

Experimento de laboratorio sobre calor latente y capacidad calorífica a bajas temperaturas (*)

I. INTRODUCCION

Hemos desarrollado recientemente un experimento de laboratorio para nuestros cursos de física general que incorporan el uso de un fluido criogénico (nitrógeno líquido, llamado en adelante LN₂), la medida de su calor latente de vaporización, y el estudio de la capacidad calorífica (promedio) a bajas temperaturas de varios materiales y su relación a la ley de Dulong y Petit. El experimento es simple y usa aparatos de laboratorio generalmente disponibles, suponiendo que se dispone de una fuente de LN₂. La toma de datos y el análisis pueden ser realizados en un turno de laboratorio de dos horas. Los valores obtenidos tienen pequeñas incertidumbres experimentales y están de acuerdo con valores calculados a partir de información publicada.

II. CALOR LATENTE DE VAPORIZACION DEL NITROGENO LIQUIDO

Un esquema del aparato usado para medir el calor de vaporización de LN₂ se muestra en la Figura 1. Un calefactor eléctrico R fue suspendido en un baño de LN₂ en un conjunto de (dos) vasos que se apoyan sobre el plato de una balanza.

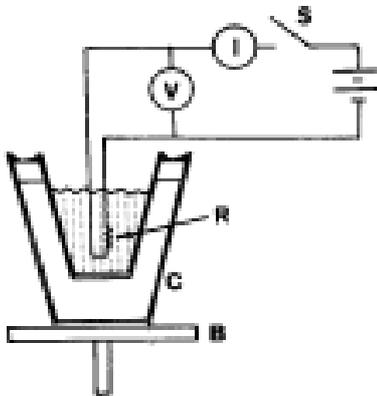


Figura 1. Esquema del aparato usado para medir el calor latente de vaporización del LN₂.

Las letras se refieren a los siguientes ítems:

B, balanza; C, conjunto de vasos de poliestireno; I, amperímetro; R, resistencia de 32 Ω ; S, interruptor; V, voltímetro. La fuente de alimentación fue de 28 V.

Durante la ebullición del LN₂, se determinó la velocidad de pérdida de masa midiendo $m(t)$, la masa del LN₂ más el conjunto de vasos, como función del tiempo. Después de unos pocos minutos de observación, fue cerrado el interruptor S y se midieron la corriente I y el voltaje V. Simultáneamente, se continuaron las medidas de $m(t)$ pero la velocidad de pérdida fue, por supuesto, mucho más alta (evaporación más rápida). Una buena técnica para medir $m(t)$ es desequilibrar la balanza uno o dos gramos y leer el tiempo cuando el fiel de la balanza pasa por cero, luego desequilibrar nuevamente y repetir.

Después que unos pocos gramos de LN₂ han sido evaporados por el calefactor, el interruptor S fue abierto nuevamente y se registró cuidadosamente el intervalo de calentamiento, Δt . (Es ventajoso

disponer de un segundo cronómetro con este fin). Las medidas de $m(t)$ se continuaron unos pocos minutos para reestablecer el fondo (de evaporación natural). Estos datos fueron graficados como se muestra en la Figura 2.

El conjunto de vasos de poliestireno, de doble pared, rotulado como C en la Figura 1, fue hecho suspendiendo un vaso de 100 ml dentro de un vaso de 200 ml. Un anillo de poliestireno fue usado para centrar los vasos, y unas gotas de pegamento de silicona selló las juntas y estabilizó el conjunto. La balanza analítica ⁽¹⁾ tenía un dial de 0 – 10 g. El calefactor tenía una resistencia de alambre arrollado de 10 W (32 Ω nominal) montada sobre el extremo de un pequeño tubo de acero inoxidable. La fuente de potencia fue una fuente de laboratorio de 28 V (nominal). The potencia máxima de 10 W de R estuvo excedida, pero quedó compensada por el enfriamiento producido por LN₂. La corriente y la tensión fueron medidos usando multímetros digitales Keithley modelo 130 ⁽²⁾. Los valores de tensión y corriente para los datos mostrados en la Figura 2 fueron $V = 28.5$ V e $I = 0.871$ A. (La potencia entregada fue entonces de 24.8 Watts).

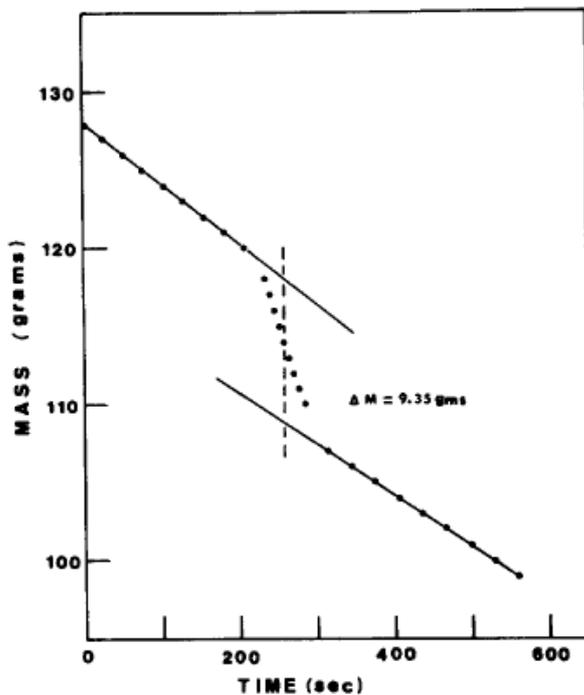


Figura 2. Gráfico de los datos que muestra la masa del conjunto de vasos más LN₂ como función del tiempo para la medida del calor de vaporización de nitrógeno líquido.

Las velocidades de base han sido extrapoladas al centro del período de calentamiento, marcado por la línea de trazos.

Se dibujaron líneas rectas a través de los datos de la Figura 2. La masa del LN₂ evaporado resultó ser 9.35 g, valor obtenido a partir del desplazamiento de las dos líneas cerca del centro del período de calentamiento. **El intervalo de calentamiento fue 73.4 s.** El calor latente de vaporización L_v se calculó a partir de la relación

$$L_v = V I \Delta t / \Delta M \quad [1]$$

Los datos reportados dan:

$$L_v = \frac{28.5 \times 0.871 \times 73.4}{9.35} = 195 \text{ J/g} \quad [2]$$

El valor aceptado es 197.7 J/g, o 47.23 cal/g.

II. CALORES ESPECIFICOS DE PLOMO Y BERILIO

Los estudiantes midieron las *capacidades caloríficas específicas molares*, promediadas sobre un rango de temperaturas de 77 K a 295 K, para dos metales: plomo y berilio. Se eligieron estos dos metales porque sus capacidades caloríficas molares son muy diferentes a temperatura ambiente. El plomo tiene un valor cercano a 3R mientras que el del berilio es mucho menor. R es la constante universal de los gases. Si el berilio fuera difícil de conseguir (su toxicidad hace que el corte de piezas no sea habitual en los talleres de maquinado) o excesivamente costoso, el silicio o el carbono podrán ser sustitutos aceptables.

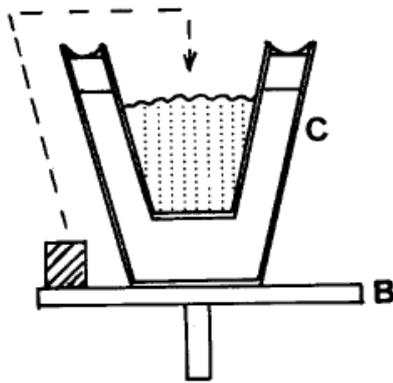


Figura 3. Diagrama esquemático ilustrando que la muestra metálica (plomo o berilio) es transferido desde el plato de la balanza al interior del nitrógeno líquido durante las medidas de capacidad calorífica.

La transferencia se hace después de alrededor de 200 s, como es mostrado por los datos en la Figura 4. B es el plato de la balanza y C es el conjunto de vasos.

Las medidas de capacidad calorífica fueron hechas así. Los vasos de poliestireno se llenaron con LN₂ y se colocaron sobre el plato de la balanza junto con la pieza de metal a ser medida, como se ilustra en la Figura 3. Como antes, la masa $m(t)$ fue medida por unos minutos para establecer la velocidad de evaporación de base. El metal fue luego retirado del plato de la balanza y ubicado con cuidado en el interior del vaso de LN₂ con pinzas. Se continuaron las medidas de $m(t)$ hasta que se reestableció la tasa de base. La extrapolación de las velocidades de base permitió determinar la masa de líquido que se evaporó al enfriar la pieza de metal desde la temperatura ambiente a la temperatura de 77 K. El calor específico promedio \bar{C}_p fue calculado entonces a partir de la expresión

$$\bar{C}_p = \frac{198 \Delta m}{n (T_0 - 77)} \text{ J/mol K} \quad [3]$$

donde Δm es la masa de LN₂ evaporada en gramos, n es la cantidad de muestra en moles, y T_0 es la temperatura inicial del metal (temperatura ambiente), en grados Kelvin.

La Figura 4 muestra datos obtenidos para muestras de plomo y berilio de masas 57.0 g (0.275 moles) y 3.62 g (0.402 moles), respectivamente. Basados en estos datos, los calores específicos promedio a presión constante \bar{C}_p se calcularon como:

$$\bar{C}_p(\text{plomo}) = \frac{198 \times 7.60}{0.275 \times (295 - 77)} = 25.1 \text{ J/mol K} \quad [4]$$

$$= 6.00 \text{ cal/ mol K} \quad [5]$$

y

$$\bar{C}_p(\text{berilio}) = \frac{198 \times 4.30}{0.402 \times (295 - 77)} = 9.72 \text{ J/mol K} \quad [6]$$

$$= 2.32 \text{ cal/mol K} \quad [7]$$

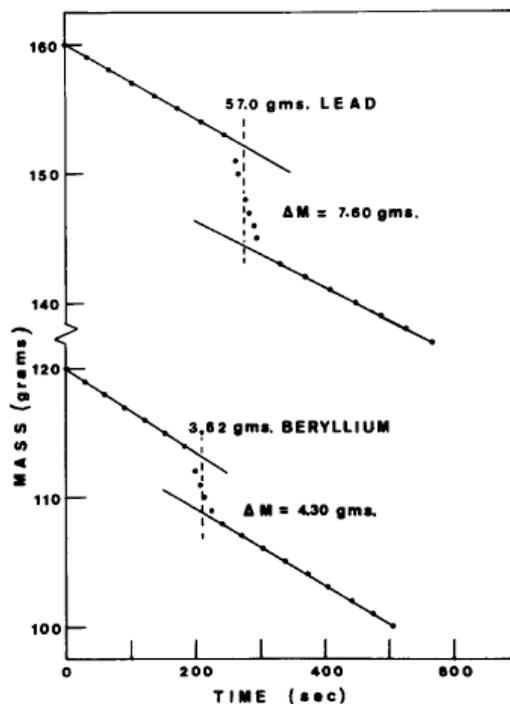


Figura 4. Gráficos de los datos que muestran la masa del conjunto de vasos más LN₂ como función del tiempo para la medida de la capacidad calorífica del plomo (superior) y berilio (inferior).

Las tasas de fondo han sido extrapoladas hacia la región en que ocurrió el enfriamiento de la muestra.

Se indican la masa de nitrógeno evaporado ΔM y las masas de cada muestra para las dos medidas.

Se obtuvieron datos similares para silicio y carbono. Usamos muestras de 7.20 g de silicio y 9.66 g de carbono (grafito) y determinamos que los calores específicos son 3.31 y 1.13 cal/ mol K, respectivamente.

Discusión.

Dulong y Petit notaron que el *calor específico a presión constante y temperatura ambiente* de la mayoría de los metales (excepto los más livianos) toma un valor cercano a 3R (24.94 J/mol K, o 5.96 cal/mol K) ⁽⁵⁾. El valor obtenido para el plomo está cerca de 3R, pero como se esperaba, los valores obtenidos para los otros elementos son considerablemente menores. Es instructivo consultar datos de la literatura para $C_p(T)$ y calcular \bar{C}_p mediante integración numérica sobre el rango apropiado de temperatura.

A título ilustrativo, en la Tabla I se reproducen conjuntos de datos de C_p y T de los materiales usados, y se incluye al cobre como referencia.

Tabla I. Calor específico molar a presión constante a varias temperaturas para Be, C (grafito), Si, Cu y Pb. Las unidades son cal / mol K y grados Kelvin. ⁽³⁾

<i>T</i>	Be	C(graphite)	Si	Cu	Pb
70	0.121	0.221	1.02	2.63	5.54
80	0.195	0.278	1.24	3.11	5.64
90	0.299	0.339	1.48	3.52	5.74
100	0.428	0.402	1.72	3.86	5.84
120	0.743	0.539	2.17	4.37	5.94
140	1.130	0.689	2.59	4.75	5.99
160	1.557	0.849	2.99	5.04	6.09
180	1.983	1.019	3.36	5.25	6.14
200	2.39	1.188	3.68	5.40	6.19
220	2.78	1.36	3.95	5.53	6.24
240	3.17	1.54	4.15	5.63	6.29
260	3.53	1.71	4.33	5.71	6.34
280	3.90	1.88	4.50	5.78	6.38
300	4.24	2.05	4.65	5.86	6.44

La Tabla II muestra los calores específicos promedio que medimos comparados a los valores calculados a partir de los datos de la Tabla I. El acuerdo es muy bueno para silicio, plomo y berilio, pero no tan bueno para carbono. Debería notarse que todas las muestras usadas fueron de muy alta pureza. (Advertimos que el plomo que se encuentra normalmente en los laboratorios puede ser de pureza cuestionable y puede aportar resultados erróneos).

Tabla II. Calor específico molar a presión constante, promediado sobre el intervalo de temperatura 77-295 K, para berilio, grafito, silicio y plomo. Las unidades son cal / mol K. La columna 2 lista valores medidos en este experimento y la columna 3, los obtenidos de los datos en la Tabla I.

Sample	\bar{C}_p (exp)	\bar{C}_p (calc)
Be	2.32	2.10
C(graphite)	1.13	0.92
Si	3.31	3.29
Pb	6.00	6.18

También advertimos a los estudiantes que se deben tomar precauciones ante el riesgo de accidentes producidos por un manejo impropio del LN₂. En nuestros laboratorios, los estudiantes usaron anteojos apropiados durante el experimento. El instructor fue responsable del recipiente principal con LN₂ y distribuía el nitrógeno a los estudiantes en pequeños vasos de poliestireno cuando éstos lo solicitaban.

Referencias.

(*) “Latent heat and low-temperature heat capacity experiment for the general physics laboratory”. C. W. Tompson and H. W. White, *Am. J. Phys.* 51 (4), (1983), 362- 364.

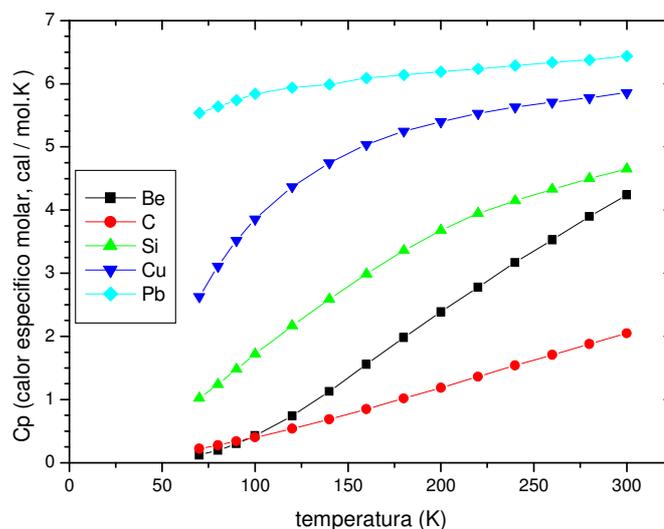
Traducción y adaptación del artículo por J.L. Alessandrini. Para uso interno de la cátedra.

1. Ohaus Dial-o-Gram model 310 balance. Ohaus Scale Corp, 29 Hanover Road, Florham Park, New Jersey 07932.
2. Keithley Instruments, Inc., 28775 Aurora Road, Cleveland, Ohio 44139

Referencias adicionales (no incluidas en el trabajo original):

3. Ver por ejemplo: *AIP Handbook* (McGraw Hill, New York, 1963), pp.4-48; NBS Cryogenic Engr. Lab WADD Tech. Rep. 60-56, Part II (1960).
4. Advertir que la masa de nitrógeno evaporado que aparece como Δm en la ecuación 3 es la misma diferencia ΔM reportada en la Figura 3 (nota del traductor).
5. Valores de C_p a 298 K (en unidades de J/mol K): cobre (24.5), plata (25.5), plomo (26.4), zinc (25.4), aluminio (24.4), estaño-blanco (26.4), azufre-rómbico (22.4), carbono-diamante (6.1). Para conocer más sobre la ley de Dulong y Petit puede consultarse la página web: http://es.wikipedia.org/wiki/Ley_de_Dulong-Petit

Nota: Los datos de la Tabla 1 muestran que el calor específico molar a presión constante disminuye al bajar la temperatura (Figura siguiente). Además, se anula en el cero absoluto, comportamiento explicado solamente por la teoría cuántica.



Los resultados de la columna 3 de la Tabla 2 pueden reproducirse integrando numéricamente estas curvas (con Origin, por ejemplo) y dividiendo ese valor por el intervalo de temperatura (230 K) para obtener el valor medio del calor específico molar a presión constante en el rango 70-300 K.

Notas complementarias.

1. El calorímetro a usarse en estos experimentos difiere del propuesto en el artículo original. En lugar de estar armado con dos vasos cónicos de poliestireno expandido (PS) como muestran las Figuras 1 y 3, el vaso interior es reemplazado por un vaso cilíndrico de polipropileno (PP). Este diseño pretende mantener constante la velocidad de evaporación del LN_2 a través de la superficie libre del líquido durante el transcurso del experimento.
2. Por razones de seguridad, cada comisión escribirá un protocolo con los pasos a seguir en cada uno de los dos experimentos.