

Calore e Temperatura

Nel capitolo sull'energia abbiamo osservato che, in presenza di forze non conservative, il concetto di energia perde di significato. Un tipico esempio di forza non conservativa è la forza d'attrito, che, in maniera maggiore o minore, è comunque presente in tutti i fenomeni dove compaiono parti in movimento. Questo farebbe pensare all'invalidità del concetto di energia se non fosse che, in presenza di attrito, si osservano cambiamenti di proprietà degli oggetti che, pure irrilevanti meccanicamente, meritano un approfondimento.

Temperatura ed equilibrio termico

Chiunque può verificare che, toccando i pneumatici della propria automobile dopo un viaggio più o meno lungo, si prova una sensazione di caldo, mentre se si lascia la macchina in strada durante una rigida notte invernale, la mattina, toccando i pneumatici si proverà una sensazione di freddo.

Per rendere quantitative queste sensazioni soggettive, si introduce una nuova (rispetto alla meccanica) proprietà dei corpi, chiamata temperatura.

Si tratta di una grandezza scalare il cui valore numerico dipende dalla scala adottata. La scala Celsius è definita attribuendo al punto triplo dell'acqua (una miscela di acqua liquida, ghiaccio e vapor d'acqua all'equilibrio) il valore convenzionale di $0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$ (si legge "gradi Celsius"), mentre la scala Kelvin (o scala assoluta) attribuisce al punto triplo dell'acqua il valore di 273.16 K (si legge "gradi Kelvin"). Per gli scopi pratici non troppo raffinati si può dire che nella scala Celsius il punto triplo dell'acqua è a $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, mentre nella scala Kelvin lo stesso punto triplo è a 273 K cosicché le due temperature sono legate dalla relazione

$$T(^{\circ}\text{C}) = T(\text{K}) - 273$$

Se ora poniamo a contatto due oggetti a diverse temperature, ci accorgeremo che le loro temperature cominciano a variare (la maggiore diminuisce mentre la minore aumenta) fino a quando non raggiungono lo stesso valore (intermedio fra i due iniziali).

Diremo che i due sistemi hanno raggiunto l'equilibrio termico: due sistemi in equilibrio termico hanno dunque la stessa temperatura. Gli strumenti utilizzati per misurare la temperatura si chiamano termometri. Il loro funzionamento si basa sulla misura di una qualche proprietà fisica il cui valore dipende dalla temperatura. Così nel più diffuso termometro a mercurio si sfrutta la variazione, in funzione della temperatura, del volume del mercurio contenuto in un capillare a sezione costante: in tal modo la misura di volume è ridotta a una misura di lunghezza. Molto utilizzati sono anche i termometri a termocoppia: essi sfruttano il fatto che alla giunzione di due metalli diversi si genera una differenza di potenziale che dipende dalla temperatura. Misurando tale differenza di potenziale rispetto ad una eguale giunzione tenuta ad una temperatura di riferimento costante, si può risalire alla temperatura da misurare. Si osservi che i termometri sono strumenti che misurano la propria temperatura: dunque, se si vuole misurare.

Si osservi che i termometri sono strumenti che misurano la propria temperatura: dunque, se si vuole misurare con un termometro, la temperatura di un oggetto, occorre prima portare termometro e oggetto all'equilibrio termico. Per questo motivo, quando si misura ad esempio la temperatura corporea, occorre attendere qualche minuto per raggiungere l'equilibrio termico con il termometro.

Energia interna

Ci si può ora chiedere di quali proprietà fisiche renda conto la grandezza chiamata temperatura. In che cosa differiscono due oggetti identici a temperatura diversa?

Dal punto di vista meccanico non ci sono differenze sostanziali, visto che i due oggetti mantengono la stessa massa, per cui, sottoposti alla stessa forza assumono la stessa accelerazione.

Esistono tuttavia altre proprietà degli oggetti, diverse da quelle che sono meccanicamente rilevanti: ci riferiamo a quelle proprietà che descrivono il comportamento interno dei corpi.

I costituenti di un corpo (atomi, molecole) non devono essere pensati come sferette rigide immobili: al contrario essi, oltre a possedere una propria struttura interna, si muovono continuamente con moti di vario tipo (traslatori, oscillatori, rotatori) e interagiscono fra loro con forze conservative.

Questo sistema di particelle possiede dunque un'energia cinetica totale (somma delle energie cinetiche individuali) e un'energia potenziale totale dovuta a tutte le possibili coppie di interazioni fra le particelle.

La somma di queste energie cinetiche e energie potenziali prende il nome di energia interna del corpo.

La temperatura è una grandezza macroscopica che misura in qualche modo questa proprietà microscopica detta energia interna.

Il sistema più semplice da descrivere è un gas costituito da sferette rigide (senza struttura interna) che interagiscono reciprocamente e con le pareti solo attraverso urti di tipo elastico.

In questo modello in cui l'energia potenziale rimane costante, la temperatura (espressa nella scala Kelvin) è proporzionale all'energia cinetica media di ogni particella.

Aumentando la temperatura aumenta l'agitazione termica delle molecole e quindi la loro energia cinetica media.

Il primo principio della termodinamica

Abbiamo visto che, per cambiare la temperatura di un corpo (quindi la sua energia interna), lo si può porre a contatto termico con un corpo a temperatura diversa.

Consideriamo due corpi, inizialmente a temperature rispettive T_1 e T_2 . Se li poniamo a contatto termico e attendiamo il tempo sufficiente a raggiungere l'equilibrio termico, i due corpi raggiungeranno entrambi una temperatura comune di equilibrio T_{eq} .

In questo processo, alle variazioni di temperatura corrisponde una variazione di energia interna dei due corpi: quella di uno diminuisce mentre quella dell'altro aumenta: si tratta dunque di un trasferimento di energia interna da un corpo all'altro.

Si definisce calore l'energia che viene scambiata fra due corpi a causa della loro differenza di temperatura: quando due corpi raggiungono la temperatura T_{eq} dell'equilibrio termico, la trasmissione di calore cessa.

Si noti che, in base alla definizione il calore è un'energia in transito da un corpo all'altro: cessata la trasmissione, il calore non esiste più, resta l'energia interna dei due corpi.

Calore ed energia interna sono dunque due forme di energia di carattere profondamente diverso: si parla di calore ogni volta che due sistemi si scambiano energia, dunque durante una variazione dello stato dei due sistemi; all'equilibrio, lo stato dei due sistemi non varia più e la loro energia interna è una proprietà, o, come si dice, una funzione di stato.

Lo scambio di calore è dunque un modo per variare l'energia interna di un sistema. Tuttavia non è l'unico.

Ritornando all'esempio dei pneumatici che si scaldano durante il moto dell'auto, dovremo riconoscere che questo riscaldamento (dunque questa variazione di energia interna) è provocato dal lavoro compiuto dalla forza di attrito fra i pneumatici e la strada.

E' noto a tutti infatti che il funzionamento del motore di un'auto provoca la rotazione delle ruote, ma che, in assenza di attrito fra pneumatici e strada (ad esempio in condizioni di strada ghiacciata) l'auto non avanzerebbe.

Ne concludiamo che un modo alternativo per variare l'energia interna di un corpo è l'esecuzione di lavoro meccanico.

Il primo principio della termodinamica stabilisce il principio di conservazione dell'energia in questi termini: se l'energia interna di un sistema varia di una certa quantità, la stessa quantità di energia deve essere stata trasferita sotto forma di calore trasmesso o di lavoro meccanico eseguito. In formule:

$$\Delta U = Q + L$$

dove U è l'energia interna ΔU la sua variazione Q il calore trasmesso e L il lavoro compiuto.

Capacità termica e calore specifico

Si consideri un corpo a temperatura T a cui viene trasmessa una certa quantità di calore Q . A seguito di questo assorbimento di calore la temperatura passerà da T a $T + \Delta T$. Si definisce capacità termica del corpo, il rapporto fra la quantità di calore trasmesso Q e la variazione di temperatura ΔT che ne consegue

$$C = \frac{Q}{\Delta T}$$

Nel S.I. le capacità termiche si misurano in J/grado*.

Si chiama calore specifico la capacità termica di una massa unitaria:

$$c = \frac{C}{m} = \frac{Q}{m\Delta T}$$

dove m è la massa del corpo. Nel S.I. i calori specifici si misurano in J/Kg grado¹. Mentre la capacità termica di un corpo dipende anche dalla sua massa, il calore specifico dipende unicamente dalla sostanza di cui il corpo è costituito.

Il calore specifico dell'acqua è 4186 J/kg grado. Su questo valore è basata l'unità di misura del calore detta caloria.

$$1 \text{ cal} = 4.186 \text{ J}$$

per cui il calore specifico dell'acqua vale $c_{\text{H}_2\text{O}} = 1000 \text{ cal/kg grado} = 1 \text{ cal/g grado}$.

Cenni alla trasmissione del calore

Finora abbiamo parlato genericamente di trasmissione di calore fra due corpi senza descrivere le modalità con cui tale trasmissione avviene.

I meccanismi con cui il calore può venire trasmesso sono sostanzialmente tre:

Conduzione (corpi solidi)

Convezione (fluidi)

Irraggiamento (anche nel vuoto)

¹ Indichiamo con grado, uno qualunque fra il grado Celsius e il grado Kelvin. Se i valori numerici delle due scale sono diversi, l'ampiezza del grado è la stessa

Conduzione

Se si scalda l'estremità di una barra di metallo (ad esempio esponendola a una fiamma) progressivamente tutta la sbarra subisce una variazione di temperatura che riguarda dapprima le zone adiacenti a quella riscaldata e successivamente le zone sempre più lontane.

Non c'è movimento di materia durante questo processo in cui il calore passa progressivamente a strati adiacenti: tale meccanismo di propagazione del calore prende il nome di conduzione del calore e richiede, come nell'esempio citato, una continuità di materia solida.

Come abbiamo osservato, il calore fluisce dall'estremo più caldo a quello più freddo; la legge della conduzione del calore è dovuta a Fourier e può essere illustrata come segue:

Consideriamo una sezione di una sbarra di spessore infinitesimo (Fig T1) dx e supponiamo che le due facce siano rispettivamente a temperatura T e $T+dT$

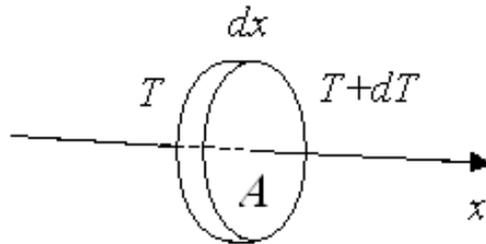


Fig T1 Per la legge di Fourier

Se A è la sezione della sbarra, la quantità di calore che per unità di tempo fluisce dalla faccia alla temperatura T verso quella a temperatura $T+dT$ vale

$$\frac{dQ}{dt} = -KA \frac{dT}{dx}$$

(il segno $-$ serve a specificare correttamente il verso in cui il calore fluisce: infatti se dT è negativa, il secondo membro della () è positivo e il calore fluisce nel verso delle x positive).

Il primo membro della () rappresenta il "flusso di calore" e, nel S.I. si misura in Watt (J/s).

La quantità k al secondo membro è una costante che si chiama "conducibilità termica" e dipende dal materiale di cui è costituita la sbarra. Nel S.I. k si misura in W/m grado.

La grandezza dT/dx misura quanto rapidamente varia la temperatura al variare della sezione della sbarra, e prende il nome di "gradiente di temperatura". Nel S.I. si misura in gradi/m.

A seconda del valore più o meno grande di k i materiali sono più o meno buoni conduttori del calore come risulta dalla Tabella I.

Tabella I Valori di K

Solidi	K
Rame	$9,2 \times 10^{-2}$
Ghiaccio	$5,2 \times 10^{-4}$
Acqua	$1,4 \times 10^{-4}$
Legno	$0,3 \times 10^{-4}$
Polistirolo	$9,3 \times 10^{-6}$
Aria	$5,5 \times 10^{-6}$

Come si vede i metalli costituiscono i migliori conduttori di calore. In essi infatti la trasmissione del calore è affidata ai cosiddetti “elettroni di conduzione”, gli stessi che sono responsabili del passaggio della corrente elettrica. Ne consegue che i buoni conduttori di calore sono anche buoni conduttori di corrente (Wiedemann-Frantz?).

Convezione

La trasmissione del calore in un fluido avviene tramite il moto delle molecole del fluido. Consideriamo (Fig. T2) un recipiente metallico contenente acqua posto su una fiamma. Il calore si trasmette per conduzione attraverso il fondo del recipiente allo strato di molecole a contatto con il fondo stesso; la temperatura dello strato aumenta e corrispondentemente diminuisce la sua densità cosicché questa porzione di fluido più caldo tende a salire verso l'alto, mentre lo spazio da esso occupato viene riempito da molecole appartenenti a uno strato più freddo superiore.

Mentre sale la parte di fluido più caldo viene a contatto con parti di fluido più freddo cui cede calore, cosicché progressivamente si raffredda.

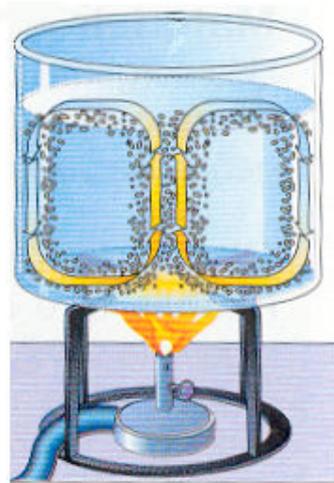


Fig T2 Le correnti di convezione trasmettono il calore in un fluido

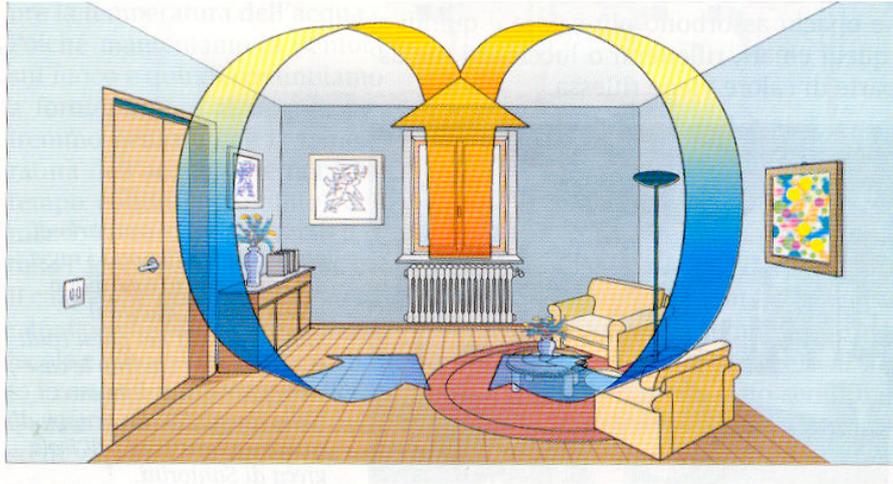


Fig. T3 Altro esempio di correnti convettive in un fluido

Si formano in questo modo, correnti di fluido caldo ascendenti e correnti di fluido freddo discendenti. Si parla complessivamente di “correnti di convezione” che possono essere facilmente osservate ogni volta che si mette una pentola d’acqua a scaldare sul fuoco.

Il meccanismo di convezione che abbiamo descritto si chiama più propriamente “convezione naturale” in quanto il moto del fluido è dovuto al cambiamento di densità con la temperatura.

Si parla invece di “convezione forzata” quando il moto del fluido è dovuto a un agente esterno come ad esempio una pompa o un ventilatore.

Supponiamo un corpo a temperatura T_C venga investito da una corrente di fluido a temperatura T_F . La quantità di calore scambiata ogni secondo dal corpo è, in base a una legge dovuta a Newton:

$$\frac{dQ}{dt} = K_C S (T_C - T_F)$$

dove S è la superficie del corpo e K_C è il cosiddetto coefficiente di convezione (nel S.I. si misura in W/m^2 grado) che dipende da moltissimi fattori come la forma della superficie di contatto (piatta o curva), la sua orientazione (orizzontale o verticale), la natura del fluido (gas o liquido), le proprietà fisiche del fluido (densità, viscosità e calore specifico), la velocità del fluido (se è abbastanza bassa da dare luogo ad un flusso laminare, ovvero se si trova in regime turbolento ecc.).

Si tenga presente che, in ogni problema di convezione in cui un fluido si trova a contatto con una parete, uno strato di fluido adiacente alla parete (di spessore tanto più sottile quanto più è turbolento il moto) è fermo e attraverso di esso la trasmissione del calore avviene per convezione.

Irraggiamento

L'irraggiamento è una forma di trasmissione del calore attraverso l'emissione e l'assorbimento di onde elettromagnetiche

Ogni corpo infatti (solido, liquido o gas) emette onde elettromagnetiche in virtù della propria temperatura. Queste onde elettromagnetiche hanno lunghezza d'onda λ distribuite su uno spettro che dipende dalla temperatura del corpo.

Così sotto 500 °C circa la maggior parte dell'energia emessa come onde elettromagnetiche è concentrata nell'infrarosso; aumentando la temperatura comincia ad essere emessa anche radiazione visibile, dapprima nella zona del rosso e poi in quella del bianco (calor rosso e calor bianco).

L'energia radiante emessa da un corpo per unità di tempo e di superficie dipende dalla temperatura del corpo e dalla sua temperatura e si dice potere emissivo ϵ

Ad esempio il potere emissivo del tungsteno a 2177 °C è di 500 kW/m²

Quando una radiazione incide su un corpo, questa viene in parte trasmessa e in parte riflessa e la frazione assorbita si chiama potere assorbente del corpo e dipende dalla sua natura e superficie.

Ad esempio a 2477 °C il potere assorbente del tungsteno è circa 0.25 cioè solo ¼ dell'energia incidente viene assorbita.

Si chiama corpo nero un corpo ideale con $e=1$, in grado cioè di assorbire tutta l'energia che lo investe. Il nerofumo ha un potere assorbente vicino a quello del corpo nero.

Il potere emissivo del corpo nero dipende dalla quarta potenza della sua temperatura assoluta (legge di Stefan Boltzmann)

$$\epsilon_0 = \sigma T^4$$

dove σ è detta costante di Stefan Boltzmann e vale $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$

Il potere emissivo di un corpo qualunque è proporzionale a quello di un corpo nero alla stessa temperatura e la costante di proporzionalità è il potere assorbente del corpo

$$\epsilon = e \epsilon_0$$

Quindi conoscendo le caratteristiche della radiazione emessa da un corpo nero, si conoscono quelle della radiazione emessa da ogni altro corpo.

Anche le onde elettromagnetiche emesse da un corpo nero sono distribuite su diverse lunghezze d'onda λ . In base alla cosiddetta formula di Planck l'energia emessa per unità di tempo e di superficie nell'intervallo di lunghezza d'onda compreso fra λ e $\lambda + d\lambda$ è, in W/m²

$$E_\lambda d\lambda = \frac{A}{\lambda^5 \left[e^{B/\lambda T} - 1 \right]} d\lambda$$

con $A = 3.74 \times 10^{-16} \text{ Wm}^2$ e $B = 1.44 \times 10^{-2} \text{ mK}$

L'andamento di E_λ in funzione di λ è mostrato al variare di T in Fig T4.

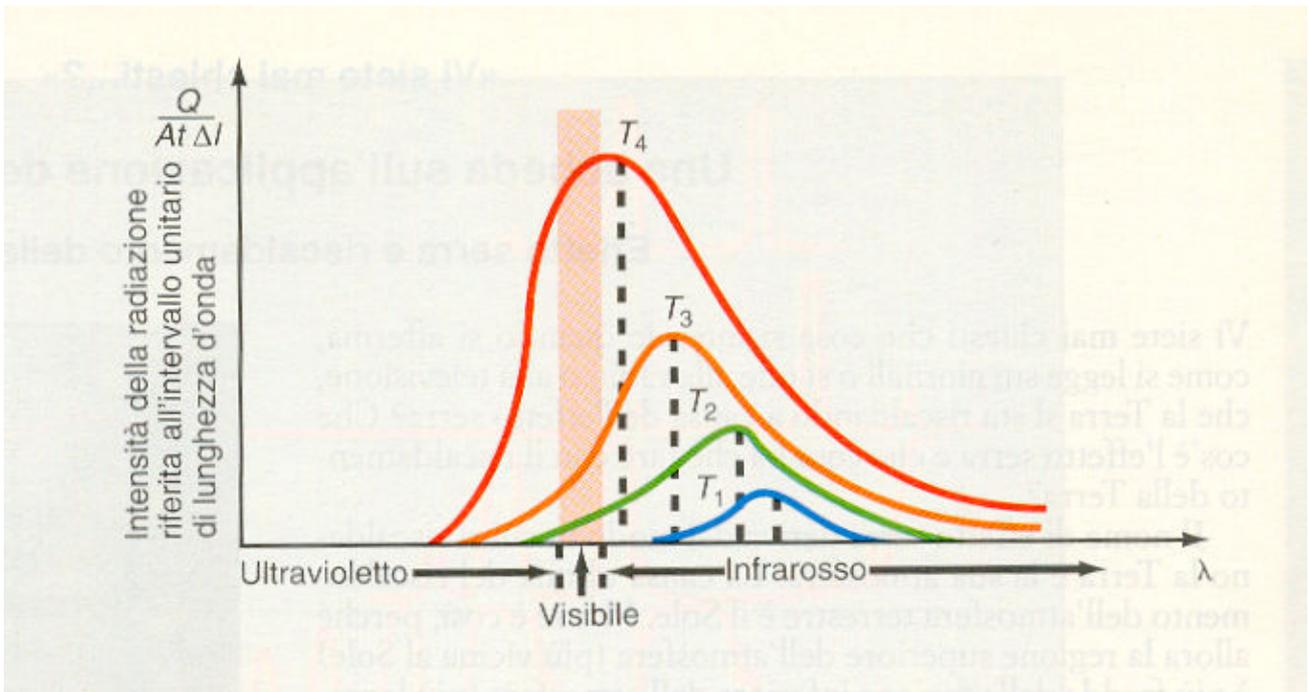


Fig T4 Legge di Planck

Si vede da Fig T3 che l'energia emessa per ogni lunghezza d'onda varia al variare di λ : in particolare, per ogni temperatura, si ha una lunghezza d'onda alla quale l'energia emessa è massima. Questo valore λ_{\max} a cui si ha la massima emissione è inversamente proporzionale alla temperatura assoluta del corpo che emette

$$\lambda_{\max} = \frac{C_W}{T}$$

Questa relazione è nota come Legge di Wien e la costante C_W detta costante di Wien vale $C_W = 0.29 \times 10^{-2} \text{ m } ^\circ\text{K}$

La legge di Wien giustifica l'osservazione fatta all'inizio del paragrafo, quando abbiamo citato il cambiamento di colore di un corpo progressivamente riscaldato.

Secondo Principio Termodinamica

Abbiamo visto che calore e lavoro sono due modi alternativi ma equivalenti di variare l'energia interna di un corpo. Abbiamo anche sottolineato come durante la trasmissione del calore e l'esecuzione di lavoro meccanico, in base al primo principio, si abbia una continua variazione dell'energia interna una continua variazione di energia interna del sistema il quale, dunque, non è in equilibrio: si dice che esso esegue una trasformazione.

Al termine della trasformazione l'energia interna del sistema acquista un valore definito e non esiste più né calore né lavoro.

Il valore dell'energia interna che il sistema possiede al termine di una trasformazione è, in generale, diverso da quello che aveva all'inizio.

Esiste tuttavia una classe di trasformazioni che riportano il sistema, dopo essersene allontanato, allo stato di partenza: queste trasformazioni si chiamano trasformazioni cicliche o cicli.

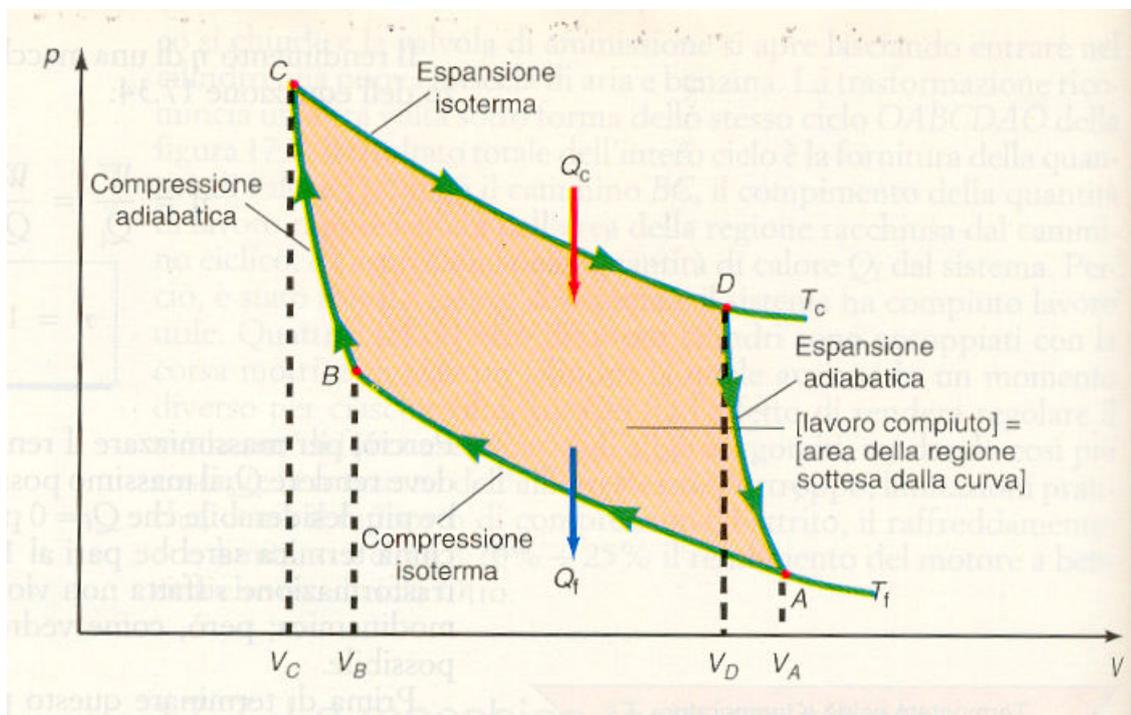


Fig T5 Ciclo di Carnot

Il secondo principio tratta di queste trasformazioni

In una trasformazione ciclica $\Delta U = 0$ quindi, per il primo principio

$$Q + L = 0$$

dove Q è il calore totale scambiato e L il lavoro totale compiuto. Convenzionalmente Q è positivo quando entra nel sistema e negativo quando ne esce: analogamente L è positivo se è compiuto sul sistema e negativo se è compiuto dal sistema.

Durante una parte della trasformazione ciclica il sistema assorbirà una quantità di calore Q_H (positiva) dall'esterno; durante un'altra parte cederà una quantità Q_C (negativa) all'esterno. Pertanto la quantità totale di calore scambiato può scriversi:

$$Q = Q_H + Q_C = Q_H - |Q_C|$$

tenendo conto che, essendo $Q_C < 0$; $|Q_C| = -Q_C$

si ha così

$$Q_H - |Q_C| = -L$$

Se dunque in una trasformazione ciclica

$$Q_H > |Q_C|$$

deve essere $L < 0$ (lavoro compiuto verso l'esterno). I sistemi che operano in tal modo si chiamano macchine termiche.

Una macchina termica utilizza una trasformazione ciclica del fluido impiegato, assorbendo più calore di quanto non ne ceda all'esterno e fornendo un lavoro verso l'esterno. Un esempio è fornito dal comune motore a scoppio, dove il calore Q_H è fornito dalla reazione (esotermica) di combustione della benzina, il calore Q_C è disperso dai sistemi di raffreddamento, e il lavoro L viene utilizzato per far girare le ruote del mezzo.

Se, viceversa

$$Q_H < |Q_C|$$

deve essere $L > 0$ (lavoro compiuto sul sistema). I sistemi che operano in tal modo si chiamano macchine frigorifere.

Una macchina frigorifera utilizza una trasformazione ciclica del fluido impiegato, utilizzando lavoro esterno per sottrarre calore Q_H e cedere all'esterno il calore $|Q_C|$. Un esempio è costituito dai comuni frigoriferi domestici, in cui il lavoro L è di natura elettrica, il calore Q_H è sottratto ai cibi contenuti nel frigorifero e $|Q_C|$ è ceduto all'ambiente. Si noti che nel caso del frigorifero

$$|Q_C| = Q_H + L > Q_H$$

essendo $L > 0$. Un frigorifero dunque cede all'ambiente più calore di quello che sottrae ai cibi per raffreddarli. Le trasformazioni cicliche hanno a che fare dunque o con macchine termiche o con macchine frigorifere. Corrispondentemente esistono due enunciati del secondo principio della termodinamica: uno riferito alle macchine termiche e uno alle macchine frigorifere

1) Enunciato Kelvin-Planck (KP)

E' impossibile realizzare una macchina termica che converta in lavoro L tutto il calore Q_H che assorbe dall'esterno.

Se si definisce efficienza (o rendimento) di una macchina termica la quantità

$$\eta = \frac{|L|}{Q_H} = -\frac{L}{Q_H}$$

pari al rapporto fra lavoro prodotto e calore assorbito, l'enunciato KP può essere sintetizzato dicendo che è impossibile realizzare una macchina termica con $\eta = 1$.

Poichè in base alla ()

$$-L = Q_H - |Q_C|$$

si ha

$$\eta = \frac{Q_H - |Q_C|}{Q_H} = 1 - \frac{|Q_C|}{Q_H}$$

per avere $\eta=1$ dovrebbe dunque essere $|Q_C|=0$. Un modo alternativo di esporre l'enunciato KP è quello di affermare che è impossibile realizzare una macchina termica che funzioni con $|Q_C|=0$, cioè senza cedere calore all'esterno .

Enunciato di Clausius (C)

E' impossibile realizzare una macchina frigorifera che funzioni senza assorbire lavoro dall'esterno. Poiché, se fosse $L=0$, una macchina frigorifera cedrebbe all'ambiente (relativamente caldo) una quantità di calore $|Q_C|$ esattamente uguale al calore Q_H assorbito dai cibi al suo interno (relativamente freddi), un modo alternativo di esporre C consiste nel dire che è impossibile realizzare una macchina frigorifera che trasferisca una certa quantità di calore da un corpo freddo a uno più caldo senza richiedere lavoro dall'esterno

Si può dimostrare che i due enunciati sono equivalenti

$$KP \equiv C$$

Dunque l'informazione che contengono è la stessa; pertanto utilizzare il secondo principio nella forma KP o C è solo questione di comodità.

Se però due enunciati che appaiono così diversi sono equivalenti, ci si può chiedere quale sia il senso comune dell'informazione che contengono.

Consideriamo a tal fine l'enunciato C. Possiamo schematizzare il processo che esso vieta come mostrato nella Fig T6

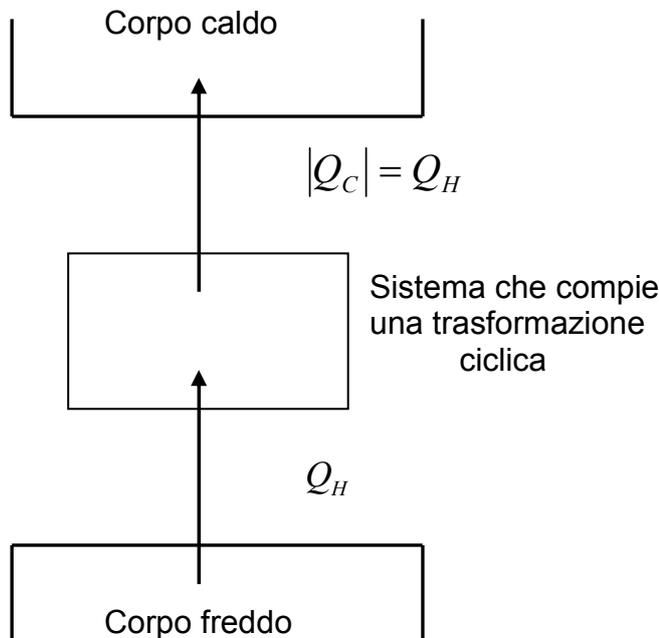


Fig T6 Questo processo è vietato dall' enunciato di Clausius

Se però consideriamo il processo inverso cioè il passaggio di calore da un corpo caldo a un corpo freddo non esiste più alcuna restrizione. Se invertiamo il senso della freccia della Fig T6 otteniamo (Fig T7)

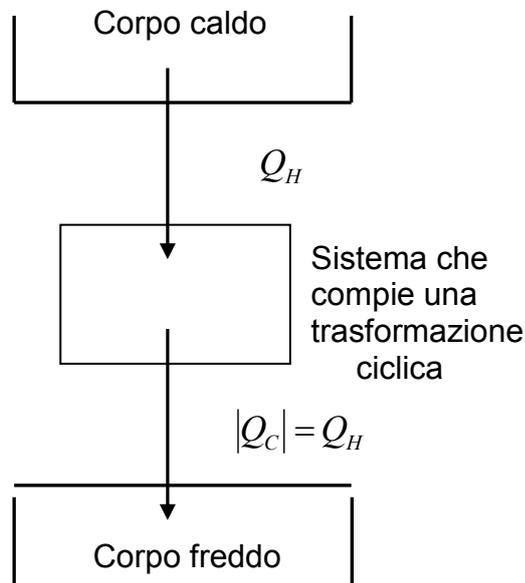


Fig T7 Questo processo non è vietato dall'enunciato di Clausius

Addirittura, non serve alcun sistema intermedio per fare passare calore da un corpo caldo a uno freddo; basta (Fig T8) porli a contatto termico

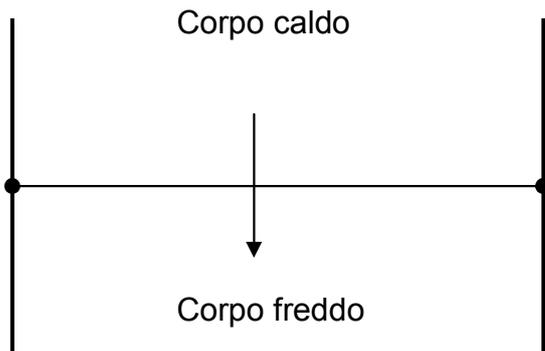


Fig T8 Per fare passare calore da un corpo caldo a un corpo freddo basta porli a contatto termico

Quindi si può fare passare calore da un corpo caldo a uno freddo senza richiedere lavoro, ma per fare passare calore da un corpo freddo a uno caldo occorre spendere lavoro.

Le caratteristiche con cui il calore può passare da un corpo caldo a uno freddo sono diverse da quelle con cui avviene il passaggio inverso. Diremo che il passaggio di calore da un corpo caldo a uno freddo è un processo irreversibile, un processo che non può essere invertito mantenendo le stesse caratteristiche ($L=0$).

Analogamente l'enunciato KP vieta il processo di Fig T9

Ancora una volta se invertiamo il senso della freccia (Fig T9) otteniamo un processo possibile

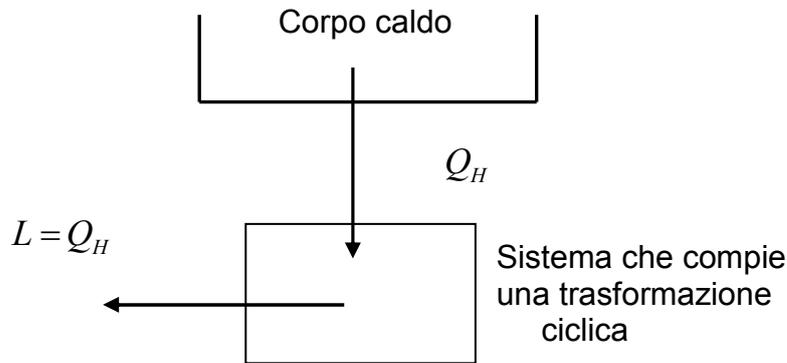


Fig T9 Questo processo è vietato dall'enunciato KP

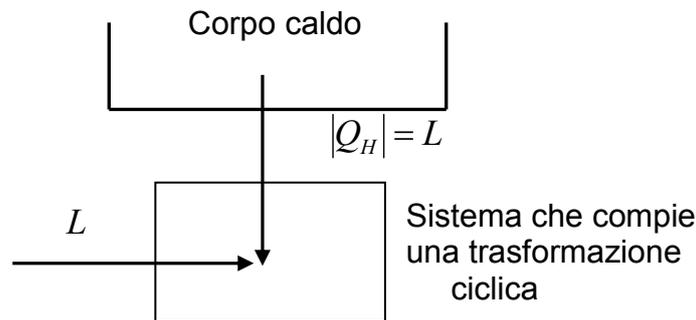


Fig T10 Questo processo non è vietato dall'enunciato KP

Il processo illustrato in Fig T10 è noto come "conversione di lavoro meccanico in calore" ed è un processo che si può svolgere quotidianamente sotto l'azione delle forze di attrito: in questo caso tutto il lavoro viene convertito in calore trasmesso all'ambiente. Se un corpo viene frenato dalle forze di attrito, il lavoro delle forze di attrito tende a fare crescere la temperatura del corpo: non appena la temperatura del corpo cresce al di sopra di quella dell'ambiente circostante si ha una trasmissione di calore all'ambiente che, al termine del processo eguaglia il lavoro compiuto.

La conversione di lavoro meccanico in calore avviene dunque con caratteristiche diverse rispetto alla conversione di calore in lavoro meccanico.

Diremo che la conversione di lavoro meccanico in calore è un processo irreversibile.

Il secondo principio della termodinamica, nei suoi due enunciati, introduce nella Fisica il concetto di trasformazione irreversibile, completamente estraneo alla Meccanica.

Per la Meccanica, il moto di un oggetto lungo una traiettoria, sotto l'azione di determinate forze può svolgersi in un verso o in un verso opposto, a seconda delle condizioni iniziali, senza contraddire ad alcun principio.

Pensiamo ad esempio al moto di un pianeta lungo la propria orbita: che esso avvenga in senso orario o antiorario dipende solo dalle condizioni iniziali: se si proiettasse un ipotetico film in cui si vede un pianeta percorrere la propria orbita, nessuno si accorgerebbe se il film viene proiettato al contrario, in quanto non si osserverebbe la violazione di alcuna legge meccanica (le leggi meccaniche sono invarianti per l'inversione temporale - scambio t con $-t$).

In termodinamica non è così: tutti si accorgerebbero che è proiettato al contrario un film che mostra una pentola d'acqua che, raffreddandosi, cede progressivamente calore ad un fornello, ovvero un sasso che, grazie al calore sviluppato dall'attrito sul terreno, acquista velocità.

L'esistenza di trasformazioni irreversibili crea una gerarchia fra le varie forme di energia: se il lavoro meccanico può trasformarsi completamente in calore, ma non viceversa, il lavoro meccanico ha maggior valore del calore; se un corpo ad alta temperatura può cedere calore a uno a bassa temperatura senza bisogno di lavoro, ma non viceversa, i corpi ad alta temperatura hanno più pregio di quelli a bassa temperatura.

Non è un problema di conservazione dell'energia: questa è garantita dal primo principio. E' un problema di utilizzazione dell'energia per compiere lavoro.

Il secondo principio afferma che ogni volta che si svolge un processo irreversibile, la quantità di energia disponibile per compiere lavoro diminuisce.

Nell'Universo (pensato come sistema isolato) si svolgono continuamente trasformazioni irreversibili: basti pensare alla trasmissione di calore tra i corpi (stelle) a temperatura maggiore a quelli (pianeti) a temperatura minore: il giorno che l'Universo raggiungesse l'equilibrio termico, tutti i corpi sarebbero alla stessa temperatura e nessuna macchina termica sarebbe in grado di produrre lavoro.

Per misurare la quantità di energia che si rende indisponibile per compiere lavoro a seguito di trasformazioni irreversibili, si introduce per ogni sistema una proprietà (o funzione di stato) chiamata da Clausius entropia.

L'entropia, come l'energia interna, ha un valore definito se il sistema è in equilibrio, mentre come l'energia interna subisce variazioni quando il sistema esegue una trasformazione in cui venga trasmesso del calore (l'energia interna può variare anche quando si compie lavoro).

Per un corpo, a temperatura assoluta T , che scambi una quantità di calore Q , la variazione di entropia è:

$$dS = \frac{dQ}{T} \quad \Delta S = \frac{\Delta Q}{T}$$

Si vede che $\Delta S > 0$ se $Q > 0$ cioè se il calore entra nel sistema, mentre $\Delta S < 0$ se $Q < 0$ cioè se il calore esce dal sistema.

Consideriamo una stella a temperatura assoluta T_s che cede una quantità di calore di valore assoluto $|Q|$ a un pianeta a temperatura assoluta $T_p < T_s$.

La variazione di entropia della stella (Q uscente) è:

$$\Delta S_s = -\frac{|Q|}{T_s}$$

mentre quella del pianeta (Q entra) è:

$$\Delta S_p = +\frac{|Q|}{T_p}$$

La variazione complessiva di entropia:

$$\Delta S_s + \Delta S_p = -\frac{|Q|}{T_s} + \frac{|Q|}{T_p} = |Q| \left(\frac{1}{T_p} - \frac{1}{T_s} \right) = |Q| \left(\frac{T_s - T_p}{T_p T_s} \right) > 0$$

in quanto $T_s > T_p$

Questo risultato dice dunque che ogni volta che viene spontaneamente trasmesso calore da un corpo a temperatura maggiore verso un corpo a temperatura minore, la variazione complessiva di entropia dei corpi coinvolti (detta entropia dell'Universo) aumenta.

L'entropia dell'Universo è dunque in costante aumento, visto che il calore passa spontaneamente e continuamente dai corpi più caldi ai corpi più freddi, mentre per l'enunciato di Clausius, non può avvenire il contrario senza spendere lavoro.

Un elegante teorema dimostra che, ogni volta che si realizza una trasformazione irreversibile, l'entropia dell'Universo aumenta, e l'energia che diventa indisponibile per compiere lavoro è proporzionale a tale aumento.

Lo stesso teorema dimostra che, quando avviene una trasformazione reversibile (ad es. una trasformazione puramente meccanica) non c'è variazione di entropia nell'Universo e non si perde quindi capacità di compiere lavoro.

In formule, se indichiamo con ΔS_U la variazione di entropia dell'Universo, è dunque sempre:

$$\Delta S_U \geq 0$$

ove il segno $>$ vale quando si verifica una trasformazione irreversibile e il segno $=$ quando sia realizza una trasformazione reversibile.

Questo risultato non è che un modo diverso di esprimere il secondo principio e quindi la gerarchia delle varie forme di energia.