

Universidad Nacional de Río Negro

Física III B – 2019

- **Unidad** 02
- **Clase** U02 C01
- **Fecha** 26 Mar 2019
- **Cont** Primer Principio
- **Cátedra** Asorey
- **Web** <http://gitlab.com/asoreyh/unrn-f3b>



Contenidos: Termodinámica, alias F3B, alias F4A

Unidad 1

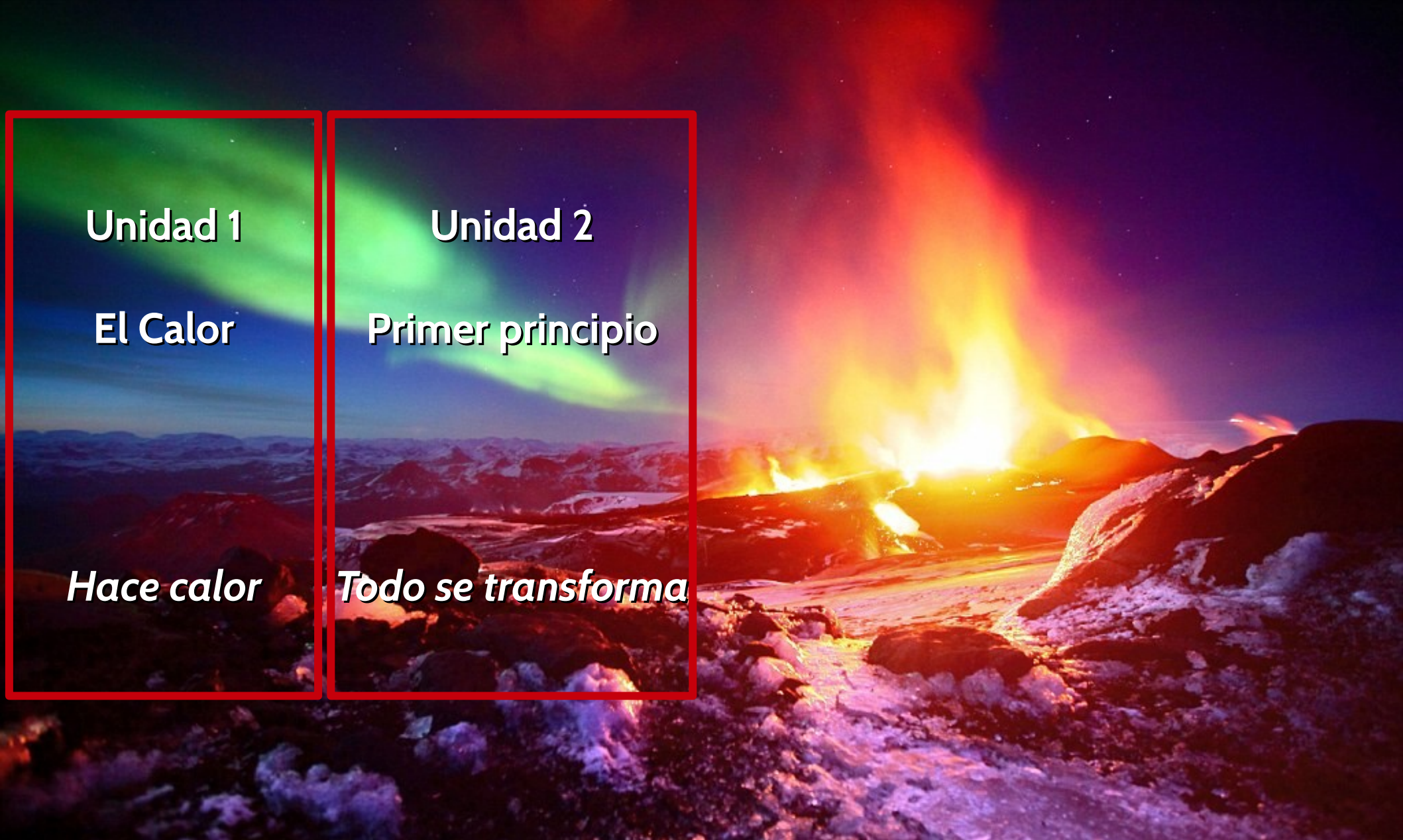
El Calor

Hace calor

Unidad 2

Primer principio

Todo se transforma



Módulo 1 - Unidad 2: primer principio

Del 05/Abr al 26/Abr (7 encuentros)

- **Calor y trabajo.** Equivalente mecánico del calor. Experimento de Joule. **Sistemas.** Fuentes de calor. **Primer principio. Flujo de calor.** Muerte térmica. Máquinas térmicas.



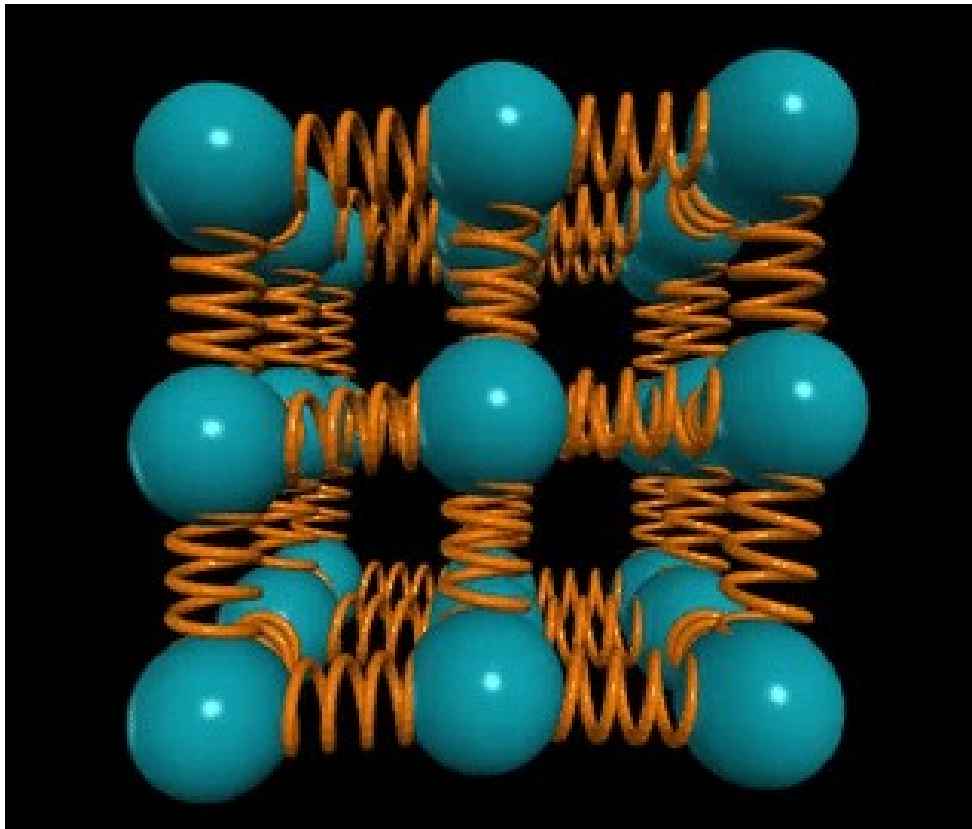
- Tengo n moles de un gas de una cierta atomicidad
- El gas se encuentra en un estado “A”
- ¿Cuánto calor necesito para cambiar su temp. en ΔT ?
 - Transformación a $V=\text{cte}$: $Q = C_v n \Delta T$
 - Transformación a $P=\text{cte}$: $Q = C_p n \Delta T$

Atomicidad	C_v	C_p	γ
Monoatómico	$3/2 R$	$5/2 R$	$5/3$
Biatómico	$5/2 R$	$7/2 R$	$7/5$
Triatómico	$6/2 R$	$8/2 R$	$4/3$

El signo de Q coincide con ΔT
 $Q > 0 \rightarrow$ Calor entregado por el medio al sistema
 $Q < 0 \rightarrow$ Calor entregado por el sistema al medio

Ley de Dulong-Petite

$$E_K = \sum_{i=1}^N \left[\frac{1}{2} m (v_{x,i}^2 + v_{y,i}^2 + v_{z,i}^2) + \frac{1}{2} k_{ef} (x_i^2 + y_i^2 + z_i^2) \right]$$



- ¿Grados de libertad?

- $v_x, v_y, v_z, x, y, z \leftarrow 6$

- Equipartición: $\frac{1}{2} kT$

- Energía interna:

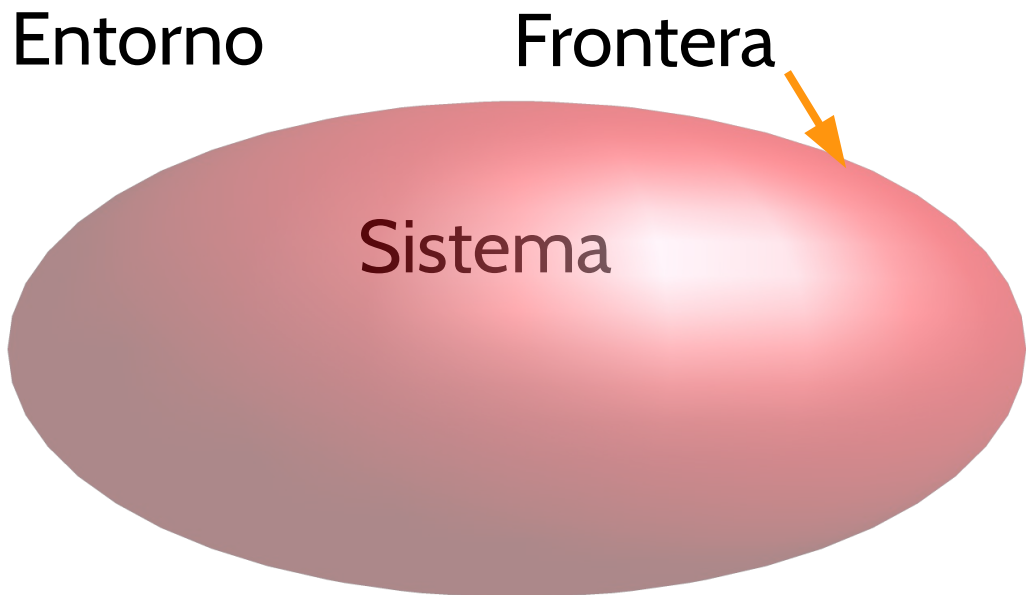
$$U = \frac{6}{2} NkT = 3nRT$$

- Calor específico:

$$Q = \Delta U = Cn\Delta T \rightarrow C = 3R$$

Sistema termodinámico

- **Sistema termodinámico:** contenido total de energía, en cualquiera de sus formas (incluyendo la masa), que se encuentra en una región macroscópica del espacio.
 - Variables de estado termodinámicas que definen al sistema → temperatura, energía interna, presión, entropía, ...

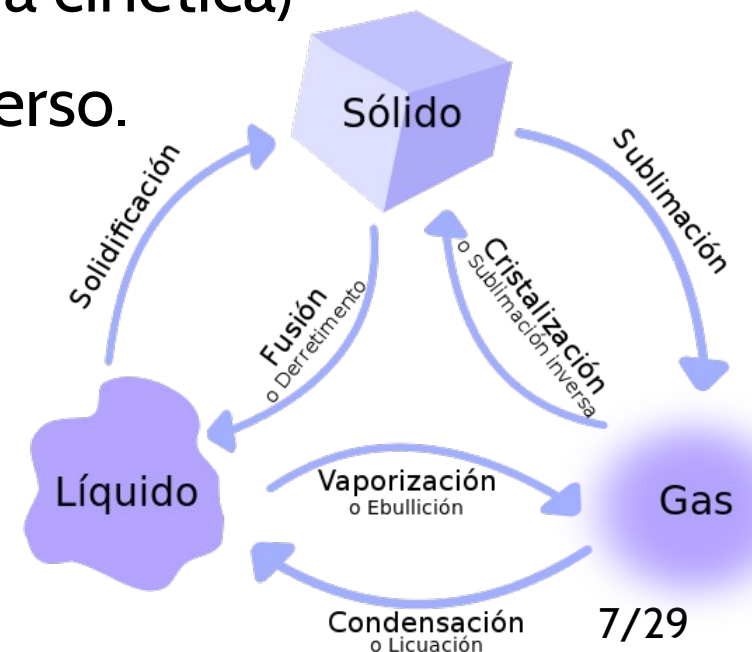


- **Sistema en equilibrio**
 - Las variables de estado no cambian con el tiempo
- **Fuera de equilibrio**
 - Transferencia “lenta” de energía

Cambios de fase

- El **cambio de fase de un sistema termodinámico** implica que algunas de las **características de esa fase cambian**. Requiere un **intercambio de energía**

- Fusión:** sólido (baja energía cinética) a líquido (alta energía cinética)
- Solidificación:** inverso.
¿Flujo de energía?
- ¿Sentido de ese intercambio?



- **Calor latente:** calor liberado o absorbido por un sistema termodinámico durante una transformación a **temperatura constante** (*latente* = escondido, 1762 J. Black)
 - Calor de fusión: sólido a líquido
 - Calor de vaporización: líquido a gas
- **Ehrenfest: Calor latente \leftrightarrow transformación de fase de primer orden**
- **Cambio de fase \rightarrow temperatura del sistema permanece constante**

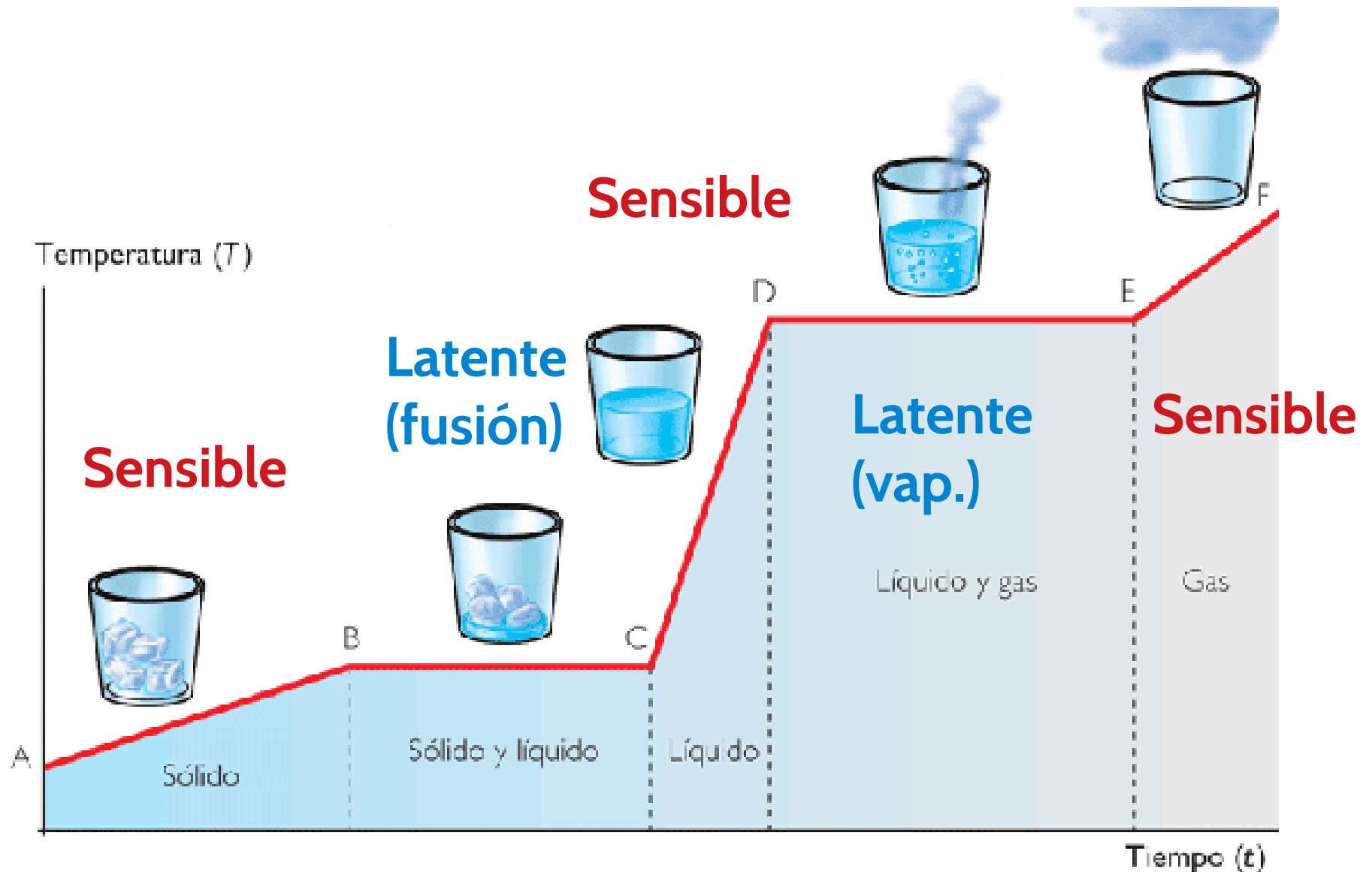
Calor latente específico

- Propiedad intensiva **L**: **calor requerido para cambiar completamente de fase a una determinada cantidad de sustancia (usualmente en masa)**
- Calor requerido para cambiar de fase una masa m :

$$L \stackrel{\text{def}}{=} \frac{Q}{m} \rightarrow Q = mL$$

- Agua: valores anormalmente altos (¡puentes H!). ¡Usos!
 - Fusión (a 273K): 334 kJ/kg, vaporización (a 373K): 2257 kJ/kg
 - Transpiración, Refrigeración, ¿rocío?...

Calor latente versus calor sensible



Paréntesis acuoso

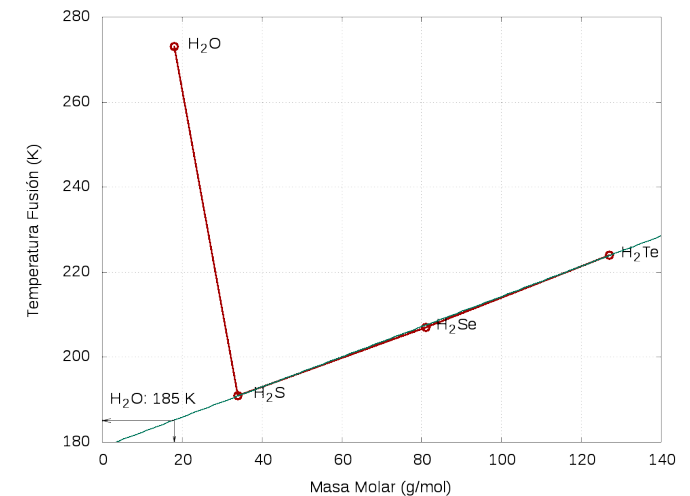
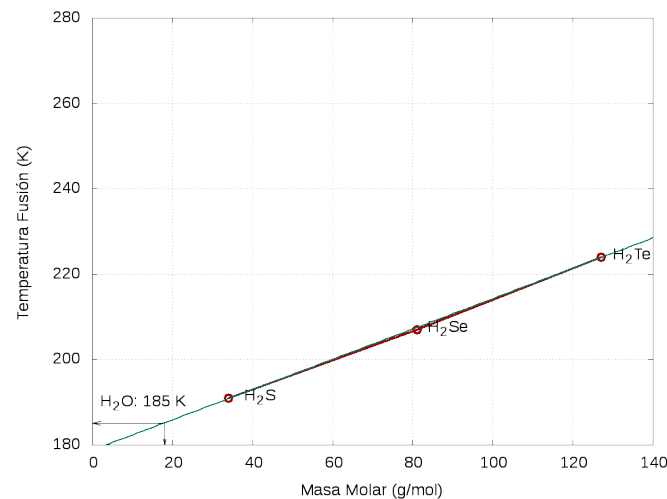
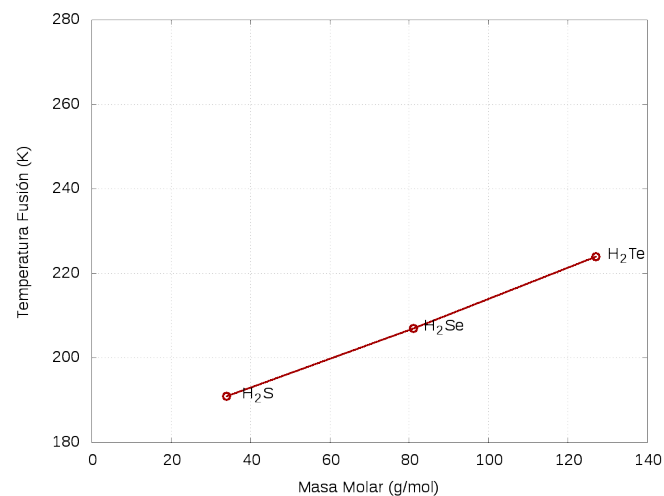
$\text{H}_2\text{O} \rightarrow \theta = 104,45^\circ \rightarrow M=18 \text{ g/mol} \rightarrow T_f=273 \text{ K}$

$\text{H}_2\text{S} \rightarrow \theta = 92,1^\circ \rightarrow M=34 \text{ g/mol} \rightarrow T_f=191 \text{ K}$

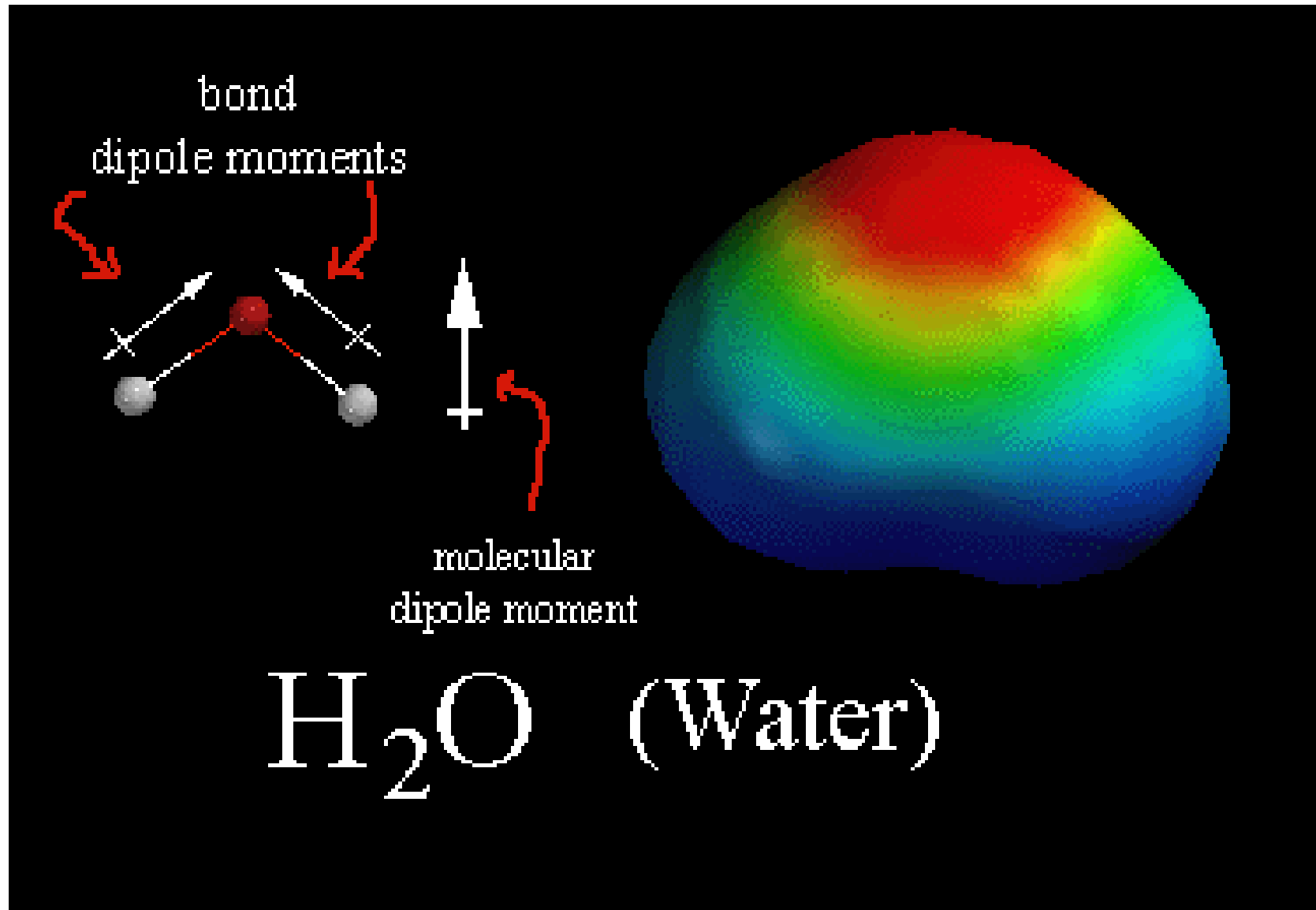
$\text{H}_2\text{Se} \rightarrow \theta = 91^\circ \rightarrow M=81 \text{ g/mol} \rightarrow T_f=207 \text{ K}$

$\text{H}_2\text{Te} \rightarrow \theta = 90^\circ \rightarrow M=127 \text{ g/mol} \rightarrow T_f=224 \text{ K}$

$$T \sim E_k \sim mv^2$$

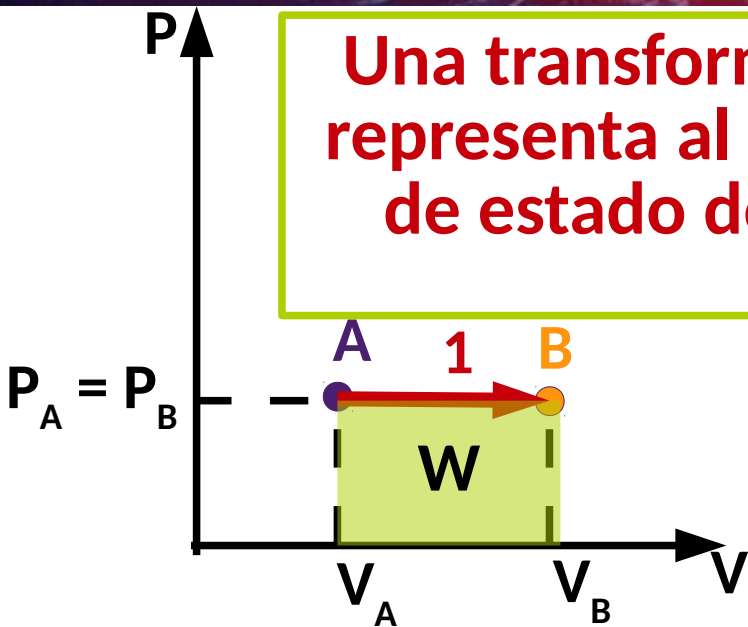


Momento dipolar de la molécula de agua



En el episodio anterior...

Una transformación
representa al cambio
de estado del gas



Calor específico
cantidad de calor para que un mol de sust.
cambie su temperatura en 1 K

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

$$U = C_V R n T$$

Energía interna

Si T cambia, habrá un cambio
en la energía interna del gas

Primer principio
de la termodinámica

$$Q = \Delta U + W$$

$$\Delta U = C_V R n \Delta T$$

Mar 26, 2019

Nada se gana, nada se pierde, todo se transforma

- La **conservación de la energía** para un **sistema termodinámico** se expresa de la siguiente forma

$$Q = \Delta U + W$$

**Primer principio
de la termodinámica**

Q = Calor cedido al sistema (signo de ΔT)

ΔU = Cambio de la energía interna del sistema (signo de ΔT)

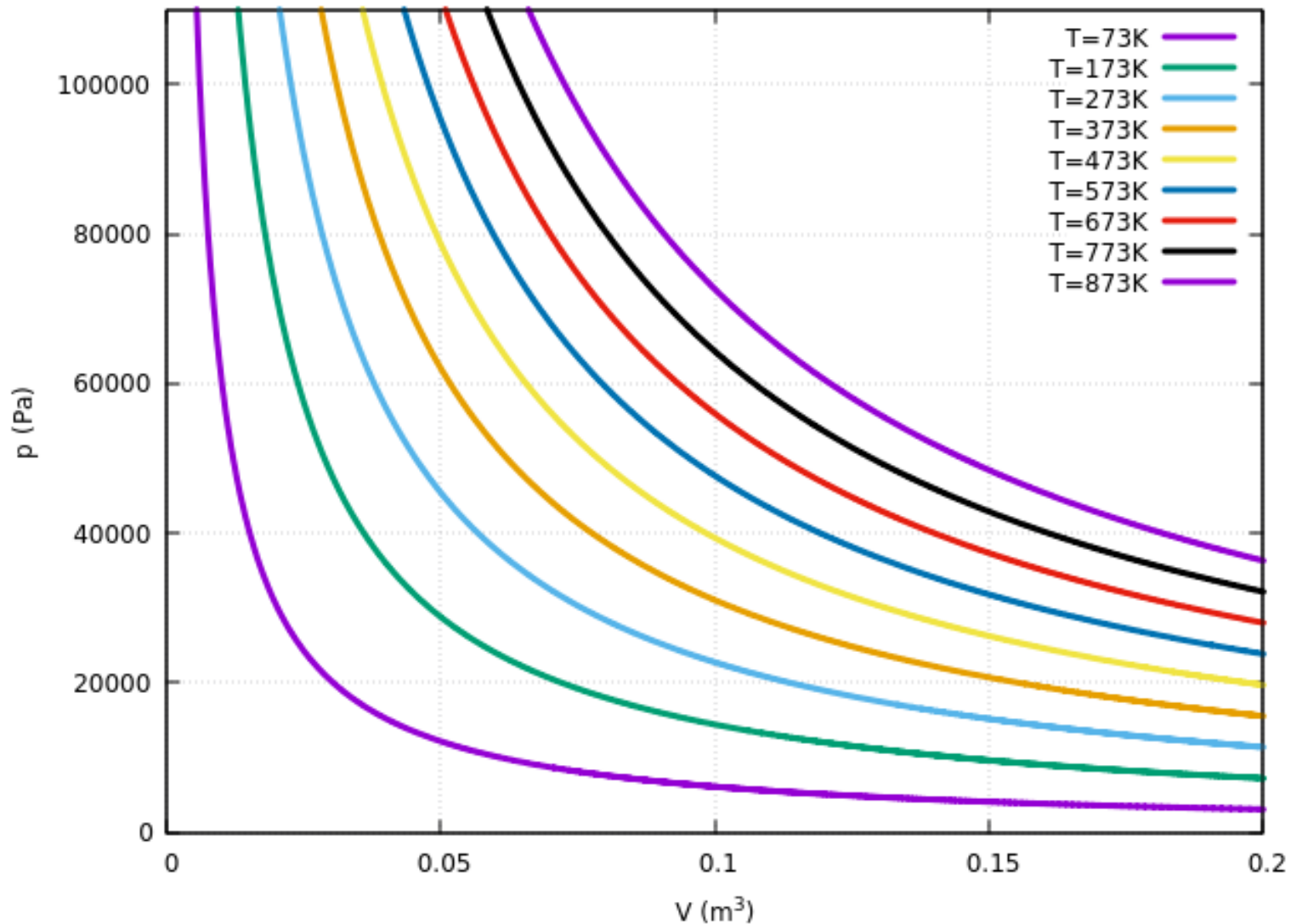
W = Trabajo realizado por el sistema (signo de ΔV)

Nueva transformación

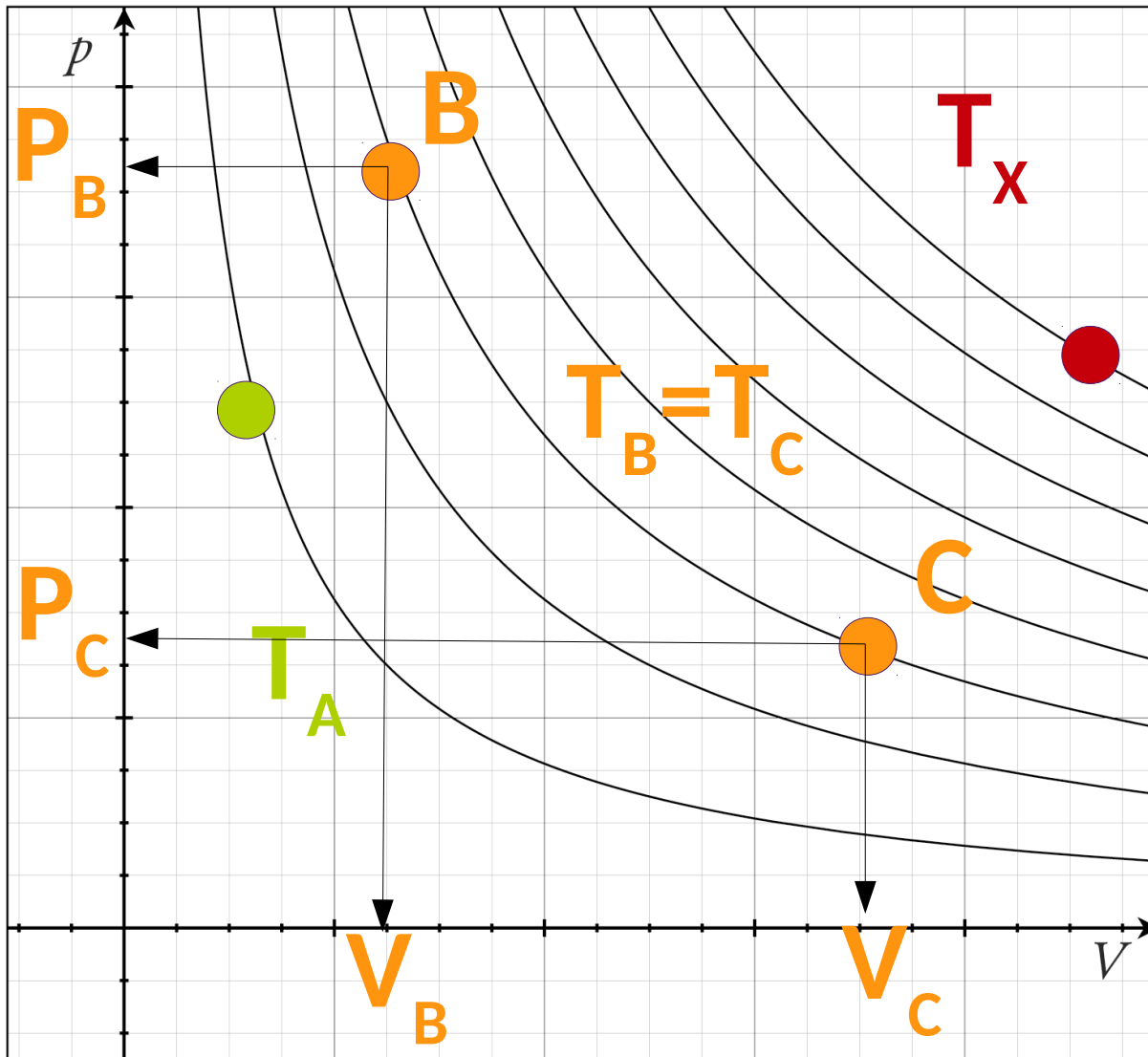
- Vimos transformaciones a $P=\text{cte}$ (isobara) y $V=\text{cte}$ (isocora)
 - **Isobara:**
 - $W = P \Delta V$
 - $\Delta U = \frac{z}{2} n R \Delta T$
 - $Q = \Delta U + W$
 - **Isocora:**
 - $W = 0$
 - $Q = C_V n \Delta T$
 - $Q = \Delta U$
- ¿Cómo será una expansión isotérmica?
 - **Baño térmico (p. ej.: Atmósfera, Océano, ...)**
 - Reservorio de calor a una temperatura T dada
 - Puede ceder o absorber calor sin que T se vea afectada
 - Un sistema en contacto con un baño \rightarrow evolución isotérmica

Transformación Isotérmica, $T = \text{cte}$

Si $T = \text{cte}$ $pV = nRT \rightarrow pV = \text{cte}$ (a n cte)



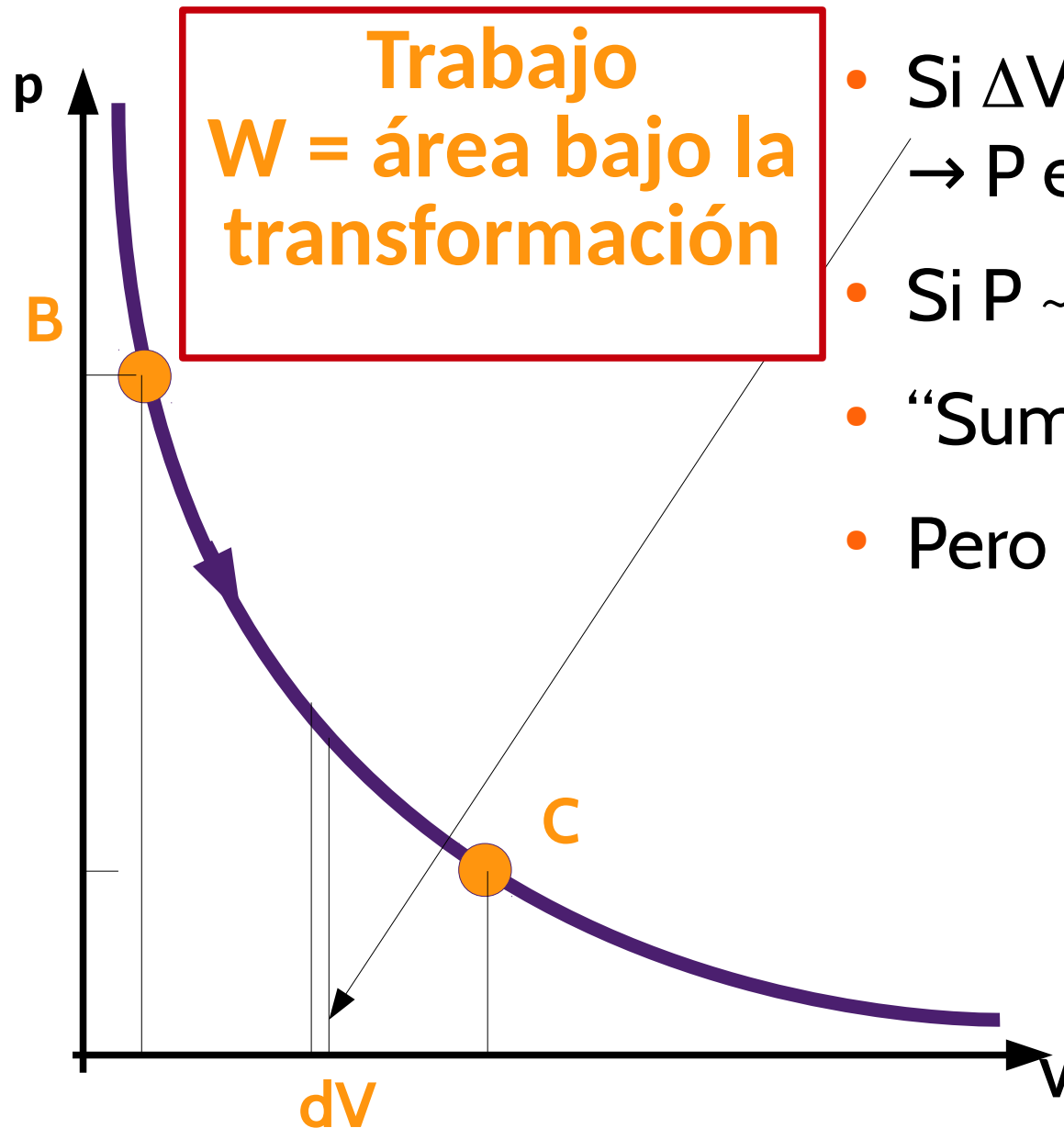
Transformación isotérmica



$$T_A < T_B < T_X$$

- 1) El gas se encuentra en el estado "B"
- 2) Evolucionando en forma isotérmica (baño térmico a $T_B = T_C$)
- 3) El gas finaliza en el estado "C"

Transformación isotérmica



- Si ΔV pequeño, $\Delta V \rightarrow dV$
 $\rightarrow P$ es aprox. constante
- Si $P \sim \text{cte} \rightarrow dW = p dV$
- “Sumando”: $W = \int_{V_B}^{V_C} p dV$
- Pero $P = n R T / V$:

$$W = \int_{V_B}^{V_C} n R T \frac{dV}{V}$$

$$W = n R T \int_{V_B}^{V_C} \frac{dV}{V}$$

$$W = n R T \ln \left(\frac{V_C}{V_B} \right)$$

- **Isobara:**

- $W = p \Delta V$
- $\Delta U = (z/2) n R \Delta T$
- $Q = \Delta U + W$

- **Isoterma:**

- $W = n R T \ln (V_f / V_i)$
- $\Delta U = 0$
- $Q = \Delta U + W \rightarrow Q = W$

- **Isocora:**

- $W = 0$
- $Q = C_v n \Delta T$
- $Q = \Delta U$

- **Adiabática**

- Próximamente en los mejores cines de su barrio

- Índice adiabático:

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v}$$

- z es la atomicidad del gas: $z=3,5,6$ para un gas mono, bi y triatómico respectivamente)
- Luego \rightarrow

$$\gamma = \frac{C_p + R}{C_v} \rightarrow \gamma = 1 + \frac{R}{C_v}$$

$$\gamma = 1 + \frac{R}{\frac{z}{2}R} \rightarrow \gamma = 1 + \frac{2}{z}$$

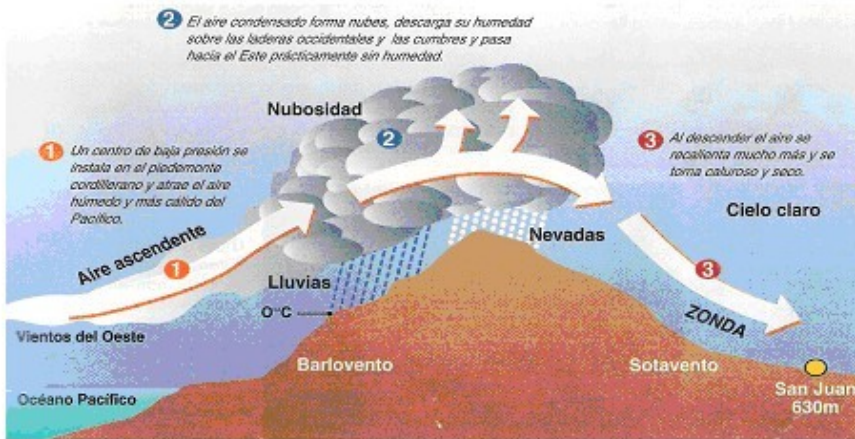
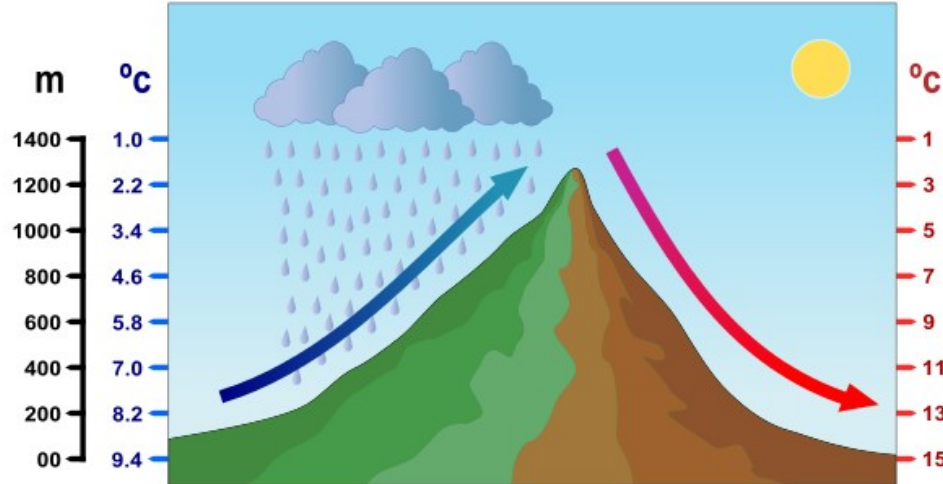
$$\gamma = \frac{z+2}{z}$$

Otra forma de escribir γ :

Último caso: No hay intercambio de calor

- No hay intercambio de calor con el medio
 - Recipiente muy aislado (calorímetro); ó
 - Transformación muy rápida (abriendo una Coca Cola)
- En este caso: **$Q = 0$ ← Transformación Adiabática**
- $Q = \Delta U + W \rightarrow 0 = \Delta U + W \rightarrow \mathbf{W = - \Delta U}$
- **En una expansión adiabática, el trabajo se realiza a costa de la energía interna del gas**
- Expansión adiabática → Brusco descenso de T
Y viceversa: en una compresión adiabática, todo el trabajo se convierte en energía interna (Zonda)

El zonda: efecto Föhn



El primer principio dice:

- $Q=0 \rightarrow W = - \Delta U \rightarrow \text{límite: } dW = -dU \rightarrow p dV = -dU$
- Pero $dU = (z/2) d(n R T)$ y por la ec. Estado, $nRT=pV$:

$$dU = \left(\frac{z}{2}\right) d(p V) \rightarrow dU = \left(\frac{z}{2}\right) (dp V + p dV)$$

$$\rightarrow p dV = -\frac{z}{2} V dp - \frac{z}{2} p dV$$

$$p dV + \left(\frac{z}{2}\right) p dV = -\left(\frac{z}{2}\right) V dp \rightarrow \left(\frac{z+2}{2}\right) p dV = -\left(\frac{z}{2}\right) V dp$$

$$\left(\frac{z+2}{z}\right) p dV = -V dp \rightarrow \gamma p dV = -V dp \rightarrow -\gamma \left(\frac{dV}{V}\right) = \frac{dp}{p}$$

- Integrando ambos lados:

$$-\gamma \int_{V_i}^{V_f} \frac{dV}{V} = \int_{p_i}^{p_f} \frac{dp}{p}$$

$$-\gamma \ln\left(\frac{V_f}{V_i}\right) = \ln\left(\frac{p_f}{p_i}\right)$$

$$\ln\left(\frac{V_i}{V_f}\right)^\gamma = \ln\left(\frac{p_f}{p_i}\right)$$

$$\left(\frac{V_i}{V_f}\right)^\gamma = \left(\frac{p_f}{p_i}\right)$$

Transformación Adiabática

$$p_i V_i^\gamma = p_f V_f^\gamma \rightarrow p V^\gamma = \text{cte} \rightarrow T V^{\gamma-1} = \text{cte}$$

La cuenta "a mano"



Por el primer principio $Q = W + \Delta U$ y como $Q = 0 \Rightarrow W = -\Delta U$

luego $dW = -dU \Rightarrow$ y como $dU = \left(\frac{\gamma}{\gamma-1}\right) nRdT = \left(\frac{\gamma}{\gamma-1}\right) d(nRT) = \left(\frac{\gamma}{\gamma-1}\right) d(pV)$ Use Ec. Estado

$\Rightarrow dW = -dU \rightarrow p dV = -\left(\frac{\gamma}{\gamma-1}\right) (V dp + p dV)$. Agregando

$$p dV + \left(\frac{\gamma}{\gamma-1}\right) p dV = -\frac{\gamma}{\gamma-1} V dp \rightarrow \left(1 + \frac{\gamma}{\gamma-1}\right) p dV = -\frac{\gamma}{\gamma-1} V dp$$

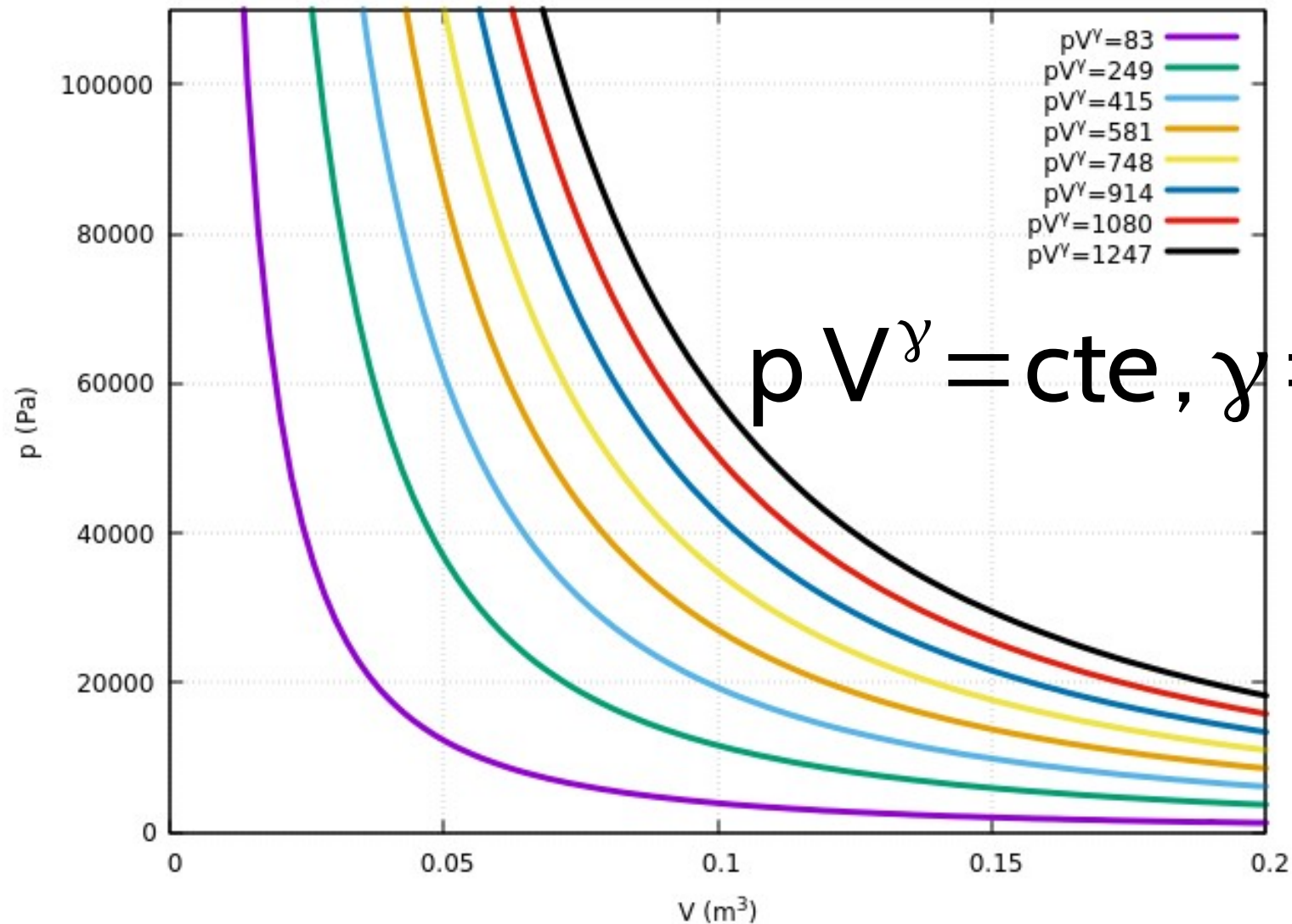
$$\Rightarrow \left(\frac{\gamma+1}{\gamma-1}\right) \left(\frac{\gamma-1}{\gamma}\right) p dV = -V dp \rightarrow \left(\frac{\gamma+1}{\gamma}\right) p dV = -V dp \Rightarrow \gamma p dV = -V dp$$

$$\Rightarrow -\gamma \frac{p dV}{V} = \frac{dp}{p} \quad \text{Integrando: } -\gamma \int_{V_i}^{V_f} \frac{dV}{V} = \int_{P_i}^{P_f} \frac{dp}{p}$$

$$\rightarrow -\gamma \ln \left(\frac{V_f}{V_i} \right) = \ln \left(\frac{P_f}{P_i} \right) \rightarrow \ln \left(\frac{V_i}{V_f} \right)^\gamma = \ln \left(\frac{P_f}{P_i} \right) \rightarrow \frac{V_i^\gamma}{V_f^\gamma} = \frac{P_f}{P_i}$$

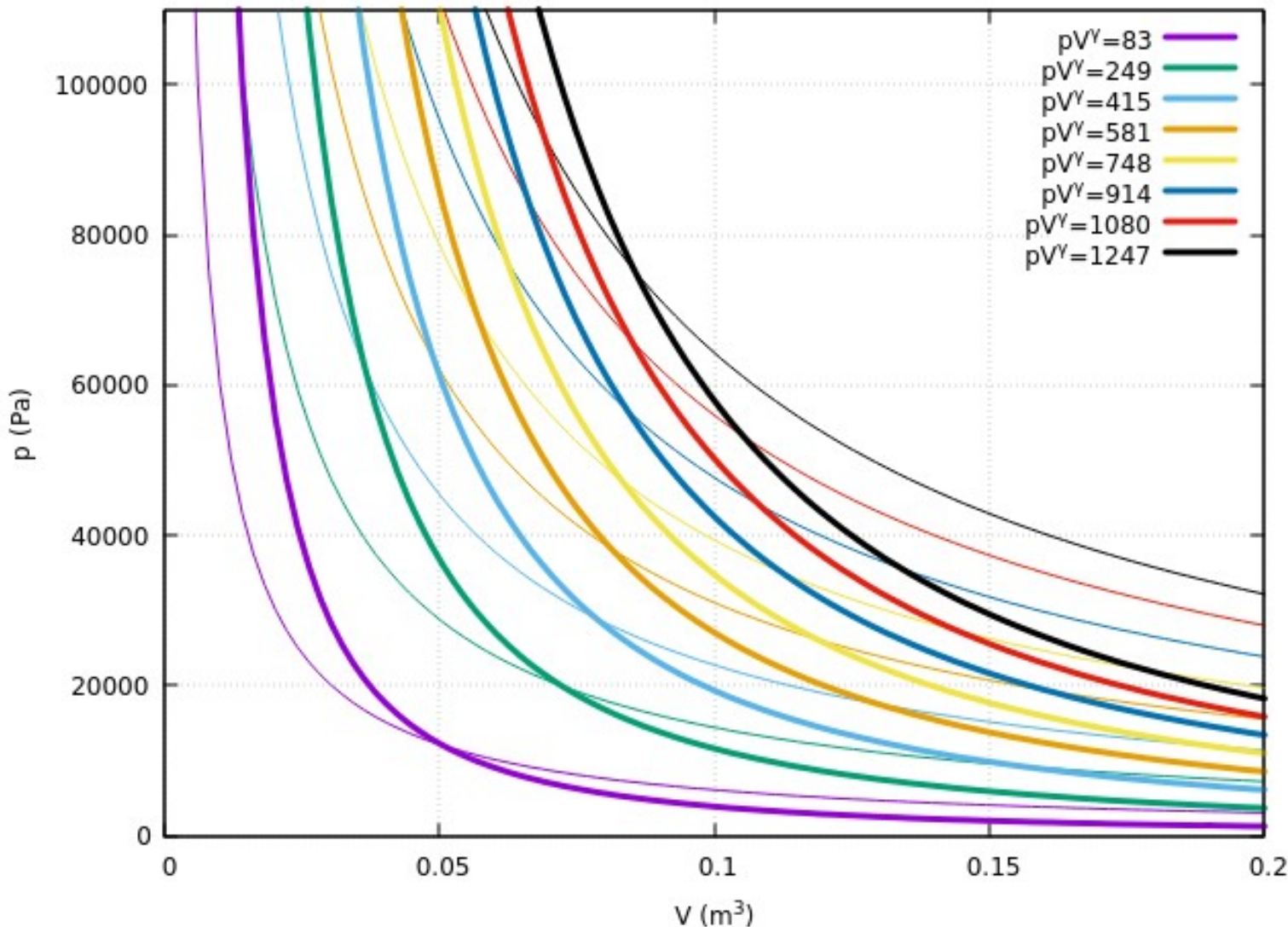
$$\Rightarrow P_i V_i^\gamma = P_f V_f^\gamma \rightarrow \boxed{p V^\gamma = \text{cte}}$$

Curvas adiabáticas



$$p V^\gamma = \text{cte}, \gamma = 5/3$$

Adiabáticas vs isotermas



- Se aproximan asintóticamente a los ejes
- Cada adiabática intersecta a una isoterma en un único punto (volveremos...)
- Las adiabáticas son isentrópicas (volveremos...)

Trabajo adiabático

- Según el primer principio y teniendo en cuenta $Q=0$:

$$W = -\Delta U \rightarrow W = -\frac{Z}{2} n R \Delta T \rightarrow W = -\frac{Z}{2} n R (T_f - T_i)$$

$$W = -\frac{Z}{2} (P_f V_f - P_i V_i)$$

$$W = -\left(\frac{P_f V_f - P_i V_i}{\gamma - 1} \right)$$

- **Isobara:**

- $W = p \Delta V$
- $\Delta U = (z/2) n R \Delta T$
- $Q = \Delta U + W$

- **Isoterma:**

- $W = n R T \ln (V_f / V_i)$
- $\Delta U = 0$
- $Q = \Delta U + W \rightarrow Q = W$

$$Q = \Delta U + W$$

- **Isocora:**

- $W = 0$
- $Q = C_v n \Delta T$
- $Q = \Delta U$

- **Adiabática**

- $W = -\Delta U$
- $\Delta U = (z/2) n R \Delta T$
- $Q = 0 \rightarrow W = -\Delta U$

$$PV = n R T$$