



La macchina termica



La macchina termica

Un insieme di trasformazioni che parta da uno stato e vi ritorni costituisce una macchina termica

- un ***ciclo*** termodinamico



La macchina termica

***In ogni ciclo la
variazione di energia
interna è nulla***

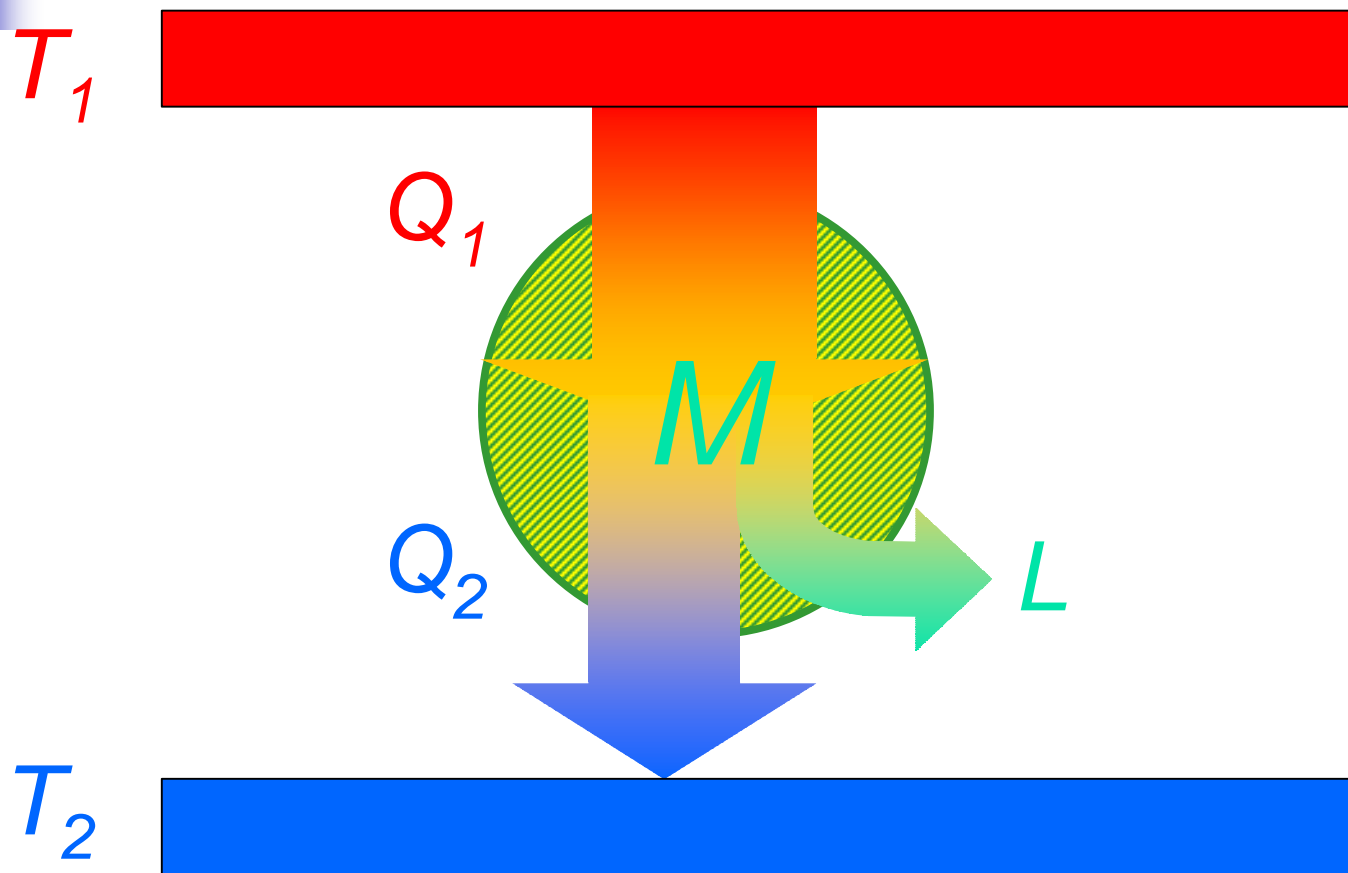
- *non* è nullo il calore *fornito* o *ceduto*
- *non* è nullo il lavoro *prodotto* o *assorbito*



La macchina termica

- Supporremo che una macchina lavori fra due sorgenti di calore a temperatura **sempre costante**
 - termostati
 - riserve di energia **molto grandi** rispetto alla macchina
- Da quella a temperatura più **alta** viene **prelevato** calore Q_1
- Calore viene **ceduto** a quella a temperatura più **bassa** Q_2
- La differenza va in **lavoro** $L = Q_1 - Q_2$

La macchina termica





La macchina termica

- Si definisce come *rendimento* di una macchina termica il rapporto fra *lavoro prodotto* e *calore assorbito*

$$h = \frac{L}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} < 1$$



Il 2° principio della termodinamica



II° principio della termodinamica

Formalizzazione
di un'osservazione sperimentale
I fenomeni termici che accadono
in Natura hanno una spiccata
caratteristica di

irreversibilità



Il II° principio della termodinamica

Due formulazioni principali

- *Clausius* (tedesco, 1822-1888)

non è possibile che il calore fluisca spontaneamente da temperature più basse a temperature più alte



Il II° principio della termodinamica

- *Kelvin* (inglese, 1824-1907)

*non è possibile realizzare
una macchina termica
che trasformi il calore
integralmente in lavoro*



II° principio della termodinamica

- Alcune precisazioni
- **non** è vietato il passaggio di calore da *corpo caldo* a *corpo freddo*
 - è vietato che ciò accada *spontaneamente*
 - frigorifero...
- **non** è vietata la trasformazione di calore *integralmente* in lavoro
 - è vietata in una trasformazione *ciclica*
 - trasformazione isoterma...



II° principio della termodinamica

- I due principi sono equivalenti
- Se fosse possibile avere la macchina proibita di Kelvin col *lavoro* ottenuto potremmo produrre *calore a qualunque temperatura!*



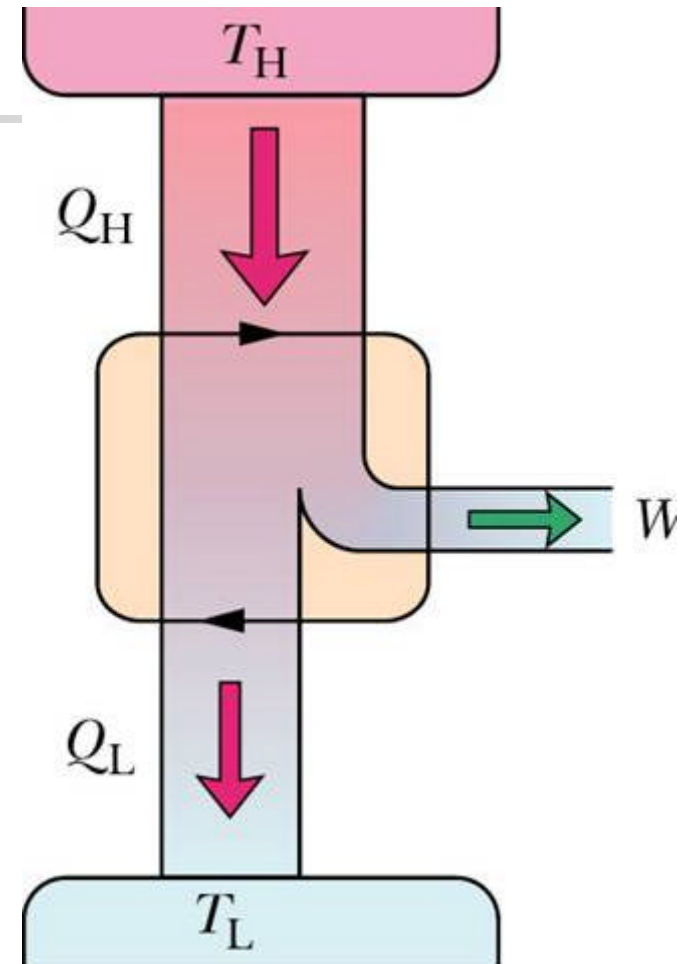
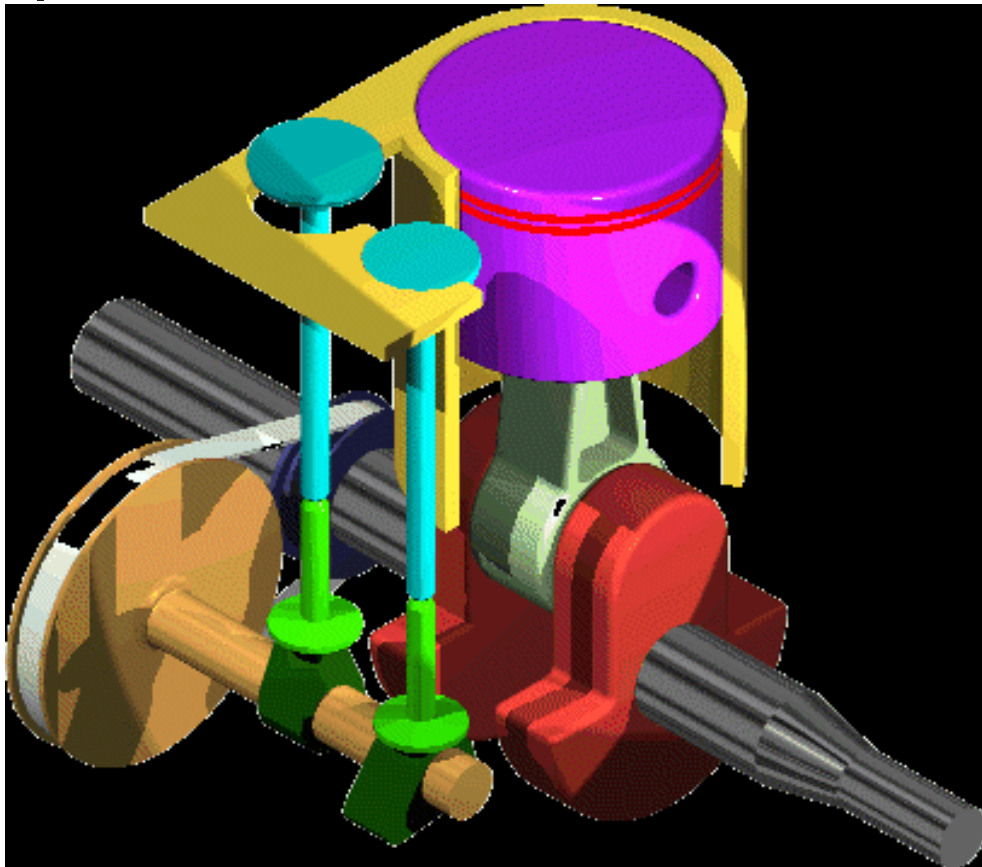
La macchina di Carnot



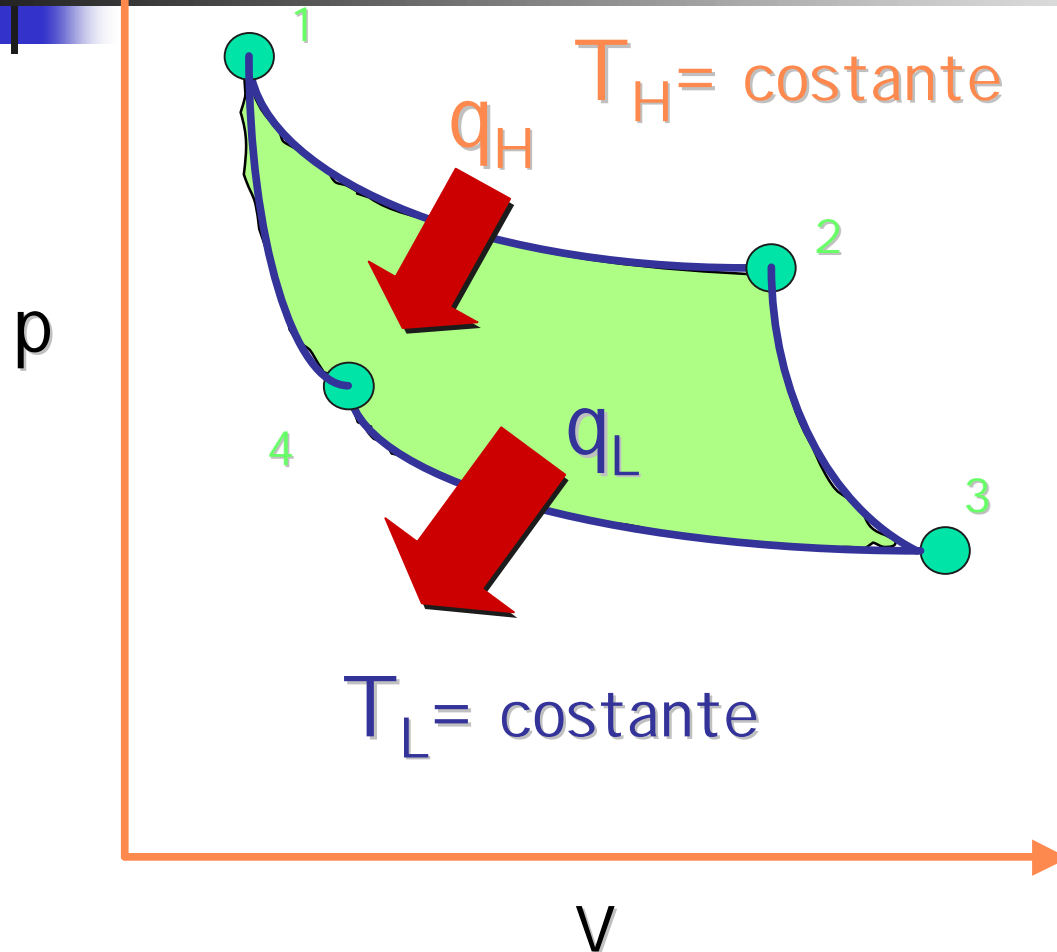
La macchina di Carnot

- *Carnot* (francese, 1796-1832) ipotizza una macchina termica *ideale*
 - *non* realizzabile in pratica
 - che stabilisce dei *limiti* per le prestazioni delle macchine reali

Motore



Ciclo di Carnot



1-2 : Isotherma

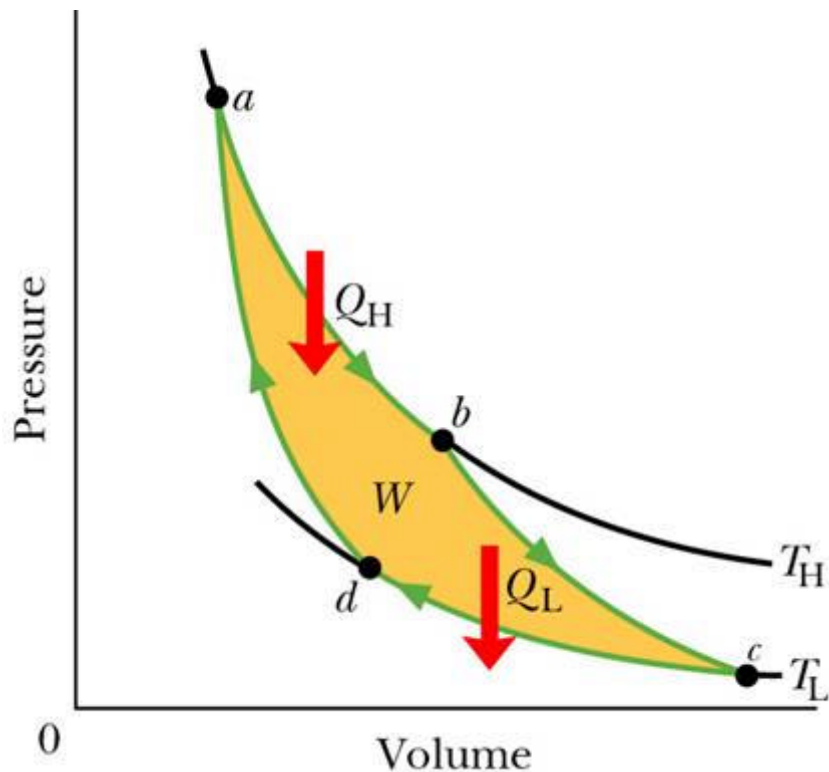
2-3 : Adiabatica

3-4 : Isotherma

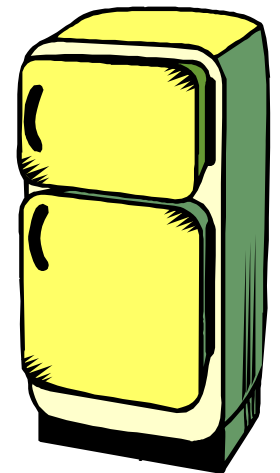
4-1 : Adiabatica

Lavoro Estratto

Ciclo di Carnot



- Efficienza:
Lavoro Compiuto / Calore Assorbito = $1 - T_C / T_H$
- Nessun ciclo puo' essere piu' efficiente di un ciclo di Carnot senza violare la Seconda Legge
- Si puo' tendere a Efficienza $\rightarrow 1$ se $T_C \rightarrow 0$
- Percorrendo un ciclo in senso antiorario otteniamo un frigorifero.



La macchina di Carnot

- Si tratta di *due trasformazioni isoterme*
 - da *A* a *B* a temperatura T_1
 - viene **assorbito** calore e **prodotto** lavoro

$$L_{A \rightarrow B} = nRT_1 \ln \frac{V_B}{V_A}$$

- da *C* a *D* a temperatura $T_2 < T_1$

$$L_{C \rightarrow D} = nRT_2 \ln \frac{V_D}{V_C}$$

- viene **ceduto** calore ed **assorbito** lavoro



La macchina di Carnot

- Inoltre *due trasformazioni adiabatiche*
 - Il lavoro è uguale all'opposto della variazione di energia interna

$$L_{B \rightarrow C} = \Delta U_{B \rightarrow C} = nC_V (T_C - T_B)$$

$$L_{D \rightarrow A} = \Delta U_{D \rightarrow A} = -nC_V (T_D - T_A)$$

$$= -nC_V (T_C - T_B)$$



La macchina di Carnot

Quindi il lavoro fatto
sulle adiabatiche nel ciclo
assomma in totale a *zero*



La macchina di Carnot

- Calcoliamo il rendimento

$$h = \frac{L}{Q_1} = \frac{L_{A \rightarrow B} + L_{C \rightarrow D}}{L_{A \rightarrow B}} = \frac{nRT_1 \ln \frac{V_B}{V_A} + nRT_2 \ln \frac{V_D}{V_C}}{nRT_1 \ln \frac{V_B}{V_A}}$$

$$= \frac{T_1 \ln \frac{V_B}{V_A} + T_2 \ln \frac{V_D}{V_C}}{T_1 \ln \frac{V_B}{V_A}} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$



La macchina di Carnot

- L'ultimo passaggio si giustifica tenendo presente che (A, D) e (B, C) giacciono su due adiabatiche $T V^{g-1} = \text{cost}$

$$T V^{g-1} = \text{cost}$$

$$T^{\frac{1}{g-1}} V = T^a V = \text{cost}$$

$$V_B T_1^a = V_C T_2^a$$

$$\frac{V_B}{V_A} = \frac{V_C}{V_D}$$

$$V_A T_1^a = V_D T_2^a$$

$$\frac{V_B}{V_A} = \frac{V_C}{V_D}$$



La macchina di Carnot

- Una conseguenza *importante*
 - dalla relazione...

$$h = \frac{L}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

...otteniamo

$$\frac{Q_2}{T_2} = \frac{Q_1}{T_1}$$

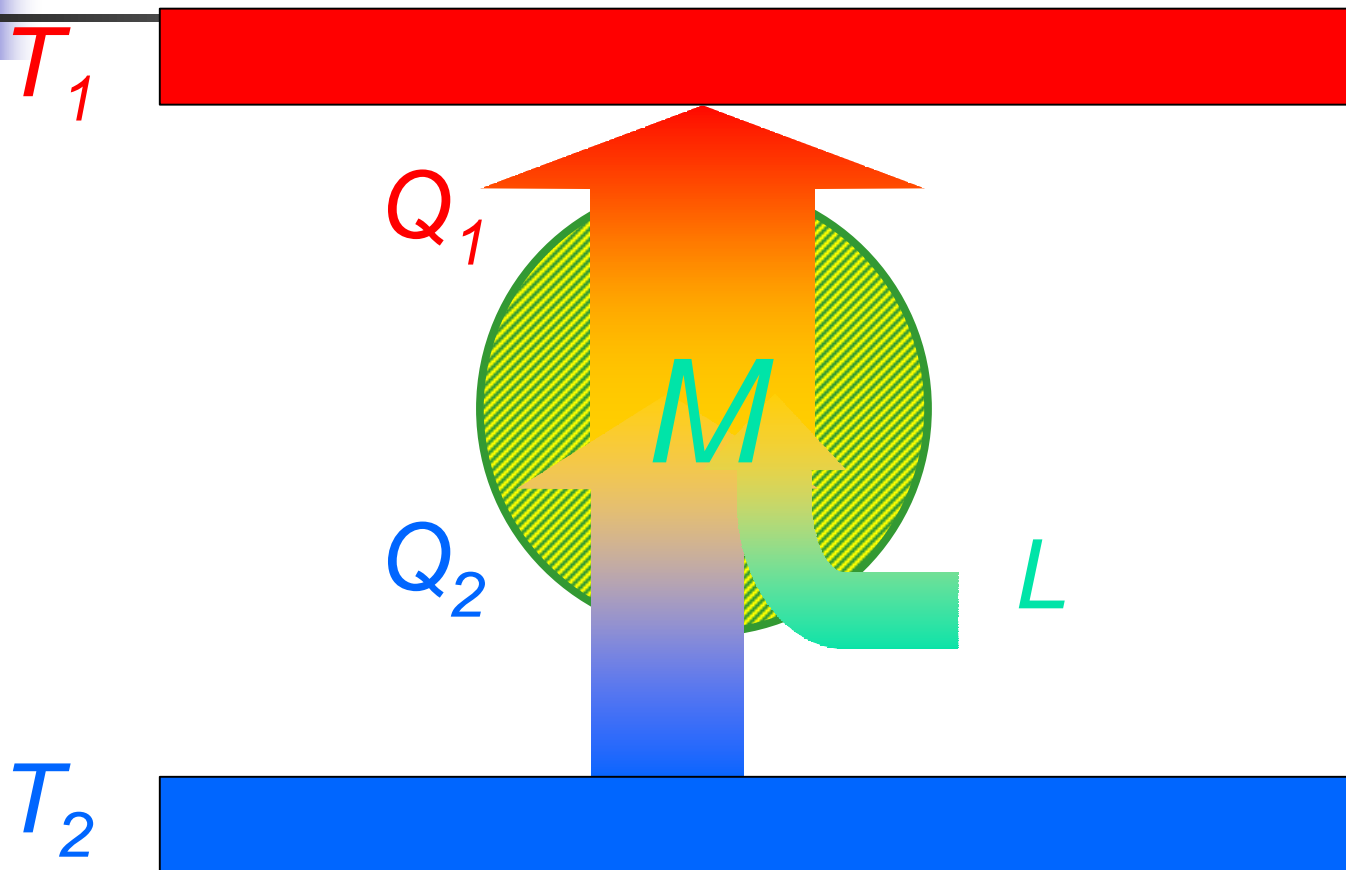


La macchina di Carnot

- ...e se facciamo funzionare il ciclo alla rovescia?
- **TUTTI** i calori e **TUTTI** i lavori cambiano di segno
 - forniremo lavoro
 - assorbiremo calore dalla sorgente fredda
 - forniremo calore alla sorgente calda

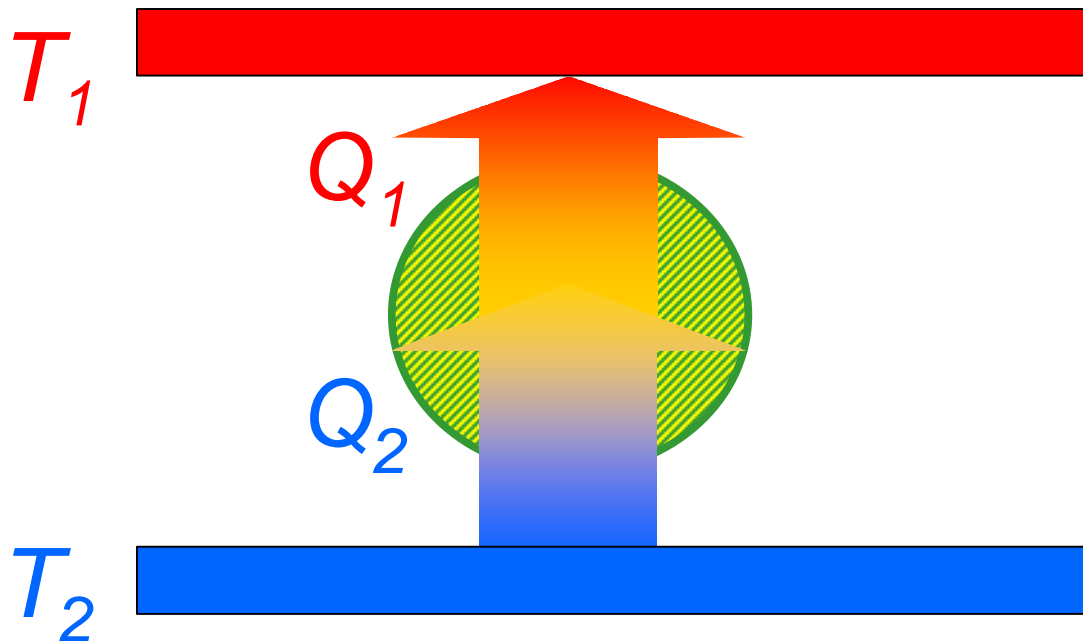
AVREMO UN FRIGORIFERO

La macchina di Carnot



La macchina di Carnot

- **Attenzione:** ciò *non* è vietato da Clausius, ciò che è vietato è questo





La macchina di Carnot

- Si definisce come *rendimento della macchina frigorifera* il rapporto fra *calore tolto* alla sorgente fredda e *lavoro necessario* per farlo

$$\mathbf{x} = \frac{Q_2}{L} = \frac{Q_2}{Q_1 - Q_2} = \frac{T_2}{T_1 - T_2} = \frac{T_2}{\Delta T}$$

- ...e questo può benissimo essere superiore a 1!



La macchina di Carnot

- Il rendimento di una macchina di Carnot dipende *solo* dalle temperature dei due termostati
 - *non* dipende dalla sostanza usata
 - *non* dipende da quanto è grande la macchina
- Importante il

Teorema di Carnot



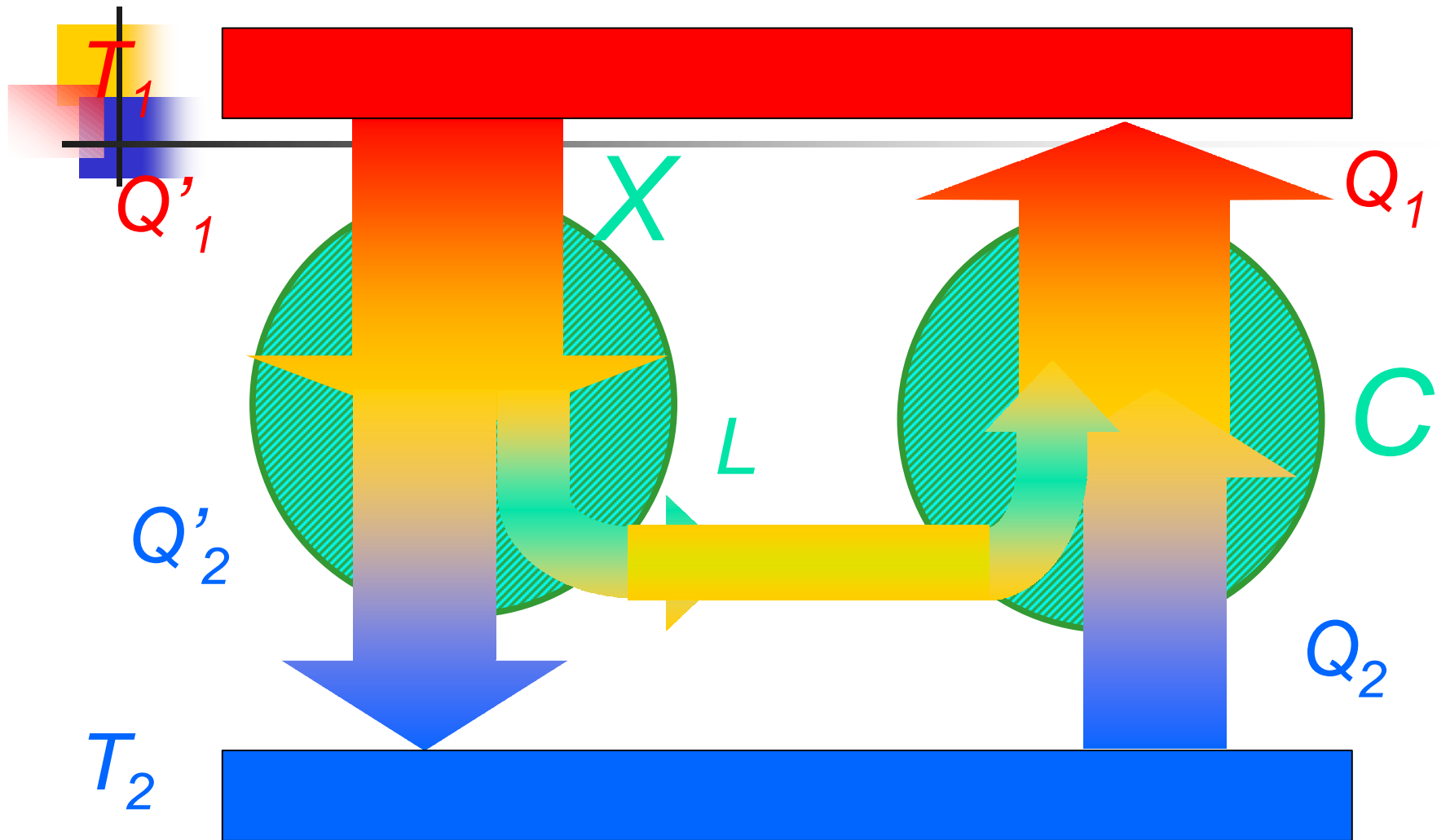
Il teorema di Carnot

***NESSUNA MACCHINA
TERMICA PUÒ SUPERARE IL
RENDIMENTO DI UNA
MACCHINA DI CARNOT CHE
LAVORI FRA LE STESS
TEMPERATURE***



Il teorema di Carnot

- Prendiamo una macchina **X** che abbia un rendimento *superiore* a quella di Carnot
- Poi una macchina *di Carnot* C che facciamo funzionare *a rovescio*
 - un frigorifero!
- Facciamo in modo che X faccia giusto funzionare C
- ...e supponiamo per assurdo che X abbia un rendimento superiore alla macchina di Carnot





Il teorema di Carnot

- Supponiamo che sia

$$h_X = \frac{Q_1' - Q_2'}{Q_1'} > \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = h_C$$

- Se abbiamo aggiustato i lavori come detto

$$Q_1' - Q_2' = Q_1 - Q_2$$



Il teorema di Carnot

- Quindi

$$\frac{1}{Q_1'} > \frac{1}{Q_1} \quad Q_1' < Q_1$$

- il termostato a temperatura alta riceve più calore di quanto ne dia
- ..e lo riceve da quello a temperatura più bassa...



Un ciclo qualunque



Calcolo di un ciclo qualunque

- Di solito sono dati
 - Alcuni parametri degli stati per cui passa il gas
 - I tipi di trasformazioni attraverso cui passa il gas
- Seguire i seguenti passi



Calcolo di un ciclo qualunque

- Passare i dati forniti nel SI
- Calcolare il numero di moli del gas
- Preparare una tabella come di seguito

	P	V	T
A			
B			
...			



Calcolo di un ciclo qualunque

- Riempire le caselle coi dati *noti*
 - Usare *l'equazione dei gas* per finir di riempire le altre
-
- Fare uno *schizzo* del ciclo nel piano PV
 - Segnare calori che *entrano* o *escono* nelle varie trasformazioni
 - Preparare una seconda tabella come in figura



Calcolo di un ciclo qualunque

	DU	L	Q
$A-B$			
$B-C$			
...			



Calcolo di un ciclo qualunque

- Riempire *per prima* la colonna delle variazioni di energia interna
 - controllare che la somma finale sia zero!
- Riempire *per seconda* la colonna dei lavori
 - può essere necessario fare degli integrali...
- Riempire *per ultima* la colonna dei calori
 - Usare solo unità SI
 - Controllare i segni delle varie quantità



Calcolo di un ciclo qualunque

- A questo punto
 - il *lavoro del ciclo* è dato dalla somma algebrica della colonna dei lavori
 - il *calore assorbito* è dato dalla somma di tutti i calori positivi
 - il *rendimento* si ottiene come quoziente dei numeri precedenti



Conseguenze del II principio



Conseguenze importanti

- Una macchina termica può trasformare solo *una parte* dell'energia disponibile in lavoro utile
- Una macchina termica può lavorare solo se sono presenti *differenze di temperatura*
- L'energia può esserci ma non essere *utilizzabile*



Conseguenze importanti

- Ogni macchina termica porta *a livellare* differenze di temperatura
- L'Universo tende a livellare le proprie differenze di temperatura
- Possiamo quantificare?