

Geografia dello sviluppo,
ambiente e risorse energetiche.
(Risorse- Economia- Ambiente)

Lezione 5

Giovedì 22 marzo 2018

**Energia seconda parte.
I principi della termodinamica.**

2 ore

Totale ore 10/48

N.	data	cat.	ore	titolo
1	27.02.18	Z	2	Presentazione del corso
2	13.03.18	C	4	Il picco del petrolio (o picco di Hubbert) I.
3	15.03.18	C	6	Il Picco di Hubbert II
4	20.03.18	A	8	Cosa è l'energia. Conservazione e conversione.
5	22.03.18	A	10	I principi della termodinamica e l'entropia.
6	27.03.18	A	12	Riflessioni sui principi della termodinamica
7	03.04.18	B	14	Energia in natura e fotosintesi
8	05.04.18	B	16	Energia degli autotrofi e di Homo sapiens
9	10.04.18	B	18	Complessificazione preindustriale. Strumenti e tecnologia.
10	12.04.18	C	20	L'era dei combustibili fossili.
11	17.04.18	C	23	EROEI ed Energia Netta.
12	19.04.18	C	25	Alternative ai combustibili fossili. Il nucleare.
13	24.04.18	C	27	Alternative ai combustibili fossili. Fonti rinnovabili.
14	26.04.18	D	29	Rearefazione delle risorse minerali implicazioni ecologiche, economiche e sociali.
15	04.05.18	D	32	Le Georisorse ed il loro futuro (Prof. F. Di Benedetto)
16	08.05.18	E	34	Misure di impatto ambientale del metabolismo sociale ed economico
17	10.05.18	F	36	Limiti dello sviluppo o della crescita?
18	15.05.18	F	38	I sistemi complessi e la dinamica dei sistemi.
19	17.05.18	F	40	Esercitazione sulla dinamica dei sistemi.
20	22.05.18	E	42	Clima e cambiamenti climatici
21	29.05.18	E	44	Esercitazione sul Picco di Hubbert (gioco da tavolo)
22	31.05.18	G	46	Conclusioni

Lo schema seguente costituisce un quadro riassuntivo sulle grandezze fisiche necessarie per comprendere l'origine e l'uso delle unità di misura in generale e di quelle dell'energia e delle altre variabili termodinamiche in particolare.

$$\text{velocità} = \frac{\text{lunghezza}}{\text{tempo}}$$

$$v = \frac{l}{t}$$

$$\frac{\text{metri}}{\text{secondi}} = \frac{m}{s}$$

$$\text{accelerazione} = \frac{\text{variazione di velocità}}{\text{tempo}}$$

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t}$$

$$\frac{\text{metri}}{\text{secondi}^2} = \frac{m}{s^2}$$

$$\text{Forza} = \text{massa} * \text{accelerazione}$$

$$F = m a$$

$$\text{Kg} \frac{m}{s^2}$$

$$\text{Lavoro} = \text{Forza} * \text{spostamento}$$

$$L = F s$$

$$\frac{\text{Kg} * m^2}{s^2} = \text{Joule}$$

L'energia è una grandezza fisica che misura la capacità di compiere lavoro di un sistema.

L'energia si presenta in due forme principali il CALORE (energia termica) e il LAVORO (molti diversi tipi).

CALORE e LAVORO sono le valute con cui si scambia l'energia al tasso di cambio fisso di 4,186 Joule per caloria.

Potenza.

Ciò che in realtà serve a tutti gli organismi viventi, e, quindi, anche all'uomo, non è l'energia in se, ma l'energia che fa qualcosa, cioè l'energia in azione, che è la Potenza. Questo si vede facilmente osservando il fatto che con un litro di benzina, energia chimica immagazzinata in un liquido, possiamo fare ben poco (a parte bruciarlo rapidamente) mentre diventa prezioso nel momento in cui abbiamo un motore a scoppio in cui farlo bruciare per ottenere lavoro cioè spostamento di una massa da un luogo ad un altro. Si può dire altrettanto di una certa quantità di legno se non si ha il modo di accendere il fuoco o di una certa quantità di uranio se non si ha una centrale elettrica. Nel momento in cui iniziamo a sfruttare l'energia immagazzinata in un certo "giacimento" stiamo in pratica usando potenza. La potenza è semplicemente l'energia che fluisce nel tempo cioè:

$$\text{Potenza} = \text{Energia}/\text{tempo}$$

Quindi l'unità di misura usata per la Potenza è il Joule per secondo, J/s, che prende il nome di **Watt**, simbolo W, in onore dell'inventore scozzese **James Watt**.

$$Potenza = \frac{Energia}{tempo}$$

$$\frac{Joule}{secondo} = \frac{J}{s} = Watt = W$$

Il rapporto fra energia e potenza è dunque mediato dal tempo.

$$\begin{aligned} \text{Potenza} &= \text{Energia}/\text{tempo} \\ \text{Energia} &= \text{Potenza} * \text{tempo} \end{aligned}$$

Dalla seconda di queste relazioni nasce una nuova unità di misura per l'energia che tutti conoscono. Il **wattora**. Se abbiamo una macchina che produce o consuma 1 Joule di energia ogni secondo (cioè una macchina che ha la potenza di 1 W) essa produce o consuma 3600 J ogni ora. 3600 Joule è la misura del Wattora o Wh:

$$1 \text{ Wh} = 3600 \text{ J} = 3,6 \text{ kJ}$$

$$Energia = Potenza * tempo$$

Una macchina che consuma o produce (converte) 1 W di Potenza in 1 ora di attività consuma o converte 3600 J di energia.

$$1 Wh = 3600 J = 3,6 kJ$$

Una lampadina a incandescenza da 100 W quanta energia Consuma in un'ora? E in un giorno? Esprimere l'energia in Joule Wattora e barili di petrolio.



Oltre a caloria (cal) e Joule (J) ci sono molte altre unità di misura fisiche e di uso comune per la misura dell'energia. Abbiamo già visto il Wattora. Molto usata nel mercato anglosassone è la BTU (British Thermal Unit), che è l'analogo della caloria (*calorie* in lingua inglese) ma in unità non metriche (cioè britanniche) la libbra (pound) per la massa e il grado Fahrenheit per la temperatura (invece del grado Celsius). La BTU è la quantità di energia necessaria a riscaldare 1 libbra di acqua distillata di 1 °F intorno ai 39,2 °F. La BTU corrisponde a circa 1055 J. Oltre a queste unità fisiche sono di uso comune molte altre unità o, meglio, equivalenti energetici legati alle particolari fonti energetiche, come il contenuto energetico di 1 barile di petrolio (1 barile è un volume di circa 159 litri), il contenuto energetico di una tonnellata di petrolio o di carbone. Questi equivalenti sono in qualche modo arbitrari perché la differenza naturale fra diversi tipi di petrolio o carbone non permette di definire in modo rigoroso gli equivalenti (torneremo su questo punto quando parleremo di energia netta). Nella tabella seguente sono riportati i più importanti equivalenti con l'acronimo italiano e inglese (che è importante per navigare in internet e capire i database internazionali). A parte sarà fornita una tabella excell che lo studente potrà utilizzare a suo piacimento come foglio di calcolo delle diverse quantità di energia in gioco nei bilanci energetici individuali, locali, nazionali e internazionali.

Acronimo inglese	Acronimo Italiano	Joule	Inglese	Italiano
1 cal =	cal	4,186	Calorie	caloria
1 BTU =	-	1,053 10 ³	British Thermal Unit	-
1 kWh =	kWh	3,60 10 ⁶	Kilowatthour	Chilovattora
1 m³ gas nat. =	-	3,64 10 ⁷	-	Smc Metro cubo standard
1 ton TNT =	-	4,19 10 ⁹	-	-
1 boe =	bep	6,12 10 ⁹	Barrel of oil equivalent	Barile equivalente di petrolio
1 TCE =	TEC	29,31 10 ⁹	Ton of Coal Equivalent	Tonnellata equivalente di carbone
1 TOE =	Tep	41,87 10 ⁹	Ton of Oil Equivalent	Tonnellata equivalente di petrolio

Suffissi.

Sia la caloria che il Joule che il Wh sono unità piuttosto piccole in rapporto alle quantità di energia che interessano i flussi totali di energia in natura e nella società. Come si vede dalla tabella precedente infatti, ad esempio, il barile di petrolio contiene energia pari a circa 6 miliardi di Joule e oggi consumiamo circa 90 milioni di barili di petrolio ogni giorno. Quindi solo di petrolio consumiamo (o convertiamo)

$$6 \cdot 10^9 * 90 * 10^6 = 540 * 10^{15} \text{ J}$$

ogni giorno.

Nello studio dei flussi energetici sarà dunque necessario usare multipli delle unità di misura fisiche e degli equivalenti energetici. Per ovviare all'uso di esponenziali si fa ricorso agli appositi suffissi riportati nella tabella che segue. Lo studente interessato alle statistiche energetiche dovrà familiarizzarsi con questi suffissi.

suffissi

Nome inglese	suffisso	Nome del suffisso	Potenza di 10	Potenza di 1000
	f	femto	10^{-15}	1000^{-5}
	p	pico	10^{-12}	1000^{-4}
	n	nano	10^{-9}	1000^{-3}
	μ	micro	10^{-6}	1000^{-2}
	m	milli	10^{-3}	1000^{-1}
		-	10^0	1000^0
	k	Kilo	10^3	1000^1
Million	M	Mega	10^6	1000^2
Billion	G	Giga	10^9	1000^3
Trillion	T	Tera	10^{12}	1000^4
Quadrillion	P	Peta	10^{15}	1000^5
Quintillion	E	Exa	10^{18}	1000^6
Sextillion	Z	Zetta	10^{21}	1000^7
Septillion	Y	Yotta	10^{24}	1000^8

Il **quad** è l'unità di misura dell'energia usata dal Ministero dell'Energia USA (U.S. Departmente of Energy. Spesso citato come: U.S. DoE) per trattare i consumi nazionali e mondiali di energia.

E' un multiplo molto grande della British Thermal Unit o BTU

$$1 \text{ quad} = 1055 \cdot 10^{15} \text{ B.T.U.} =$$

$$1,055 \cdot 10^{18} \text{ Joule} = 1,055 \text{ EJ}$$

Consumo di orario di una lampadina da 100 Watt



**1 barile di petrolio è pari
a circa $6,12 \cdot 10^9 \text{ J} = 6120 \text{ MJ}$**

**Una lampadina da 100 Watt consuma
100 J/s quindi in un'ora
che contiene 3600 secondi consuma:**

$$100 \text{ J/s} * 3600 \text{ s/h} = 360.000 \text{ J/h} \quad \rightarrow \quad 360.000 \text{ J} = 0,36 \text{ MJ}$$

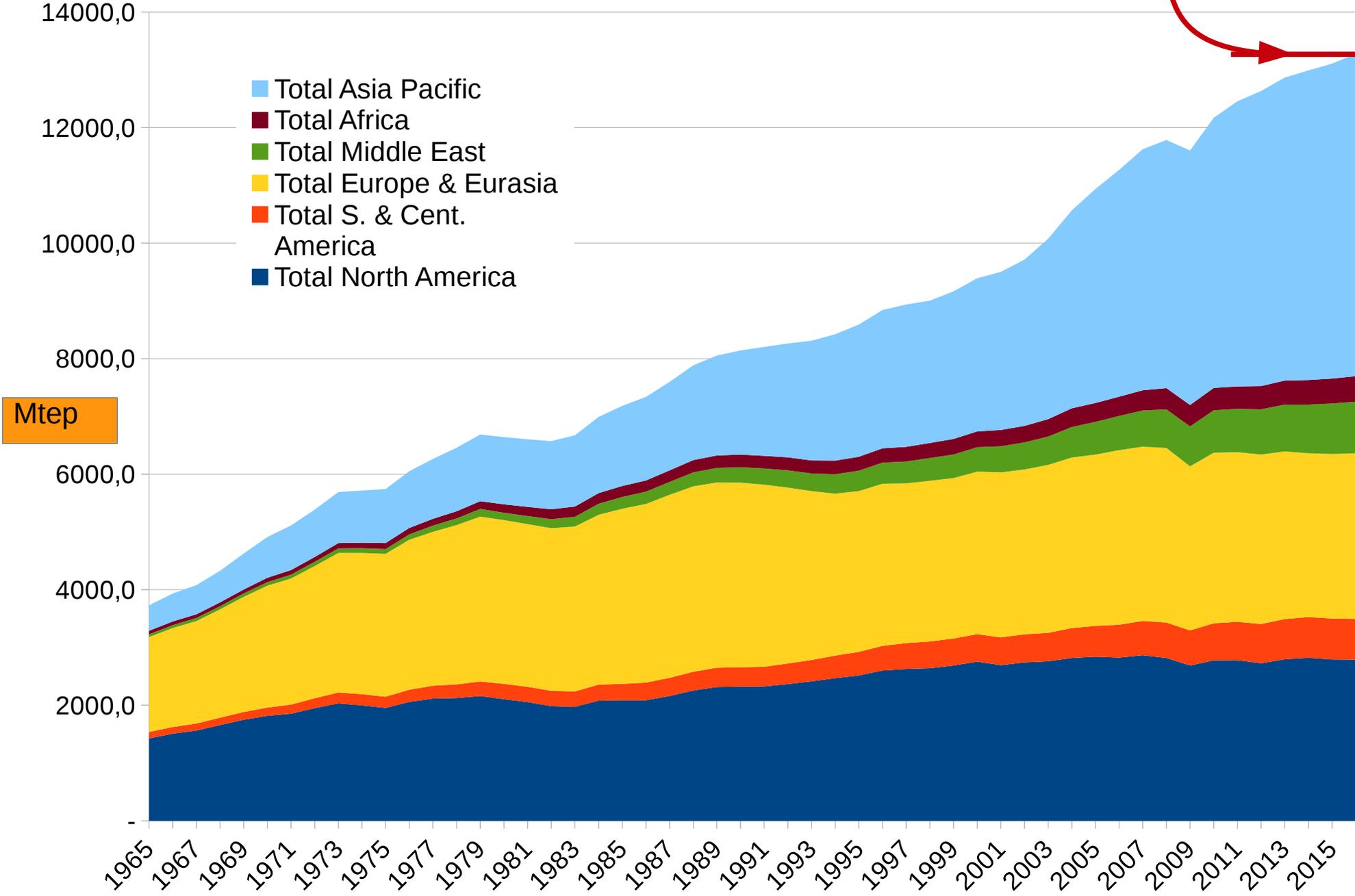
$$\frac{0,36 \text{ MJ}}{6120 \text{ MJ}} = 0,00006 \text{ barili}$$

**Un barile di petrolio ha un volume di
circa 159 litri di petrolio**

$$0,00006 \text{ b} * 159 \text{ l/b} * 1000 \text{ ml/l} = 9,5 \text{ ml di petrolio}$$



Tot (2016) = 13276,3 Mtep = 556 EJ => 17,6 TW





Global social & economic
metabolism

17.6 TW



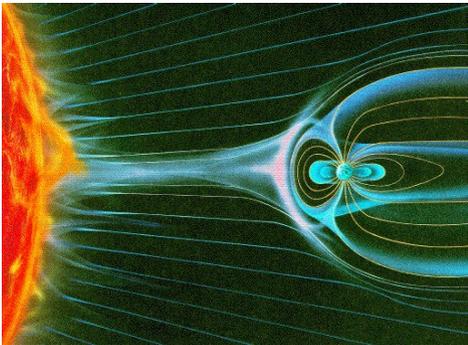
Terrestrial
biomass

100 TW



Tropospheric
Wind power

3,600 TW



Solar radiation
Intercepted by earth

174,000 TW

Scolpiti nella roccia. I principi della termodinamica.

Le trasformazioni energetiche sono descritte dai principi della termodinamica. Questi principi sono **leggi tratte dall'osservazioni dei fenomeni, quindi non sono dimostrabili come teoremi matematici, ma si suppone (fino a prova contraria) che siano semplicemente leggi di natura inviolabili.** La solidità di questi principi e perciò l'importanza della termodinamica è confermata dal giudizio che su questa materia espresse Albert Einstein:

" Una teoria è tanto più importante quanto maggiore è la semplicità delle sue premesse, quanto più diversi sono i tipi di cose che correla e quanto più esteso è il campo della sua applicabilità. Di qui, la profonda impressione che ho ricevuto dalla Termodinamica classica. E' la sola teoria fisica di contenuto universale di cui sono convinto che nell'ambito di applicabilità dei suoi concetti di base non verrà mai superata."

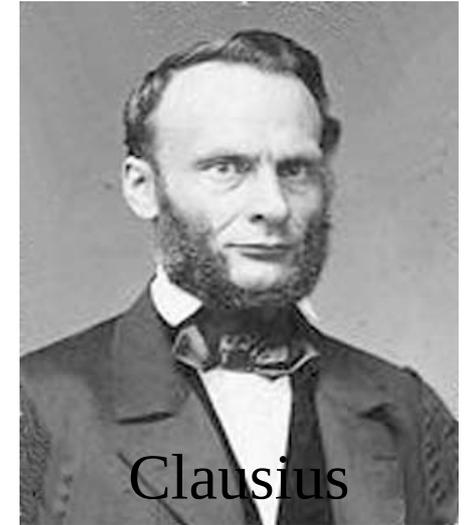
È comunque importante riflettere sul fatto che Einstein si premunisce di restringere il giudizio sulla termodinamica classica, al campo di applicabilità dei suoi concetti. Vedremo che i principi della termodinamica hanno un significato che va oltre al tema delle trasformazioni energetiche.

Termodinamica

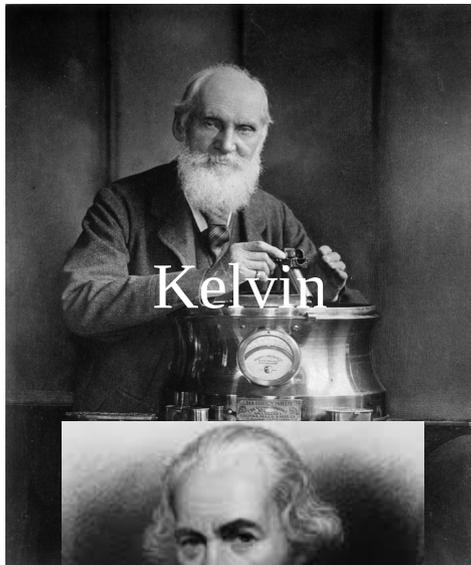
Leggi tratte dall'osservazioni dei fenomeni, quindi non dimostrabili come teoremi matematici o deducibili da altre leggi, ma si suppone (fino a prova contraria) che siano leggi di natura inviolabili.



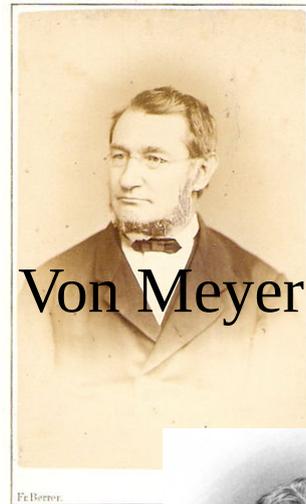
Carnot



Clausius



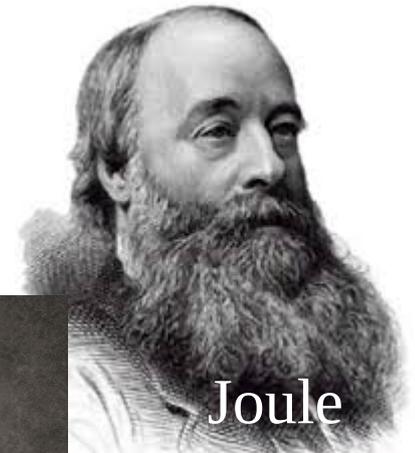
Kelvin



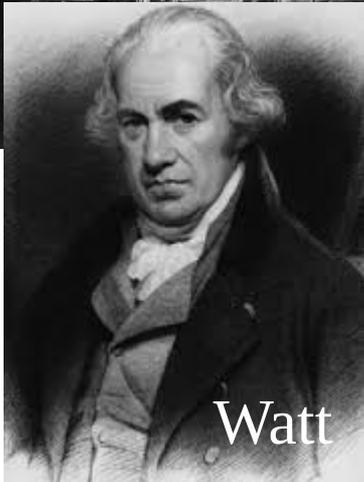
Von Meyer



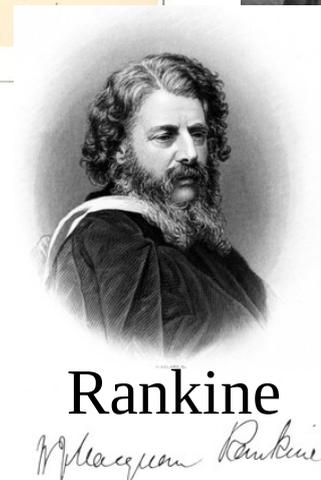
Rumford



Joule

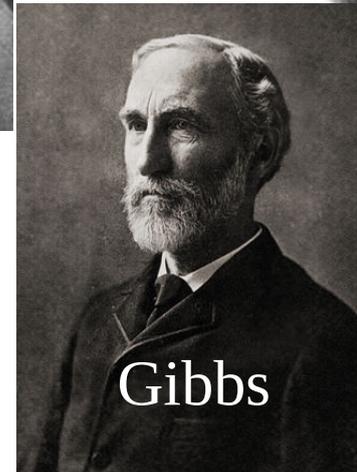


Watt



Rankine

William Rankine



Gibbs

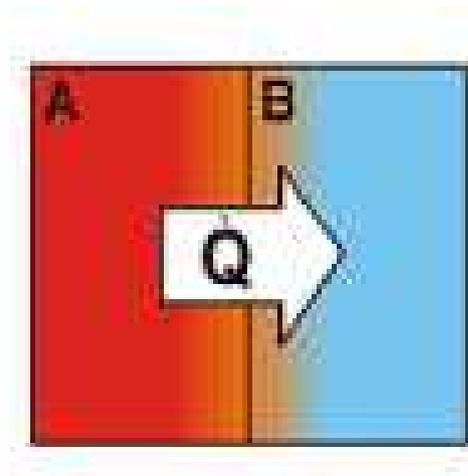
Principio zero.

Ogni principio introduce una grandezza fisica e la definisce nei termini e limiti a cui si è accennato sopra. Il primo principio della termodinamica è il **Principio Zero**. Che si chiama così perché fu introdotto dopo che ormai gli altri principi erano stati numerati e resi popolari. Prendiamo due corpi, ad esempio due contenitori di acqua, uno caldo e l'altro freddo (Figura seguente). Se li mettiamo in contatto osserviamo che dopo un certo tempo ambedue sono tiepidi. Si è verificato del passaggio di calore da uno all'altro. Si definisce **equilibrio termico** lo stato in cui non si osserva più passaggio di calore. Qui si introduce un punto di vista intuitivo, ma erroneo: considerare il calore una specie di fluido. In effetti il calore non è un fluido, ma, come visto, una forma di energia interna del sistema, si tratta di energia che è posseduta a livello microscopico dalle particelle che costituiscono il corpo in questione. È il loro moto disordinato dei suoi componenti microscopici (atomi o molecole) che conferisce energia al corpo e la temperatura è la misura del loro grado di "eccitazione motoria", più esse si muovono velocemente maggiore è la temperatura e maggiore il contenuto di energia del corpo. **Il Principio Zero stabilisce che quando due corpi sono in equilibrio termico con un terzo corpo lo sono anche fra di loro. Per astratto che possa sembrare questo principio stabilisce semplicemente che se misuro la temperatura di due corpi diversi con un termometro (il terzo corpo), posso dire se essi sono in equilibrio termico anche senza metterli a contatto e vedere se si scambiano calore.** Essenzialmente questo principio definisce il modo di effettuare misure di temperatura. In effetti quando abbiamo detto che l'equilibrio termico si osserva quando non vi è più passaggio di calore abbiamo dato un giudizio qualitativo che, diciamo, può essere avvalorato usando la sensazione di calore o freddo che si ha quando si tocca un corpo. Nella realtà il flusso di calore si osserva attraverso l'uso del termometro e si stabilisce l'avvenuto raggiungimento dell'equilibrio termico fra due corpi quando la loro temperatura è la stessa e non varia più. Un corpo qualsiasi è in equilibrio termico quando la sua temperatura non varia da punto a punto cioè fra le sue diverse parti.

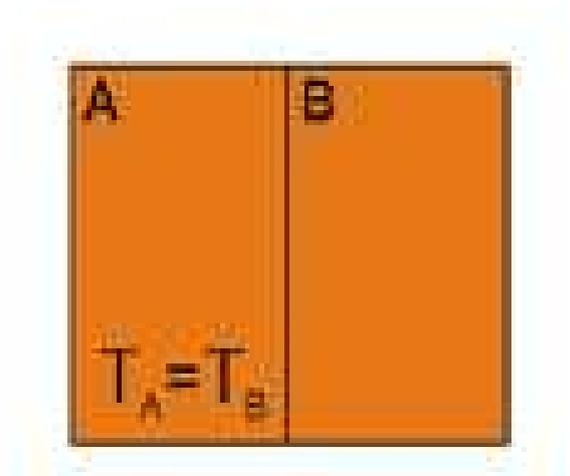
Equilibrio termico



FASE 1



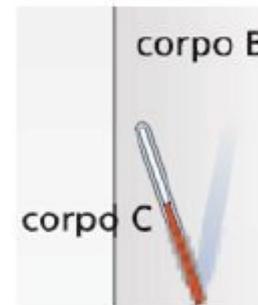
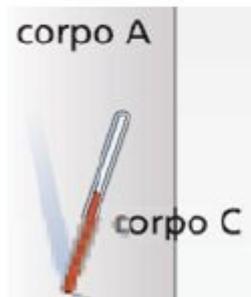
FASE 2



FASE 3

Principio zero.

- *se un corpo A è in equilibrio termico con un corpo C e anche un corpo B è in equilibrio termico con C, allora A e B sono in equilibrio termico tra loro.*



- Il principio è un criterio generale per confrontare le temperature di oggetti *distanti nello spazio o nel tempo.*

Misure di temperatura (termometria)

La misura della temperatura si basa su diverse scale termometriche. La più nota è ovviamente la scala centigrada o Celsius nella quale approssimativamente si pone $T = 0$ alla temperatura di fusione del ghiaccio (acqua pura solida) e $T = 100$ alla temperatura di ebollizione dell'acqua pura alla pressione di 1 Atmosfera.

In fisica, per motivi che non possono essere approfonditi in questo contesto, la scala di temperatura in uso è la scala assoluta o Kelvin nella quale lo zero assoluto è fissato a $-273,15$ °C. Il grado centigrado e Kelvin sono uguali:

$$1 \text{ K} = 1 \text{ C}$$

per cui la temperatura di ebollizione dell'acqua a pressione atmosferica è a $373,15$ K mentre il ghiaccio fonde esattamente a $273,15$ K.

Lo zero assoluto è una temperatura limite che può essere approssimata ma mai raggiunta.

Scala assoluta delle temperature.

$$T(K) = T(C) + 273.15$$

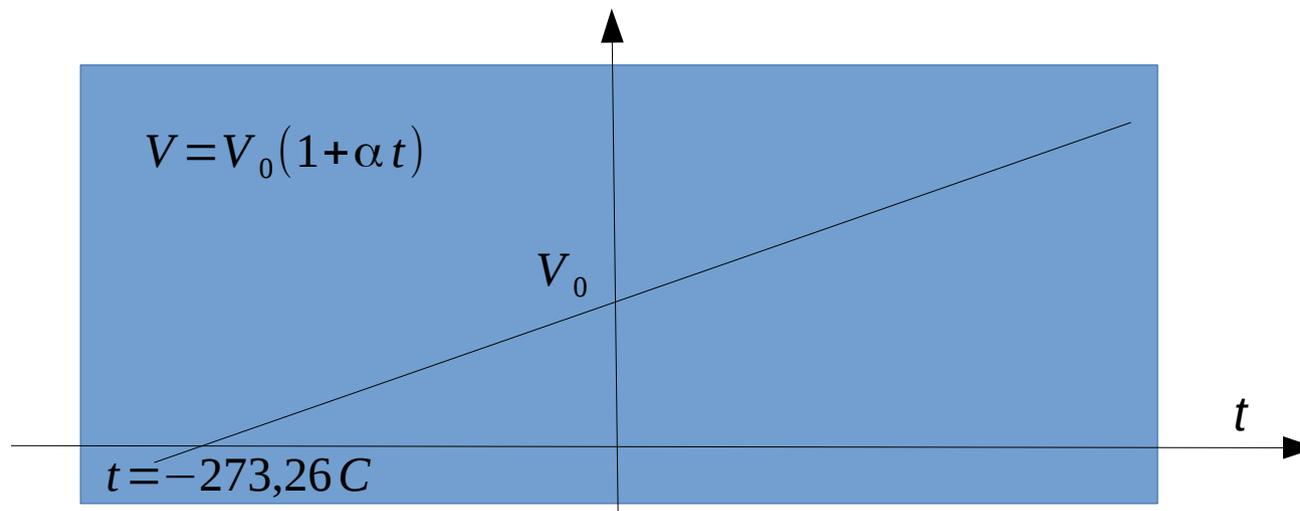
T(K) - Kelvin	T(C) - Celsius	
0	-273,15	limite
4,24	-268,91	T ebollizione elio
77,35	-195,8	T eb azoto
90,18	-182,97	T eb ossigeno
89	-184	Minima terrestre
288	15	Media terrestre
300	25	T ambiente
373,15	100	T eb acqua
5800	5527	Fotosfera solare

Scala assoluta delle temperature e grado Kelvin: K

La scala assoluta delle temperature ha come zero il valore di $-273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$. Il grado Kelvin corrisponde allo stesso intervallo del grado centigrado (o Celsius). La giustificazione del valore di $-273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$ può essere compresa partendo dalla legge di Charles dei gas secondo cui il volume di un gas è direttamente proporzionale alla temperatura:

$$V = V_0(1 + \alpha t)$$

Dove V è il volume del gas, V_0 è il volume del gas alla temperatura di zero gradi centigradi, t è la temperatura in gradi centigradi e α è il coefficiente di dilatazione del gas. La variazione del gas in funzione della temperatura è rappresentata da una retta con intercetta di V_0 sulle ordinate. Estrapolando la retta fino al punto in cui incontra le assi delle ascisse si vede che, per i gas perfetti, tale valore è proprio di $-273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$. A questo valore di temperatura il volume del gas ideale dovrebbe essere nullo. Questa è ovviamente una temperatura limite in quanto i gas ideali o perfetti esistono solo in un determinato intervallo di temperature e pressioni.

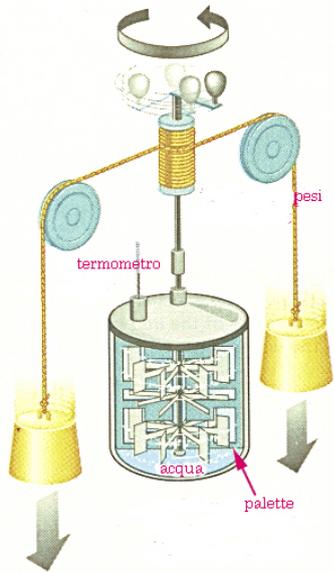


Primo Principio.

Il **Primo Principio** è un riformulazione del principio di conservazione dell'energia già incontrato studiando il moto dei corpi in meccanica. Quando lasciamo cadere un corpo da una certa quota, dove possedeva un'energia potenziale pari a $m \cdot g \cdot h$ (m = massa del corpo in Kg, g = accelerazione di gravità = $9,8 \text{ m/s}^2$, h = quota in metri) man mano che questo si avvicina a quota zero (arbitrariamente presa) l'energia potenziale si trasforma in energia cinetica (cioè di movimento) pari a $1/2 \cdot m \cdot v^2$.

Alla luce dell'osservazione di Joule sull'equivalenza di Calore e lavoro (vedi figura seguente) si giunge ad una formulazione del Primo Principio in cui si afferma che **l'energia di un sistema isolato, che cioè non scambia né materia né energia con l'esterno, è costante.** L'energia all'interno di un thermos ideale perfettamente sigillato è costante. L'unico sistema perfettamente isolato è l'universo intero quindi l'energia dell'universo è costante. Il principio ammette che l'energia si trasformi da una forma ad un'altra, ma il totale della somma delle diverse forme non cambia. L'energia non scompare, ma cambia continuamente forma. Se un sistema (un corpo) scambia energia con un altro corpo sotto forma di calore o di lavoro è l'energia della somma dei due corpi che è costante. Dunque è la somma di calore e lavoro (le valute di scambio dell'energia) che resta costante nelle trasformazioni energetiche. Tipicamente uno dei due corpi è il sistema in esame (cfr pag 26 e 27 della Lezione 2 per una definizione di sistema o corpo) e l'altro corpo è l'ambiente che lo circonda.

Equivalenza di calore e lavoro



Mulinello di Joule

1 cal = 4,187 Joule

l'energia di un sistema cambia in funzione di quanto calore il sistema assorbe o perde e di quanto lavoro il Sistema compie all'esterno o subisce dall'esterno.

$$\Delta E = Q - L$$

Positivo se il calore entra nel sistema

Positivo se il lavoro è compiuto dal sistema

Primo principio.

- Principio di conservazione dell'energia.
- L'energia di un sistema isolato (cioè che non scambia energia e materia con l'esterno) è costante.

Introduzione al Secondo Principio.

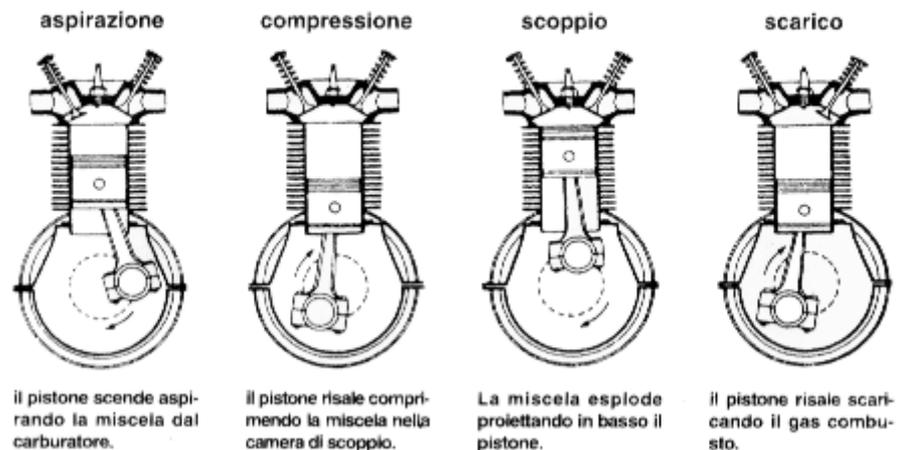
Il Secondo Principio stabilisce che la modalità degli scambi energetici fra corpi conduce spontaneamente verso forme di energia meno disponibile, o, se si preferisce, di qualità inferiore. Il modo di arrivare a questa conclusione è abbastanza complesso, ma questo prezzo ha un ritorno eccezionalmente alto dal punto di vista culturale, perché comprendere il significato del secondo principio della termodinamica schiude una profonda comprensione del modo in cui funziona la natura, la storia ed il processo economico. **È per questo che assieme al primo, il secondo principio dovrebbe far parte del bagaglio culturale di tutti, insieme alla comprensione della musica, delle arti figurative, della poesia, della matematica di base, dovrebbe far parte dell'alfabetizzazione di ogni cittadino di questo pianeta.** Per iniziare questo cammino si deve capire cosa sono le macchine termiche cioè i motori che trasformano calore (il moto disordinato delle molecole di un corpo) in lavoro (il movimento ordinato di meccanismi che svolgono una funzione utile).

Macchine termiche

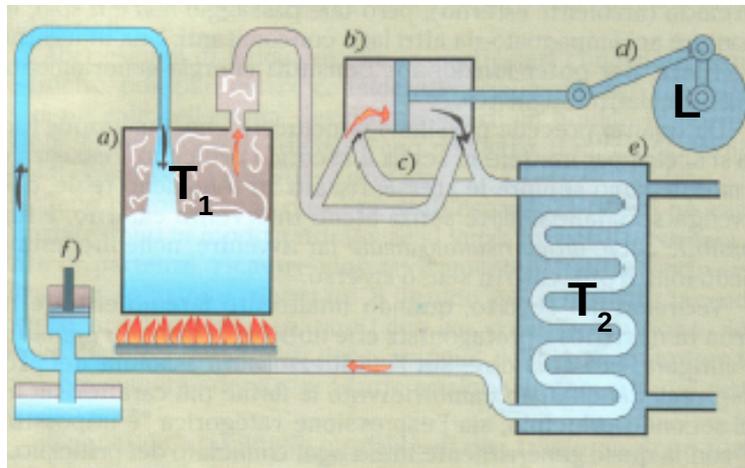
- Definiamo macchina termica un dispositivo che trasforma calore in lavoro. Esempi di macchine termiche sono la macchina a vapore, il motore a combustione interna (benzina e gasolio), e il motore a turbina. Praticamente tutti i motori che per produrre lavoro (energia che svolge una funzione utile) bruciano qualcosa. Tali motori funzionano in genere fra due temperature, l'alta temperatura T_1 della caldaia, del bruciatore, del cilindro ecc, e la bassa temperatura T_2 del radiatore, della torre di raffreddamento ecc, e trasformano l'energia disordinata delle molecole del combustibile quando brucia, nel moto ordinato di una serie di meccanismi che producono un lavoro utile L . Le macchine termiche lavorano facendo dei cicli che si ripetono rendendo il funzionamento continuo nel tempo.
- Esempi.** Tutti, coloro che hanno la patente di guida, conoscono le fasi del ciclo del motore a scoppio a quattro tempi: aspirazione, compressione scoppio e scarico. La temperatura T_1 del motore a benzina è la temperatura di scoppio della benzina mentre la temperatura T_2 è la temperatura dei gas di scarico alla marmitta.

Al termine delle quattro fasi il Motore ha compiuto un ciclo completo e riprende dalla prima fase continuando idealmente all'infinito.

Le fasi del motore a scoppio a quattro tempi



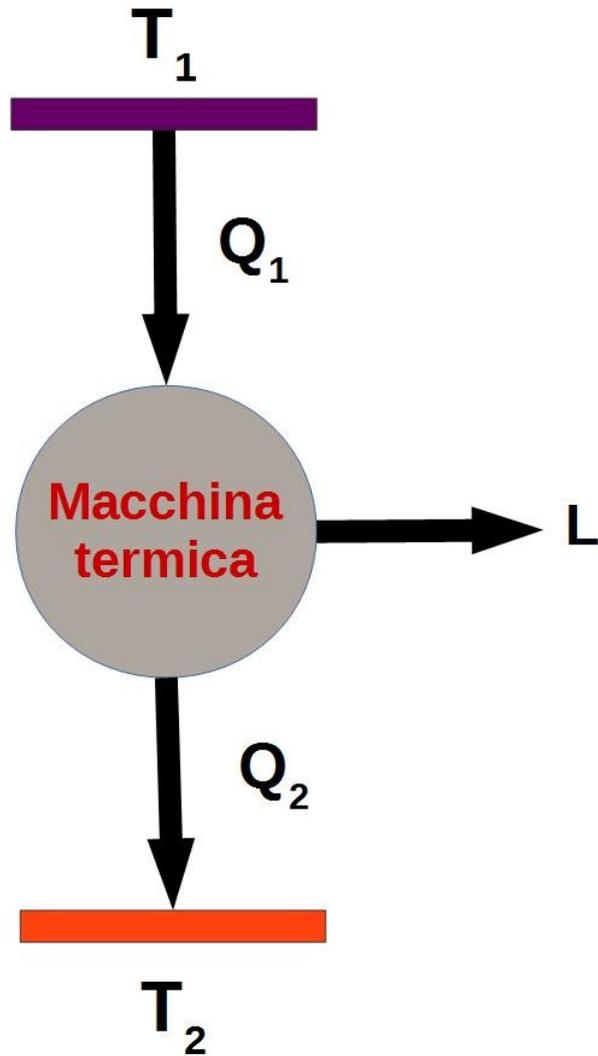
- Anche la macchina a vapore, che è l'archetipo delle macchine termiche reali (ve ne sono di teoriche usate come modello per confronto con le macchine reali), funziona attraverso il suo ciclo di ebollizione dell'acqua, espansione del vapore che mette in moto il meccanismo che produce lavoro utile e ricondensazione dell'acqua.



Schema di macchina a vapore. Anche la macchina a vapore lavora in cicli che si ripetono potenzialmente all'infinito.

- Una macchina termica può essere schematizzata come nella figura che segue. La macchina genera lavoro L , prendendo una quantità di calore Q_1 dalla sorgente a temperatura T_1 e scarica una parte del calore prelevato Q_2 al sistema di raffreddamento a temperatura T_2 . Il lavoro prodotto corrisponde alla differenza $Q_1 - Q_2$.
- Si definisce rendimento della macchina il rapporto fra la differenza $Q_1 - Q_2$ e Q_1 .

Macchine termiche.



$$L = Q_1 - Q_2$$

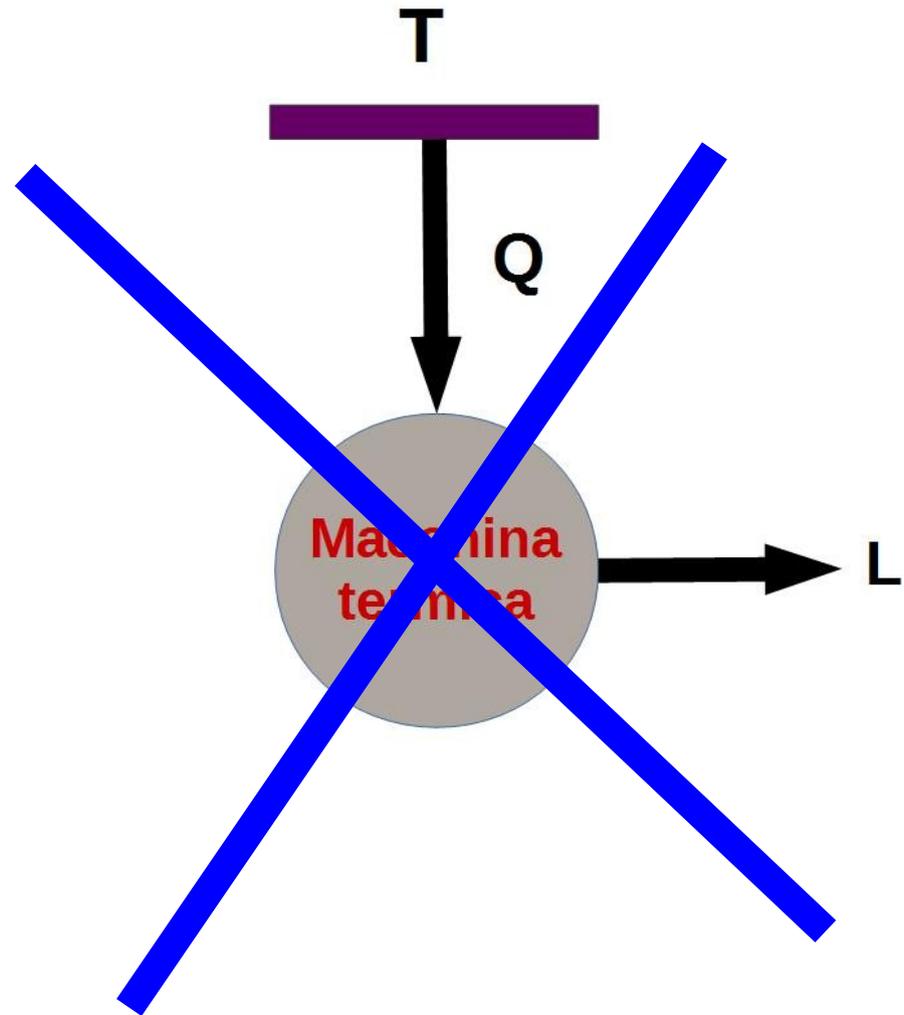
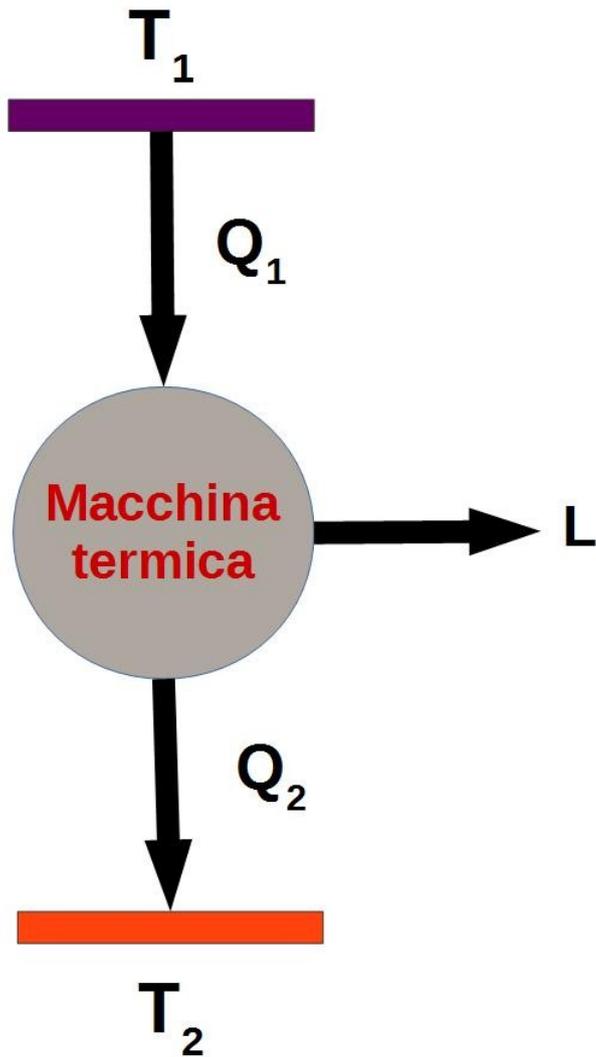
$$\eta = \frac{L}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

Rendimento della macchina

- **Secondo principio.**

L'osservazione mostra che non esiste macchina in grado di trasformare tutto il calore assorbito da una sorgente in lavoro. C'è sempre una parte del calore che viene scaricato ad un corpo a temperatura inferiore. Spesso quest'ultimo è semplicemente l'ambiente.

- È su questa osservazione che si basa il secondo principio della termodinamica formulato proprio in questa forma da Kelvin
- **È impossibile creare una macchina che abbia come unico effetto la trasformazione di calore preso ad una sorgente a temperatura omogenea in lavoro.**



Macchina impossibile che trasforma tutto il calore Q tratto dalla sorgente a temperatura T in lavoro L .

Secondo principio.

E' impossibile creare una macchina che abbia come unico effetto l'estrazione di calore da una sorgente a temperatura costante e la trasformi interamente in lavoro meccanico.

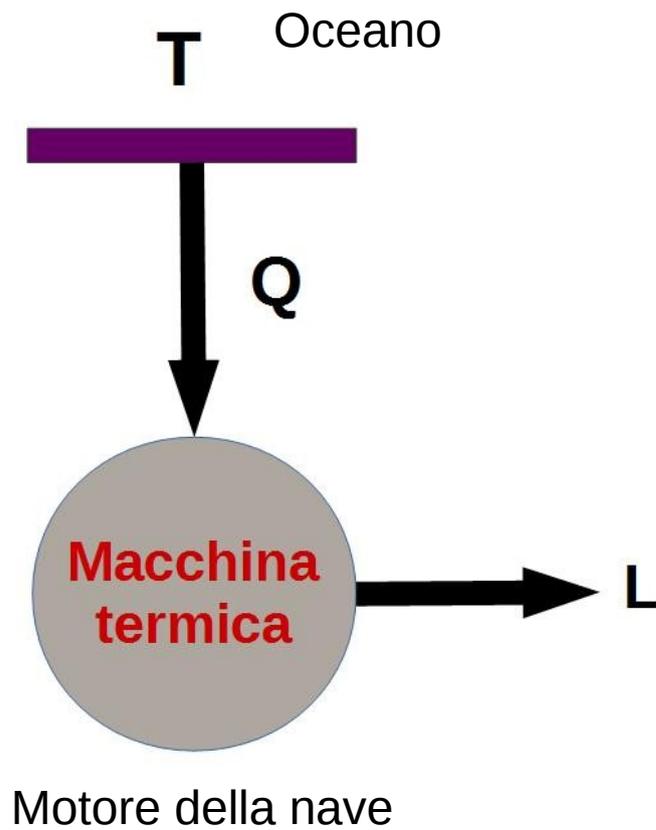
In pratica il rendimento di una macchina termica reale è sempre essere inferiore a 1 (o al 100%).

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

Una tale macchina permetterebbe, ad esempio, di creare una nave che estraendo il calore dal mare potesse navigare indefinitamente. Questo non è possibile. Qualsiasi macchina deve necessariamente (è un'osservazione non un teorema) scaricare una parte del calore che estrae dalla sorgente a temperatura superiore T_1 in un pozzo a temperatura più bassa T_2 .

Questa particolare formulazione del secondo principio stabilisce che è impossibile questa forma di moto perpetuo.

Il secondo principio stabilisce che in ogni trasformazione energetica, in ogni azione che produca lavoro utile, si paga sempre una tassa energetica sotto forma di calore.



Moto perpetuo (di seconda specie)