

Maria Luisa Fiandri, Laura Forti

**JOULE E L'EQUIVALENTE MECCANICO DEL CALORE:
TRA STORIA DELLA FISICA E DIDATTICA**

Analizzando il problema della natura del calore nel XIX secolo, vengono individuati i personaggi che maggiormente hanno contribuito al raggiungimento della concezione moderna di questo concetto. Passando attraverso le idee di Sadi Carnot (1796-1832) e Julius Robert von Mayer (1814-1878), si introducono la figura di James Prescott Joule (1818-1889) ed il suo lavoro di sperimentatore. Viene quindi focalizzata l'attenzione su uno dei suoi esperimenti più famosi: quello da cui, utilizzando una ruota a pale lavorante in un calorimetro pieno d'acqua, fu ricavato l'equivalente meccanico del calore. Grazie alla sua semplicità concettuale questo esperimento può essere proposto come un valido modello didattico. Verrà pertanto descritta la riproduzione da noi progettata ed eseguita di questo apparato. Saranno infine illustrati la metodologia seguita nell'esecuzione dell'esperimento, i risultati ottenuti e gli obiettivi didattici perseguibili.

Il problema della natura del calore

Nonostante i termini temperatura e calore fossero noti sin dall'antichità, una distinzione chiara ed inequivocabile tra i concetti che essi rappresentano si ebbe solo nella seconda metà del XVIII secolo, quando Joseph Black (1728-1799) definì il calore come "qualcosa di reale" che può essere ceduto o assorbito dai corpi durante processi di vario tipo e la temperatura come l'intensità del calore presente nei vari corpi¹.

Su cosa fosse questo "qualcosa di reale" Black non si pronunciò; all'epoca, del resto, erano presenti teorie contrastanti a questo riguardo e Black si limitò ad esporre quelle che gli sembravano le più probabili. Le teorie più accreditate erano due: una vedeva il calore come una sostanza, l'altra lo vedeva come una forma di moto.

La prima, detta teoria del calorico, portava ad affermare che il calore fosse un fluido (detto, appunto, calorico) impalpabile ed imponderabile e che la quantità totale di calorico presente nell'universo fosse costante. Così ogni corpo possedeva una quantità finita di calorico e, di conseguenza, al contatto con gli oggetti si avvertivano sensazioni diverse in ragione dell'ammontare del calorico posseduto dagli stessi. Secondo questa teoria, inoltre, l'attrito sviluppava calore in quanto le forze che lo producevano spremevano fuori dal materiale una parte del suo calorico.

Per quanto riguarda l'altra teoria alla quale si accennava precedentemente, essa affondava le sue radici nel meccanicismo, spiegando il calore come dovuto ad un movimento meccanico (vibrazione) delle particelle dei corpi. Secondo questa teoria il movimento delle particelle doveva essere veloce (si pensi, per esempio, al moto tumultuoso dell'acqua che bolle), le direzioni di tale movimento le più disparate (il riscaldamento di un corpo da parte di un altro avviene a prescindere dalle modalità di contatto) ed, infine, tutte le particelle, od almeno la maggior parte di esse, dovevano essere tanto piccole da risultare impercettibili (se noi vediamo un corpo che si muove velocemente non è detto che esso sia anche caldo, in quanto il moto che vediamo è collettivo e non delle singole particelle).

¹ J. Black, "Lectures on the Elements of Chemistry, given at the University of Edinburgh", 1766-1796, Matthew Carey, Philadelphia, 1807.

Maria Luisa Fiandri, Laura Forti Joule e l'equivalente meccanico del calore: tra storia della fisica e didattica

Nonostante questa fosse fondamentalmente una buona teoria (per esempio spiegava molto bene come mai l'attrito producesse calore), non fece molta presa sulla maggior parte degli scienziati in quanto, come ammette lo stesso Black, non era facile formarsi un'idea del "tremolio" delle particelle.

Uno dei primi ad assumere posizioni decisamente critiche nei confronti della teoria del calorico fu Benjamin Thompson, il conte Rumford (1753-1814); egli, infatti, progettò diversi esperimenti nel tentativo di confutarla (si pensi, per esempio, a quelli che condusse dopo aver diretto nel 1797 dei lavori di alesatura dei cannoni). Pur tuttavia gli scienziati del tempo non si convinsero dell'infondatezza della teoria del calorico, riuscendo sempre a spiegare i risultati di tali esperimenti in termini di quest'ultima.

I più importanti studi sul calore condotti nella prima metà del XIX secolo avevano lo scopo pratico di migliorare il funzionamento delle macchine a vapore; fu così che il giovane ingegnere Sadi Carnot (1796-1832) si accinse allo studio di questo problema.

Come la maggior parte degli scienziati suoi contemporanei, Carnot era un sostenitore della teoria del calorico; tuttavia, un frammento redatto tra il 1824 ed il 1826 testimonia la sua conversione alla teoria meccanica del calore:

"Il calore non è altra cosa che la potenza motrice, o piuttosto che il movimento che ha cambiato di forma. E' un movimento nelle particelle dei corpi. Dovunque c'è distruzione di potenza motrice vi è, nel medesimo tempo, produzione di calore in quantità precisamente proporzionale alla quantità di potenza motrice distrutta. Reciprocamente, dovunque c'è distruzione di calore, vi è produzione di potenza motrice."².

Carnot ipotizzò anche che esistesse un rapporto costante tra calore guadagnato ed energia spesa: tra i suoi manoscritti postumi, si trova, in una nota fugace, un valore per tale costante di proporzionalità, che, nelle nostre unità di misura, risulta essere pari a 3600 J/Kcal.

Quindi, sebbene all'inizio del XIX secolo non si fosse ancora certi della natura meccanica del calore, l'ambiente scientifico si stava sempre più orientando verso questa concezione.

Il capovolgimento di mentalità si ebbe, però, soprattutto tra i giovani, fuori dagli ambienti accademici, dove il peso della tradizione e l'autorità dei maestri talvolta impacciano il rinnovamento delle idee.

Osservando alcuni fenomeni naturali (come ad esempio il fatto che le onde battute dal vento sono più calde del mare calmo), Julius Robert von Mayer (1814-1878) cominciò ad elaborare l'ipotesi di una possibile proporzionalità tra energia meccanica e calore. Nel 1841, cercando di dare un fondamento fisico alle sue nuove idee, arrivò anche a dare un valore a tale costante di proporzionalità, che egli stesso definì equivalente meccanico del calore. Supponendo che la differenza tra i calori specifici dei gas a pressione e volume costanti equivallesse al lavoro fatto per vincere, nell'espansione del gas, la pressione esterna, Mayer trovò che

² S. Carnot, "Réflexion", Paris, 1878, citato in: N. Abbagnano et al., "Storia delle Scienze", UTET, Torino, 1965, vol. II, pag. 241.

Maria Luisa Fiandri, Laura Forti Joule e l'equivalente meccanico del calore: tra storia della fisica e didattica

una grande caloria equivaleva a 3500 J (valore in buonissimo accordo con quello trovato da Carnot).

Nonostante la portata di questi risultati, le idee di Mayer non furono immediatamente accettate dalla comunità dei fisici. Di fatto, ciò che rese possibile il riconoscimento del suo genio fu il meticoloso lavoro dello scienziato dilettante James Prescott Joule (1818-1889), il quale con accurate misure dimostrò che la quantità di calore prodotta da una data quantità di lavoro è sempre la stessa.

Joule ed il suo lavoro di sperimentatore

Secondo di cinque figli, James Prescott Joule nacque a Salford, vicino a Manchester, il 24 dicembre 1818. Ricevette la sua prima educazione a casa, insieme al fratello maggiore: dal 1834 al 1837, infatti, John Dalton (1766-1844) insegnò loro la matematica elementare, la filosofia naturale ed i fondamenti di chimica.

Nonostante il padre possedesse una fabbrica di birra, Joule non vi lavorò mai, anche se aveva intrapreso i suoi pionieristici esperimenti proprio per ottimizzarne la produzione.

Dedicando i suoi primi studi all'idea di costruire un motore elettrico che riuscisse a competere con la macchina a vapore, Joule si accorse ben presto che vi erano delle indesiderate conversioni di "forza elettrica" in calore. Interessandosi a questo problema, nel 1840 scoprì ciò che oggi è noto col nome di effetto Joule: il calore generato in un circuito elettrico dipende dalla resistenza totale e dal quadrato della corrente.

Focalizzando, quindi, l'attenzione sugli effetti termici dell'elettricità, Joule presentò al congresso di Cork della British Association for the Advancement of Science del 1843 gli esperimenti di conversione di energia meccanica in calore tramite le correnti elettriche indotte in una bobina; in questa occasione diede anche una prima stima dell'equivalente meccanico del calore, che, in termini moderni, risultava essere 4510 J/Kcal.

Nonostante la loro importanza, questi risultati non fecero alcuna particolare impressione sugli scienziati britannici e passarono quasi inosservati.

Joule proseguì comunque i suoi esperimenti, studiando anche le proprietà termomeccaniche dei gas. Dagli esperimenti che condusse in questo campo ottenne un nuovo valore per l'equivalente meccanico del calore (4420 J/Kcal), in buon accordo con quello precedentemente trovato.

Negli stessi anni Joule arrivò ad un'altra determinazione di questa quantità, ideando uno tra i suoi esperimenti più famosi: quello della ruota a pale azionata da pesi e ruotante in un calorimetro pieno d'acqua. Con questo apparato trovò, nel 1845, un valore per l'equivalente meccanico del calore pari a 4790 J/Kcal e successivamente, dopo aver perfezionato l'esperimento, un valore di 4210 J/Kcal. Ripeté, inoltre, l'esperimento utilizzando dell'olio di balena e del mercurio, trovando, nel primo caso, 4220 J/Kcal e, nel secondo caso, 4240 J/Kcal.

Il mulinello con la ruota a pale originale

Maria Luisa Fiandri, Laura Forti Joule e l'equivalente meccanico del calore: tra storia della fisica e didattica

Sebbene Joule avesse condotto fin dal 1840 esperimenti sulla natura del calore, gli scienziati del XIX secolo non avevano mai dato molta importanza ai risultati ai quali era giunto: la teoria fluidistica del calore era molto più semplice da accettare che quella dinamica e la scarsa dimestichezza che si aveva con le "particelle" non faceva altro che screditare quest'ultima.

Nonostante ciò, l'esperimento del 1845 attirò l'attenzione del pubblico scientifico: due pesetti, cadendo, mettevano in rotazione un mulinello a pale all'interno di un calorimetro pieno d'acqua; misurando la variazione di energia meccanica e (dalla variazione di temperatura) il calore guadagnato dal sistema, si poteva calcolare l'equivalente meccanico del calore.

Oltre al fatto che questa determinazione arrivava dopo una lunga serie di esperimenti effettuati in campi molto diversi l'uno dall'altro, fu probabilmente l'immediatezza nella comprensione (non solo del funzionamento dell'apparato, ma anche dei concetti insiti nell'esperimento stesso) che convinse la comunità scientifica della proporzionalità tra energia meccanica e calore.

Si può allora ben capire come questo esperimento possa essere un valido strumento didattico: la forza della sua semplicità farà sicuramente presa sugli studenti oggi, così come la fece sugli scienziati più di un secolo fa.

L'apparato utilizzato da Joule nell'esperimento del mulinello con la ruota a pale, in realtà era molto più elaborato di quanto si possa immaginare dall'osservazione dello schema che viene spesso riportato nei libri. Come dice lo stesso Joule:

"L'apparato esibito di fronte alla British Association consisteva di una ruota a pale in ottone che lavorava orizzontalmente in un cilindro pieno d'acqua."³

Tuttavia questa "ruota a pale" era molto complessa: consisteva di un cestello che conteneva sia le palette fisse, che l'albero con le palette mobili; questo cestello era costituito da quattro piani di due tipi differenti: erano infatti alternati i piani con solo palette mobili e quelli con entrambi i tipi di palette.

Una volta fissato questo cestello all'interno del recipiente cilindrico, quest'ultimo veniva chiuso con un coperchio fornito di due aperture: una per farvi passare l'albero, l'altra per il termometro che avrebbe dovuto registrare le variazioni di temperatura del liquido.

La parte dell'albero che rimaneva all'esterno del recipiente cilindrico presentava un tamburo con in cima una manovella: attorno al tamburo vi erano avvolti due fili, i cui capi liberi erano a loro volta avvolti attorno a due carrucole; su ciascun asse di queste erano avvolti altri due fili ai quali era attaccato un piattino da bilancia (figura 1).

³ "The scientific papers of James Prescott Joule", vol. 1, Taylor & Francis Ltd., London, 1884, pag. 203.

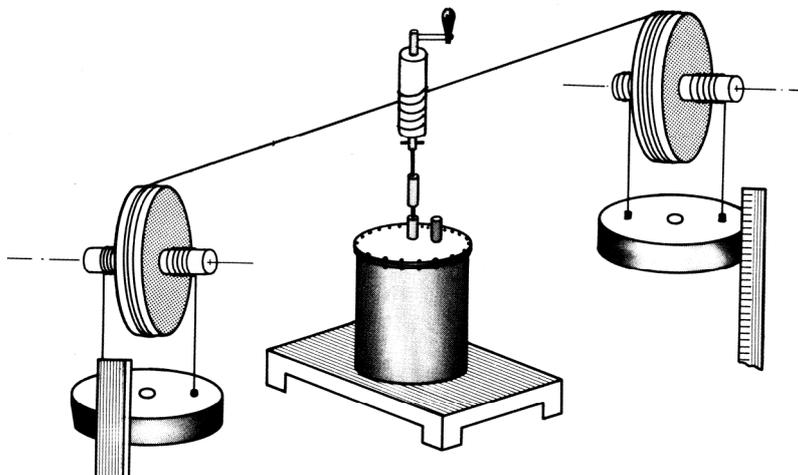


Fig. 1: Schema dell'apparato di Joule visto dall'esterno (figura tratta da: C. Bernardini S. Tamburini, "Lezioni di fisica", Editori Riuniti Nuova Scuola, Roma, 1981, pag. 216).

Aggiungendo dei pesetti su questi piatti (la cui altezza era accertata mediante due aste graduate) si poteva mettere in rotazione la ruota a pale e calcolare esattamente il lavoro fatto.

Una volta che i piatti erano discesi a terra venivano risollevari sfruttando la manovella attaccata all'albero; era infatti necessario far discendere i pesi in rapida successione un certo numero di volte per ottenere un apprezzabile riscaldamento del liquido. Ovviamente anche durante la risalita dei pesi si sarebbe messo in moto il cestello, senza, tuttavia, che questa volta si potesse conoscere con esattezza l'energia spesa.

Per risolvere questo problema Joule inserì nell'albero un dispositivo che permetteva di sconnettere il moto dell'albero stesso da quello del tamburo. In questo modo si poteva considerare come unica energia spesa per agitare il liquido quella dovuta alla discesa dei pesi, in quanto, durante la loro risalita, il cestello con le palette sarebbe rimasto fermo.

Il nostro modello didattico

L'esperimento del mulinello con la ruota a pale, avendo una pregnanza sia storica che didattica, viene citato nella maggior parte dei libri scolastici, dove viene proposto non solo il suo schema concettuale, ma anche il calcolo numerico dell'equivalente meccanico del calore.

Convinti dell'idea che potrebbe essere produttivo non solo descrivere l'esperimento agli studenti, ma anche mostrarlo loro praticamente e, addirittura, coinvolgerli nell'esecuzione, abbiamo pensato di farne un modello didattico.

E' in questa ottica che si è guardato all'apparato sperimentale per poterne fare una buona riproduzione: il più fedele possibile alle descrizioni di Joule, ma anche con tutti gli accorgimenti didattici necessari.

Si sono, allora, dovute apportare alcune modifiche all'originale. In primo luogo abbiamo pensato che un recipiente trasparente permettesse di vedere cosa avveniva all'interno. Scartato il vetro a causa della sua fragilità, abbiamo optato per un materiale plastico, costruendo il recipiente cilindrico ed il coperchio in plexiglas.

Per quanto riguarda la struttura interna, abbiamo distinto la parte fissa da quella mobile, attaccando direttamente al recipiente le palette che dovevano restare ferme: il fatto che parte fissa e parte mobile facessero parte della stessa struttura, infatti, poteva complicare la comprensione del funzionamento dell'apparato.

La parte mobile è stata fatta in alluminio di spessore tale da evitare eventuali deformazioni causate dall'attrito con il liquido durante la rotazione. Per ridurre al minimo, invece, gli attriti indesiderati, sono stati usati cuscinetti a sfera sia per la rotazione dell'albero, sia per quella delle carrucole.

La parte superiore dell'albero presenta una calettatura su cui poggia il tamburo (al quale sono avvolti due fili di nylon): in questo modo, sollevando leggermente il tamburo, si possono riavvolgere i fili senza far ruotare l'albero. Inoltre, invece dei piattini, alle estremità dei fili sono stati posti due ganci ai quali i pesi possono essere alternativamente attaccati e staccati (per facilitare l'operazione del riavvolgimento).

Per completare l'apparato vi è, da ultimo, una struttura metallica su cui viene posizionato il recipiente ed a cui sono fissate le carrucole; essa è dotata di appoggi a vite che permettono il livellamento di tutto l'apparato.

Per quanto riguarda le dimensioni, non avendo trovato nella letteratura dati certi, le abbiamo scelte in modo che il recipiente fosse sufficientemente grande da far vedere il

moto delle palette anche da una certa distanza⁴.

La riproduzione dell'esperimento

La riproduzione vera e propria dell'esperimento eseguito da Joule nel 1845 è risultata più complessa di quanto avevamo immaginato.

Per prima cosa abbiamo dovuto scegliere in modo opportuno i valori delle tre variabili h (quota di caduta dei pesi), m_L (massa di liquido) e M (massa dei pesi).

⁴ Le dimensioni dell'apparato sono le seguenti: il recipiente cilindrico ha un'altezza di (28.0 ± 0.1) cm ed un diametro interno di (26.0 ± 0.1) cm; le palette fisse hanno la dimensione di $(4.0 \text{ cm}) \times (7.0 \text{ cm}) \times (1.0 \text{ cm})$, mentre quelle mobili hanno la parte finale allargata di $(5.0 \text{ cm}) \times (6.4 \text{ cm}) \times (0.2 \text{ cm})$ e la parte più stretta che le tiene fisse all'albero rispettivamente di $(7.5 \text{ cm}) \times (2.0 \text{ cm}) \times (0.2 \text{ cm})$ e di $(3.5 \text{ cm}) \times (2.0 \text{ cm}) \times (0.2 \text{ cm})$. Infine l'albero ha un diametro di (6.00 ± 0.05) mm ed un'altezza totale di (39.5 ± 0.1) cm.

Per quanto riguarda la scelta del luogo in cui effettuare l'esperimento, abbiamo cercato un posto che, oltre ad offrirci un buon dislivello, ci desse anche garanzie di sicurezza (per non causare danni a cose o a persone durante la discesa dei pesi) e di isolamento, per garantirci che la temperatura ambiente non fosse influenzata da perturbazioni di qualunque tipo (correnti d'aria, irraggiamento solare, passaggio di persone, etc...).

La scelta è caduta quindi sulla tromba di una scala secondaria che, sebbene ci offrisse un dislivello utile di soli 5.6 m (contro le 12 yard - 11 m circa - di cui disponeva Joule), ci offriva tuttavia le garanzie di sicurezza e di isolamento necessarie.

Per quanto riguarda la scelta del liquido abbiamo deciso di usare per la prima serie di esperimenti dell'acqua, riservandoci l'utilizzo di altri liquidi in esperimenti successivi.

Il contenitore che abbiamo costruito ha un volume di 14.8 dm³ e può quindi contenere una massa d'acqua di circa 15 kg. Abbiamo tuttavia scartato in partenza la scelta di riempire completamente il recipiente, perché per scaldare una tale massa di acqua si sarebbe dovuto effettuare un numero di discese troppo elevato; inoltre, poiché il coperchio non è a chiusura ermetica si sarebbero verificate notevoli fuoriuscite di liquido causate dalla violenta agitazione.

D'altra parte, abbiamo dovuto tenere conto anche che una massa troppo piccola di acqua non avrebbe prodotto un attrito sufficiente ed i pesi sarebbero arrivati al suolo con velocità elevata, trasformando quindi buona parte dell'energia potenziale iniziale in energia cinetica finale (anziché in lavoro compiuto dalle forze d'attrito sull'acqua).

Per quanto riguarda la scelta dei pesi, abbiamo tenuto conto, da un lato, che la loro massa M doveva essere la più grande possibile (per compensare il modesto dislivello di caduta e scaldare apprezzabilmente l'acqua in un numero ragionevole di discese) e, dall'altro, che non poteva essere troppo elevata (per non sottoporre l'albero rotante - che ha diametro di soli 6 mm - a sollecitazioni eccessive).

I pesi che si trovano in commercio hanno masse di 2, 5 o 10 kg; dunque non sono "dosabili" a piacere (e inoltre sono abbastanza costosi). Abbiamo quindi pensato di costruirci da noi i pesi "ad hoc" per l'esperimento, riempiendo due sacchetti con della sabbia (materiale poco costoso e facilmente reperibile), in quantità che abbiamo variato nelle diverse prove, fino ad ottimizzare il risultato.

La scelta finale è stata quella di utilizzare una massa d'acqua $m_L = 7$ kg con pesi di massa $M = 4$ kg. (In questa situazione, l'impiego di un sottile anello di gomma al silicone interposto fra coperchio e recipiente e l'uso di morsetti per migliorare la chiusura sono stati sufficienti ad eliminare le fuoriuscite di acqua).

Abbiamo quindi affrontato il problema della scelta dei termometri per la misura della temperatura, che è la misura più delicata di tutto l'esperimento.

Poiché la temperatura dell'acqua aumenta soltanto di qualche decimo di grado centigrado, per avere un errore piccolo su tale misura sarebbe stato opportuno utilizzare termometri al centesimo, che però sono piuttosto costosi. Abbiamo quindi optato per dei termometri al decimo di grado, ma per ridurre l'errore li abbiamo scelti al mercurio e di portata limitata (-8°C +32°C), in modo tale da potere apprezzare il ventesimo di grado.

Maria Luisa Fiandri, Laura Forti Joule e l'equivalente meccanico del calore: tra storia della fisica e didattica

Completata la serie di prove per cercare le condizioni ottimali, siamo passati alla fase di misura vera e propria, i cui dati vengono riportati nella tabella 1.

Numero discese	Ora	T acqua (°C)	T ambiente (°C)
1	9:55	(22.00 ± 0.05)	(22.20 ± 0.05)
15	10:25	(22.20 ± 0.05)	(22.25 ± 0.05)
30	10:58	(22.40 ± 0.05)	(22.25 ± 0.05)

Tabella 1

Come si può notare, oltre alla temperatura dell'acqua è stata monitorata anche la temperatura ambiente al fine di assicurarci che la misura non venisse compromessa da improvvisi sbalzi della temperatura esterna (nonostante si fosse rivestito l'apparato con un doppio strato isolante, costituito da un rivestimento di lana di roccia più uno di polistirolo opportunamente sagomato). Inoltre, per una migliore riuscita dell'esperimento, sia l'acqua che l'apparecchiatura venivano portati con un giorno di anticipo sul luogo dell'esperimento, in modo da essere in equilibrio termico con l'ambiente all'inizio delle misure.

Eseguita la fase di misura, siamo passati a calcolare il lavoro ed il calore in gioco.

Il lavoro speso, uguale alla variazione di energia del sistema, è stato calcolato secondo la formula:

$$L = U - K - E_C = 2 Mgh - \frac{1}{2} Mv^2 - \frac{1}{2} I \omega^2$$

dove M è la massa dei pesi, g l'accelerazione di gravità, h l'altezza di caduta, v la velocità di arrivo a terra, I il momento d'inerzia delle carrucole rispetto al loro asse di rotazione ed ω la loro velocità angolare.

Il momento d'inerzia delle carrucole è stato calcolato mediante la formula:

$$I = \frac{1}{2} m(R_1^2 + R_2^2)$$

$$I = \frac{1}{2} m(R_1^2 + R_2^2) + m(R_1 R_1 + R_2 R_2)$$

dove m è la massa delle carrucole, R_1 il loro raggio esterno ed R_2 quello interno.

Per quanto riguarda la velocità angolare, essa è data dal rapporto tra la velocità di discesa dei pesi ed il raggio esterno delle carrucole; quindi la

determinazione di v è necessaria per calcolare non solo l'energia cinetica dei pesi, ma anche quella delle carrucole.

A tale scopo abbiamo pensato di utilizzare un marcatempo; esso, infatti, non solo permette di fare misure abbastanza precise (quello che abbiamo utilizzato aveva una frequenza di 50 Hz), ma ha anche un meccanismo di funzionamento semplice che può essere facilmente compreso dagli studenti.

$$Q_L = c_L m_L T$$

Il calore Q_L acquistato dal liquido è stato calcolato come:

dove c_L è il calore specifico dell'acqua, m_L la sua massa e T la variazione di temperatura.

Abbiamo quindi calcolato in modo analogo anche il calore Q_A assorbito dall'apparato mobile di alluminio e quello Q_P assorbito dal recipiente di plexiglas (note le due masse e i relativi calori specifici).

Non abbiamo invece tenuto in alcun conto l'energia ed il calore persi a causa di effetti dissipativi non voluti: infatti i cuscinetti a sfera utilizzati per l'albero e le carrucole hanno reso del tutto trascurabile l'attrito fra le parti esterne, mentre la coibentazione usata ha garantito l'isolamento termico dell'apparato.

$$J = N \frac{U - K - E_C}{Q_L + Q_A + Q_P}$$

In questo modo avevamo tutti i dati per valutare l'equivalente meccanico del calore secondo la formula:

dove N rappresenta il numero di discese effettuate.

Avendo eseguito 30 discese dei pesi, abbiamo ottenuto un valore per l'equivalente meccanico del calore pari a:

$$J = (4.1 \pm 0.6) J/cal$$

I dati sperimentali che hanno portato a questo risultato sono mostrati nella tabella 2.

Conclusioni

Riteniamo che il nostro apparato costituisca un valido modello didattico in quanto riunisce in sé alcuni pregi che lo differenziano dagli altri modelli presenti sul mercato.

In primo luogo la (quasi) fedele ricostruzione consente di ripercorrere lo stesso iter sperimentale percorso da Joule nelle sue misure (difficoltà comprese), giungendo ad un valore dell'equivalente meccanico del calore che, se non può ancora definirsi buono, è sicuramente più che accettabile.

Un altro aspetto rilevante di questo modello didattico è il fare toccare con mano agli studenti come importanti risultati scientifici si siano potuti ottenere

Maria Luisa Fiandri, Laura Forti Joule e l'equivalente meccanico del calore: tra storia della fisica e didattica

anche senza l'ausilio di quelle avanzate tecnologie che sembrano ormai divenute indispensabili per il raggiungimento di qualunque obiettivo (non solo scientifico).

Il materiale e gli strumenti usati per l'esecuzione dell'esperimento sono tutti molto semplici, di facile reperibilità o costruzione e non c'è nulla che possa essere considerato come "scatola nera".

Inoltre le nozioni di Fisica necessarie alla comprensione dell'esperimento sono semplici nozioni di base, che potrebbero essere spiegate anche agli studenti delle scuole medie inferiori.

ENERGIA POTENZIALE DEI PESI	$M = (4.00 \pm 0.01)$ Kg $U = 2Mgh = (439 \pm 9)J$ $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ $h = (5.6 \pm 0.1) \text{ m}$	
ENERGIA CINETICA DEI PESI	$M = (4.00 \pm 0.01)$ Kg $K = \frac{1}{2} Mv^2 = (1.4 \pm 0.2) J$ $V = (0.60 \pm 0.05) \text{ m/s}$	$L = U - K - E_C$ $= (438 \pm 9) J$
ENERGIA CINETICA DELLE CARRUCOLE	$M = (0.372 \pm 0.002) \text{ Kg}$ $E_C = \frac{1}{2} I \omega^2 =$ $R_1 = (6.820 \pm 0.002) 10^{-2} \text{ m}$ $= (0.07 \pm 0.01) J$ $R_2 = (0.40 \pm 0.03) 10^{-2} \text{ m}$ $I = (877 \pm 6) 10^{-6} \text{ Kg m}^2$ $\omega = v / R_1 = (8.8 \pm 0.7) \text{ rad/s}$	
CALORE ASSORBITO DAL LIQUIDO	$M_L = (7.00 \pm 0.01) \text{ Kg}$ $Q_L = m_L c_L t =$ $c_L = 1 \text{ cal/g } ^\circ\text{C}$ $= (2.8 \pm 0.4) \text{ Kcal}$ $t = (0.40 \pm 0.05) ^\circ\text{C}$	
CALORE ASSORBITO DALL'APPARAT O MOBILE	$M_A = (0.42 \pm 0.01) \text{ Kg}$ $Q_A = m_A c_A t =$ $c_A = 0.2 \text{ cal/g } ^\circ\text{C}$ Kcal $= (0.034 \pm 0.005)$ $t = (0.40 \pm 0.05) ^\circ\text{C}$	$Q = Q_L + Q_A + Q_P =$ $= (3.2 \pm 0.4) \text{ Kcal}$

Maria Luisa Fiandri, Laura Forti Joule e l'equivalente meccanico del calore: tra storia della fisica e didattica

CALORE ASSORBITO DAL RECIPIENTE	$M_p = (2.52 \pm 0.01) \text{ Kg}$ $c_p = 0.34 \text{ cal/g}$ $^{\circ}\text{C}$ $t = (0.40 \pm 0.05)$ $^{\circ}\text{C}$	$Q_p = m_p c_p t =$ $= (0.34 \pm 0.04) \text{ Kcal}$
---------------------------------------	---	---

Tabella 2

Come abbiamo ricordato, sono presenti sul mercato altri modelli didattici che danno valori per l'equivalente meccanico del calore più precisi di quello trovato finora da noi, pur tuttavia essi non offrono tutti i vantaggi (sia storici, che didattici) ricordati sopra.

Di conseguenza è guardando alla nostra proposta nella sua interezza che riteniamo di potere affermare la validità del modello proposto.