

Universidad Nacional de Río Negro

Física III B – 2021

- **Unidad** 02
- **Clase** U02 C02 - 08/30
- **Fecha** 10 Abr 2021
- **Cont** Transformaciones y Ciclos
- **Cátedra** Asorey - Calderón
- **Web** <https://gitlab.com/asoreyh/unrn-f3b>



Unidad 2: Primer Principio

Unidad 1

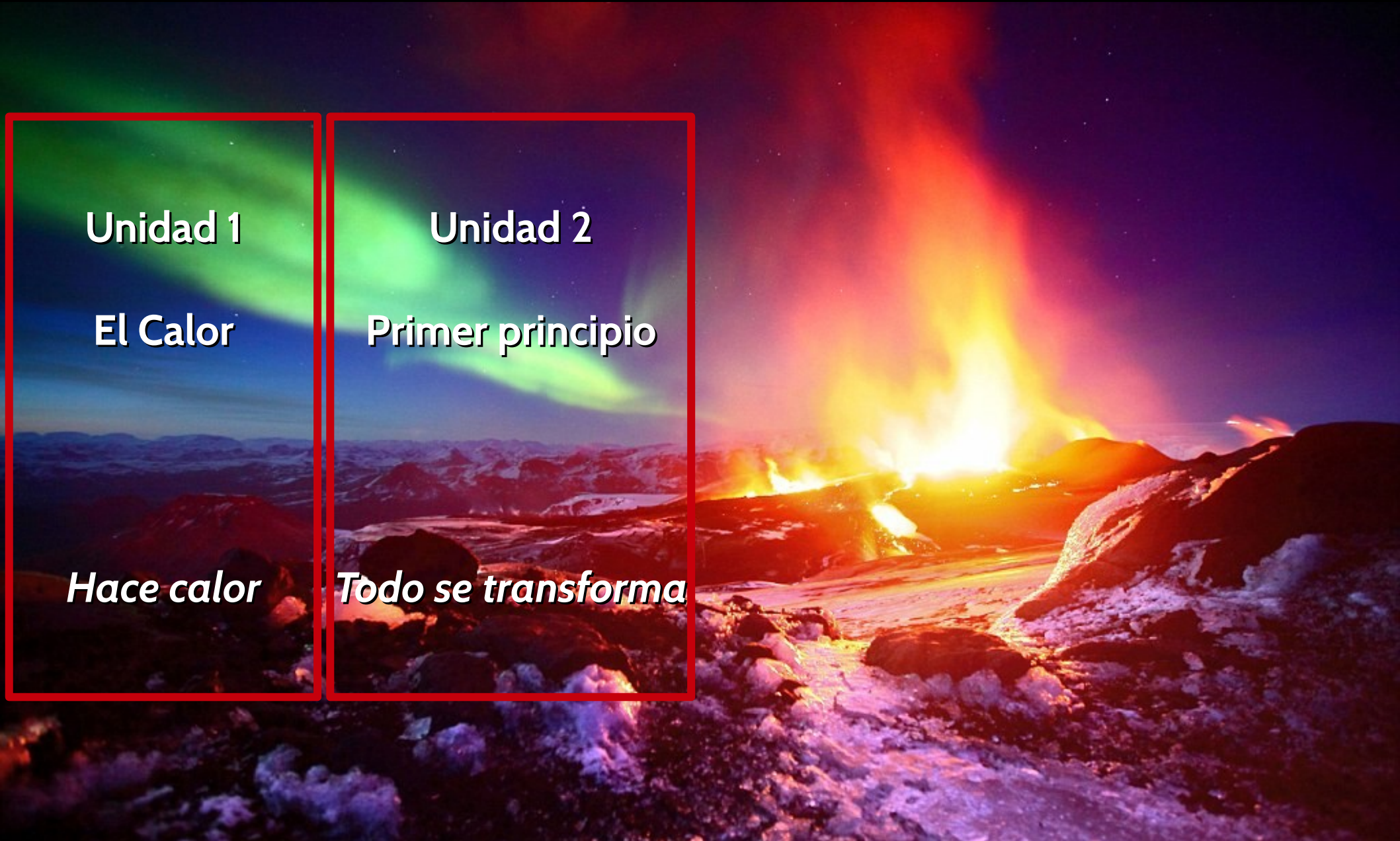
El Calor

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.



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)

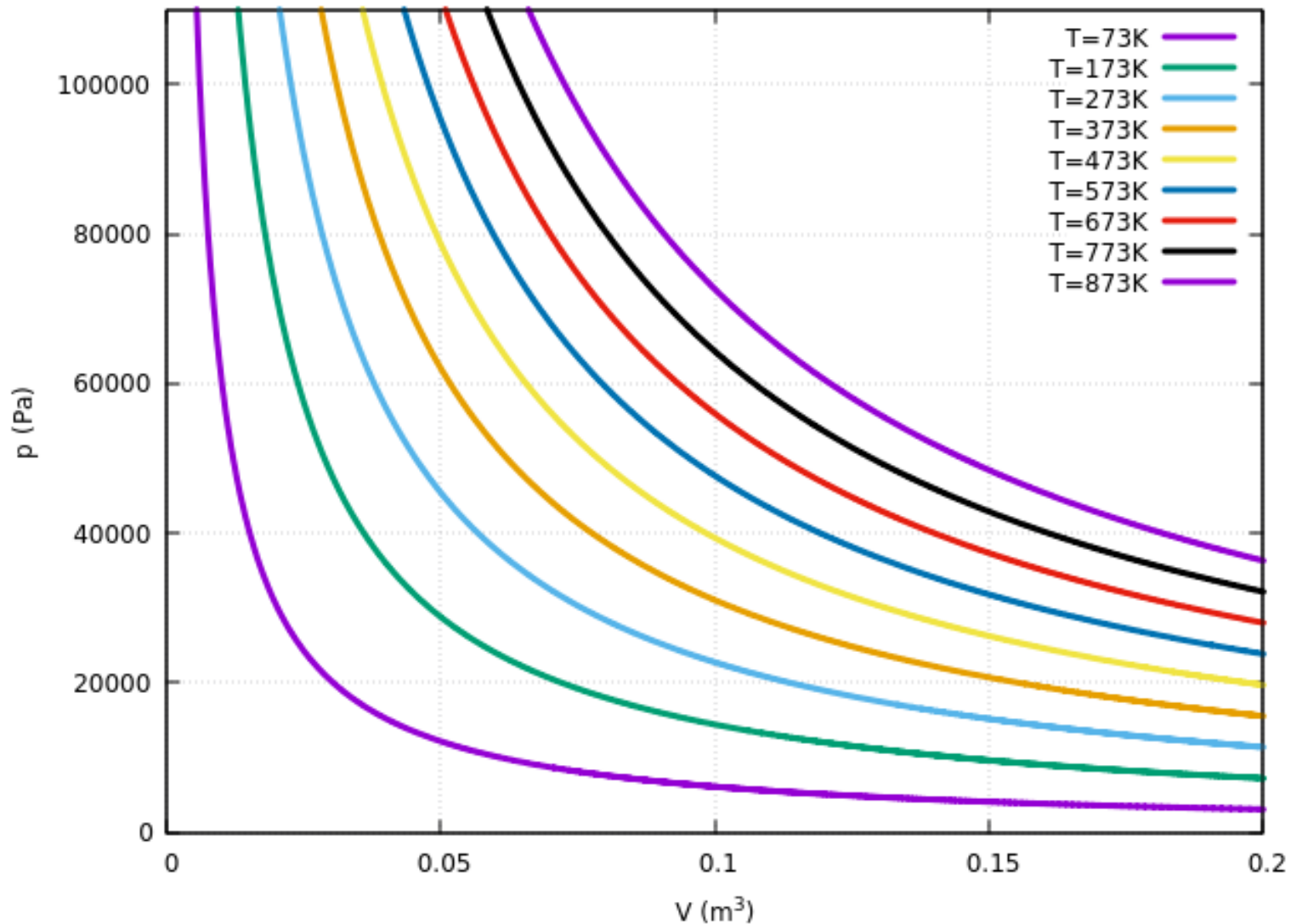
W = Trabajo realizado por el sistema (signo de ΔV)

Nueva transformación

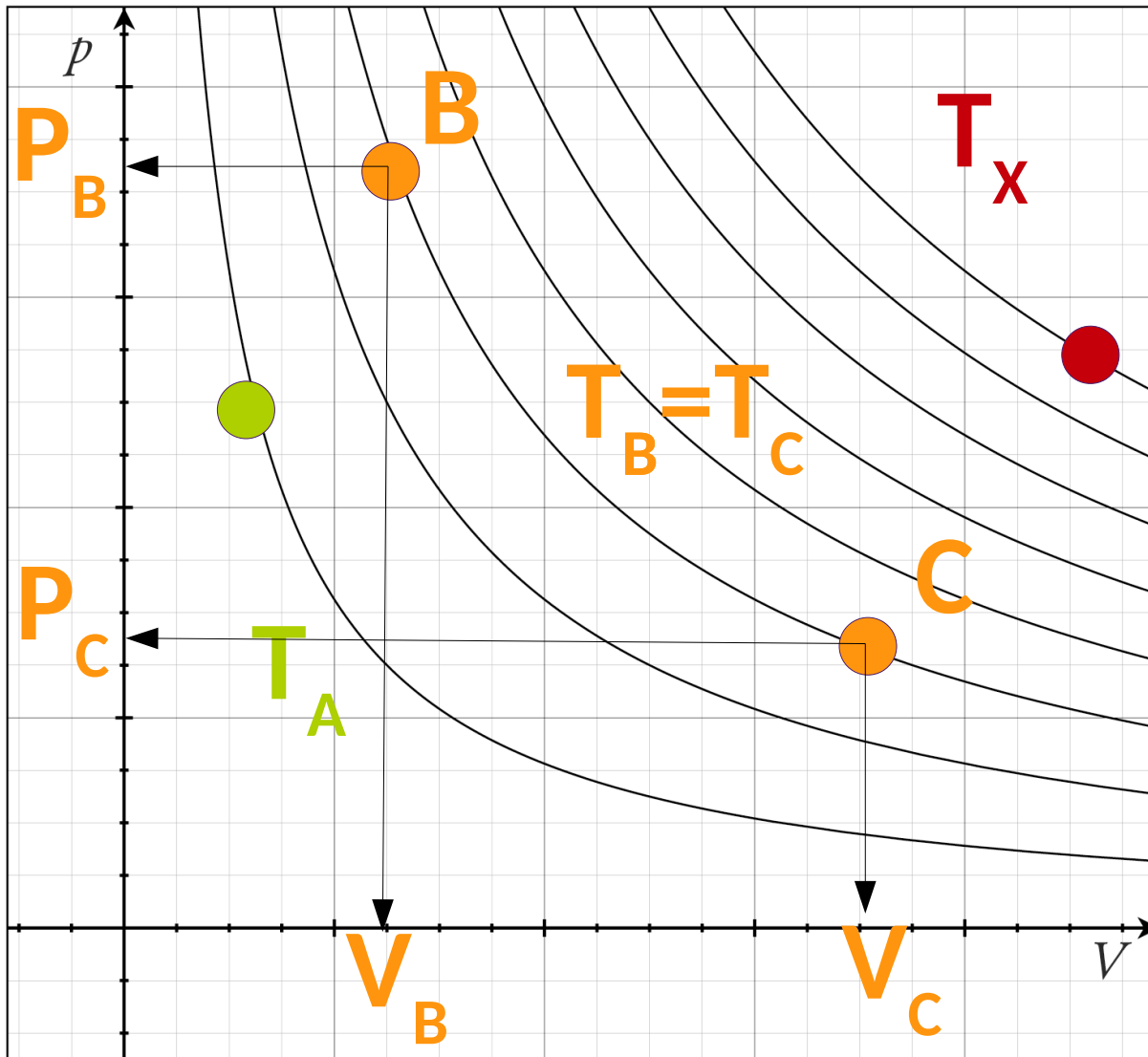
- Vimos transformaciones a $P=\text{cte}$ (isobara) y $V=\text{cte}$ (isocora)
 - **Isobara:**
 - $W = P \Delta V$
 - $\Delta U = \frac{z}{2} n R \Delta T$
 - $Q = \Delta U + W$
 - **Isocora:**
 - $W = 0$
 - $Q = C_V n \Delta T$
 - $Q = \Delta U$
- ¿Cómo será una expansión isotérmica?
 - **Baño térmico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



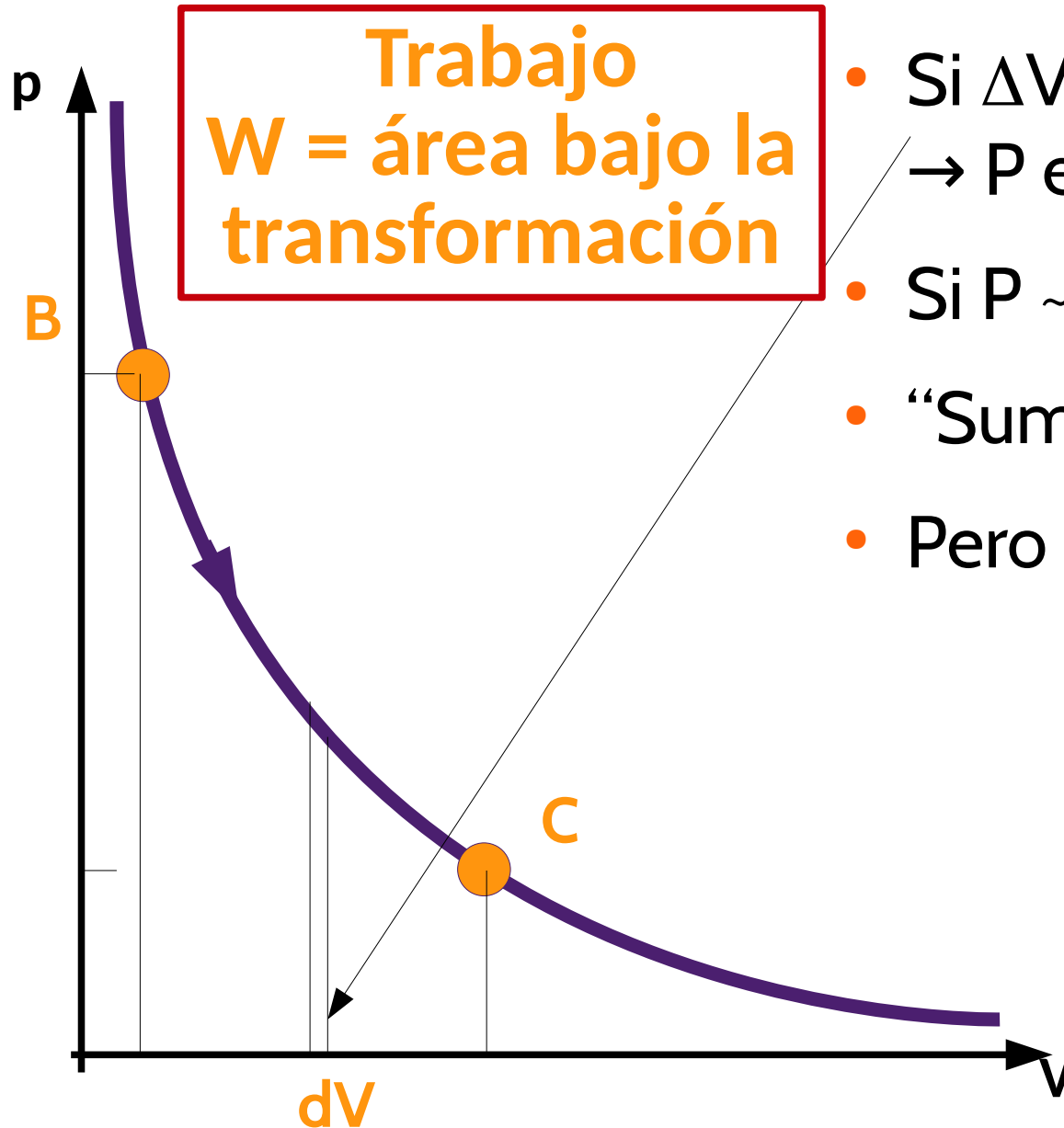
Transformación isotérmica



$$T_A < T_B < T_X$$

- 1) El gas se encuentra en el estado "B"
- 2) Evolucionar 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**

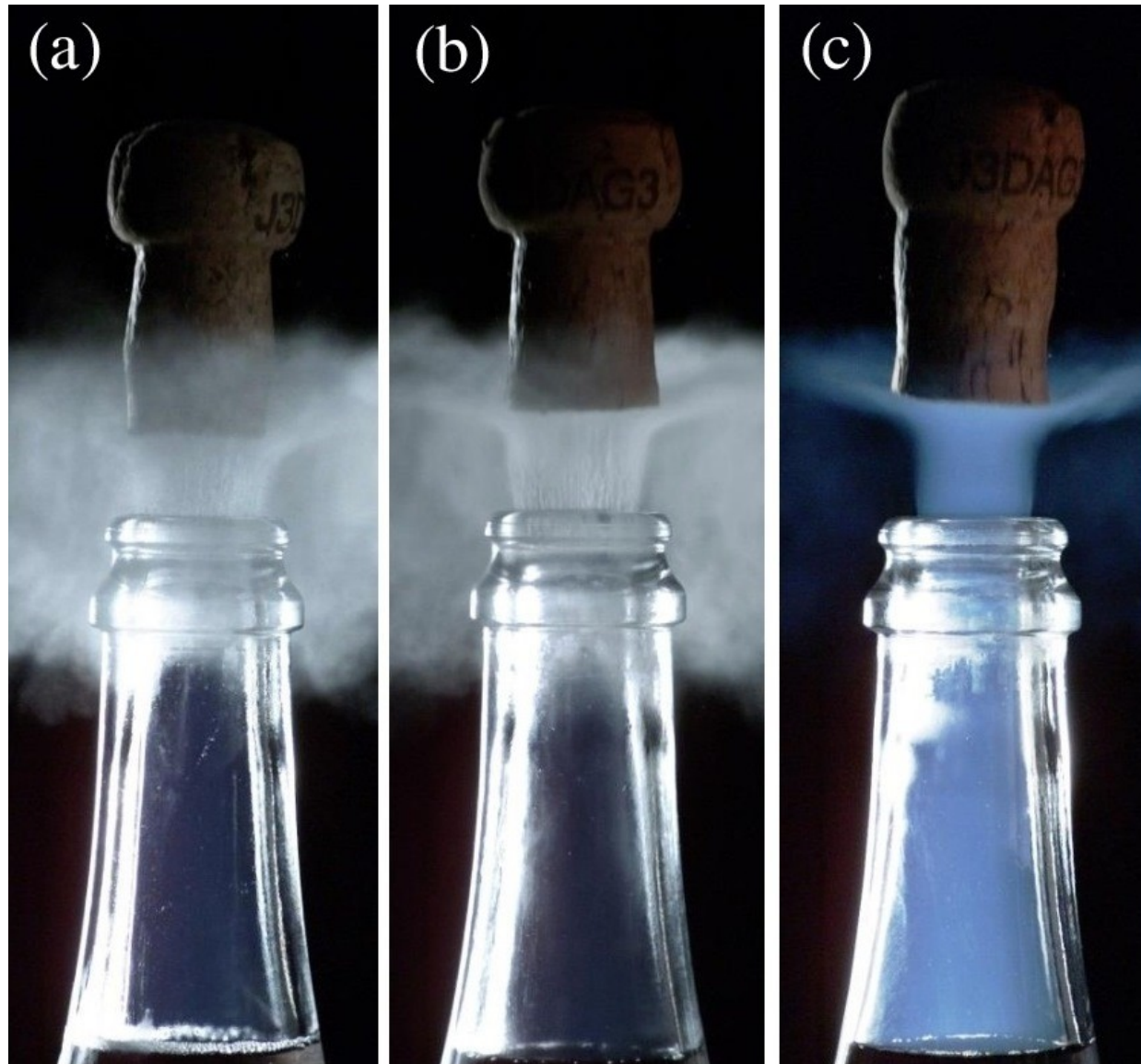
- Índice adiabático

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

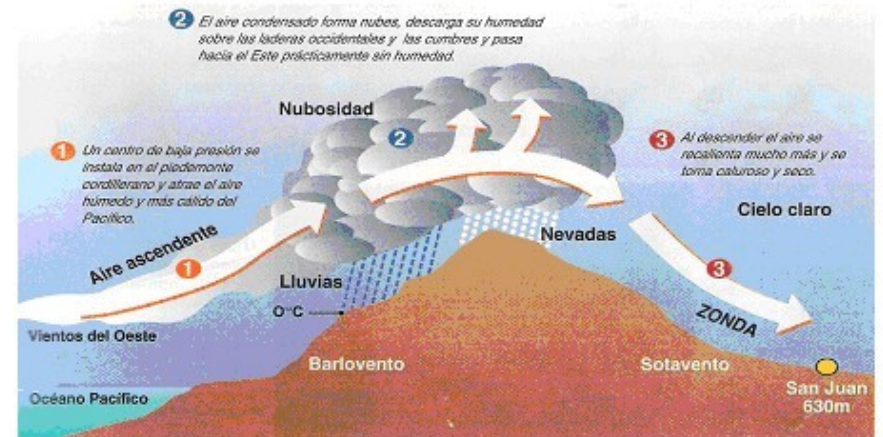
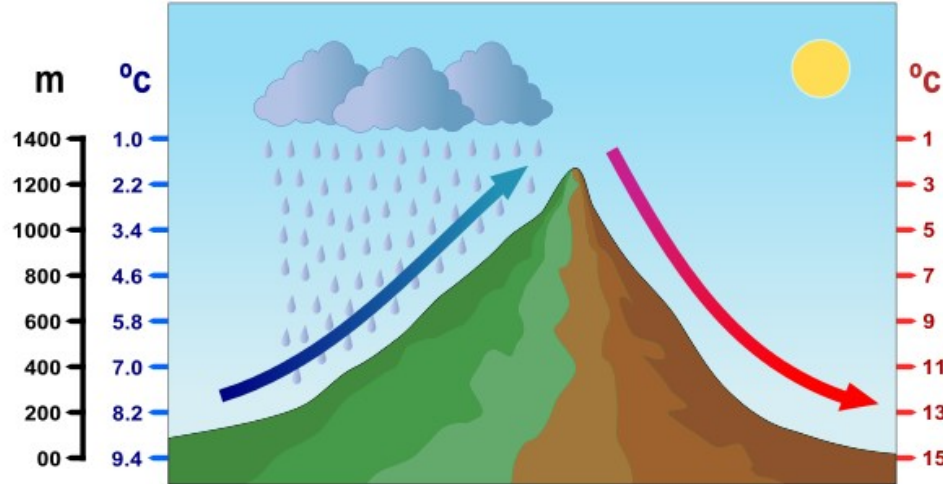
Último caso: No hay intercambio de calor

- 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)

Sepa física y sea el alma de la fiesta



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

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

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

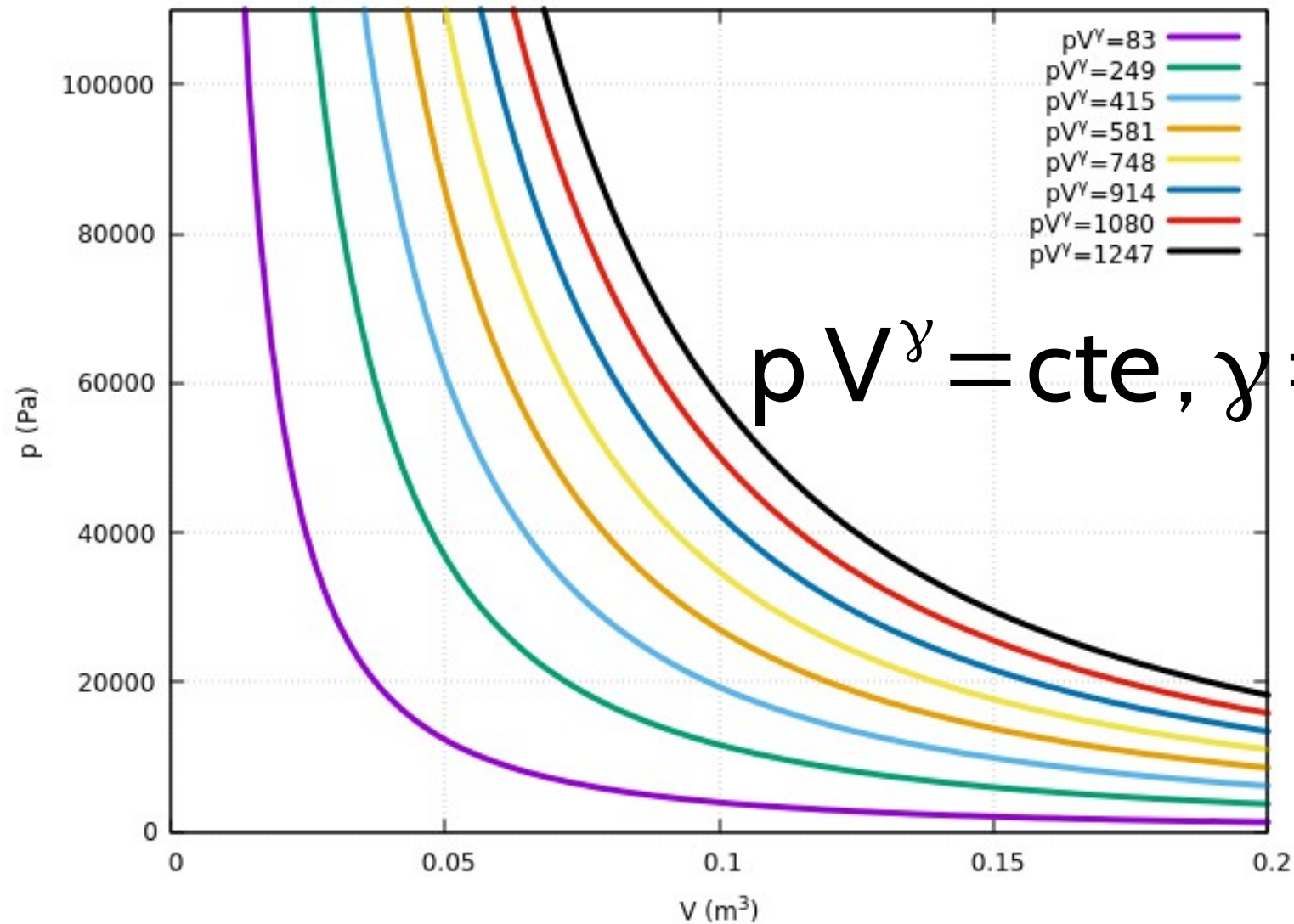
$$\Rightarrow \left(\frac{\gamma+1}{\gamma-1}\right) \left(\frac{\gamma-1}{\gamma}\right) p dV = -V dp \rightarrow \left(\frac{\gamma+1}{\gamma}\right) p dV = -V dp \Rightarrow \gamma p dV = -V dp$$

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

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

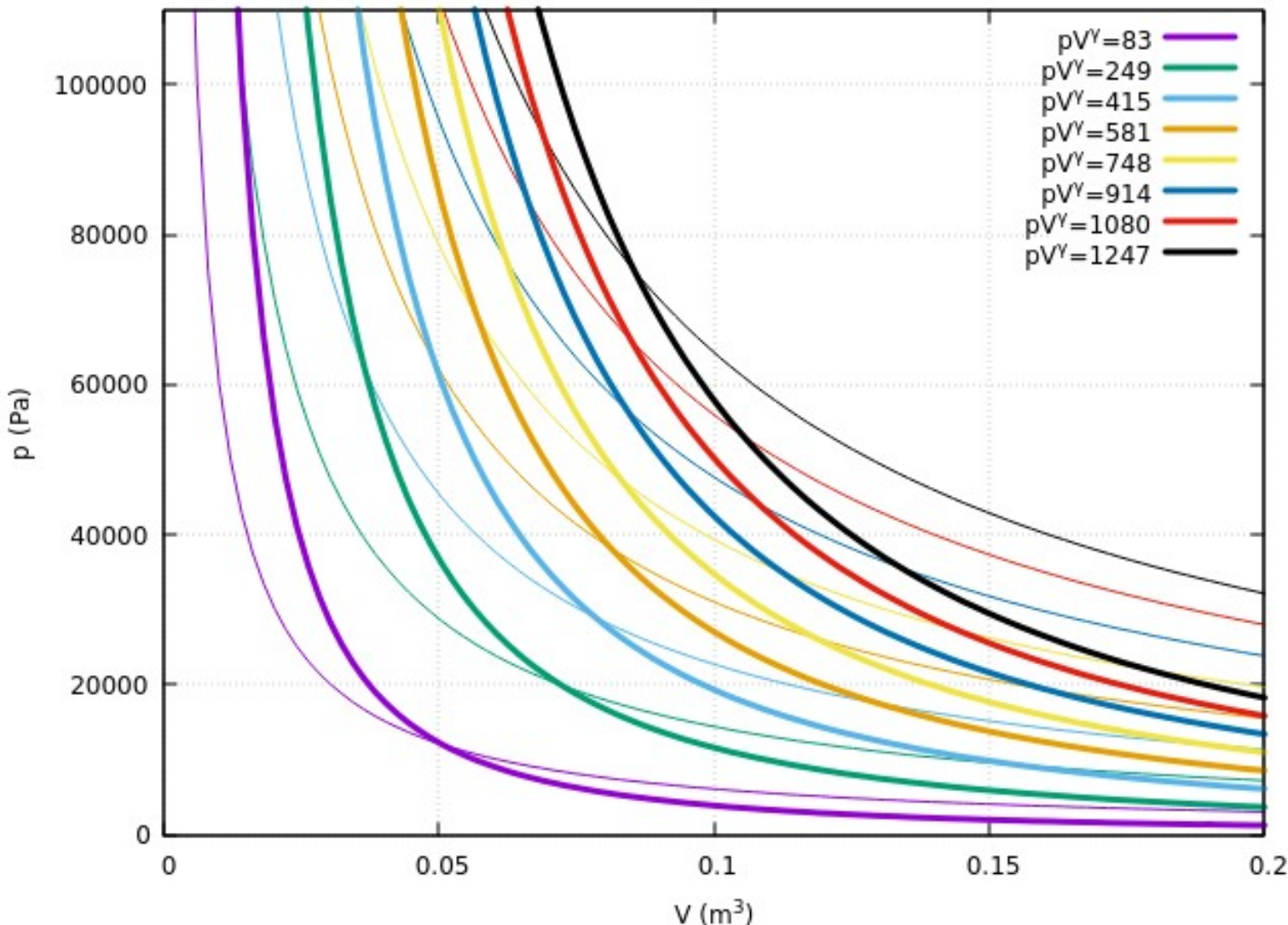
$$\Rightarrow p_i V_i^\gamma = p_f V_f^\gamma \rightarrow \boxed{pV^\gamma = \text{cte}}$$

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:**

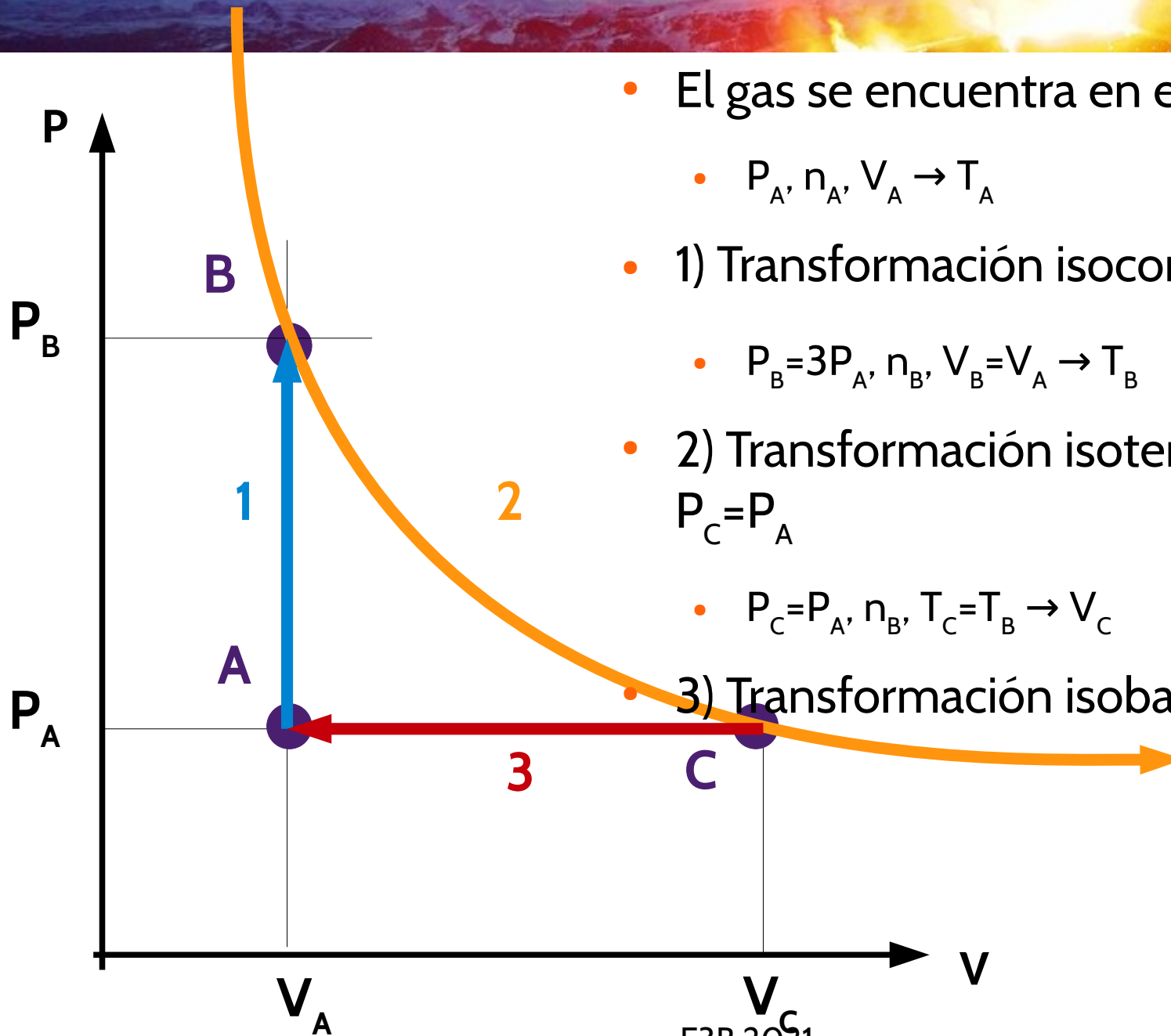
- $W = 0$
- $Q = C_v n \Delta T$
- $Q = \Delta U$

- **Adiabática**

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

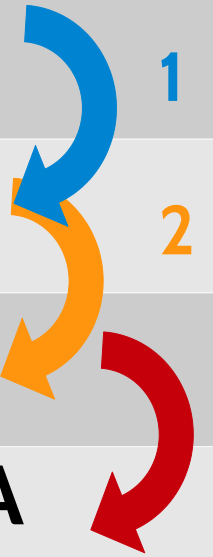
$$PV = n R T$$

Sucesión de transformaciones



- El gas se encuentra en estado A
 - $P_A, n_A, V_A \rightarrow T_A$
- 1) Transformación isocora hasta B, $P_B = 3 P_A$
 - $P_B = 3P_A, n_B, V_B = V_A \rightarrow T_B$
- 2) Transformación isoterma hasta C, $P_C = P_A$
 - $P_C = P_A, n_B, T_C = T_B \rightarrow V_C$
- 3) Transformación isobara hasta A

Cuadro de estados



| Estado | p | V | T | n |
|--------|--------------|-------------|-------------|-------|
| A | p_A | V_A | T_A | n_A |
| B | $p_B = 3p_A$ | $V_B = V_A$ | T_B | n_A |
| C | $p_C = p_A$ | V_C | $T_C = T_B$ | n_A |
| → A | p_A | V_A | T_A | n_A |

- Identificar los datos en el problema
- Determinar datos faltantes con las transformaciones
- Calcular datos faltantes con ec. de estado $\rightarrow pV=nRT$

Cuadro de transformaciones

| Transf | Q | W | ΔU |
|-------------|------------------|----------------------|--------------------------|
| 1: isocora | $= \Delta U$ | 0 | $=(z/2) n R (T_B - T_A)$ |
| 2: isoterma | $= W$ | $= nRT \ln(V_C/V_A)$ | 0 |
| 3: isobara | $= \Delta U + W$ | $= P(V_A - V_C)$ | $=(z/2) n R (T_A - T_C)$ |

- Identificar aquellos valores que no cambian en cada transformación
- Dejar el calor Q para el final (evita confusiones)
- En un ciclo $\Delta U_{\text{total}} = 0 \leftarrow$ El gas vuelve a su estado inicial $U_f = U_i$

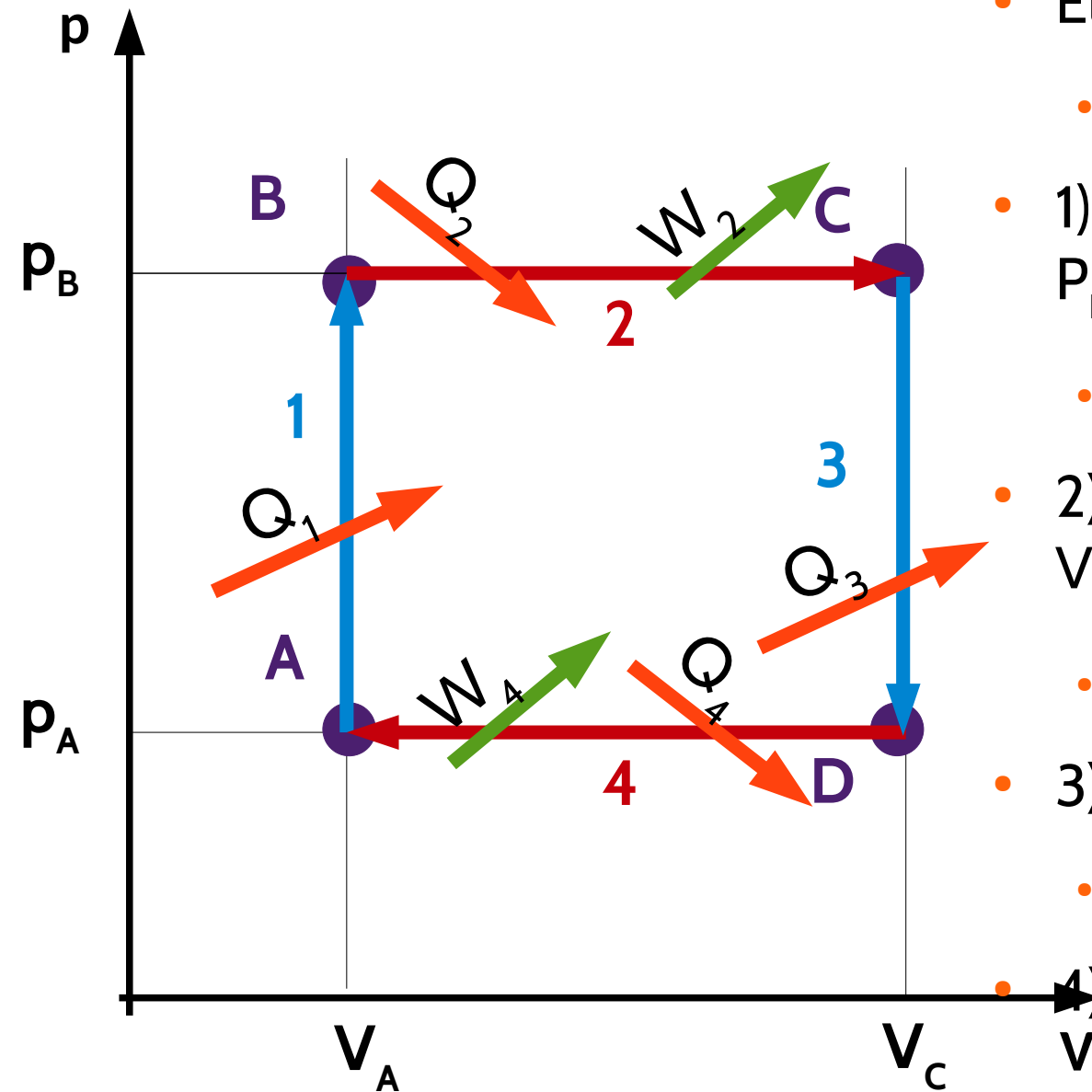
- A medida que el ciclo avanza, el sistema intercambia calor (Q) y trabajo mecánico (W) con el medio
- El sistema “almacena” energía en forma de energía interna (\rightarrow Temperatura \rightarrow Energía Cinética)
- Al finalizar el ciclo, $U_f = U_i \rightarrow \Delta U = 0$
- Para el ciclo completo, el primer principio garantiza

$$Q = W$$

- Pero esos valores son “netos”

Otro ciclo, el cuadrado letal

$n = \text{cte}$



- El gas se encuentra en estado A
 - $P_A, n_A, V_A \rightarrow T_A$
- 1) Transformación isócora hasta B,
 $P_B = 3 P_A$
 - $P_B = 3 P_A, n_A, V_B = V_A \rightarrow T_B$
- 2) Transformación isóbara hasta C,
 $V_C = 3 V_A$
 - $P_C = P_B, n_A, V_C = 3 V_B \rightarrow T_C$
- 3) Transformación isócora hasta D
 - $V_D = V_C, n_A, P_D = P_A \rightarrow T_D$
- 4) Transformación isóbara hasta A

Cuadro de estados

| Estado | p | V | T | n |
|--------|--------------|--------------|-------|-------|
| A | p_A | V_A | T_A | n_A |
| 1:B | $p_B = 3p_A$ | $V_B = V_A$ | T_B | n_A |
| 2:C | $p_C = p_B$ | $V_C = 3V_B$ | T_C | n_A |
| 3:D | $p_D = p_A$ | $V_D = V_C$ | T_D | n_A |
| 4:A | p_A | V_A | T_A | n_A |

Cuadro de transformaciones

| Transf | Q | W | ΔU |
|---------------------------|------------------|---------------------|--------------------------|
| 1 _{A→B} :isócora | $= \Delta U$ | 0 | $=(z/2) n R (T_B - T_A)$ |
| 2 _{B→C} :isóbara | $= \Delta U + W$ | $= p_B (V_C - V_B)$ | $=(z/2) n R (T_C - T_B)$ |
| 3 _{C→D} :isócora | $= \Delta U$ | 0 | $=(z/2) n R (T_D - T_C)$ |
| 4 _{D→A} :isóbara | $= \Delta U + W$ | $= p_D (V_D - V_A)$ | $=(z/2) n R (T_A - T_D)$ |

- **Calor**

- $Q > 0 \leftarrow$ Calor entra al sistema desde una fuente
- $Q < 0 \leftarrow$ Calor sale del sistema \rightarrow No es aprovechable

- **Trabajo**

- $W > 0 \leftarrow$ Trabajo producido por el sistema \rightarrow Útil
- $W < 0 \leftarrow$ Trabajo realizado sobre el sistema \rightarrow Costo
- ¿Qué obtuve luego de un ciclo? \rightarrow Trabajo Neto
- ¿Que tuve que poner para lograr el ciclo? \rightarrow Calor $Q > 0$

- Definimos al rendimiento como

$$\eta = \frac{\text{Lo que obtuve}}{\text{Lo que tuve que poner}}$$

- En términos del ciclo,

$$\eta = \frac{W_{\text{neto}}}{Q_{>0}}$$