

Universidad Nacional de Río Negro

Física III B - 2018

- **Unidad** 02
- **Clase** U02 C04 - 09
- **Fecha** 19 Abr 2018
- **Cont** Ciclos
- **Cátedra** Asorey
- **Web** github.com/asoreyh/unrn-f3b
- **YouTube** <https://goo.gl/nNhGCZ>



Contenidos: Termodinámica, alias F3B, alias F4A

Unidad 1

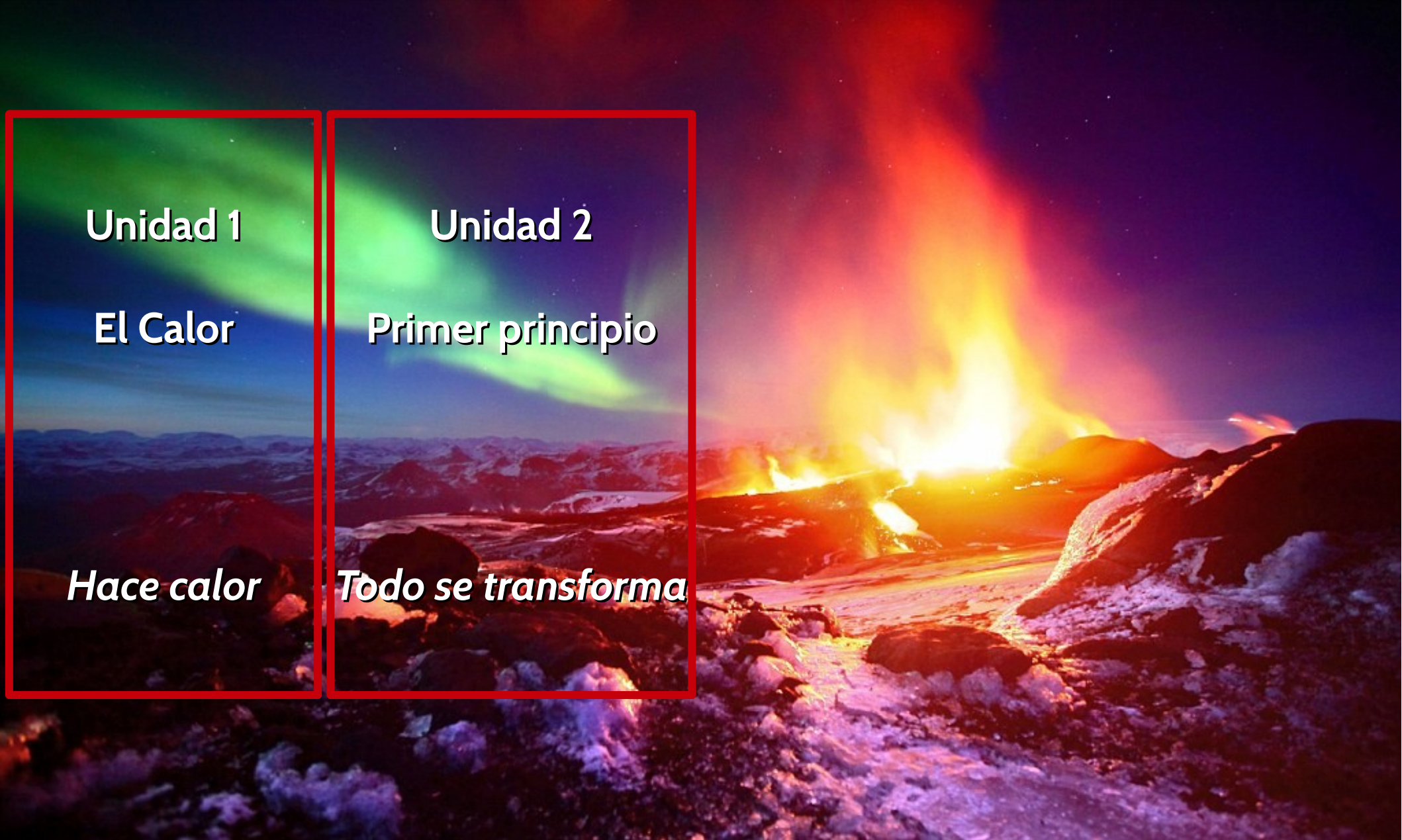
El Calor

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.



- ¿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

Paréntesis acuoso

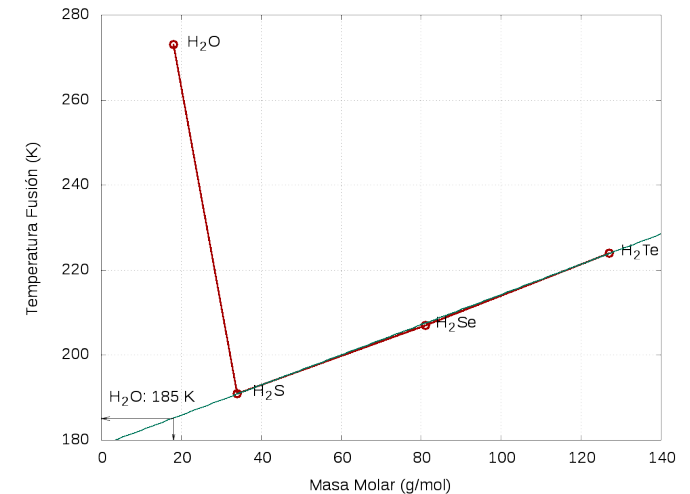
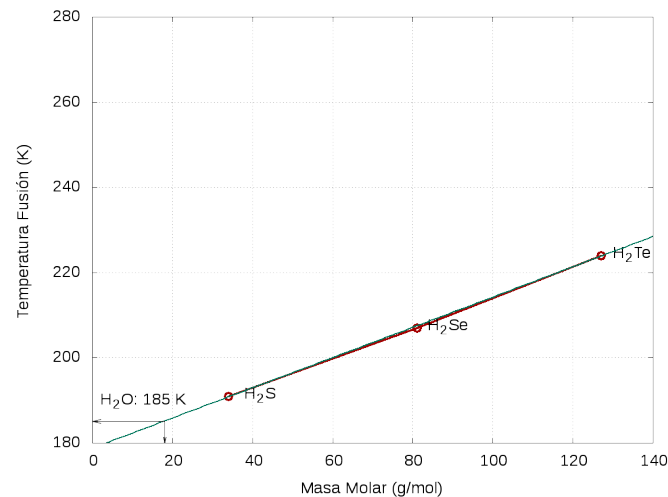
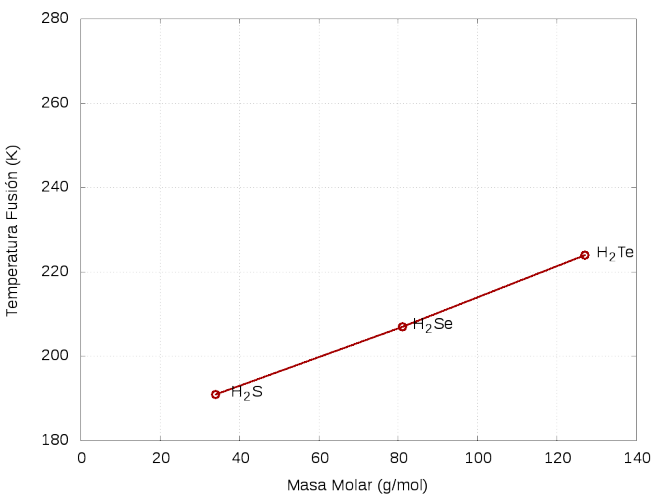
$\text{H}_2\text{O} \rightarrow \theta = 104,45^\circ \rightarrow M=18 \text{ g/mol} \rightarrow T_f=273 \text{ K}$

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

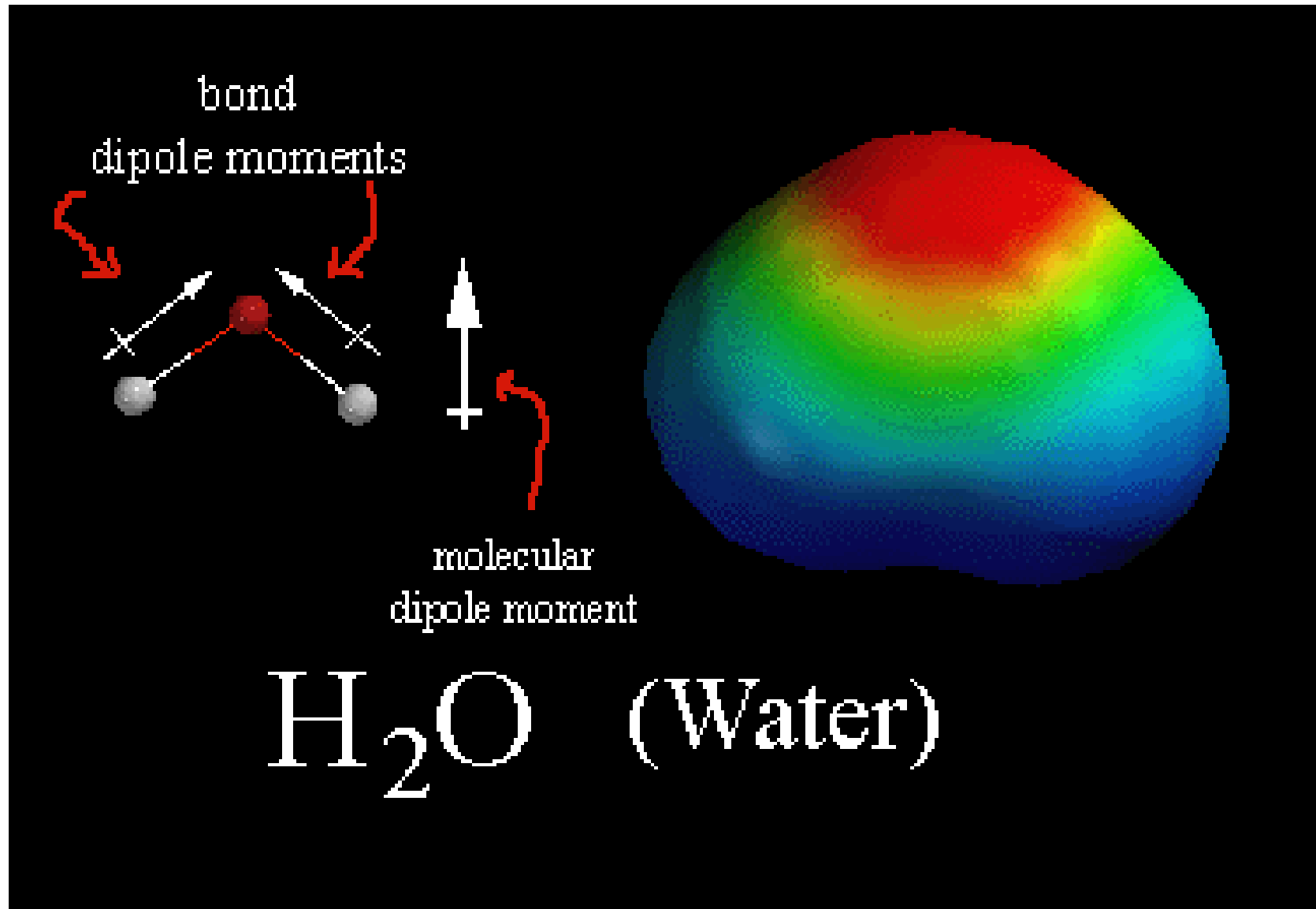
$\text{H}_2\text{Se} \rightarrow \theta = 91^\circ \rightarrow M=81 \text{ g/mol} \rightarrow T_f=207 \text{ K}$

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

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



Momento dipolar de la molécula de agua





Trabajo en el pizarrón

- Trabajamos con ejercicio de calor latente Guía 02

- **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:**

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

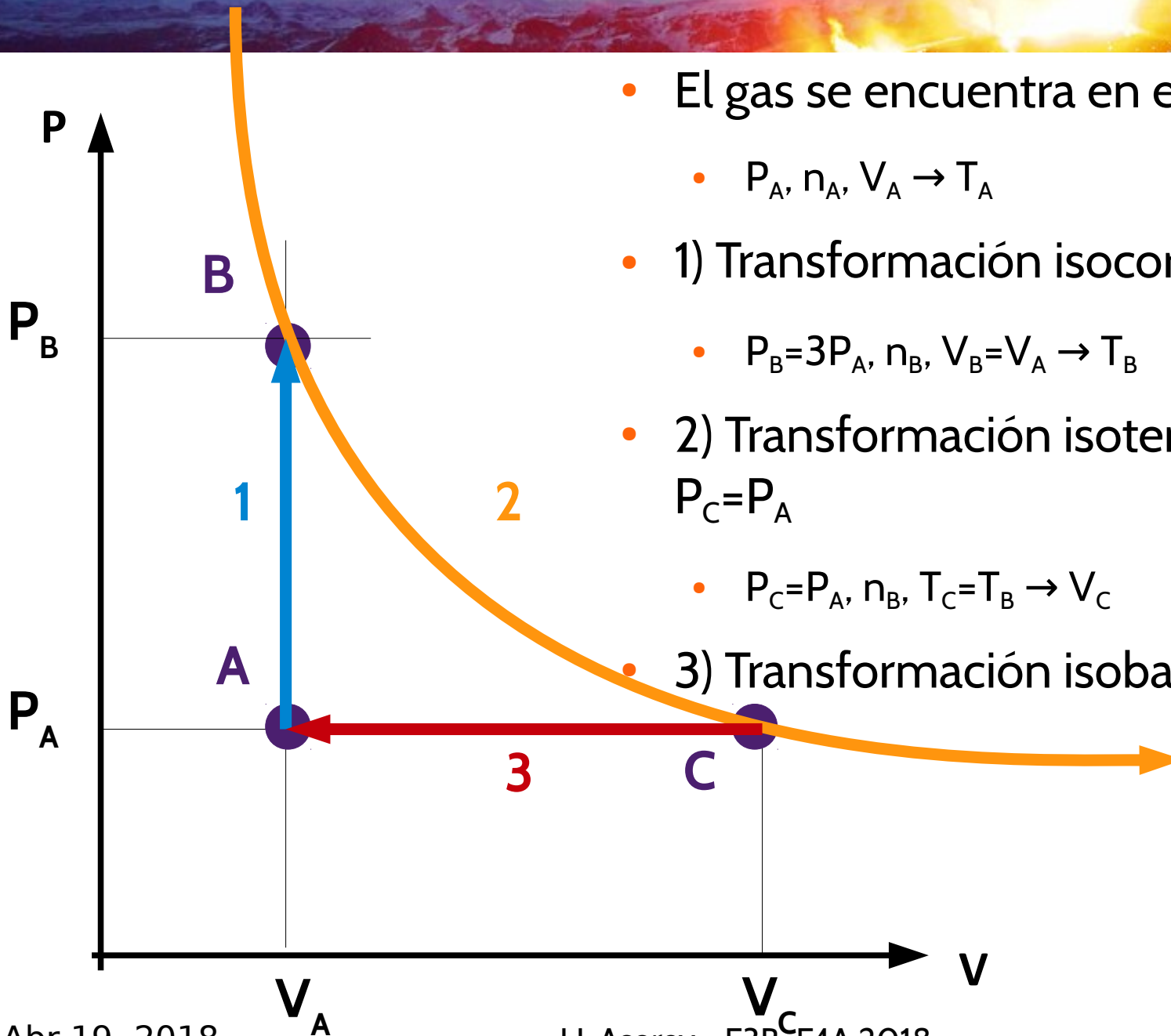
- **Adiabática**

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

$$PV = n R T$$

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



Entendiendo el ciclo

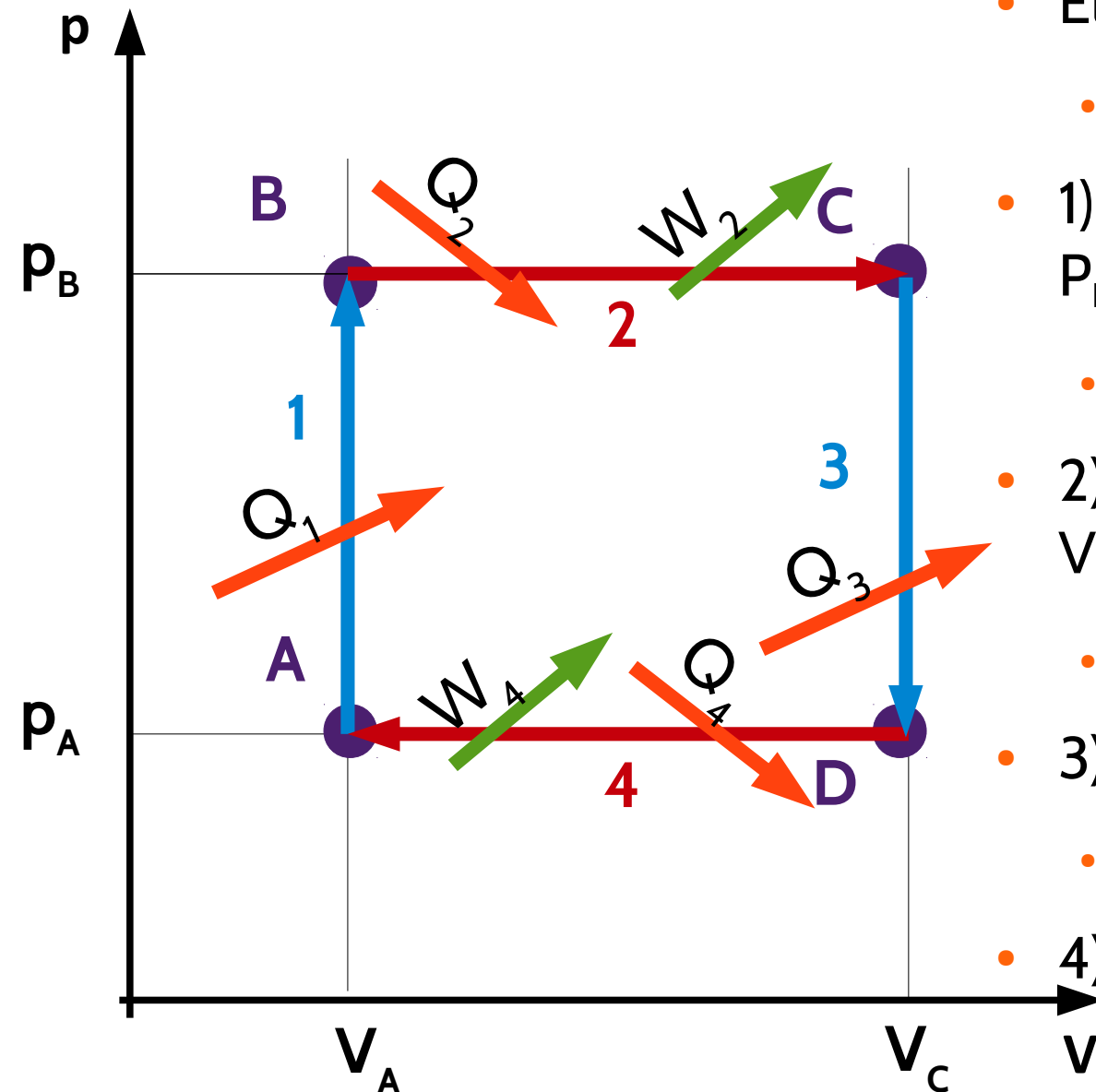
- A medida que el ciclo avanza, el sistema intercambia calor (Q) y trabajo mecánico (W) con el medio
- El sistema “almacena” energía en forma de energía interna (\rightarrow Temperatura \rightarrow Energía Cinética)
- Al finalizar el ciclo, $U_f = U_i \rightarrow \Delta U = 0$
- Para el ciclo completo,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

Lo que obtuve

$$\eta = \text{-----}$$

Lo que tuve que poner

- En términos del ciclo,

W_{neto}

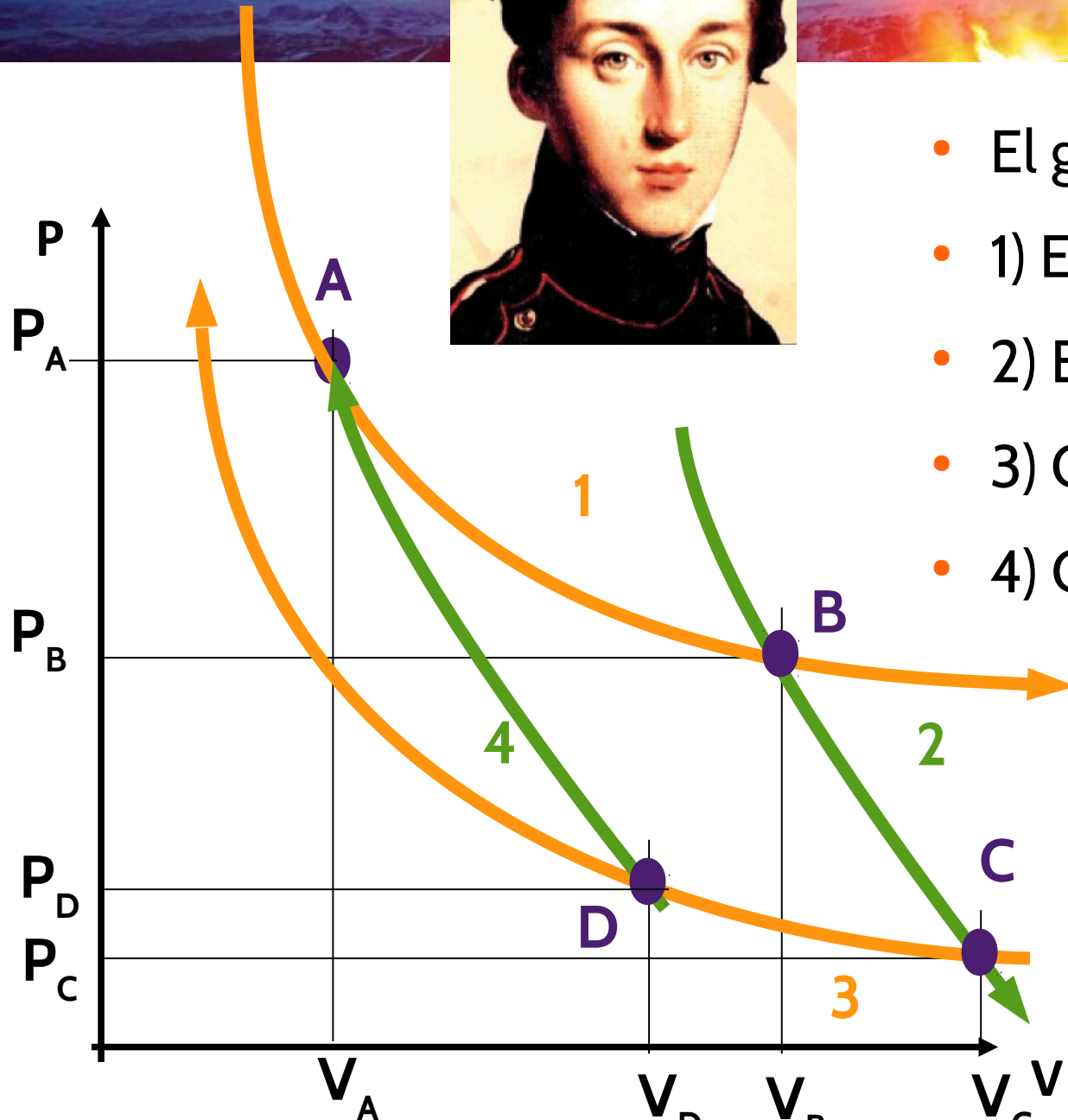
$$\eta = \text{-----}$$

$Q_{>0}$

Reversibilidad termodinámica (volveremos)

- **Proceso Reversible** es aquel en el que el sentido puede invertirse mediante un cambio infinitesimal de las condiciones de entorno
 - Idealización
 - Punto a punto → desplazamiento infinitesimal del equilibrio
 - Procesos conservativos
 - Al invertirse el proceso, el sistema regresa al estado inicial
 - Coloquial: procesos muuyyyy lentos
- **Un ciclo reversible** es aquel ciclo en el que todas las transformaciones son reversibles

Otro ciclo → Carnot



- El gas se encuentra en A
- 1) Expansión Isotérmica $A \rightarrow B$
- 2) Expansión Adiabática $B \rightarrow C$
- 3) Compresión Isotérmica $C \rightarrow D$
- 4) Compresión Adiabática $D \rightarrow A$

**Ciclo completo
reversible**
(fuera de escala)

Transf.	Q	ΔU	W
1) Isoterma $A \rightarrow B$	$=W_1 (>0)$	0	$nRT_A \ln(V_B/V_A)$
2) Adiabática $B \rightarrow C$	0	$(z/2) nR(T_C - T_B)$	$-\Delta U_2 (>0)$
3) Isoterma $C \rightarrow D$	$=W_3 (<0)$	0	$nRT_C \ln(V_D/V_C)$
4) Adiabática $D \rightarrow A$	0	$(z/2) nR(T_A - T_D)$	$-\Delta U_4 (<0)$

- **Verificar**

- $\Delta U=0$ \leftarrow En el ciclo no hay cambio en U
- $Q = W$ \leftarrow Primer principio: El calor neto = El trabajo neto

Rendimiento de la máquina de Carnot

- Lo que obtuve / Lo que puse
 - Obtuve: Trabajo neto (Suma de los W)
 - Puse: Calor entrante (Sólo cuento los calores positivos $Q > 0$)
- Nos preparamos, respiramos hondo, y vamos...

Eficiencia del ciclo de Carnot

- Primero verifiquemos que a lo largo del ciclo $\Delta U=0$:

$$\Delta U_T = \sum U_i \rightarrow \Delta U_T = \left(\frac{z}{2}R\right)n(T_C - T_B) + \left(\frac{z}{2}R\right)n(T_A - T_D)$$
$$\Delta U_T = \left(\frac{z}{2}R\right)n(T_C - T_B + T_A - T_D)$$

y dado que las transformaciones 1 y 3 son isotérmicas:

$$\Delta U_T = \left(\frac{z}{2}R\right)n(T_C - T_A + T_A - T_C), \Rightarrow \Delta U_T = 0, \text{ y además}$$

$$W_2 = -W_4$$

Eficiencia del ciclo de Carnot

- ¿cual es la relación entre volúmenes en las adiabáticas?

Adiabática: $pV^\gamma = \text{cte} \rightarrow TV^{\gamma-1} = \text{cte}$

$$T_B V_B^{\gamma-1} = T_C V_C^{\gamma-1} \quad \text{y} \quad T_A V_A^{\gamma-1} = T_D V_D^{\gamma-1}$$

$$\begin{aligned} \frac{T_B V_B^{\gamma-1}}{T_A V_A^{\gamma-1}} &= \frac{T_C V_C^{\gamma-1}}{T_D V_D^{\gamma-1}} \\ \left(\frac{T_B}{T_A} \right) \left(\frac{V_B}{V_A} \right)^{\gamma-1} &= \left(\frac{T_C}{T_D} \right) \left(\frac{V_C}{V_D} \right)^{\gamma-1} \\ \left(\frac{V_B}{V_A} \right)^{\gamma-1} &= \left(\frac{V_C}{V_D} \right)^{\gamma-1} \\ \boxed{\frac{V_B}{V_A} &= \frac{V_C}{V_D}} \end{aligned}$$

Eficiencia del ciclo de Carnot

- Trabajo neto

$$W = \sum W_i = W_1 + W_2 + W_3 + W_4, \text{ y dado que } W_2 = -W_4 \rightarrow W = W_1 + W_3$$

$$W_1 = nRT_A \ln\left(\frac{V_B}{V_A}\right) \text{ y } W_3 = nRT_C \ln\left(\frac{V_D}{V_C}\right)$$

$$W = nRT_A \ln\left(\frac{V_B}{V_A}\right) + nRT_C \ln\left(\frac{V_D}{V_C}\right)$$

$$W = nRT_A \ln\left(\frac{V_B}{V_A}\right) - nRT_C \ln\left(\frac{V_C}{V_D}\right)$$

$$W = nRT_A \ln\left(\frac{V_B}{V_A}\right) - nRT_C \ln\left(\frac{V_B}{V_A}\right)$$

$$W = nR \ln\left(\frac{V_B}{V_A}\right) (T_A - T_C)$$

Eficiencia del ciclo de Carnot

- Calor entregado al sistema (sólo en transformación 1)

$$Q_{>0} = nRT_A \ln\left(\frac{V_B}{V_A}\right)$$

- Entonces el rendimiento:

$$\eta = \frac{\sum_i W_i}{\sum_j (Q_j > 0)}$$
$$\eta_{\text{Carnot}} = \frac{nRT_A \ln\left(\frac{V_B}{V_A}\right)(T_A - T_C)}{nRT_A \ln\left(\frac{V_B}{V_A}\right)}$$

$$\eta_{\text{Carnot}} = \frac{T_A - T_C}{T_A} \rightarrow \eta_{\text{Carnot}} = 1 - \frac{T_C}{T_A} < 1$$

Eficiencia de la máquina de Carnot

- Lo que obtuve / Lo que puse
 - Obtuve: Trabajo neto (Suma de los W)
 - Puse: Calor entrante (Sólo cuento los calores positivos $Q > 0$)
- Entonces, para el ciclo de Carnot

$$\eta = \frac{\sum_i W_i}{\sum_j (Q_j > 0)} \rightarrow \eta_{\text{Carnot}} = 1 - \frac{T_C}{T_A} < 1$$

- T_C : baño térmico de la transformación 3; T_A : térmico de la transformación 1 $\rightarrow T_C < T_A$.
- $T_C \rightarrow$ Baño frío; $T_A \rightarrow$ baño caliente

Maldita termodinámica, 1ra parte

- Vemos que a pesar de ser un gas ideal y todas las transformaciones son reversibles,

$$\eta_{\text{Carnot}} = 1 - \frac{T_C}{T_A} < 1$$

- El rendimiento de una máquina de Carnot siempre es menor que 1:
- 1^{er} Teorema de Carnot (demostración en la próx. unidad)

No existe una máquina térmica que funcionando entre dos fuentes térmicas dadas tenga un rendimiento mayor que una máquina reversible (de Carnot).