equivalente eléctrico del calor

- Si se expresa el trabajo eléctrico W_{elec} en *Joules* se puede encontrar el valor requerido para generar una *caloría*.
- La cantidad de calorías entregadas al agua se calcula a través de la medición de la temperatura ΔT de la misma y su massa (m_{agua}) la cual está dada por:

$$Q = c_{agua} (m_{agua} + M_{eq}) \Delta T$$

Equivalente eléctrico del calor

- Mida la temperatura ambiente T_{amb} . Llene el vaso con agua fría hasta que la resistencia esté completamente inmersa en el agua. El agua deberá estar $\approx 10^{\circ}C$ por debajo de T_{amb} .
- Conecte la fuente de voltaje a los terminales de la resistencia, el amperímetro y el voltímetro de manera que pueda leer simultáneamente la corriente y el voltaje en la resistencia.
- Ubique el vaso dentro del calorímetro y coloque el termómetro dentro del mismo para medir la temperatura del agua.
- Revuelva el agua con el termómetro hasta que la temperatura se equilibre (T_i) por debajo de la temperatura ambiente.
- Encienda la fuente mientras toma el tiempo (t_i).

Equivalente eléctrico del calor

- Tome nota de la corriente I y el Voltaje V .
- Mida la temperatura del agua en función del tiempo.
- Cuando la temperatura del agua sea tal que $T - T_{amb} \approx T_{amb} - T_i$, apague la fuente y anote el tiempo (t_f).
- Continúe mezclando y lea el termómetro hasta que la temperatura llegue a un máximo (T_f).

Equivalente eléctrico del calor

- Una manera alternativa para determinar M_{eq} es medir diferentes valores de ΔT para diferentes intervalos de tiempo $t_a = t_f - t_i$ manteniendo la resistencia conectada mientras se aplica la misma potencia eléctrica.
- Al graficar ΔT medido en función de t_a , la pendiente de la recta que obtendría ser'a:

$$Pendiente(\Delta T vs t_a) = \frac{P_{elec}}{c_{agua} \cdot (m_{agua} + M_{eq})}$$

- Obtenga el valor del equivalente eléctrico del calor.

Equivalente mecánico del calor

- Joule propuso un experimento para demostrar que el calor no era más que una forma de energía.
- Con su experimento, Joule pudo demostrar que se podía elevar la temperatura del agua transfiriéndole energía mecánica.
- Este descubrimiento permitió desarrollar tanto *la teoría de la conservación de la energía* así como la formulación de *la primera ley de la termodinámica*.

Equivalente mecánico del calor

- Una cuerda de nylon se enrolla varias veces alrededor de un cilindro de aluminio el cual se hace girar por medio de una manivela.
- La fricción entre el cilindro y la cuerda debe ser justo la necesaria para que soporte una masa M colocada en el extremo de la cuerda, la cual debe estar suspendida a unos 5 cm del suelo.
- Un termistor dentro del cilindro de aluminio permite medir su temperatura, con la cual es posible estimar la energía transmitida al cilindro mediante la expresión:

$$Q = mc(T_f - T_i)$$

Equivalente mecánico del calor

- $m \rightarrow$ masa del cilindro de aluminio.
- $c \rightarrow$ el calor específico del aluminio.
- T_i y $T_f \rightarrow$ las temperatura inicial y final, respectivamente.

La cantidad de trabajo realizado al girar la manivela que mueve el cilindro de aluminio N vueltas, está dado por:

$$W = (Mg) (2\pi r) N$$

- $g \rightarrow$ la aceleración de la gravedad.
- $r \rightarrow$ el radio del cilindro.

Conociendo W y Q se puede determinar el equivalente mecánico del calor.

La expansión térmica

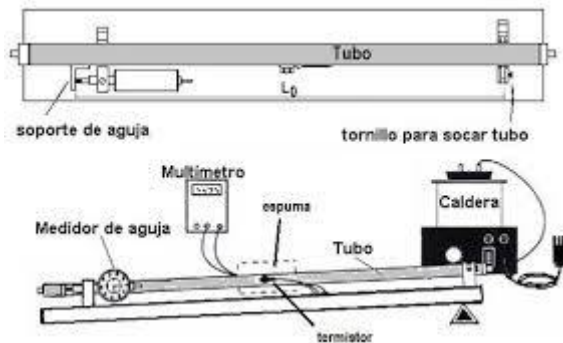
- La mayoría de los sólidos se expanden cuando se calientan y se contraen cuando se enfrían.
- El cambio en longitud con la temperatura para un material sólido se expresa como:

$$\frac{l_f - l_o}{l_o} = \alpha (T_f - T_o)$$

$$\frac{\Delta l}{l_o} = \alpha \Delta T$$

- l_o y $l_f \rightarrow$ la longitud inicial y final, respectivamente.
- T_o y $T_f \rightarrow$ la temperatura inicial y final, respectivamente.
- $\alpha \rightarrow$ el *coeficiente de expansión térmica lineal*.

La expansión térmica



La expansión térmica

Realice el montaje teniendo en cuenta los siguientes pasos:

- Mida la longitud L del tubo.
- Monte el tubo a estudiar (Cu, Al, acero), respectivamente, en la base de expansión. Ajuste suavemente el tornillo que sujeta la clavija del tubo.
- Ajuste el termistor (o el termómetro) que vaya a utilizar. Asegure el máximo contacto térmico entre el tubo y el sensor de temperatura.
- Coloque el aislamiento térmico.
- Determine la temperatura ambiente.

La expansión térmica

- Conecte el generador de vapor de agua a uno de los extremos del tubo. Este extremo debe estar mas alto que el otro.
- Ajuste el cero del tornilllo micrométrico. Determine a cuanto equivale una división.
- Encienda el generador de vapor, teniendo en cuenta que la cantidad de agua sea la adecuada.
- Cuando el vapor comience a fluir registre los datos del tornillo micrométrico y del multímetro (temperatura).
- Repita el procedimiento anterior para cada uno de los tubos propuestos.
- A partir de un análisis gráfico encuentre el valor de α .

Conductividad térmica

- El calor puede ser transferido de un punto a otro por medio de tres procesos diferentes:
 - Conducción
 - Convección
 - Radiación
- En la conducción, el calor se transfiere a través de un medio material y no se presenta transporte de materia durante el proceso.
- En un sólido existen dos agentes los cuales pueden transportar energía térmica:
 - los portadores de carga (electrones, huecos)
 - las vibraciones de la red (fonones)

Conductividad térmica

- La conductividad térmica total puede ser expresada como:

$$\kappa = \kappa_e + \kappa_f$$

- κ_e y $\kappa_f \rightarrow$ son las contribuciones electrónica y fonónica a la conductividad térmica total.
- La tasa a la cual se transfiere calor a través del material es $\frac{dQ}{dT}$ y se denomina flujo de calor.
- El flujo térmico está descrito por la ley de Fourier, la cual describe la conducción de calor en un regimen estacionario unidimensional.

Conductividad térmica

- El flujo térmico es proporcional al área transversal a la dirección del flujo (A), a la diferencia de temperatura entre ambos lados del material (ΔT), e inversamente proporcional a la distancia recorrida desde el lugar a mayor temperatura (h).

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{\kappa A \Delta T}{h}$$

- la constante de proporcionalidad κ se denomina *conductividad térmica*, siendo sus unidades en el SI, $\frac{W}{m}$.
- El experimento se basa en fundir un bloque de hielo y medir el calor Q absorbido (por el hielo) sabiendo que se requieren 80 calorías para fundir un gramo de hielo. $\Delta Q = mL_f$.

Conductividad térmica



Conductividad térmica

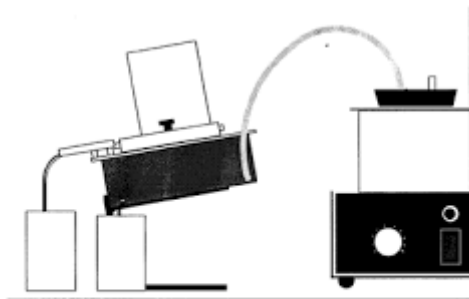


Figura 2: Montaje Experimental

Conductividad térmica

- La cámara de vapor se coloca sobre la base y se conecta el generador de vapor. La cámara tiene una abertura en la parte superior donde se coloca el material a estudiar (muestra).
- Se coloca el molde de hielo destapado con la boca hacia abajo y sobre el material.
- Al encender el generador de vapor, este vapor circulará a través de la cámara y como consecuencia de ello, se genera una diferencia de temperatura a través del material en estudio.
- El calor transferido al hielo será utilizado para fundirlo.
- El experimento consiste en hallar el tiempo Δt en el cual se funde una masa m de hielo.

Capacidad calorífica

- Cuando un sistema absorbe calor puede o no tener un incremento de la temperatura, dependiendo de la naturaleza del proceso.
- Si un sistema experimenta un cambio de temperatura de T_i a T_f durante la transferencia de Q unidades de calor, se define la capacidad calorífica media del sistema como:

$$C = \frac{Q}{T_f - T_i}$$

- La capacidad calorífica es una propiedad extensiva, ya que su magnitud depende, no solo de la sustancia, sino también de la cantidad de materia del cuerpo o sistema; por ello, es característica de un cuerpo o sistema particular.

Capacidad calorífica

- La capacidad calorífica no debe ser confundida con la capacidad calorífica específica o calor específico, el cual es la propiedad intensiva que se refiere a la capacidad de un cuerpo para almacenar calor y es el cociente entre la capacidad calorífica y la masa del objeto.
- La capacidad calorífica C viene dada por:

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

- El calor específico o capacidad calorífica específica (c) se define a partir de la relación:

$$C = \frac{Q}{\Delta T} = c \cdot m$$

Capacidad calorífica

- Determine la masa de un calorímetro vacío, M_{cal} . Llenelo con agua fría hasta aproximadamente un tercio de su capacidad y determine la masa del calorímetro con agua.
- Haga lo mismo con otro calorímetro pero utilice agua caliente. Mida las correspondientes temperaturas, T_{cal} y T_{fria} .
- Añada el agua caliente al agua fría y agite con el termómetro hasta que se establezca la temperatura de la mezcla. Anote la temperatura final T_{final} de la mezcla.
- Repita el experimento para diferentes masas de agua a diferentes temperaturas. Evalúe ΔQ_{cal} y ΔQ_{fria} .

Capacidad calorífica

- Mida M_{cal} , la masa del calorímetro (seco y vacío), y $M_{muestra}$ para cada una de las muestras metálicas a ser medidas.
- Coloque la muestra en medición en un baño térmico (agua hirviendo) hasta que esté en equilibrio a la temperatura T_{ini} .
- Ponga en el calorímetro tanta agua fría como sea necesaria y mida su temperatura, T_{fria} .
- Saque la muestra del agua hirviendo, suspendala en el agua fría (sin que toque el fondo del calorímetro).
- Revuelva el agua hasta que la temperatura se estabilice y mida su valor, T_{final} .

Capacidad calorífica

- Determine el calor específico de la masa en estudio a partir de las masas del calorímetro, del agua depositada en él, y los calores específicos del agua y del calorímetro y las diferencias de temperatura, teniendo en cuenta que:

$$M_{muestra} \cdot c_{muestra} (T_{ini} - T_{final}) = M_{agua} \cdot c_{agua} (T_{final} - T_{ini})$$

- $c_{muestra} \rightarrow$ calor específico de la muestra.
 - $c_{agua} \rightarrow$ calor específico del agua.
- A partir de este procedimiento determine el calor específico $c_{muestra}$ para cada muestra utilizada.

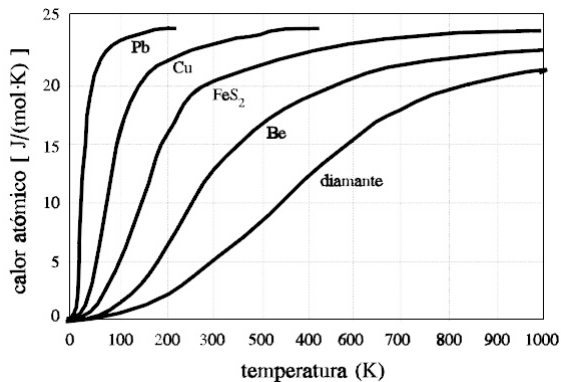
Teoría de Debye

- En la termodinámica y física del estado sólido, el modelo de Debye es un método desarrollado por Peter Debye (1912) para la estimación de la contribución de los fonones al calor específico en un sólido.
- Un fonón es una cuasipartícula o modo cuantizado vibratorio que tiene lugar en redes cristalinas como la red atómica de un sólido.
- Los fonones son una versión mecano-cuántica de un tipo especial de movimiento vibratorio denominado –en Mecánica clásica– modos normales, por el cual cada parte de una red oscila con la misma frecuencia.

Teoría de Debye

- El modelo de Debye trata las vibraciones de la red atómica (calor) como fonones en una caja, en contraste con el modelo de Einstein, que representa a los sólidos como formados por muchos osciladores armónicos cuánticos no interactuantes entre sí.
- El modelo de Debye predice correctamente la dependencia a temperaturas bajas de la capacidad calorífica, que es proporcional a T^3 . Al igual que el modelo de Einstein, también predice la ley de Dulong-Petit a altas temperaturas.
- Resulta deficiente a la hora de explicar los fenómenos observables a temperaturas intermedias.

Teoría de Debye



Teoría de Debye

- En la física clásica, un sólido a una temperatura determinada puede considerarse como constituido por átomos vibrando enlazados entre sí. ítem Cada átomo vibrando puede considerarse como 3 osciladores armónicos (clásicos), uno por cada dirección en la que puede vibrar el átomo.
- Cada oscilador armónico tiene 2 grados de libertad, su posición y su momento lineal.
- Por el teorema de equipartición de la energía, un átomo vibrando tiene $\frac{1}{2}kT$ de energía por cada grado de libertad.

Teoría de Debye

- la energía interna U_m por cada mol del solido es:

$$U_m = 3N_A kT$$

- Por lo tanto, el calor específico resulta ser:

$$c = \frac{dU}{dT} = 3N_A k$$

Lo que representa el resultado clásico conocido como la *ley de Dulong y Petit*.

- Sin embargo, para bajas temperaturas se mostró experimentalmente que el valor predicho por la teoría clásica no correspondía al valor medido.

Teoría de Debye

- Einstein argumentó que los osciladores asociados a los átomos debían ser *osciladores armónicos cuánticos*.
- Esto implica que las oscilaciones solo podían darse para ciertas frecuencias discretas. En este caso, la energía interna por mol de un sólido es:

$$U_m = \frac{3N_A \hbar \omega}{e^{\frac{\hbar \omega}{kT}} - 1}$$

Por lo cual, el calor específico resulta ser:

$$c = 3R \left(\frac{\hbar \omega}{kT} \right)^2 \frac{e^{\frac{\hbar \omega}{kT}}}{\left(e^{\frac{\hbar \omega}{kT}} - 1 \right)^2}$$

Teoría de Debye

- Si se define una temperatura propia de cada material llamada temperatura de Einstein como $\hbar\omega = kT_E$, el calor específico se puede escribir como

$$c = 3R \left(\frac{T_E}{T} \right)^2 \frac{e^{\frac{T_E}{T}}}{\left(e^{\frac{T_E}{T}} - 1 \right)^2}$$

donde

$$\nu = \frac{kT_e}{2\pi\hbar} = \frac{kT_e}{h}$$

- es la frecuencia de oscilación de las moléculas en la red cristalina.

Teoría de Debye

- Los N átomos de un sólido a una temperatura $T \neq 0$ vibran alrededor de sus posiciones de equilibrio. Sin embargo, estos átomos no vibran independientemente unos de otros sino que ejecutan complicadas vibraciones acopladas.
- En el modelo de Debye se considera el sólido como un medio *continuo* y *elástico* de volumen V y se tiene una distribución:

$$g(\omega)d\omega = \frac{3V\omega^2}{2\pi^2c_s^3}d\omega$$

- $c_s \rightarrow$ la velocidad del sonido en el sólido.

Teoría de Debye

- La frecuencia máxima de vibración ω_D se puede calcular a partir de:

$$3N = \int_0^{\omega_D} g(\omega) d\omega$$

- lo cuál da como resultado:

$$\omega_D^3 = c_s \left(\frac{6N\pi^2}{V} \right)$$

- En la ecuación anterior ω_D es la *frecuencia de Debye* del sólido.

Teoría de Debye

- La expresión para la energía se puede calcular a partir de la siguiente integral:

$$\frac{U}{N} = \frac{3V}{2\pi^2 c_s^3} \int_0^{\omega_D} \frac{\hbar\omega}{\exp(\beta\hbar\omega) - 1} \omega^2 d\omega$$

- la cual se puede escribir como:

$$U = 3RT \left(\frac{T}{\Theta_D} \right)^3 \int_0^{x_D} \frac{x^3}{(e^x - 1)^2} dx$$

- $N \rightarrow$ número de átomos en la muestra. $x_D = \frac{\Theta_D}{T}$ y $x = \frac{\hbar\omega}{kT}$.
- Si U es el calor suministrado por la muestra, entonces, el calculo numérico de la integral permite encontrar la temperatura de Debye a la temperatura de ebullición del N_2 .

La práctica

La idea de esta práctica es determinar la cantidad de nitrógeno líquido Δm que se evapora cuando el nitrógeno absorbe calor de una pieza metálica.

- En un recipiente de icopor se vierte nitrógeno líquido L_{N_2} hasta aproximadamente $\frac{1}{3}$ de su altura. El recipiente se coloca sobre el platillo de una balanza. Sobre el mismo platillo se coloca la muestra metálica, la cuál luego será introducida en el líquido.

La práctica

- La temperatura del medio ambiente hace que el L_{N_2} se evapore a cierta tasa. La cual se determina midiendo el peso del recipiente más el líquido en función del tiempo.
- Se introduce la pieza metálica dentro del L_{N_2} .
- El calor de la muestra será absorbido por el L_{N_2} lo cual hará que una cierta cantidad de L_{N_2} se evapore de una manera rápida y desordenada.
- Una vez el sistema llega nuevamente al equilibrio, la tasa de evaporación será la misma que antes de introducir la pieza metálica.

La práctica

- Aproximando los datos experimentales antes y después de introducir la pieza metálica a una línea recta, se puede encontrar la masa perdida Δm debido unicamente al calor proveniente de la pieza metálica.

Si m es la masa de la pieza metálica y c su calor específico, la cantidad de calor entregado al nitrógeno será:

$$\Delta Q = mc(77K - T_o)$$

Este calor es usado para convertir el nitrógeno líquido en vapor de nitrógeno.

La práctica

Si el calor latente de vaporización del L_{N_2} es $L = 47.23 \frac{\text{cal}}{\text{g}}$, la masa de nitrógeno vaporizado será:

$$\Delta m = \frac{\Delta Q}{L}$$

En esta práctica se trata de repetir el experimento con tres diferentes piezas metálicas, encontrar su calor específico a esta temperatura, compararlo con el obtenido a temperatura ambiente y utilizar una integración numérica para hallar su temperatura de Debye.