

Universidad Nacional de Río Negro

Física III B – 2021

- **Unidad** 02
- **Clase** U02 C01 - 07/30
- **Fecha** 09 Abr 2021
- **Cont** Primer principio
- **Cátedra** Asorey - Calderón
- **Web** <https://gitlab.com/asoreyh/unrn-f3b>



Unidad 2: Primer Principio

Unidad 1

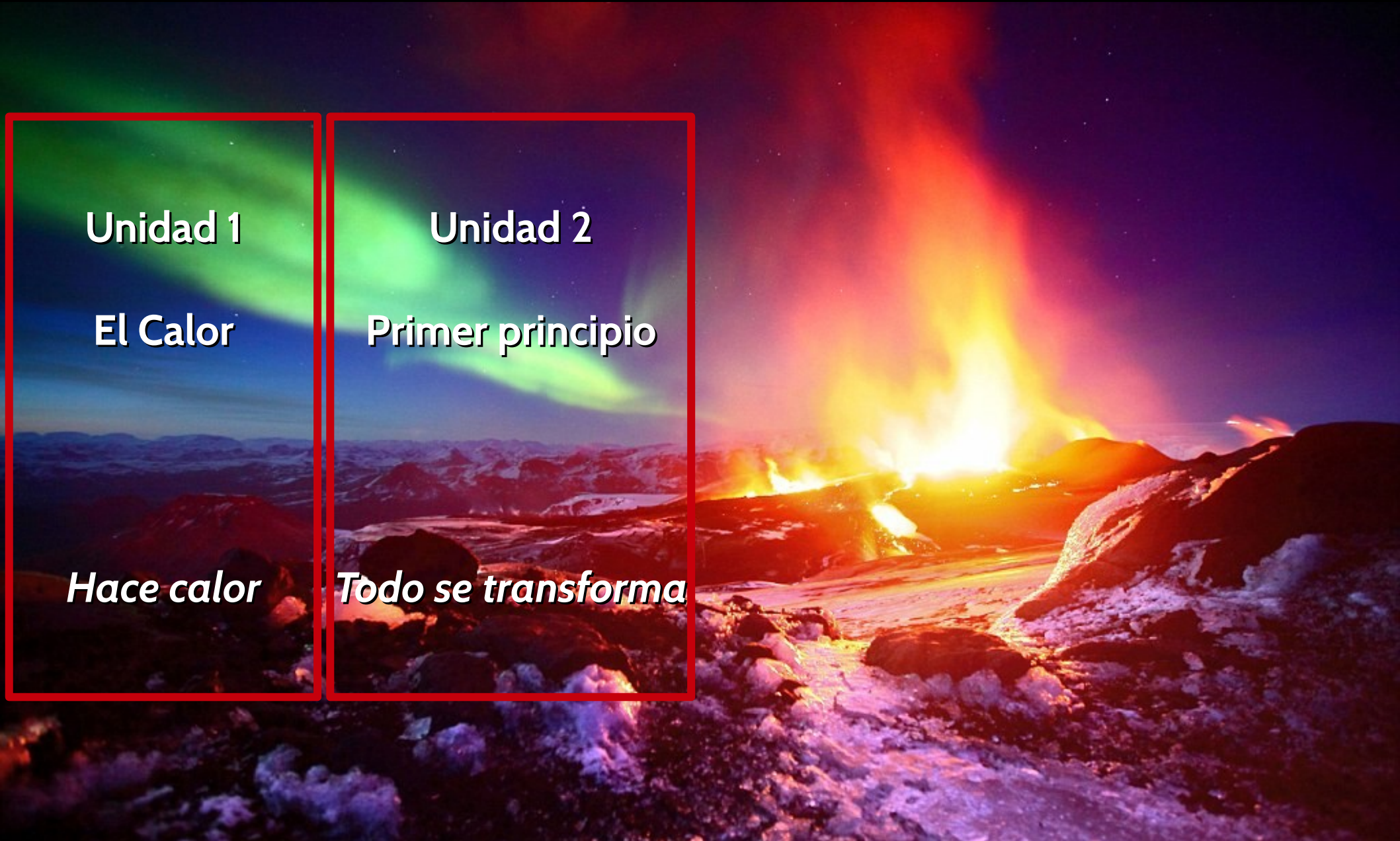
El Calor

Hace calor

Unidad 2

Primer principio

Todo se transforma



Módulo 1 - Unidad 2: Primer Principio

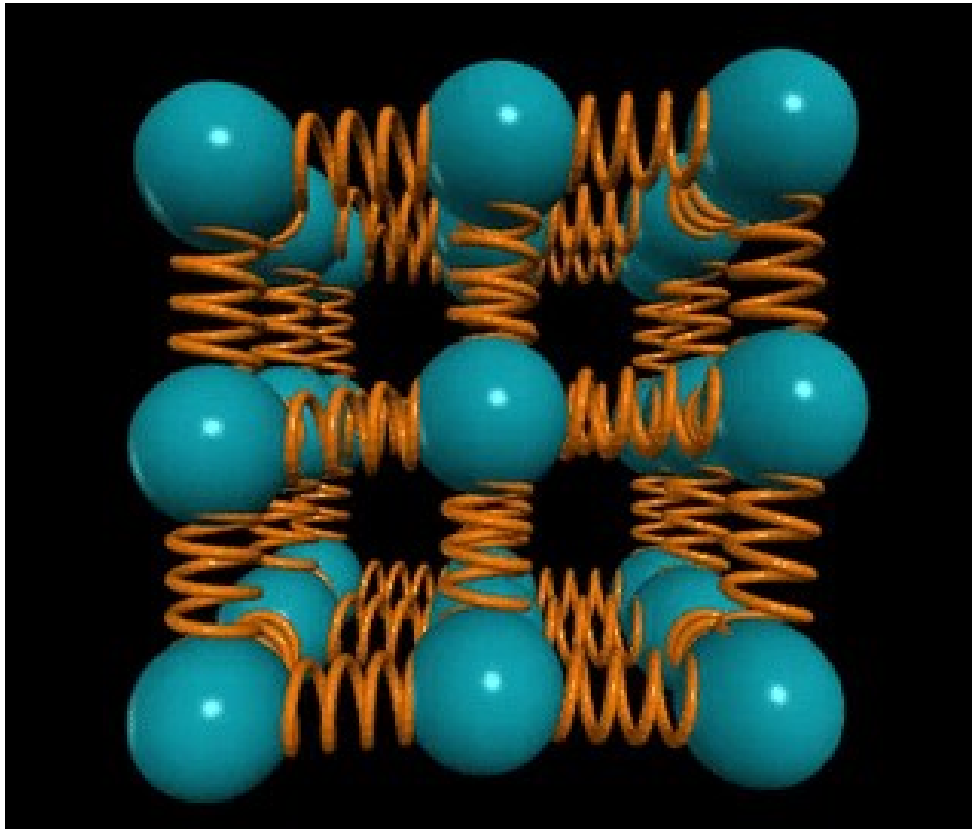
- **Calor y trabajo.** Equivalente mecánico del calor. Experimento de Joule. **Sistemas.** Fuentes de calor. Potenciales termodinámicos. **Primer principio. Flujo de calor.** Muerte térmica. Máquinas térmicas.



- ¿Por qué se usa U para la energía interna?
 - En el Siglo XIX se usaba en general la letra V como símbolos para las energías potenciales (típicamente por la relación entre la energía potencial electrostática y el Voltaje)
 - Rankine introduce en 1853 el concepto de Energía Interna (W. J. Rankine, *On the general law of the transformation of energy*, Proc. of the Philosophical Society of Glasgow, vol. 3, no. 5, pages 276-280, Feb 1853)
 - Usó la letra U para esta forma de energía
 - **Error tipográfico:** la U y la V eran intercambiables en latín
 - **Pragmatismo:** Para diferenciar del volumen V

Ley de Dulong-Petite

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



- ¿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:

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

¿Cómo se explica ese resultado?

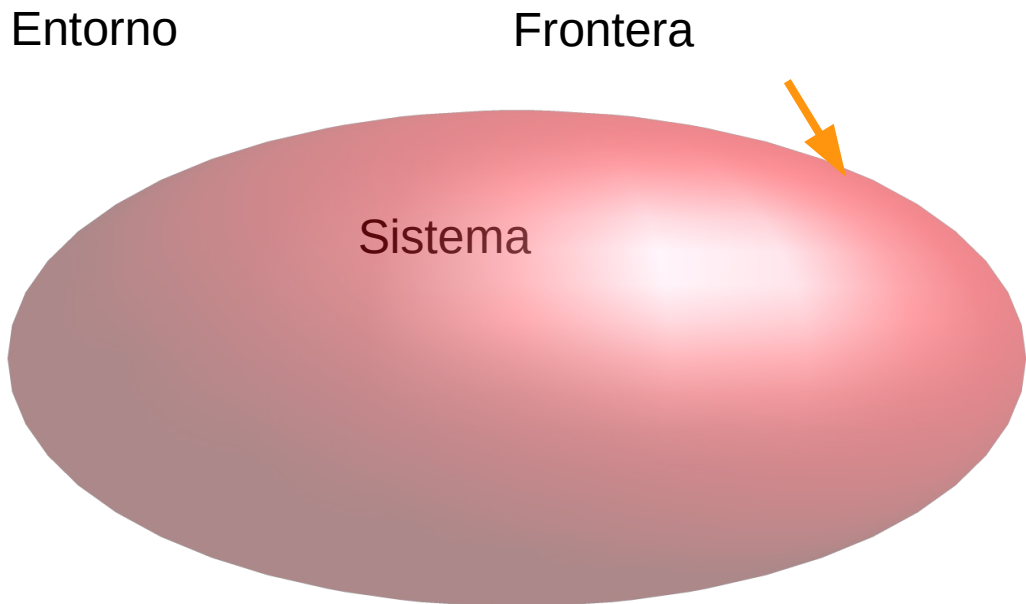
- Entonces, para calentar 100K a 1 kg de metal:
 - Cobre: 39250.3 J
 - Plomo: 12037,6 J
- ¿Por qué es menor para el plomo respecto al cobre?
- La capacidad calorífica c de un cuerpo con calor específico C y masa molar M es entonces:

Capacidad
Calorífica

$$c = \frac{C}{M}$$

$$[c] = \frac{[C]}{[M]} = \frac{\frac{\text{J}}{\text{mol K}}}{\frac{\text{kg}}{\text{mol}}} = \frac{\text{J}}{\text{kg K}}$$

- **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

Fases de un sistema termodinámico

- **Fases** (¡no confundir con estado de agregación!)
zonas macroscópicas de un sistema con propiedades físicas y químicas homogéneas
 - Sistema monofásico (una fase) → sistema homogéneo
 - Sistema de varias fases → sistema heterogéneo o mezcla



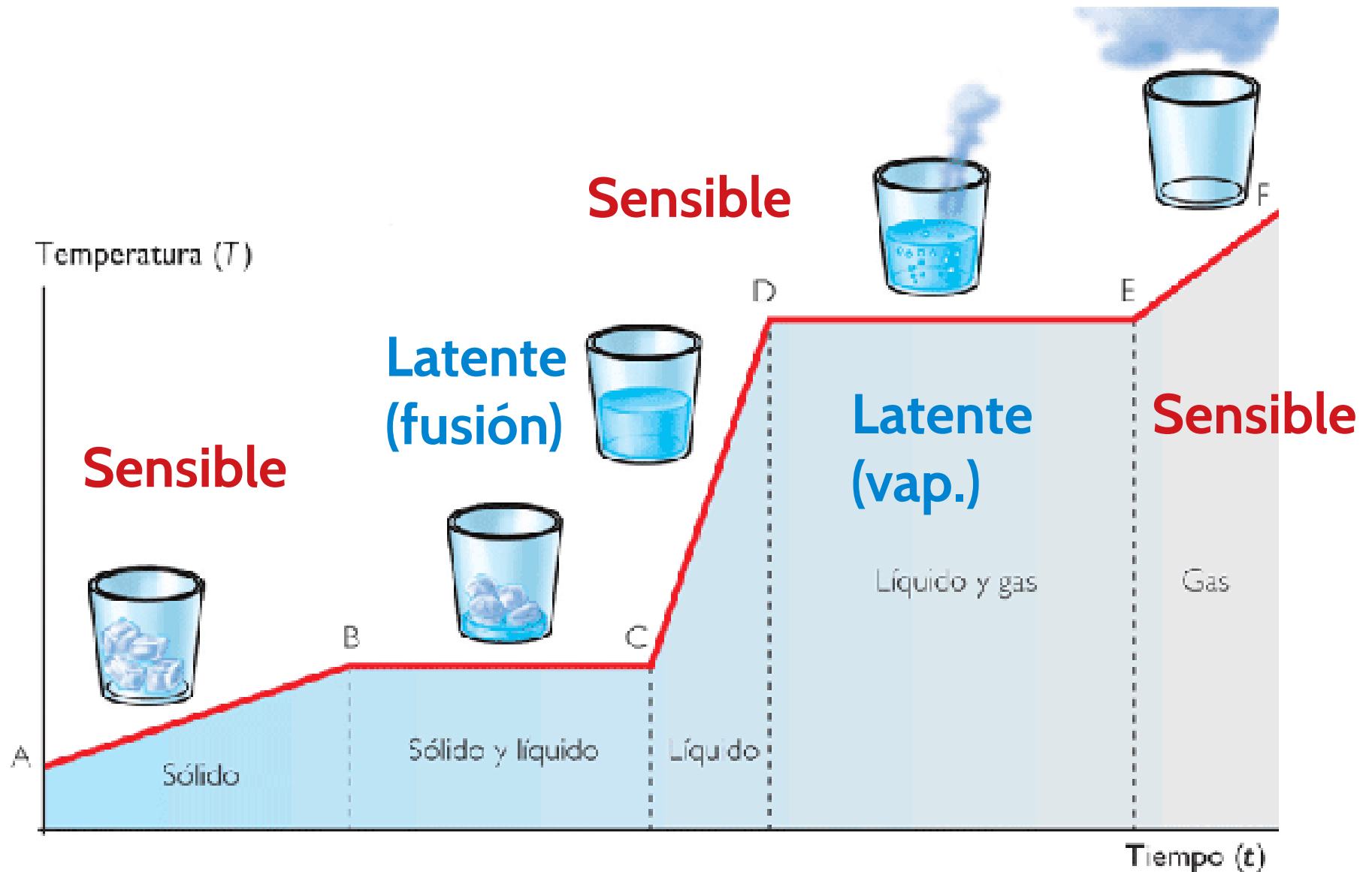
Calor latente específico

- **Calor latente:** calor liberado o absorbido por un sistema termodinámico durante una transformación a temperatura constante (*latente* = escondido, 1762 J. Black)
- 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



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)

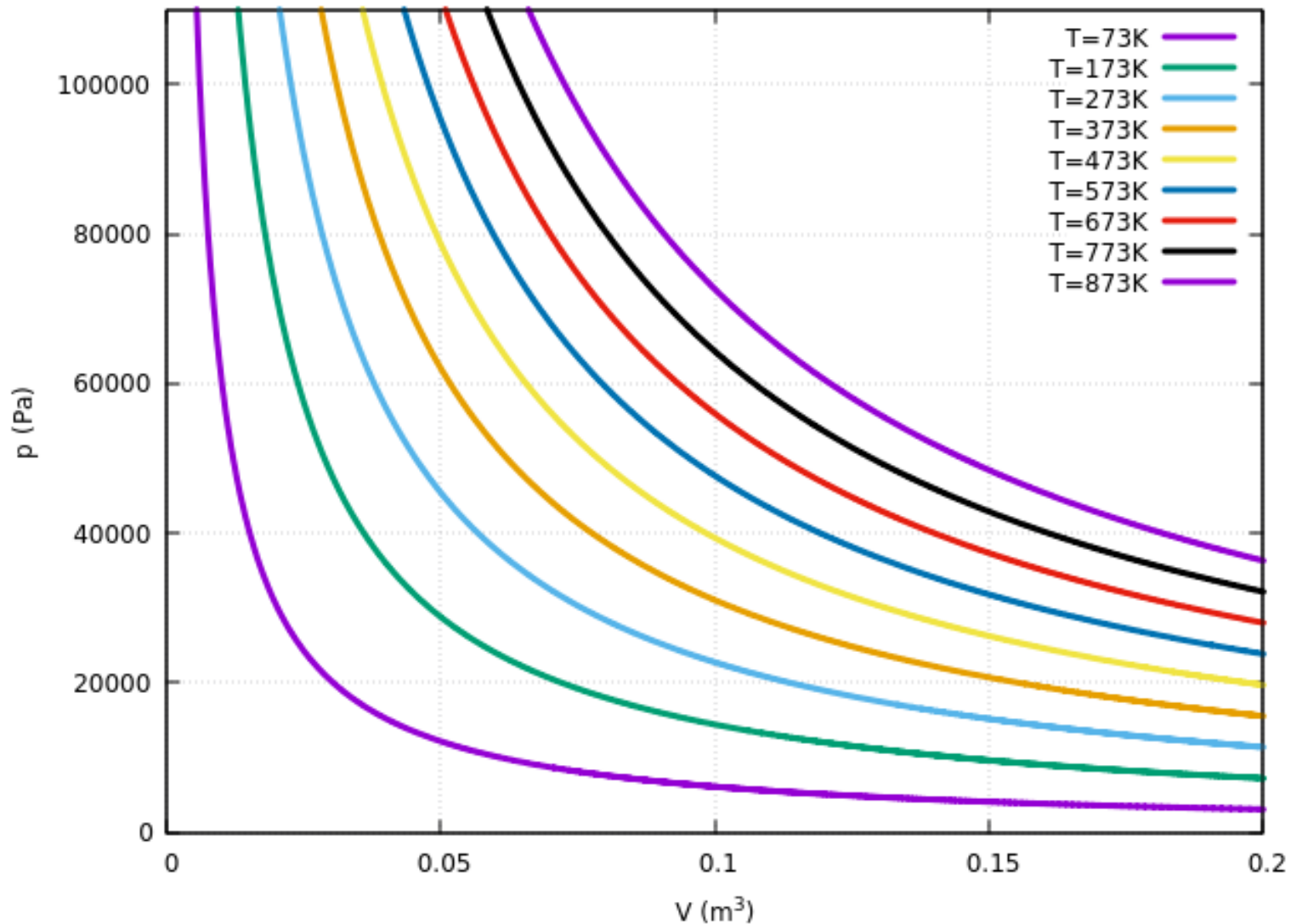
W = Trabajo realizado por el sistema (signo de ΔV)

Nueva transformación

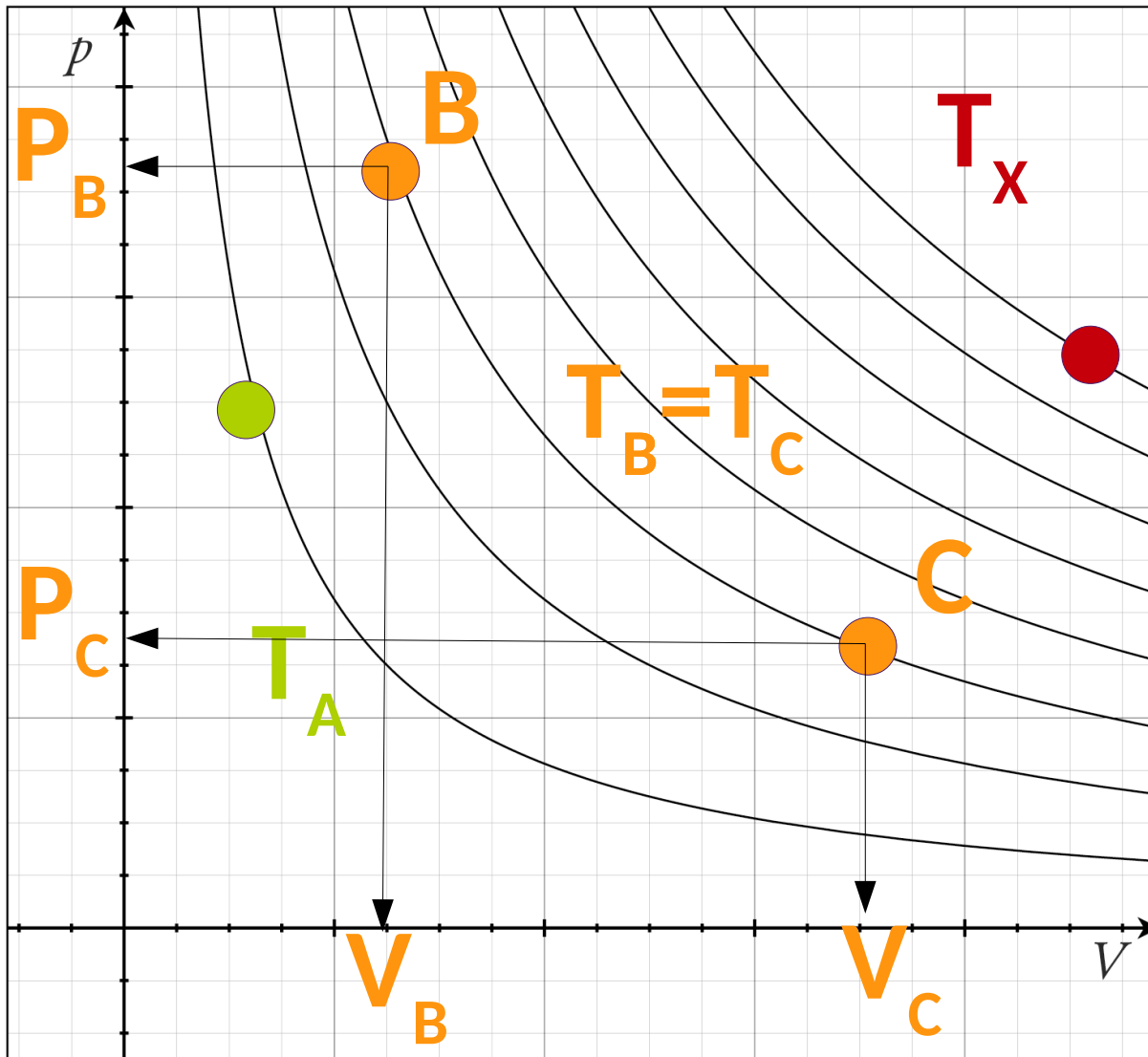
- Vimos transformaciones a $P=\text{cte}$ (isobara) y $V=\text{cte}$ (isocora)
 - **Isobara:**
 - $W = P \Delta V$
 - $\Delta U = \frac{z}{2} n R \Delta T$
 - $Q = \Delta U + W$
 - **Isocora:**
 - $W = 0$
 - $Q = C_V n \Delta T$
 - $Q = \Delta U$
- ¿Cómo será una expansión isotérmica?
 - **Baño térmico (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)



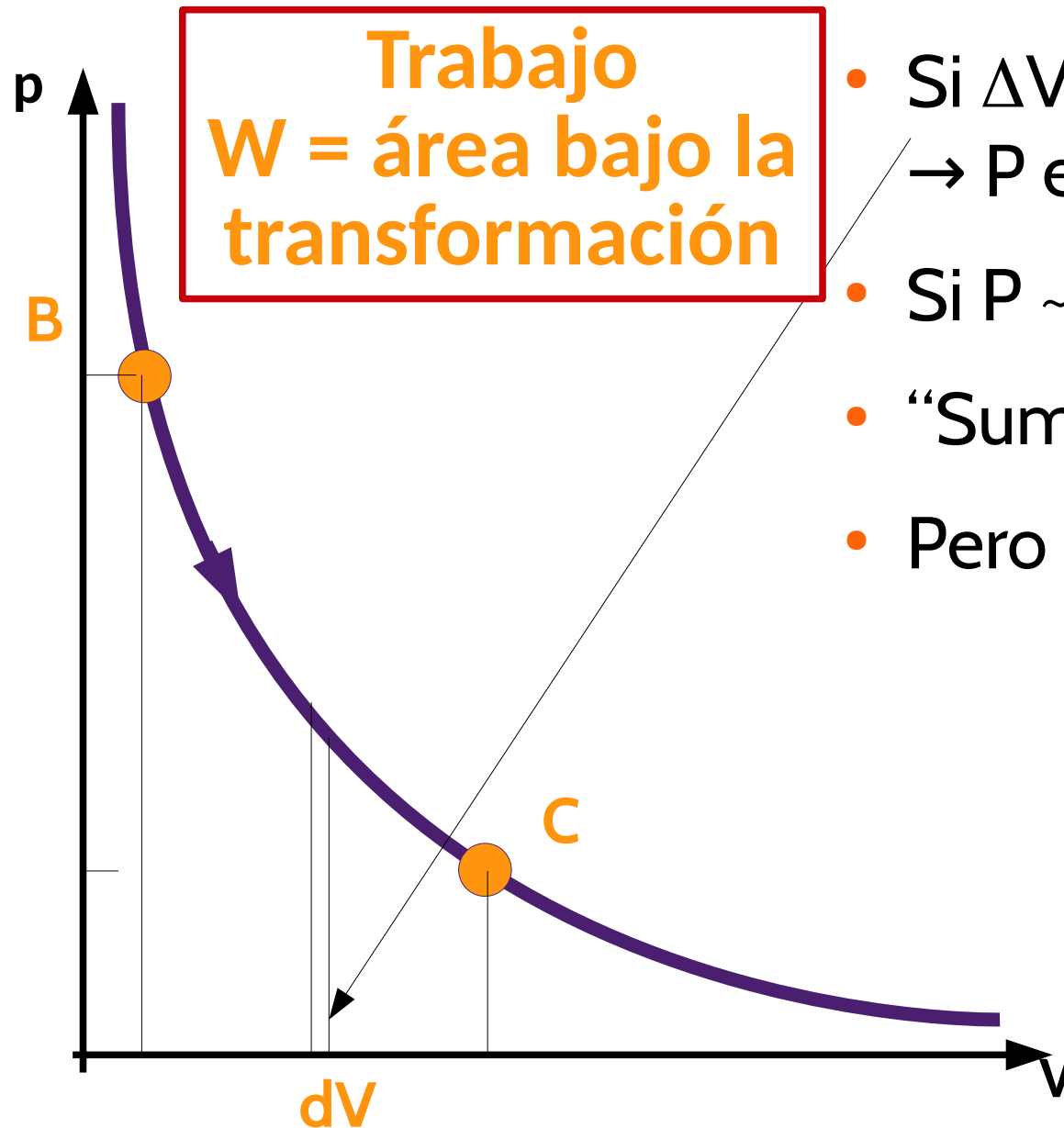
Transformación isotérmica



$$T_A < T_B < T_X$$

- 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**

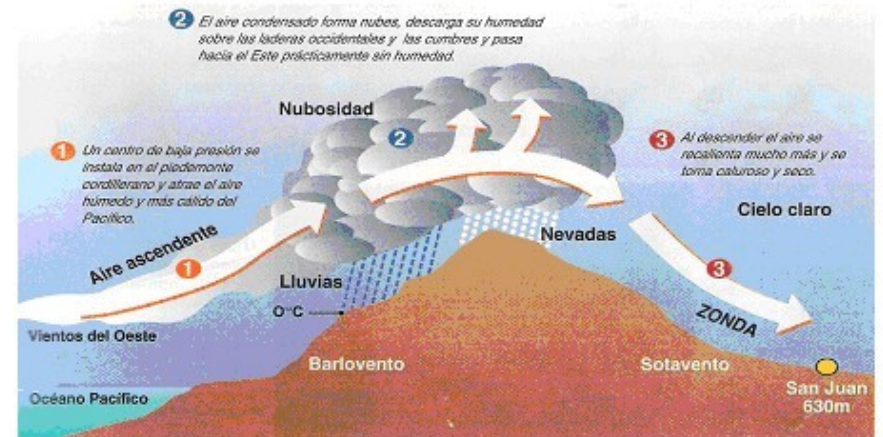
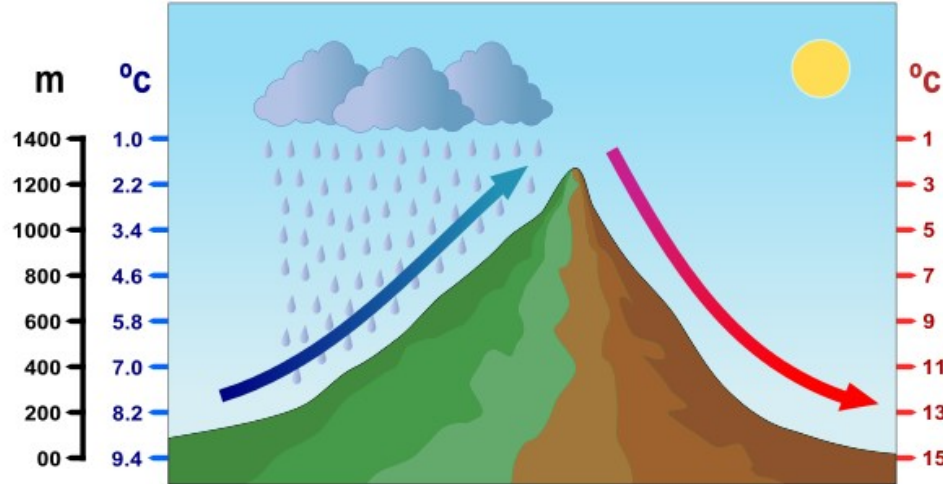
- Índice adiabático

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} \rightarrow \gamma = \frac{z+2}{z}$$

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, $nRT=pV$:

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

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

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

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



¡Ánimo!

- 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

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

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

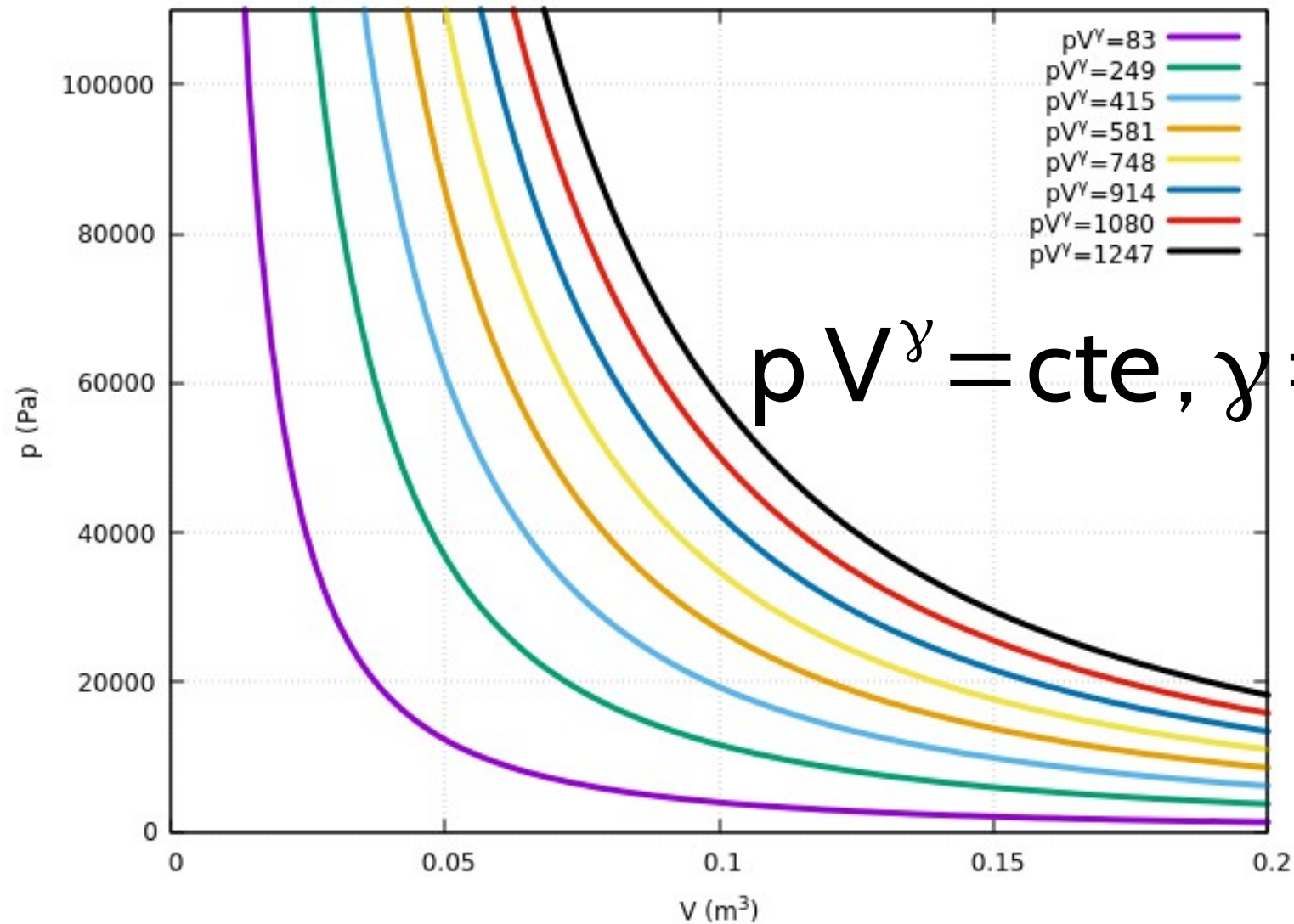
$$\Rightarrow \left(\frac{\gamma+1}{\gamma-1}\right) \left(\frac{\gamma}{\gamma-1}\right) p dV = -V dp \rightarrow \left(\frac{\gamma+1}{\gamma-1}\right) p dV = -V dp \Rightarrow \gamma p dV = -V dp$$

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

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

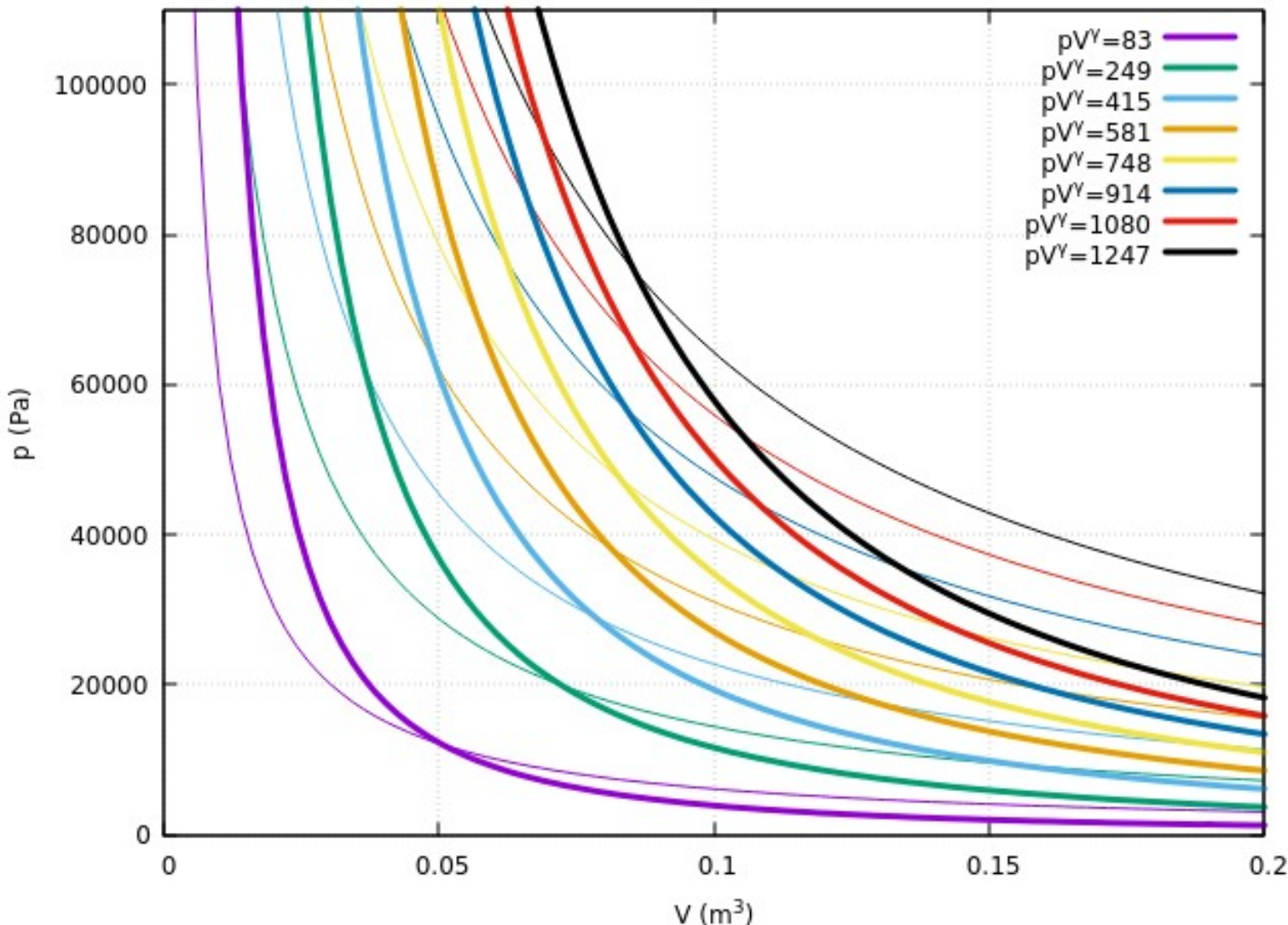
$$\Rightarrow p_i V_i^\gamma = p_f V_f^\gamma \rightarrow \boxed{pV^\gamma = \text{cte}}$$

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**

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

$$PV = n R T$$