**CALORE E LAVORO-relazione sperimentale**

In questi brevi appunti dimostreremo che il **calore è una forma di energia**. L’idea che il calore potesse essere una forma di energia risale almeno al tempo di **Leibnitz**, che postulò l’esistenza di una forza viva distribuita fra i moti molecolari in modo da giustificare la sparizione di forza viva macroscopica durante gli urti[[1]](#footnote-1). Anche l’idea che esso sia una forma di Lavoro risale a vari secoli addietro, almeno agli inizi del 1800 ma probabilmente era già in germe fin dalla metà del 1600 quando furono realizzate le prime macchine a vapore (cioè macchine che, riscaldando del vapore, producevano Lavoro a causa della sua espansione).

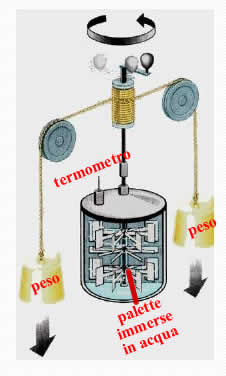
**Sperimentalmente, calore e Lavoro sono legati fra loro**

Molte esperienze dimostrano che **un Lavoro compiuto su un corpo accresce la temperatura di quest’ultimo**. Si può affermare che il calore può essere prodotto a spese di un Lavoro di qualsiasi specie: il Lavoro fatto, per esempio, dalle [forze di attrito](http://www.sapere.it/sapere/strumenti/studiafacile/fisica/La-meccanica/Le-forze-e-i-principi-della-dinamica/Le-forze-di-attrito.html) produce calore mentre il Lavoro compiuto per comprimere un gas all'interno di un recipiente ne aumenta la temperatura e di conseguenza produce anch’esso calore. Viceversa, in particolari condizioni, **è possibile ottenere Lavoro fornendo calore ad un corpo** (generalmente, facendo espandere del gas): è quanto accade nel caso delle macchine termiche, come ad esempio nella locomotiva a vapore o, più modernamente, nelle centrali termo-elettriche.

Il fatto che il calore potesse trasformarsi in Lavoro e viceversa fece sì che ad un certo punto della storia dell’evoluzione delle concezioni fisiche, studiando in particolare le **macchine termiche**, si affacciò la congettura che il **calore** non fosse altro che una delle tante forme in cui si manifesta l’**energia**.

Uno dei primi esperimenti riguardo alla trasformazione di Lavoro in calore fu eseguito da **Sir Benjamin Thompson**, **conte di Rumford**. Nel **1798**, sovrintendendo all’alesatura dei cannoni dell’esercito bavarese, Thompson eseguì un curioso esperimento: immerse un cannone con tutto l’apparato di alesatura in una vasca piena d’acqua: iniziò l’operazione di alesatura e notò che dopo circa due ore di lavoro l’acqua si era così riscaldata da iniziare a bollire! Thompson giunse alla corretta conclusione che l’unica spiegazione possibile era che **il calore fosse stato fornito dal movimento dell’alesatura**, cioè che -detto in parole moderne- il calore era stato fornito dal movimento degli strumenti di alesatura. La copia della lettera originale con cui Thompson illustrò il suo esperimento è messa on-line nel sito “Fisica Facile”.

**Il mulinello di Joule**

Per dimostrare con certezza che il calore è una forma di energia serviva un esperimento decisivo, svolto in modo **quantitativo**. Tale esperimento fu ideato e realizzato fra il **1843** e il **1849** dal fisico britannico **J. P. Joule.**

**Lo scopo dell’esperimento era quello di misurare la relazione fra energia dissipata per attrito e calore prodotto**. L’esperimento consiste in un recipiente pieno d’acqua dentro cui sono immerse delle palette. Le palette sono collegate a dei pesi che sono tenuti sollevati dal suolo.

“Il meccanismo di uno dei suoi esperimenti somiglia a un orologio a pesi collegato a un mulinello a palette immerse nell’acqua contenuta in un recipiente adiabatico (adiabatico=termicamente isolante). Il tutto a temperatura ambiente. Girando la manovella s’innalzano i pesi, il che conferisce energia potenziale al **Sistema**. Il Sistema può venir considerato **isolato**. [dal libro di Einstein e Infeld: L’evoluzione della fisica]

Lasciandoli andare, a poco a poco i pesi scendono -mettendo contemporaneamente in rotazione le palette– finché non raggiungono il loro punto più basso. Il fatto interessante è che **il Lavoro della forza-peso** sui due pesi non si trasforma interamente in **energia cinetica** dei pesi, come accadrebbe in una caduta libera: presto infatti la velocità di caduta dei pesi smette di crescere e si attesta su di un valore costante.

La **forza-peso**è infatti bilanciata dalla **forza di attrito**esercitata dall’acqua sulle palette. Se l’attrito è molto alto la velocità di caduta delle due masse è molto piccola, quasi nulla: possiamo affermare che esse perdono energia potenziale senza guadagnare energia cinetica: di conseguenza, **le masse perdono Energia Meccanica.**

Dove va a finire l’Energia Meccanica persa? Il termometro segna un aumento di temperatura, che normalmente attribuiamo a passaggio di **calore**. Il Sistema è **isolato** e perciò l’unica spiegazione è che l’energia persa sia responsabile dell’innalzamento di temperatura.

Misurando l’aumento di temperatura (**ΔT**) e la massa dell’acqua riscaldata (**m**) è possibile calcolare il calore prodotto (**Q**). Calcolando poi la perdita di Energia Meccanica (**Energia Meccanica dissipata, EDISS**) e confrontando i valori di Q e Ediss si ottiene questo risultato fondamentale:

**l’Energia Meccanica persa è sempre proporzionale al calore prodotto**

Scritto in linguaggio matematico: **EDISS α Q (1a)**

Un esempio di come il calcolo di Q e Ediss è effettuato è descritto nel paragrafo “Un esempio pratico dell’esperimento di Joule”.

**La costante di proporzionalità fra Energia dissipata e calore è universale**

Le misure di Joule e di altri fisici del suo tempo hanno permesso di misurare il tasso di scambio Energia dissipata→Calore: gli esperimenti effettuati hanno mostrato che dissipare un’energia potenziale di una massa di 0,427 Kg sollevata ad 1 m dal suolo equivale ad una **caloria**. Cioè 1 cal = 4,186 J e 1 Cal = 1Kcal = 4186 J. Perciò posso scrivere l’equazione (1a) come:

**EDISS = 4,186⋅Q (1b)** ; Energia in Joule, Q in calorie

L'aspetto veramente importante del lavoro di Joule è che la costante di proporzionalità misurata nell'esperimento della ruota a pale è uguale a quella ottenuta utilizzando altri metodi, molto diversi, per provocare un aumento temperatura dell'acqua mediante l'esecuzione di Lavoro di attrito. In altre parole: **la costante di proporzionalità calore-lavoro è universale**.

I metodi usati per verificare la proporzionalità Energia Meccanica dissipata-Calore e misurarne la costante di proporzionalità furono i seguenti:

a) gli esperimenti con la ruota a pala (il mulinello già descritto sopra);

b) esperimenti in cui il lavoro meccanico veniva speso in una macchina elettrica che provocava il passaggio di corrente attraverso una resistenza immersa nell'acqua;

c) esperimenti in cui il lavoro meccanico veniva speso per comprimere il gas contenuto in un cilindro immerso nell'acqua;

d) esperimenti in cui il lavoro meccanico veniva speso fra due pezzi di ferro che venivano strofinati l’uno con l’altro al di sotto della superficie dell’acqua.

In tutti gli esperimenti, il risultato ottenuto fu che per innalzare di 1°C la temperatura di 1 grammo di acqua era sempre necessario dissipare 4,186J. Si può concludere che: la dissipazione di una certa quantità di energia su di una data quantità di acqua racchiusa **adiabaticamente** (cioè: isolata termicamente) provoca lo stesso aumento della temperatura **indipendentemente** dal metodo seguito per condurre il processo.

Questo importante risultato sperimentale è stato confermato in seguito utilizzando anche sostanze diverse dall'acqua. Possiamo concludere che:

**calore prodotto ed Energia Meccanica dissipata (cioè: calore e EDISS) sono direttamente proporzionali, con una costante universale di proporzionalità k = 4,186 J/cal (1cal = 4,186 Joule)**

Il fatto che la costante di proporzionalità k è universale dimostra che Lavoro e calore sono due diverse manifestazioni della stessa grandezza -in questo caso l’energia-; in altri termini: **il calore non è che una forma di trasferimento di energia** **analogaal Lavoro**. Non ti torna questo discorso? Riguardati gli appunti presi in classe!

Poiché calore e Lavoro sono due diverse manifestazioni del trasferimento di energia, **puoi usare calore al posto del Lavoro per ottenere energia cinetica!** Ad esempio, puoi scaldare un gas dentro un cilindro con pistone: il gas si espande e mette in moto il pistone, come accade nel motore a scoppio. Non riesci a visualizzare il Sistema cilindro+pistone? Più semplicemente, pensa a cosa accade quando apri lo sportello di un forno bello caldo! Lavoro e calore sono forme di energia equivalenti.

Se **il calore è una forma di energia** io posso esprimerlo direttamente in Joule! In altre parole: posso usare per calore e Lavoro la stessa unità di misura. In questo caso scrivo le eq. (1a,b) nella semplicissima forma:

**Q = EDISS  -in modulo-** ; Q e Energia in Joule  **(2a)**

**Segno del Calore e del Lavoro**

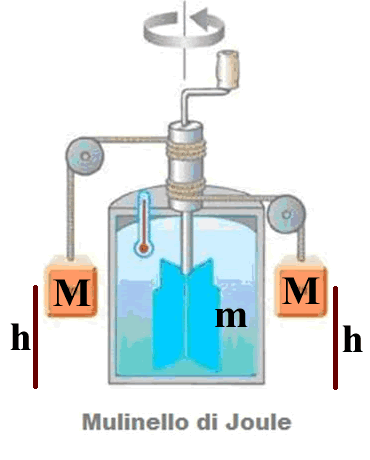
Infine, un’ultima precisazione sull’eq. (2a) riguardante i **segni**. Convenzionalmente, si considera il **calore positivo** quando viene assorbito dal Sistema, ad esempio quando riscaldo un gas con una fiamma. All’opposto, si considera il **Lavoro positivo** quando esso è fatto dal Sistema, ad esempio quando un gas si espande e spinge via l’aria intorno a sé. Per questo motivo, il segno di Q è opposto a quello del Lavoro e perciò l’eq (2b)-(2c) assumono la loro forma definitiva:

**EDISS = -4,186⋅Q** ; Q in calorie , Energia in Joule **(2b)**

**EDISS = -Q** ; Q e Energia in Joule **(2c)**

*[Testo rielaborato dai documenti dei siti* [*www.alessandraprofangelucci.it*](http://www.alessandraprofangelucci.it) *e* [*www.ematte4i-urbino.it*](http://www.ematte4i-urbino.it) ]

**Un esempio pratico dell’esperimento di Joule**

Consideriamo un **mulinello di Joule** formato da un recipiente con una massa d’acqua m=300g e con 2pesi di valore M=5kg l’una poste ad un’altezza h=2,3m.

All’inizio la temperatura dell’acqua è Ti=18°C; le due masse sono immobili.

Calcolo l’**Energia Meccanica iniziale**: Ei = Ui + Ki

Ui = M⋅g⋅h⋅2masse = 5kg⋅9,8N/kg⋅2,3m⋅2masse = 225,4J

Ki = 0J

Ei = Ui + Ki = 225,4J + 0J = 225,4J

Lascio cadere le due masse! All’inizio accelerano, poi scendono con velocità circa costante a causa del rallentamento dell’attrito. Misuro che esse arrivano al suolo con una velocità finale Vf=1,8m/s.

Calcolo adesso l’**Energia Meccanica finale**: Ef = Uf + Kf

Uf=0J

Kf= ½⋅m⋅Vf2⋅2masse = 16,2J

Ef = Uf + Kf = 0J + 16,2J = 16,2J

Calcolo infine l’**Energia Meccanica dissipata:** Ediss = Ef – Ei = 16,2J – 225,4J → Ediss=-209,2J

Noto però che l’acqua si è riscaldata! La sua temperatura finale adesso è Tf=18,1666 °C: è aumentata di un valore ΔT=+0,1666°C. Calcoliamo il **calore assorbito dall’acqua** usando la formula del calore specifico che abbiamo imparato al II anno: Q = c⋅m⋅ΔT. Nel nostro caso: m=300g , c=1cal/(g⋅°C) , ΔT=+0,1666°C →

Q = 49,98cal

In conclusione: il mulinello ha dissipato 209,2J di Energia Meccanica ed ha generato 49,98 calorie di calore.

Facendo il rapporto risulta: Ediss/Q = 4,186 J/cal

cioè: è stata prodotta 1 caloria di calore per ogni 4,186J di Energia Meccanica dissipata

**Ripetiamo una seconda volta l’esperimento** cambiando i valori iniziali. Uso due pesi di valore M=10kg l’uno appesi immobili ad un’altezza iniziale h=1,8m: le pale vorticano dentro una massa m=500g d’acqua alla temperatura iniziale Ti=21°C. Faccio cadere nuovamente i pesi, le pale vorticano dentro l’acqua scaldandola, i pesi scendono lentamente e toccano il suolo con una velocità finale Vf=1,2m/s: la temperatura finale dell’acqua è Tf=21,1617°C.

Calcolo ancora una volta l’**Energia Meccanica iniziale**: Ei = Ui + Ki

Ui = M⋅g⋅h⋅2masse = 10kg⋅9,8N/kg⋅1,8m⋅2masse = 352,8J

Ki = 0J

Ei = Ui + Ki = 352,8J + 0J = 352,8J

Lascio cadere le due masse! All’inizio accelerano, poi ancora una volta scendono con velocità circa costante a causa dell’attrito delle pale con l’acqua. Misuro che esse arrivano al suolo con una velocità finale Vf=1,8m/s.

Calcolo adesso l’**Energia Meccanica finale**: Ef = Uf + Kf

Uf=0J

Kf= ½⋅m⋅Vf2⋅2masse = 14,4J

Ef = Uf + Kf = 0J + 14,4J = 14,4J

Calcolo infine l’**Energia Meccanica dissipata:** Ediss = Ef – Ei = 14,4J – 352,8J → Ediss=-338,2J

Noto però che l’acqua si è riscaldata! La sua temperatura finale adesso è Tf=21,1617 °C: è aumentata di un valore ΔT=+0,1617°C. Calcoliamo il **calore assorbito dall’acqua** usando la formula del calore specifico che abbiamo imparato al II anno: **Q = c⋅m⋅ΔT**. Nel nostro caso: m=500g , c=1cal/(g⋅°C) , ΔT=+0,1617°C →

Q = 80,85cal

In conclusione: il mulinello ha dissipato 338,2J di Energia Meccanica ed ha generato 80,85 calorie di calore.

Facendo il rapporto risulta: Ediss/Q = 4,186 J/cal

cioè: è stata prodotta 1 caloria di calore per ogni 4,186J di Energia Meccanica dissipata

Il valore del rapporto Ediss/Q non è cambiato: **Ediss e Q sono direttamente proporzionali**



Adesso è giunta l’ora di fissare i concetti essenziali di questi appunti.

Lo scopo degli appunti è dimostrare che **il calore è una forma di Energia**, alla stregua di quella Potenziale e Cinetica.

Si parte dall’osservazione che **esiste una relazione fra Lavoro e calore**: facendo Lavoro su di un oggetto posso riscaldarlo, cioè gli fornisco calore; viceversa, posso usare il calore per generare Lavoro. Storicamente, la prima osservazione ben documentata che il Lavoro si può trasformare in calore è fatta risalire all’esperimento del **Conte Rumford**: da notare che il suo esperimento fu solo qualitativo, cioè non Rumford prese alcuna misura.

I primi esperimenti quantitativi (cioè: con misure accurate) sulla relazione fra calore e energia sono fatti risalire a **Joule**. Egli riscaldò dell’acqua usando l’attrito generato da alcune pale tenute in moto dal Lavoro prodotto dalla discesa di due pesi. Calcolando l’Energia Meccanica dissipata durante la caduta dei pesi (Ediss) ed il calore generato dall’attrito (Q) arrivò alla conclusione che Ediss α Q → Ediss=k⋅Q .

Altri esperimenti portati avanti con diverse tecniche confermarono la proporzionalità fra Ediss e Q e mostrarono che la costante k è universale: k = 4,186J/cal ; ciò significa che, in qualunque modo io produca calore consumando Energia Meccanica (o viceversa), si produce sempre 1 caloria di calore per ogni 4,186J di Energia Meccanica dissipata.

L’universalità del valore di k dimostra che il calore è una forma di Energia: i 4,186J di Energia Meccanica persi non vengono distrutti ma sono trasformati in 1 caloria di calore (e viceversa).

1. Negli appunti URTI ELASTICI ED ANELASTICI”, nel paragrafo “Forza viva e velocità” [↑](#footnote-ref-1)