

III.2. Il primo principio della termodinamica

⌘ Come si arriva per via macroscopica alla nozione di energia interna

⌘ Lo scambio termico e la quantità di calore

⌘ Il primo principio della termodinamica e quello di conservazione della energia

⌘ Quesiti di fine capitolo

⌘ Quesiti dalle Olimpiadi della Fisica

⌘ Problemi di fine capitolo

2.1 Come si arriva, per via macroscopica alla nozione di energia interna

2.1.1 UN RIEPILOGO DI QUANTO GIÀ STABILITO SULLA ENERGIA MECCANICA

Riassumiamo alcune delle considerazioni che hanno consentito di assegnare alla energia il ruolo centrale svolto in meccanica.

- il lavoro effettuato dalla risultante di forze di qualsiasi genere agenti su un corpo o su un sistema di corpi determina variazioni di energia cinetica uguali al lavoro effettuato (teorema della energia cinetica valido sia in meccanica classica sia in meccanica relativistica)
- il lavoro compiuto da una particolare categoria di forze interne (quelle conservative) si può scrivere come variazione della energia potenziale e tale lavoro dipende esclusivamente dalla configurazione iniziale e da quella finale del sistema;
- quando sul corpo agiscono esclusivamente forze conservative la energia meccanica (somma della energia cinetica e di quella potenziale) si conserva;
- in generale la energia meccanica di un sistema non si conserva e la sua variazione è pari alla somma del lavoro delle forze esterne e interne non conservative; in altri termini la energia meccanica di un sistema può variare o per l'azione di forze esterne o per l'azione di forze interne dissipative.
- le forze non conservative hanno la caratteristica di produrre *cambiamenti osservabili di un genere diverso* dalla posizione e dalla velocità: deformazioni, cambiamenti di stato di aggregazione, riscaldamento, ...

Numerosi fatti sperimentali hanno consentito di generalizzare il concetto di energia con la introduzione della nozione di energia interna: tale grandezza fisica è già stata introdotta nella II parte in connessione con le problematiche di natura relativistica connesse alla equivalenza di massa ed energia. Si è ipotizzato che per la materia continuo a valere su scala atomica e molecolare le stesse leggi che valgono su grande scala e si è definita come energia interna la energia dei microcomponenti.

Scopo di questo *capitolo* è quello di connettere la energia interna con la energia meccanica e di giungere ad una legge generale di conservazione della energia che prescindano da ogni interpretazione di tipo atomistico ma si basi esclusivamente sui *fatti* cioè su misure di grandezze che consentano di fondare la conservazione della energia su base sperimentale.

Questo tipo di *approccio* sembrerà strano e inutilmente complicato a chi, essendo assolutamente certo della esistenza degli atomi, tende a ragionare secondo schemi di tipo strettamente riduzionista: ciò che succede per le cose che vediamo deve succedere anche per quello che non vediamo e le leggi che governano i fenomeni microscopici devono essere le stesse di quelle dei fenomeni macroscopici che appartengono alla esperienza comune.



Rudolph Clausius 1822 – 1888 protagonista degli studi di termodinamica della seconda metà dell'800



Questa impostazione è scorretta per due ragioni:

- le *leggi fisiche hanno natura di scala* e spesso accade che quando si cambia la scala a cui si indaga cambiano anche le leggi
- il concetto di energia interna è nato prima e autonomamente rispetto all'atomismo; anzi, per un certo periodo le leggi della termodinamica sono state utilizzate proprio per dimostrare che si poteva fare della *scienza veritiera* senza dover avanzare ipotesi indimostrabili sulla costituzione della materia.

2.1.2 IL CONCETTO DI SISTEMA TERMODINAMICO E DI STATO DEL SISTEMA

In termodinamica il campo di indagine si restringe e *ci si limita a sistemi di corpi per quali si possano ignorare i cambiamenti delle diverse forme di energia meccanica già studiate*. Si suppone che esse non cambino o che le loro variazioni, essendo quantificabili, possano essere accantonate per non appesantire la trattazione.

Se studio il funzionamento di una macchina termica mi disinteresso se essa si trovi o meno su un sistema più grande con sue forme particolari di energia. Non mi interessa l'energia cinetica che essa possiede per il fatto di ruotare sulla terra o per il fatto di trovarsi su una nave in navigazione.

Inoltre ci si limita a considerare le *condizioni di equilibrio*, cioè quelle condizioni per le quali grandezze fisiche quali pressione, densità, volume, temperatura possano essere definite per il sistema considerato, o per una sua porzione macroscopica, in maniera non ambigua.

Quando un gas fa alzare il pistone di un cilindro accadono numerose cose che vengono trascurate:

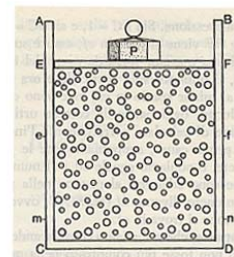
- si ignora il fatto che la energia potenziale del gas cambia perché una porzione del gas si trova più in alto (questo aspetto può essere calcolato ed aggiunto in un qualsiasi momento)
- si suppone che in ogni istante la densità del gas sia la stessa (ma ciò non è vero perché essa sarà inferiore nelle vicinanze del pistone dove avviene la rarefazione piuttosto che nelle zone lontane); trascorso un certo tempo il gas, per effetto di moti di assestamento interno, si riporterà in condizioni di uniformità. In questo caso si aggira l'ostacolo supponendo che le trasformazioni avvengano attraverso una successione di stati di equilibrio con una specie di movimento a scatti estremamente ravvicinati.

Dunque in termodinamica il nostro sistema fisico viene descritto attraverso un numero ridotto di grandezze fisiche dette *parametri di stato* le quali sono in grado di descrivere completamente le caratteristiche macroscopiche considerate rilevanti in condizioni di equilibrio.

Nel caso del pistone le grandezze rilevanti per fare previsioni di comportamento risultano essere la massa, la composizione chimica, la pressione, il volume e la temperatura. Queste grandezze saranno dette *parametri di stato* e tra esse, come si nota, non compaiono la forma del recipiente o la densità.

La ragione di ciò sta nel fatto che la forma risulta del tutto irrilevante nel descrivere i comportamenti che riteniamo interessanti (in questo caso le conversioni energetiche e/o le trasformazioni chimiche) mentre la densità

equilibrio termodinamico



stato termodinamico e parametri di stato

la **equazione di stato** è una relazione di natura teorica od empirica che lega i diversi parametri di stato

si chiamano **funzioni di stato** delle grandezze fisiche il cui valore dipende esclusivamente dallo stato del sistema: le funzioni di stato, per definizione, **non hanno memoria**



l'estratto conto bancario è una funzione di *status sociale* di un individuo

tà si ricava dalla conoscenza di massa e volume. Rimane infine da osservare che, per qualsiasi sistema, i parametri di stato (posto che siano n) sono sempre legati tra loro da una equazione detta *equazione di stato* che riduce di uno quelli indipendenti.

La equazione di stato è molto semplice per particolari sistemi (per esempio per i gas sufficientemente rarefatti) mentre è più complessa per altri sistemi.

Accanto ai parametri di stato esistono poi altre grandezze fisiche significative nel determinare i comportamenti del sistema che chiameremo *funzioni di stato* e che hanno un ben preciso valore in corrispondenza di ogni particolare stato. Le funzioni di stato ci informano di qualche particolare caratteristica posseduta da un sistema per il solo fatto di trovarsi in quello stato, indipendentemente dal come e perché il sistema si trovi in quello stato.

La metafora che segue è esterna alla fisica, non del tutto precisa, ma estremamente comunicativa: il danaro depositato sul conto corrente di un individuo è una funzione di stato di quell'individuo rispetto alla possibilità di fare acquisti.

Spendiamo infine due parole sull'oggetto di studio della termodinamica: essa si occupa di trasformazioni energetiche nelle quali gioca un posto significativo il calore; ma come vedremo *il calore non è una grandezza fisica*, è solo il nome con cui chiamiamo le variazioni di una grandezza fisica molto più sofisticata, la energia interna, che si realizzano in determinati contesti.

2.1.3 I SISTEMI ISOLATI ADIABATICAMENTE

Sappiamo dalla esperienza che un corpo omogeneo posto in vicinanza di altri corpi può subire modificazioni di stato di aggregazione o di temperatura quando cambia la temperatura dei corpi circostanti.

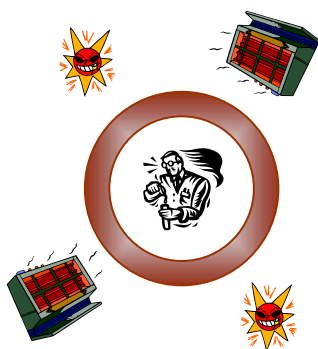
In alcuni contesti, quando si prendono precauzioni di tipo particolare, si verifica il caso in cui modificazioni all'ambiente circostante non si ripercuotono sul corpo in esame. Si chiama *sistema isolato adiabaticamente* un sistema fisico le cui caratteristiche macroscopiche non cambiano quando cambia la temperatura dei corpi circostanti.

I sistemi isolati adiabaticamente, anche se costituiscono una astrazione, possono essere realizzati concretamente con un grado di precisione elevato quanto si voglia utilizzando dispositivi quali i comuni thermos per alimenti. Il loro meccanismo di funzionamento sarà descritto nel seguito.

Può sembrare bizzarra questa scelta di riferirsi ai *sistemi isolati adiabaticamente*, ma essa risulta indispensabile per togliere il velo di mistero che circonda il concetto di calore e per poter rendere non ambigua la definizione macroscopica di energia interna.

I passaggi che seguiremo sono i seguenti:

- definizione operativa di una nuova grandezza fisica detta *energia interna* attraverso una grandezza fisica ben definita e misurabile: il *lavoro in ambiente adiabatico*; in questo modo la energia interna è associata allo stato macroscopico di un sistema fisico e dunque un corpo in un dato stato può essere caratterizzato anche attraverso la energia interna che possiede



un sistema si dice in **isolamento adiabatico** quando le sue caratteristiche macroscopiche non dipendono dalle variazioni di temperatura dei corpi circostanti



La **variazione di energia interna** viene misurata attraverso il **lavoro** compiuto in **ambiente adiabatico**

- definizione del *calore* come *trasferimento di energia interna da un corpo ad un altro* e sua misurazione attraverso le variazioni di energia interna del corpo che cede o riceve calore
- *generalizzazione del teorema di conservazione della energia* introducendo nel bilancio energetico oltre che il lavoro la energia interna ed il calore



2.1.4 IL LAVORO SVOLTO SU UN SISTEMA ISOLATO ADIABATICAMENTE E L'ESPERIENZA DEL MULINELLO DI JOULE.

Supponiamo di cambiare lo stato di un sistema *isolato adiabaticamente per effetto del lavoro di forze esterne e indichiamo con ① e ② gli stati iniziale e finale. Si osserva allora che il lavoro compiuto è sempre lo stesso indipendentemente dal tipo di forze utilizzate o dalle modalità di esecuzione dell'esperimento.*



E' questo il risultato sperimentale che consente di definire l'energia interna. Le esperienze che aprirono la strada a tale concetto furono compiute negli anni 40 dell'800 da *Joule* (1818-1889) e consistettero nella costruzione di una apparecchiatura nella quale una certa massa d'acqua isolata dal mondo esterno poteva subire gli effetti di un lavoro meccanico secondo modalità diverse: rotazione di pale messe in azione dalla caduta di pesi, riscaldamento di una resistenza elettrica alimentata dalla energia prodotta da un generatore elettrico (dinamo) messo in moto dagli stessi pesi.

I pesi venivano lasciati cadere con velocità diverse e Joule riuscì ad osservare che il cambiamento di stato del sistema (espresso dalla variazione di temperatura dell'acqua) era sempre lo stesso per eguali lavori indipendentemente dalla modalità di esecuzione dell'esperimento.

Oggi che l'energia non costituisce più un mistero, tali esperienze possono essere realizzate utilizzando conversioni energetiche di varia natura e producono invariabilmente le stesse variazioni di stato. Questo fatto viene elevato al rango di postulato e costituisce, come vedremo, l'essenza del teorema di conservazione dell'energia generalizzato o *primo principio della termodinamica*.

2.1.5 IL LAVORO SU UN AMBIENTE ADIABATICO È UNA FUNZIONE DI STATO: SI DEFINISCE L'ENERGIA INTERNA

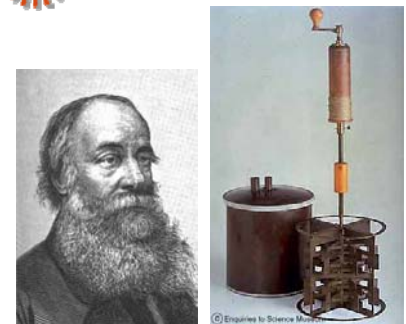
Con uno schema di ragionamento analogo a quello già seguito per definire l'energia potenziale possiamo definire *univocamente* una nuova grandezza tipica dello stato del sistema e legata agli effetti prodotti dal *lavoro meccanico compiuto su di un sistema*.

Basta infatti fissare arbitrariamente un riferimento che indichi il punto zero di tale grandezza e che corrisponda ad uno stato identificabile (noi lo indicheremo con ①) e porre per definizione:

$$U_P =_{\text{def}} \int_{\text{①} \rightarrow \text{P}} \mathcal{L}_{\text{est}}^1 \quad (III.2.1)$$

Quando si passa da uno stato arbitrario ① ad uno stato ② si avrà allora:

¹ La scelta del simbolo *U* è legata alla tradizione accademica internazionale oltre che al fatto che si tratta del simbolo usato da Clausius nei lavori di fondazione del concetto di energia interna. Non lo useremo se non raramente con la energia potenziale e dunque il rischio di ambiguità è ridotto. Per altro le due grandezze sono *molto strettamente imparentate tra loro*.

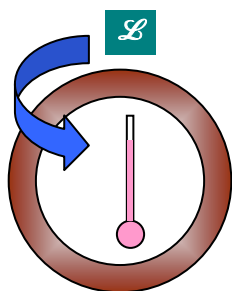


James Prescott Joule (1818–1889)

Le esperienze del mulinello consentono di fondare il concetto di energia interna di un sistema



$$U_2 - U_1 = \mathcal{L}_{\text{est } 1 \rightarrow 2} - \mathcal{L}_{\text{est } 2 \rightarrow 1} = \mathcal{L}_{\text{est } 1 \rightarrow 2} + \mathcal{L}_{\text{est } 2 \rightarrow 1} = \mathcal{L}_{\text{est } 1 \rightarrow 2} \quad (\text{III.2.2})$$



Il lavoro può modificare lo stato di un sistema isolato

La nuova grandezza U_P è detta *energia interna del sistema corrispondente allo stato P* e, poiché nella definizione interviene in maniera arbitraria uno stato di riferimento (punto zero), è definita a meno di una costante additiva come accade per tutte le altre forme di energia di stato.

Poiché siamo in grado di misurare il lavoro necessario ad indurre una data variazione di stato, possiamo costruire dei semplici misuratori di variazione di energia interna detti *calorimetri*. In essi, dopo la taratura, il cambiamento di energia interna è associata in maniera univoca con la variazione di una grandezza di stato *osservabile e misurabile* che può essere, per esempio, la temperatura del sistema oppure la quantità di materia che ha cambiato stato di aggregazione.

Nel caso in cui si decida di utilizzare le variazioni di temperatura basta prendere un corpo campione che faccia da strumento di misura: ad ogni valore di temperatura del corpo bisogna associare un corrispondente valore di energia interna. Tale corpo può essere per esempio una massa d'acqua nota contenuta in un thermos e deve essere tarato empiricamente.² Abbiamo così realizzato quello che è noto come *calorimetro*. Il suo utilizzo verrà illustrato tra breve.

Oltre alla energia interna, in termodinamica, e in particolare in termochimica, si utilizzano numerose altre funzioni di stato (energia libera, entalpia, ...). In questo testo ci limiteremo ad utilizzare le due più importanti: l'energia interna e l'entropia.

2.1.6 RIASSUMENDO

Consideriamo un sistema chiuso, per esempio quello costituito dalla terra e da un corpo che sta cadendo su di essa. La energia meccanica del sistema diminuisce durante la caduta e diminuisce ancora più bruscamente durante la fase di impatto. Durante la caduta la energia cinetica cresce meno lentamente di quanto non diminuisca la energia potenziale, per effetto delle forze d'attrito. Nel momento dell'impatto agiscono forze di deformazione plastica e la energia cinetica si annulla. *La energia meccanica del sistema è diminuita ma al suo posto compare un aumento di energia interna esattamente uguale e contrario alla diminuzione di energia meccanica in modo che la somma della energia meccanica e della energia interna sia costante.*

La cosa importante è che la validità di questa legge non deriva da una petizione di principio del tipo *speriamo che la energia si conservi* ma è legata ad una *verifica di quantità misurabili* (la energia meccanica e la energia interna misurabile attraverso il lavoro in ambiente adiabatico).

Supponiamo di voler alzare da 20°C a 60°C la temperatura di 1 litro di acqua collocata in un thermos e di realizzare quanto voluto secondo modalità operative diverse.

Usiamo dapprima un cucchiaio di dimensioni trascurabili e lo agitiamo calcolando forze e spostamenti in modo di determinare il lavoro delle forze esterne durante la fase di agitazione. Utilizziamo poi per il riscaldamento una lampadina del faro della bicicletta alimentata dalla energia



² È da esperienze di questo tipo che si scopre che per alzare di 1°C la temperatura di una data massa d'acqua occorrono energie leggermente diverse alle diverse temperature.

elettrica prodotta dalla rotazione della ruota anteriore della bicicletta collegata al generatore elettrico della stessa.

Anche in questo caso si dovrà compiere del lavoro per produrre l'energia elettrica necessaria e, in questo sta l'elemento sensazionale, per produrre la stessa variazione di stato, occorre lo stesso lavoro meccanico indipendentemente dal sistema usato, dal tempo impiegato o dalla costanza o incostanza nella fornitura del lavoro.

Questo ci dice che il lavoro delle forze esterne che, apparentemente non si trasforma in energia meccanica (o che si trasforma solo parzialmente in essa) non sparisce. Al suo posto compare sempre la stessa cosa (lo stesso effetto); ed ecco che noi inventiamo una parola *energia interna* per descrivere questa *regolarità della natura*.

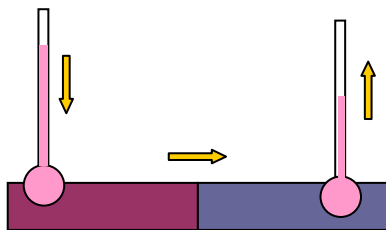
2.2 Lo scambio termico e la quantità di calore

2.2.1 L'ENERGIA INTERNA PUÒ ESSERE CAMBIATA ANCHE IN ASSENZA DI LAVORO: LO SCAMBIO TERMICO



il lavoro non è l'unico metodo per cambiare l'energia interna di un sistema

Ma esiste un altro *modo di cambiare l'energia di un corpo senza bisogno di compiere lavoro* da parte di forze esterne. Se un corpo viene avvicinato ad una fiamma cambia il suo stato (la temperatura) e con esso la sua energia interna. Se poi immergiamo il corpo in acqua fredda, la sua temperatura cambia nuovamente, e dunque cambia ancora la sua energia interna. Tutti questi cambiamenti di energia non sono associati a lavoro di forze che agiscono sul corpo e dunque, la energia interna, i cui cambiamenti si misurano attraverso il lavoro compiuto in ambiente adiabatico, si può cambiare in altri modi.



si chiama **scambio di calore** il trasferimento di energia interna senza esecuzione di un lavoro

La *teoria molecolare* ci dice cosa succede sul piano microscopico quando si mettono a contatto un corpo caldo e uno freddo. Il cambiamento di energia è determinato dalle collisioni molecolari. Le molecole del corpo caldo si muovono a velocità più alte; quelle del corpo più freddo a velocità più basse e, nella zona di contatto, avvengono urti elastici tra le molecole dei due corpi. Nell'urto tra una particella veloce ed una particella lenta avviene un trasferimento di energia cinetica da quella veloce a quella lenta; ne consegue che, quando si mettono a contatto due corpi a diversa temperatura, la energia cinetica totale delle molecole del corpo più caldo diminuisce mentre aumenta quella delle molecole del corpo più freddo. Attraverso questo fenomeno, si realizza il trasferimento di energia da un corpo caldo ad uno freddo senza che venga compiuto del lavoro.

Il processo di trasferimento di energia da un corpo ad un altro senza intervento di lavoro è chiamato scambio di calore o scambio termico.

2.2.2 LO SCAMBIO TERMICO PUÒ AVERE DIVERSE FORME

Il fenomeno appena considerato tra due corpi in contatto diretto è chiamato *conduzione del calore*, o anche *scambio di calore per conduzione*.

lo **scambio di calore** può avvenire per conduzione, convezione e irraggiamento

Lo scambio di calore può anche avvenire per *convezione*. Uno strato di liquido o di gas in contatto con un corpo di temperatura più alta si scalda e, dilatandosi, si sposta per galleggiamento permettendo ad un altro strato di prendere il suo posto. Tale tipo di scambio termico, dovuto ad una corrente di liquido o gas, è detto *scambio di calore per convezione*.

Il terzo modo con cui può avvenire uno scambio di calore è attraverso raggi invisibili e lo si può illustrare attraverso il seguente esperimento. Supponiamo di collocare un corpo riscaldato, per esempio un ferro da stiro, su di un supporto e quindi mettiamo una mano davanti alla piastra di ferro ad una distanza di 15÷20 cm dalla superficie calda.

Sentiremo che il ferro trasmette energia alla nostra mano e, d'altra parte, non si tratta di convezione perché la corrente d'aria calda che si forma va verso l'alto; non si tratta nemmeno di conduzione perché l'aria, e in genere tutti i gas, sono dei pessimi conduttori di calore.

Si è visto che qualsiasi corpo riscaldato emette radiazione infrarossa e, al di sopra degli 800 °C, emette anche luce visibile. Questo processo di trasmissione energetica attraverso onde elettromagnetiche (radiazione in-

frarossa e luce visibile) è detto *scambio termico per radiazione*, o anche *scambio di calore per irraggiamento*.

Nell'esperimento descritto in precedenza avevamo a che fare con della radiazione. In effetti se si interpone un foglio di stagnola tra la piastra del ferro e la mano cesserà la sensazione di calore e la ragione sta nel fatto che il metallo, in larga misura riflette, e in parte assorbe, la radiazione che pertanto non raggiunge più la mano.

Infine osserviamo che, mentre nel caso della conduzione e della convezione, è sempre richiesta la presenza di qualche elemento materiale tra i due corpi, la radiazione termica può viaggiare anche nel vuoto come accade, ad esempio, nel caso della radiazione solare.

A causa dell'irraggiamento, è impossibile escludere completamente lo scambio termico da parte di un sistema, ma è però possibile fare in modo che le trasformazioni che avvengono in un sistema si avvicinino alla condizione di adiabaticità.

Lo scambio di calore, di solito, avviene lentamente, molto più lentamente di molte altre trasformazioni energetiche. Per questa ragione, qualsiasi trasformazione rapida come una esplosione o un lampo può essere considerata adiabatica con un elevato grado di precisione.

Si può anche costruire un sistema in grado di approssimare un ambiente adiabatico impedendone scambi con l'ambiente circostante, dotandolo cioè di un buon grado di isolamento. Un buon esempio di rivestimento adiabatico è il *vaso Dewar*, che altro non è se non un normale thermos . Si tratta di un recipiente di vetro dalle pareti sottili e doppie tra cui è stato fatto il vuoto. Il vuoto minimizza i processi di conduzione e convezione. Inoltre la parete esposta del recipiente è trattata a specchio in modo che la superficie rifletta le radiazioni impedendo lo scambio termico per irraggiamento. Un sistema fisico racchiuso in un ambiente tipo Dewar può essere considerato isolato adiabaticamente.

2.2.3 LA MISURA DELLA QUANTITÀ DI CALORE

La precedente definizione di energia interna consente di definire in maniera non ambigua la *quantità di calore Q*. *La quantità di calore è l'energia trasmessa durante gli scambi di calore*: quando l'energia di un corpo cambia solo per scambio termico (cioè in assenza di lavoro da parte di forze esterne) si scrive per definizione:

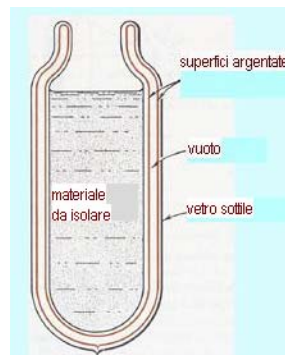
$$Q =_{\text{def}} \Delta U \tag{III.2.3}$$

la quantità di calore è la misura della variazione energetica di un corpo durante uno scambio termico.

La definizione appena data non ha natura circolare perché nel paragrafo precedente è stata data una definizione indipendente di variazione di energia interna. La quantità appena definita è espressa da un numero relativo; il calore positivo è quello che fa aumentare la energia interna (si parla di calore assorbito), mentre il calore negativo è quello che la fa diminuire (si parla di calore ceduto).

Quando lo scambio termico avviene tra due corpi A e B, nessuno dei quali compie lavoro, e in un sistema isolato, la variazione di energia interna del sistema è nulla e pertanto:

$$\Delta U = 0 = \Delta U_A + \Delta U_B \Leftrightarrow \Delta U_A = -\Delta U_B \Leftrightarrow Q_A = -Q_B$$

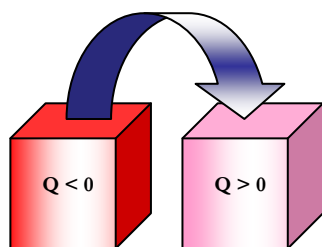


il vaso Dewar funziona minimizzando sia la conduzione sia l'irraggiamento ed è l'ambiente isolato per eccellenza



la quantità di calore viene misurata come variazione di energia interna

Negli scambi termici il calore ceduto da un corpo è pari al calore assorbito dall'altro o anche il calore scambiato da un corpo è uguale e contrario a quello scambiato dall'altro.



Le quantità di calore si misurano attraverso i calorimetri. Infatti se si vuol determinare il calore scambiato tra un corpo B e un calorimetro A basta immergere il corpo nell'acqua del calorimetro ed osservare la variazione di temperatura che si determina nell'acqua.

Ciò permette di determinare $\Delta U_A = Q_A$ ma $Q_B = -Q_A$ e pertanto si determina il calore scambiato tra corpo e calorimetro.

Ovviamente, la unità di misura della quantità di calore nel S.I. è la stessa del lavoro e dell'energia e cioè il *joule*.

$$[Q] = [U] = [\mathcal{L}] = \text{joule} = \text{J}$$

Nel linguaggio comune il termine *riscaldamento* ha due significati: la trasmissione di energia sotto forma di calore (come nello scambio termico) e l'aumento di temperatura. I due fenomeni non sono equivalenti.



riscaldamento: una parola dal significato ambiguo

La temperatura di un corpo può essere modificata anche senza fornirgli calore: nell'urto anelastico, nelle deformazioni plastiche, nei processi in presenza di attrito la temperatura del corpo aumenta compiendo lavoro su di esso e non per scambio termico. Al contrario durante processi quali la fusione o l'ebollizione la temperatura del corpo non cambia sebbene avvenga un processo di trasferimento di energia sotto forma di calore.

Pertanto, per una descrizione precisa di un fenomeno, si dovrebbe evitare l'uso di un termine ambiguo quale *riscaldamento* caratterizzando il processo più precisamente: cambiamento di temperatura o trasmissione di energia per scambio termico.

2.2.4 FENOMENI MACROSCOPICI CONNESSI ALLO SCAMBIO TERMICO: CALORE SPECIFICO, CALORI LATENTI E CALORI DI REAZIONE

Durante gli scambi termici i fenomeni macroscopici osservabili più rilevanti sono il cambiamento di temperatura e il cambiamento di stato di aggregazione e a ciascuno di essi è associata una legge empirica all'interno della quale compare un coefficiente tipico della sostanza e del fenomeno considerato. Tali leggi fanno contemporaneamente da definizione del corrispondente coefficiente come vedremo tra breve.

□ cambiamento di temperatura e calore specifico

Preso un corpo omogeneo solido o liquido ⁽³⁾ di massa m cui viene fornita una quantità di calore Q si osserva attraverso esperienze effettuate attraverso un calorimetro che il calore determina una variazione di temperatura secondo le seguenti leggi:

- ◇ m e Δt sono inversamente proporzionali
- ◇ Δt è indipendente dal valore di temperatura iniziale e, fissata la massa, è proporzionale a Q
- ◇ al variare della sostanza si ottengono variazioni di temperatura diverse.

Si condensa questo insieme di osservazioni scrivendo che:

il calore specifico viene definito osservando che $Q \propto m \Delta t$

³ In modo di trascurare le variazioni di volume che corrisponderebbero a lavoro e dunque alla negazione del principio dello scambio termico

$$Q \propto m \Delta t$$

La costante di proporzionalità viene indicata con c ed è detta *calore specifico della sostanza considerata* essa corrisponde alla *quantità di energia necessaria per determinare una variazione unitaria di temperatura su una quantità di sostanza pari alla unità di massa*. Si scrive dunque:

$$Q = c m \Delta t = c m \Delta T \quad (III.2.4)$$

La quantità $c m$ che fa da costante di proporzionalità tra calore scambiato e variazione di temperatura è detta *capacità termica del corpo*.

La legge (III.2.4) è valida solo in prima approssimazione perché, come si osserva con esperienze più raffinate, il calore specifico non risulta esattamente costante e indipendente dalla temperatura.

Una volta stabilita la (III.2.4) è sempre possibile misurare il calore relativo allo scambio termico tra due corpi qualsiasi. Basta infatti conoscere il calore specifico dei due corpi e la variazione di temperatura che caratterizza il processo di andata all'equilibrio per risalire direttamente a Q . È inoltre possibile eguagliando i calori scambiati determinare la temperatura di equilibrio che si determina nel contatto di due corpi diversi (si vedano gli esempi dei prossimi paragrafi).

❑ **fusione e solidificazione**

Nella fusione di un cristallo (o nella solidificazione di un liquido) si osserva che la temperatura non cambia e che la massa di sostanza fusa o solidificata è proporzionale alla energia coinvolta nello scambio termico. La costante di proporzionalità λ è detta *calore latente di fusione e rappresenta la quantità di energia necessaria per far fondere o solidificare l'unità di massa*

$$Q = \lambda_f \Delta m \quad (III.2.5)$$

❑ **evaporazione e condensazione**

Nella evaporazione di un liquido (o nella condensazione di un vapore) la quantità di sostanza evaporata risulta essere proporzionale alla energia coinvolta e la costante di proporzionalità L viene detta *calore latente di evaporazione*

$$Q = L \Delta m \quad (III.2.6)$$

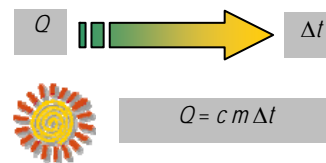
Nella tabella (III.2.1) si sono rappresentati i parametri tipici di alcuni materiali di interesse comune; il dettaglio dei processi che sono stati qui sommariamente descritti verrà affrontato nei capitoli dedicati alla termodinamica ed alla fisica molecolare. I valori sono riferiti a condizioni standard di pressione e temperatura

❑ **reazioni chimiche**

Anche nelle reazioni chimiche si ha una quota di energia assorbita o ceduta dalla reazione (endotermica o esotermica rispettivamente) e tale energia è proporzionale alla massa di reagente coinvolto. La costante di proporzionalità q viene chiamata *potere calorico o calore di reazione*.

$$Q = q \Delta m \quad (III.2.7)$$

❑ **conduzione del calore nei solidi**



sostanza	c J / (g K)	L J / g	λ_f J/g
Acqua	4.18	2'250	=
Alcool	2.42	853	=
Glicerina	2.42	=	=
Mercurio	0.14	284	=
Alluminio	0.90	=	321
Argento	0.23	=	88
Ferro	0.46	=	270
Ghiaccio	2.09	=	333
Piombo	0.13	=	25
Rame	0.39	=	175

Tabella III.2.1

i **calori latenti** rappresentano le energie per unità di massa che sono necessarie per i cambiamenti di stato



il **calore di reazione** rappresenta le energie per unità di massa che vengono assorbite o liberate durante le reazioni chimiche



Tabella III.2.2: coefficienti di conducibilità

Materiale	λ (W/m °C)	λ (kcal/m h °C)
Alluminio	204,7	176
Acciaio con meno dello 0,1% di C	54,66	47
Acciaio con meno dello 0,6% di C	41,86	36
Acciaio all'1,5% di C	37,2	32
Acciaio al 5% di C	30,23	26
Acciaio al 20% di Cr	17,44	15
Acciaio al 5% di Ni	29	25
Acciaio al 30% di Ni	10,5	9
Argento	418,7	360
Bronzo	58,15	50
Ferro puro	87,2	75
Ottone	69,8-116,3	60-100
Rame puro	383,3	330
Rame impuro	52,3-139	45-120
Stagno	651	56
Zinco	110,5	95

Materiale	λ (W/m °C)	λ (kcal/m h °C)
Cemento	0,93	0,8
Creta	0,93	0,8
Gesso	0,4	0,35
Granito	3,1-4	2,7-3,5
Intonaco ordinario	0,81	0,7
Legno asciutto di abete o pino	0,14-0,16	0,12-0,14
Legno di quercia	0,21	0,18
Linoleum	0,186	0,16
Marmo	2,1-3,5	1,8-3
Mattoni secchi	0,465	0,4
Mattoni forati	0,35	0,3
Muratura di mattoni	0,465	0,4
Muratura di pietra	1,4-2,3	1,2-2
Pietra	0,7-1,4	0,6-1,2
Sabbia asciutta	0,35	0,3
Sabbia umida	1,163	1
Vetro	0,7	0,6
Vetro kron	1,05	0,9
Vetro al piombo	0,81	0,7
Vetro pirox	1,16	1
Vetro al quarzo	1,4	1,2

Materiale	λ (W/m °C)	λ (kcal/m h °C)
Amianto	0,23	0,2
Cotone (ovatta)	0,465	0,04
Feltro (crine)	0,035	0,03
Lana	0,035	0,03
Lana di roccia	0,035-0,08	0,03-0,07
Lana di vetro	0,035-0,105	0,03-0,09
Magnesia	0,058	0,05
Magnesia (coppelle)	0,07	0,06
Pomice	0,093	0,08
Seta	0,0465	0,04
Sughero	0,035-0,058	0,03-0,05
Torba	0,0465	0,04

Per affrontare problemi di conduzione e isolamento del calore nei solidi si fa riferimento ad una caratteristica dei diversi materiali detta *coefficiente di conduzione*.

Si osserva sperimentalmente che la potenza termica (calore per unità di tempo, detta anche *flusso*) trasmessa da un materiale di sezione σ , spessore d che presenti tra le due estremità un salto termico ΔT è governata da una relazione di proporzionalità diretta con il gradiente di temperatura $\frac{\Delta T}{d}$ e con la superficie. La costante di proporzionalità, diversa per i diversi materiali, è detta coefficiente di conduzione e qui a lato (tabella III.2.2) vengono pubblicati in tabella i valori per i metalli (conduttori), materiali da costruzione e per gli isolanti. Oltre che il valore in unità del S.I. nella seconda colonna è indicato quello in unità pratiche usate per la progettazione in ingegneria.⁴

$$P = \Phi = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \lambda_c \frac{\Delta T}{d} \sigma \quad (III.2.8)$$

Uno scaldabagno

Esercizio: In uno scaldabagno bisogna portare una massa d'acqua $m = 70.0$ kg dalla temperatura $t_1 = 15.0^\circ\text{C}$ alla temperatura $t_2 = 64.5^\circ\text{C}$.

- quanta energia occorre \mathcal{E} ?
- se lo scaldabagno ha una resa dell'80% quanta energia termica \mathcal{E}_f bisogna fornire
- se per riscaldare si usa del metano che fornisce una energia al metro cubo $A = 3.56 \cdot 10^7$ J/m³ quanti metri cubi V di metano occorrono?

☺

$$\mathcal{E} = m c \Delta t = 70.0 \cdot 4.180 \cdot 10^3 \cdot (64.5 - 15.0) = 1.45 \cdot 10^7 \text{ J}$$

Si sa che $\mathcal{E} = \frac{80}{100} \mathcal{E}_f$ pertanto $\mathcal{E}_f = \frac{100}{80} \mathcal{E} = 1.81 \cdot 10^7 \text{ J}$

$$V = \frac{\mathcal{E}_f}{A} = \frac{1.81 \cdot 10^7}{3.56 \cdot 10^7} = 0.51 \text{ m}^3$$

☺

Rame che scioglie del ghiaccio

Esercizio: Un blocco di rame di massa $m_{\text{cu}} = 154$ g viene riscaldato in un forno sino ad una temperatura x incognita.

A questo punto lo si mette in una miscela di acqua e ghiaccio in equilibrio della quale è nota la quantità di ghiaccio $m = 62$ g.

Si mescola il tutto e si osserva che il ghiaccio fonde completamente mentre la temperatura del bagno rimane a 0°C .

Sapendo che il calore specifico del rame è $c_{\text{cu}} = 390$ J/(kg °C) e che il calore di fusione del ghiaccio $\lambda = 334$ kJ/kg determinare la temperatura incognita x . Perché in un esercizio del genere è lecito aspettarsi che la temperatura del rame fosse un po' più alta di quella che si è trovata?

☺

Si tratta di eguagliare il calore di fusione del ghiaccio al calore ceduto dal rame per raffreddarsi sino a 0°C .

⁴ La legge, detta *legge di Fourier*, per molti aspetti, è simile a quella che governa il passaggio di corrente nei conduttori metallici e dietro questa analogia si nasconde una realtà più profonda che riguarda i meccanismi microscopici della conduzione elettrica e termica.

$$\text{Pertanto } m_{\text{cu}} c_{\text{cu}} (x - 0) = m \lambda \text{ da cui } x = \frac{m \lambda}{c_{\text{cu}} m_{\text{cu}}} = \frac{0.062 \cdot 334 \cdot 10^3}{0.154 \cdot 390} = 345 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Poiché si può ipotizzare che una parte della energia ceduta dal rame si sia trasferita al contenitore e all'ambiente è realistico pensare ad una temperatura più alta.

☺

Miscela acqua e ghiaccio riscaldata da un fornello

Esercizio: Una quantità d'acqua $m_1 = 2.543 \text{ kg}$ si trova alla temperatura $t_1 = 86.3 \text{ } ^\circ\text{C}$.

In essa viene immessa una quantità $m_2 = 0.457 \text{ kg}$ di ghiaccio a $t_2 = 0^\circ\text{C}$ che si porta in equilibrio con il bagno.

Successivamente si fornisce della energia attraverso un fornello elettrico di potenza elettrica $P_e = 5.00 \times 10^2 \text{ W}$ con un rendimento $\eta = 0.820$ per un tempo $\tau = 4'$ e 34 s .

Descrivere i passi da seguire per determinare la temperatura finale del sistema e quindi determinarla (indicare con t_3 la temperatura dopo lo scioglimento del ghiaccio e con t_4 la temperatura finale). Calore specifico medio dell'acqua $c = 4.182 \times 10^3 \text{ J}/(\text{kg } ^\circ\text{C})$, calore di fusione $c_F = 0.334 \times 10^6 \text{ J}/\text{kg}$.

☹

Per determinare t_3 basta eguagliare il calore ceduto dall'acqua a quello ricevuto dal ghiaccio (che prima fonde e poi si scalda). Si determina poi la energia termica ceduta dal fornello alla massa d'acqua m_1+m_2 nel tempo dato e, tenendo conto del calore specifico dell'acqua si trova la temperatura finale.

$$c m_1 (t_1 - t_3) = c_F m_2 + c m_2 (t_3 - 0) \Leftrightarrow (c m_2 + c m_1) t_3 = c m_1 t_1 - c_F m_2 \Leftrightarrow$$

$$t_3 = \frac{c m_1 t_1 - c_F m_2}{c(m_2 + m_1)} = \frac{4.182 \times 10^3 \times 2.543 \times 86.3 - 0.334 \times 10^6 \times 0.457}{4.182 \times 10^3 \times (2.543 + 0.457)} = 61.0 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$P_e = \frac{\mathcal{E}_e}{\tau} \text{ da cui } \mathcal{E}_{\text{el}} = P_e \tau = 5.00 \times 10^2 \times (4 \times 60 + 34) = 1.37 \times 10^5 \text{ J}$$

Per effetto del rendimento si ha $\eta = \frac{\mathcal{E}_{\text{ter}}}{\mathcal{E}_{\text{el}}}$ e pertanto

$$\mathcal{E}_{\text{te}} = \eta \times \mathcal{E}_{\text{el}} = 1.37 \times 10^5 \times 0.80 = 1.10 \times 10^5 \text{ J}$$

$$\mathcal{E}_{\text{te}} = c(m_1 + m_2)(t_4 - t_3) \Leftrightarrow t_4 = \frac{\mathcal{E}_{\text{te}}}{c(m_1 + m_2)} + t_3 = \frac{1.10 \times 10^5}{4.182 \times 10^3 \times 3.000} + 61.0 = 69.8 \text{ } ^\circ\text{C}$$

☺

Potere calorico del legno

Esercizio: Il potere calorico del legno secco $\lambda_c = 14.7 \text{ MJ}/\text{kg} = 5.3 \text{ GJ}/\text{m}^3$.

Usare questa informazione per trovare la densità δ del legno.

Se si usa la combustione del legno per portare una massa $m = 250 \text{ kg}$ di acqua dal $t_1 = 13.5 \text{ } ^\circ\text{C}$ a $t_2 = 65.8 \text{ } ^\circ\text{C}$ con rendimento $\eta = 0.7$ determinare la massa di legno da bruciare.

☹

La densità del legno può essere trovata facendo il rapporto dei due valori riferiti al volume e alla massa:

$$\delta = \frac{5.3 \cdot 10^9 \text{ J}/\text{m}^3}{14.7 \cdot 10^6 \text{ J}/\text{kg}} = 361 \text{ kg}/\text{m}^3$$

In base alla relazione sul riscaldamento e raffreddamento di un corpo si ha:

$$\Delta \mathcal{E} = m c (t_2 - t_1) = 250 \cdot 4 \cdot 180 \cdot (65.8 - 13.5) = 5.47 \cdot 10^7 \text{ J}$$

Tenuto conto che il rendimento del processo di combustione soggetto al rendimento

$$\eta = \frac{\Delta \mathcal{E}}{\Delta \mathcal{E}_c} \text{ l'energia necessaria alla combustione è pari a:}$$

$$\Delta \mathcal{E}_c = \frac{\Delta \mathcal{E}}{\eta} = \frac{5.47 \cdot 10^7}{0.7} = 7.81 \cdot 10^7 \text{ J}$$

Tenendo conto che la quantità di energia prodotta è proporzionale alla massa Δm combusta si ha:

$$\Delta m = \frac{\Delta \mathcal{E}_c}{\lambda_c} = \frac{7.81 \cdot 10^7}{14.7 \cdot 10^6} = 5.3 \text{ kg}$$

☺

Solidificazione nel vuoto di una massa d'acqua

Esercizio: Un recipiente contiene una massa m di acqua a 0° C allo stato liquido. Viene aspirata l'aria sovrastante e l'acqua inizia un processo di evaporazione rapida che determina il congelamento della massa d'acqua rimanente.

Se indichiamo con m_1 la massa d'acqua evaporata con $\lambda_e = 2.543 \cdot 10^6 \text{ J/kg}$ il calore latente di evaporazione e con $\lambda_s = 3.35 \cdot 10^5 \text{ J/kg}$ il calore latente di solidificazione determinare la percentuale $100 \cdot \frac{m_1}{m}$ di acqua che evapora trovando prima la relazione e poi il valore numerico.

⊗

Il processo di evaporazione assorbe energia interna dal liquido che, come anticipato a lezione, può congelare.

Basta eguagliare la energia richiesta per la evaporazione con quella ceduta nella solidificazione per ottenere il risultato richiesto.

Naturalmente, se la massa che evapora è m_1 , quella che solidifica è $m - m_1$ avremo dunque:

$$\lambda_e m_1 = \lambda_s (m - m_1) \Leftrightarrow 1 = \frac{\lambda_s}{\lambda_e} \left(\frac{m}{m_1} - 1 \right) \Leftrightarrow \frac{m}{m_1} = 1 + \frac{\lambda_e}{\lambda_s} \Leftrightarrow$$

$$100 \frac{m_1}{m} = \frac{100}{1 + \frac{\lambda_e}{\lambda_s}} = \frac{100}{1 + \frac{2.543}{0.335}} = 11.6 \%$$

☺

Una parete a due strati

Esercizio: Una parete è costituita da due strati di spessore d_1 e d_2 con coefficienti di conducibilità diversi λ_1 e λ_2 . La temperatura su un lato è t_1 e l'altra è t_2 . Determinare, in condizioni di equilibrio dinamico, cioè quando la quantità di calore che attraversa i due strati è la stessa, la temperatura t della separazione tra i due strati.

⊗

Indichiamo con t la temperatura intermedia e con $\Delta \tau$ un generico intervallo di tempo.

In condizioni di equilibrio la potenza che attraversa la parete nei suoi diversi punti è la stessa e pertanto:

$$\frac{\Delta \mathcal{E}}{\Delta \tau} = \lambda_1 \frac{S}{d_1} (t - t_1) = \lambda_2 \frac{S}{d_2} (t_2 - t) \text{ passando al rapporto si ottiene:}$$

$$\frac{\lambda_1 d_2}{\lambda_2 d_1} \frac{t - t_1}{t_2 - t} = 1.$$

Per semplicità di calcolo conviene indicare con α la quantità costante $\frac{\lambda_1 d_2}{\lambda_2 d_1}$.

Si ha allora: $\alpha(t - t_1) = t_2 - t \Leftrightarrow t(\alpha + 1) = t_2 + \alpha t_1$

$$\text{e infine } t = \frac{t_2 + \alpha t_1}{1 + \alpha}$$

☺

Riscaldamento di una lastra di marmo irradiata dal Sole

Esercizio: Il marmo ha calore specifico $c = 8.80 \text{ J K}^{-1}\text{kg}^{-1}$ e densità $\delta = 2.70 \text{ kg dm}^{-3}$. Una lastra quadrata di lato $l = 1.40 \text{ m}$ e spessore $d = 3.5 \text{ cm}$ riceve dal sole un irraggiamento medio di $6.00 \cdot 10^2 \text{ w/m}^2$ e riflette il 60% della radiazione incidente. Calcolare l'aumento di temperatura ΔT nel tempo di 4.00 minuti.

☹

Indicata con $\Delta E/(S \Delta t)$ l'irraggiamento e tenuto conto del fatto che viene assorbito solo il 40% della energia incidente, la energia assorbita per metro quadro di superficie irradiata sarà:

$$\Delta E'/\Delta S = 0.4 \Delta E/\Delta t \cdot \Delta t = 0.4 \cdot 6.00 \cdot 10^2 \cdot 4 \cdot 60 = 5.76 \cdot 10^4 \text{ J/m}^2.$$

$$\text{Dunque } \Delta E' = 5.76 \cdot 10^4 \cdot \Delta S = 5.76 \cdot 10^4 \cdot 1.40^2 = 1.13 \cdot 10^5 \text{ J}$$

Tenendo conto della relazione tra energia ed incremento di temperatura:

$$\Delta E' = c M \Delta T \text{ si ha che } \Delta T = \frac{\Delta E'}{c M}.$$

$$\text{Dobbiamo calcolare } M = \delta V = \delta S d = 2.70 \cdot (1.40 \cdot 10)^2 \cdot 0.35 = 185 \text{ kg.}$$

$$\text{Dunque: } \Delta T = \frac{\Delta E'}{c M} = \frac{1.13 \cdot 10^5}{185 \cdot 8.80} = 69.4 \text{ K}$$

☺

Calcolo della energia necessaria per fondere e riscaldare

Esercizio: Determinare l'energia necessaria per portare una massa $m = 0.500 \text{ kg}$ di ghiaccio da una temperatura iniziale $t_1 = -37.3 \text{ }^\circ\text{C}$ allo stato liquido caratterizzato da una temperatura finale $t_2 = 67.3 \text{ }^\circ\text{C}$.

☹

Il valore di energia richiesto è determinato da tre contributi. Il calore Q_1 necessario a portare il ghiaccio a $0 \text{ }^\circ\text{C}$, il calore Q_2 necessario a fondere completamente il ghiaccio ed infine il calore Q_3 necessario a portare l'acqua da 0°C a $67.3 \text{ }^\circ\text{C}$.

Ricordiamo che il $^\circ\text{C}$ e il K pur differendo nella origine della scala hanno la stessa estensione e pertanto gli intervalli di temperatura presentano lo stesso valore nelle due unità.

$$Q = (0 - t_1) c_g m + \lambda m + (t_2 - 0) c_a m$$

$$= 0.500 \times 10^3 (37.3 \times 2.09 + 333 + 4.18 \times 67.3) = 3.46 \times 10^5 \text{ J}$$

☺

Contatto tra metalli diversi

Esercizio: Determinare la temperatura finale che si ottiene mettendo a contatto un pezzo di rame di massa $m_1 = 2.00 \text{ kg}$ alla temperatura di $126 \text{ }^\circ\text{C}$ con un pezzo di ferro di massa $m_2 = 3.54 \text{ kg}$ alla temperatura di 12°C . Si supponga che l'esperimento avvenga in ambiente adiabatico.



Possiamo applicare il ragionamento che ci ha portato a scrivere la (III.2.8) e si avrà così:

$$m_1 c_{\text{CU}} (t_1 - t_f) = m_2 c_{\text{FE}} (t_f - t_2)$$

Se si risolve l'equazione rispetto a t_f e si riportano i valori di calore specifico indicati in tabella si ha:

$$t_f = \frac{m_1 c_{\text{CU}} t_1 + m_2 c_{\text{FE}} t_2}{m_1 c_{\text{CU}} + m_2 c_{\text{FE}}} = \frac{2.00 \times 0.39 \times 126 + 3.54 \times 0.46 \times 12}{2.00 \times 0.39 + 3.54 \times 0.46} \approx 48.9 \text{ } ^\circ\text{C}$$



2.2.5 COME FUNZIONA IL CALORIMETRO AD ACQUA

Il *calorimetro ad acqua* è un vaso Dewar contenente un termometro molto sensibile e un agitatore necessario per diminuire il tempo necessario affinché i corpi contenuti nel calorimetro si portino all'equilibrio.

Supponiamo che il calorimetro contenga una massa d'acqua m a temperatura t (indichiamo con c il calore specifico dell'acqua) e immergiamo in questa massa un corpo solido di massa m' di calore specifico c' a temperatura t' .

Il sistema si porterà abbastanza rapidamente ad una temperatura t_f intermedia tra t e t' e poiché il calore scambiato dai due corpi è identico sarà:

$$m c (t_f - t) = m' c' (t' - t_f) \tag{III.2.8}$$

Questa equazione consente, per esempio, di calcolare il calore specifico del corpo immerso attraverso la misura delle 3 temperature e delle 2 masse. Le due temperature del calorimetro si leggono sul termometro mentre quella del corpo va prefissata (per esempio lasciandolo per un tempo sufficientemente lungo immerso in un bagno d'acqua di cui si possa misurare la temperatura). Le masse si misurano direttamente per esempio attraverso una bilancia.

Risolviendo la (III.2.8) si ha per il calore specifico:

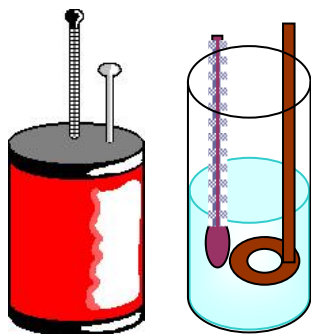
$$c' = \frac{m c (t_f - t)}{m' (t' - t_f)}$$

Il valore trovato dovrebbe essere indipendente dai diversi dati presenti nella relazione, ma le cose non vanno così perché nello scrivere la (III.2.8) non si è tenuto conto del fatto che il calorimetro ed i suoi componenti (termometro ed agitatore) possiedono comunque una propria capacità termica.

Il problema viene risolto aggiungendo nel termine di sinistra una massa aggiuntiva m_e detta *equivalente in acqua del calorimetro* perché corrisponde alla massa d'acqua corrispondente alla capacità termica del calorimetro:

$$(m + m_e) c (t_f - t) = m' c' (t' - t_f)$$

Per determinare l'equivalente in acqua basta eseguire l'esperimento utilizzando al posto di un corpo una massa d'acqua di temperatura nota. In questo modo nella equazione il calore specifico dell'acqua si semplifica e l'unica incognita risulta m_e che può essere determinato una volta per tutte.



il calorimetro ad acqua è un vaso Dewar in cui si sfrutta la conoscenza del calore specifico dell'acqua per misurare quantità di calore

equivalente in acqua di un calorimetro

2.2.6 L'ACQUA: UNA SOSTANZA MOLTO PARTICOLARE

Dall'esame della tabella (III.2.1) si osserva che l'acqua è una sostanza molto particolare perché presenta un elevato calore specifico e un elevato calore sia di fusione sia di evaporazione.

Ciò significa che occorrono grandi quantità di energia per determinare una data variazione di temperatura e che anche nei cambiamenti di stato l'acqua richiede o cede grandi quantità di energia.

Se ne può dedurre una funzione di termoregolazione: grandi quantità d'acqua determinano un clima temperato e l'assenza d'acqua è invece caratterizzata da mancanza di inerzia termica come accade nei deserti dove l'escursione termica tra il dì e la notte è molto elevata.

Ma non si tratta dell'unica stranezza: il ghiaccio è un ottimo isolante termico e, ancora meglio, si comporta la neve pressata caratterizzata dalla associazione delle proprietà isolanti del ghiaccio e di quelle dell'aria intrappolata tra i fiocchi; la costruzione degli igloo sfrutta questa proprietà e per la stessa ragione, in caso di maltempo in alta montagna con necessità di pernottare all'aperto è consigliabile scavare una buca nella neve.

Infine, come è noto dal galleggiamento del ghiaccio sull'acqua, l'acqua, a differenza degli altri solidi, aumenta la sua densità nel passare dallo stato solido a quello liquido. Questo fatto è dovuto alla particolare configurazione del cristallo di ghiaccio nel quale i legami connessi agli atomi di idrogeno determinano una maggiore spaziatura di quanto non sia per le molecole allo stato liquido.

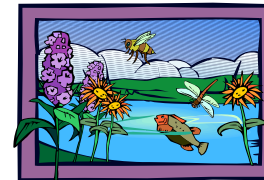
La questione della densità trova poi una ulteriore anomalia quando ci si trova allo stato liquido. Mentre i liquidi si espandono al crescere della temperatura l'acqua subisce una debole contrazione tra 0 e 3.8 °C e incomincia ad espandersi dopo i 3.8°C. A questa temperatura si ha dunque un massimo di densità. Questa proprietà insieme alle grandi capacità di isolamento del ghiaccio garantisce la vita acquatica anche a temperature esterne molto basse perché l'acqua a 4° tende a depositarsi sul fondo.

Supponiamo di avere un bacino lacustre e una temperatura esterna in fase di abbassamento. Inizialmente, quando ci si trova al di sopra dei 4° ma comunque al di sotto della temperatura media del lago, si ha un rimiscolamento dovuto al raffreddamento delle acque superficiali che, aumentando di densità vanno verso il fondo.

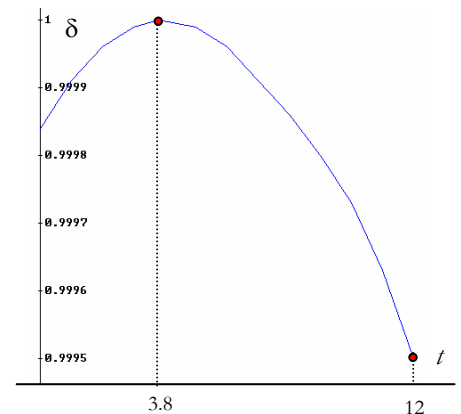
Quando si raggiungono i 4° il processo di circolazione cessa perché l'acqua continua a raffreddarsi cedendo energia all'ambiente ma le acque più fredde rimangono in superficie e galleggiano sull'acqua a 4°. Se la temperatura scende ancora ha inizio il processo di solidificazione che avviene a partire dalla superficie. Man mano che la temperatura scende si ha sotto la superficie del ghiaccio uno strato di acqua immobile che congela gradatamente e molto lentamente data la bassa conducibilità termica del ghiaccio. Sul fondo rimane uno strato piuttosto ampio a 4° seguito da un basso gradiente termico verso la superficie con il raggiungimento degli 0° in corrispondenza delle zone a contatto con il ghiaccio.



alto potere isolante: l'igloo ripara dal freddo



alto calore specifico = clima temperato



andamento anomalo della densità dell'acqua con il massimo intorno ai 4° C



il fondo dei laghi non congela a causa dell'andamento anomalo della densità con la temperatura

2.3 Il primo principio della termodinamica e quello di conservazione dell'energia

2.3.1 QUANDO L'ENERGIA INTERNA CAMBIA SIA PER EFFETTO DEL LAVORO SIA PER EFFETTO DI UNO SCAMBIO TERMICO

Si è appena visto che l'energia interna di un corpo può cambiare, o per l'azione di forze esterne o per scambio termico con l'ambiente. È anche possibile il caso in cui l'energia cambi per entrambe le ragioni contemporaneamente. In tal caso il cambiamento di energia del sistema è pari alla somma del lavoro compiuto dalle forze esterne e della quantità di calore ottenuta dall'ambiente:

$$\Delta U = \mathcal{L}_{\text{est}} + Q \quad (\text{III.2.9})$$

Il lavoro compiuto da un sistema contro l'ambiente esterno differisce da quello compiuto dalle forze esterne solo per il segno ($\mathcal{L}_{\text{est}} = -\mathcal{L}$) e pertanto la equazione (III.2.9) si può anche scrivere:

$$\Delta U = Q - \mathcal{L} \quad (\text{III.2.10})$$



cioè, la variazione di energia interna di un sistema fisico in grado di scambiare calore con l'ambiente esterno e di compiere lavoro su di esso è dato dalla differenza tra il calore ricevuto e il lavoro fornito.

La differenza di segno tra calore e lavoro è legata alla definizione data per l'energia interna e corrisponde funzionalmente alla simulazione del motore termico nel quale il calore è assorbito da una sorgente esterna e il lavoro viene fornito dal sistema (il calore assorbito fa aumentare l'energia interna, il lavoro compiuto la fa diminuire).

La relazione (III.2.10) esprime matematicamente il *primo principio della termodinamica*.

2.3.2 IL PRINCIPIO DI CONSERVAZIONE DELL'ENERGIA

Per semplificare la trattazione del concetto di energia interna abbiamo evitato di entrare in dettaglio sugli effetti osservabili connessi al cambiamento dell'energia interna di un sistema.

Energia interna etimologicamente significa energia dei costituenti interni del sistema e pertanto, in generale, essa può essere vista sia sotto l'aspetto microscopico (energia cinetica dei costituenti elementari del corpo) sia sotto l'aspetto macroscopico (energia cinetica e potenziale dei sottosistemi macroscopici che costituiscono il sistema); dal punto di vista della fisica moderna bisogna addirittura mettere in conto la energia di riposo dei singoli costituenti come si è fatto nel capitolo sulla dinamica relativistica.

Consideriamo ora un sistema di corpi che non interagiscano meccanicamente con i corpi circostanti (cioè un sistema chiuso) e che non abbiano scambi di calore verso l'esterno (cioè un sistema isolato adiabaticamente). Dal fatto che $\mathcal{L} = 0$ e $Q = 0$ ne consegue, in base al primo principio della termodinamica, che l'energia totale del sistema non cambia. *L'energia totale di un sistema chiuso e isolato adiabaticamente è costante e questa è la formulazione più generale del principio di conservazione dell'energia.*

2.3.3 NEI PRIMI DECENNI DELL'OTTOCENTO SI È ALLA RICERCA DI UN PRINCIPIO UNIFICATORE

Anche se la fisica dei manuali deve seguire un criterio logico nella organizzazione degli argomenti, per cui si studia dapprima la meccanica, poi si passa alla termodinamica e infine si arriva all'elettromagnetismo, la storia della conoscenza segue altri criteri e altri ritmi.

Tra gli *anni 30 e 40 dell'ottocento* la situazione della scienze fisico chimiche era la seguente:

- la meccanica era ormai stata studiata in tutti i suoi aspetti, dopo l'affermazione del modello newtoniano e iniziavano a farsi strada i tentativi di spiegare qualsiasi altra conoscenza in termini meccanici;
- si era in piena fase di sviluppo delle conoscenze sulle correnti elettriche e sulla possibilità di produrle attraverso il magnetismo;
- lo studio dei fenomeni termici era collegato a quello del motore termico che si stava rivelando come la nuova fonte di sviluppo delle attività industriali e dei trasporti;
- in medicina era in pieno sviluppo lo studio della fisiologia e in questo campo numerosi scienziati sperimentali compivano studi di fisica alla ricerca di spiegazione materiali dei processi vitali e delle modalità di funzionamento di organi e apparati;
- in chimica, dopo i lavori di Lavoisier di fine 700 si era entrati nella fase di accumulo di conoscenze che avrebbe portato, nel giro di una trentina d'anni, al completamento sostanziale della chimica inorganica;

In questo quadro si fece pian piano strada l'idea che dietro la trasformazione reciproca di un fenomeno in un altro esistesse una sorta di principio unificatore e questo principio unificatore si sarebbe rivelato essere l'energia, vista dapprima come substrato che sta dietro le apparenze e successivamente come grandezza fisica che si trasforma conservandosi quantitativamente.

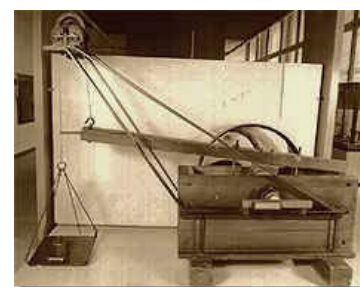
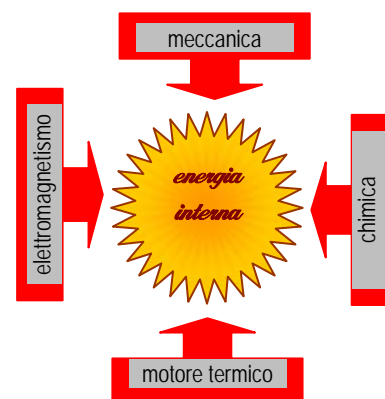
2.3.4 I CONTRIBUTI DI ROBERT MAYER

Julius Robert Mayer (1814-1878) studiò medicina e quindi si imbarcò come medico di bordo. Sembra che le prime idee sul legame tra calore e lavoro meccanico gli siano venute dalla osservazione che, nei paesi tropicali, il sangue venoso proveniente dai salassi risultava di un rosso molto più vivo di quanto non gli fosse capitato di osservare in Europa.

Nella sua "Storia delle Scienze della Natura" S. F. Mason afferma: *Egli attribuì tale differenza alla maggiore quantità di ossigeno presente nel sangue venoso in condizioni tropicali, e l'eccesso di ossigeno alla diminuzione della combustione del cibo che forniva calore al corpo. Il fenomeno sembrava confermare l'idea che il calore del corpo provenisse dall'energia chimica prodotta dal cibo: Mayer avanzò allora l'ipotesi che anche l'energia meccanica dei muscoli derivasse dalla stessa fonte, e che l'energia meccanica, il calore e l'energia chimica fossero equivalenti e reciprocamente convertibili.*

Sulla base di questi indizi Mayer eseguì il primo calcolo del calore equivalente ad una data energia meccanica.

Lo schema di ragionamento seguito fu di tipo teorico e si basò sulla differenza già nota del calore specifico dei gas quando questi vengono riscaldati a volume costante (nel qual caso non si ha lavoro meccanico) e quando invece il riscal-



apparato sperimentale di Mayer



J. R. Mayer (1814-1878)

damento viene effettuato a pressione costante (nel qual caso si produce anche un lavoro dovuto al fatto che mentre il gas si scalda si ha anche una espansione per poter mantenere costante la pressione).

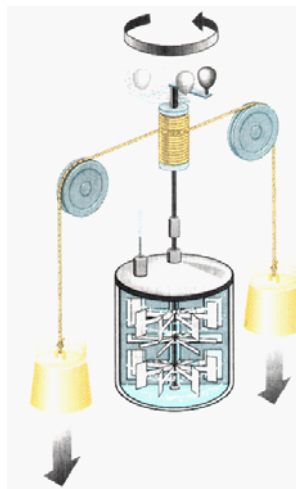
Poiché tale differenza era nota ed era imputabile ad un lavoro Mayer riuscì a mettere in relazione il calore con il lavoro e, in base a risultati sperimentali già noti, e senza eseguire altri esperimenti arrivò ad un valore per l'equivalente termico della caloria; tale valore risultò corretto con un errore dell'ordine del 25%.

Mayer nelle sue argomentazioni non distingue tra un vago concetto di forza e quella che sarà poi l'energia e sostiene che *le forze sono oggetti imponderabili, indistruttibili e reciprocamente trasformabili* e che il movimento delle particelle è il mediatore che spiega la scomparsa di movimenti macroscopici che si trasformano in calore.

Il contributo non determinò sul momento grandi cambiamenti per due ragioni:

- ♦ fu respinto dagli *Annalen der Physik* perché scritto in larga misura con lo stile filosofico oscuro della *filosofia della natura* tipico dell'idealismo tedesco; fu poi pubblicato nel 1842 su una rivista di chimica;
- ♦ il dato più importante dell'articolo era il valore dell'equivalente meccanico del calore; ma esso veniva fornito senza giustificazione.

Secondo la storiografia più recente sembra comunque che l'articolo di Mayer fosse noto a Joule.



schema del mulinello di Joule



2.3.5 I LAVORI DI JOULE ANDARONO BEN AL DI LÀ DELLA ESPERIENZA DEL MULINELLO

James Prescott *Joule* (1818-1889) era uno scienziato dilettante (birraio di professione) e a differenza di Mayer si concentrò per tutta la vita sulla *determinazione sperimentale della equivalenza tra calore e lavoro*.

I suoi primi lavori sono immediatamente successivi alle scoperte di Faraday in elettromagnetismo e riguardano dapprima la ricerca di una valutazione quantitativa degli effetti di calore delle correnti elettriche e successivamente il tentativo di ottimizzare il funzionamento dei motori e dei generatori di elettricità.

In particolare *Joule* si chiedeva se un motore elettrico alimentato a pile non fosse più conveniente (in termini di consumi) di una macchina a vapore. I suoi lavori dedicati alla determinazione *dell'equivalente meccanico del calore* vanno dal 1840 al 1847 e vengono così riassunti in una lettera del 1845 ad una rivista inglese di fisica:

l'apparato consisteva di una ruota a pale di ottone che lavorava orizzontalmente in un recipiente pieno d'acqua. A questa ruota si poteva comunicare del moto mediante pesi, carrucole, etc... La ruota si muoveva con grande resistenza nel recipiente pieno d'acqua, di modo che i pesi (ciascuno dei quali ammontava a quattro libbre) scendevano con una velocità relativamente bassa di circa un piede al secondo. L'altezza delle carrucole rispetto al suolo era di dodici yard, e conseguentemente, quando i pesi erano discesi per tutta questa distanza, li si doveva far risalire al fine di rinnovare il movimento della ruota. Dopo aver ripetuto per sedici volte questa operazione l'aumento della temperatura dell'acqua veniva accertato mediante un termometro molto sensibile ad accurato.

Si eseguirono nove esperimenti nel modo suddetto, e nove esperimenti vennero fatti al fine di eliminare gli effetti di raffreddamento o di riscaldamento dovuti alla atmosfera. Dopo aver ridotto il risultato alla capacità per il calore di una libbra d'acqua, apparve che, per ogni grado di calore sviluppato dall'attrito dell'acqua, si era spesa una potenza meccanica pari a quella che può sollevare all'altezza di un piede un peso di 890 libbre.

Gli equivalenti che ho già ottenuto sono i seguenti. In primo luogo 823 libbre nel caso degli esperimenti magneto elettrici; in secondo luogo 795 libbre dedotte dal freddo prodotto dalla rarefazione dell'aria; e in terzo luogo 774 libbre a partire da esperimenti (non ancora pubblicati) sul moto dell'acqua in tubi sottili. Poiché quest'ultima classe di esperimenti è simile a quella con la ruota a pale, possiamo considerare la media tra 774 libbre e 840 libbre, cioè 832 libbre, come l'equivalente derivato dall'attrito dell'acqua.

In esperimenti così delicati, nei quali ben difficilmente si osservano variazioni di temperatura superiori a mezzo grado, non ci si poteva certamente aspettare che tra i risultati esistesse un accordo maggiore di quello che è stato esposto. Posso pertanto trarre la conclusione secondo cui è stata provata l'esistenza di una relazione equivalente tra il calore e le forme ordinarie della potenza meccanica; e posso assumere, sino a quando non saranno fatti degli esperimenti più accurati, che l'equivalente sia pari a 817 libbre e cioè pari alla media di tre classi distinte di esperimenti. ⁽⁵⁾

Si osservino alcuni elementi tipici del fisico sperimentale nel modo di operare di Joule:

- ♦ la descrizione della apparecchiatura (che garantisce la riproducibilità),
- ♦ la ripetizione dell'esperienza (che garantisce la regolarità),
- ♦ l'esecuzione della esperienza in campi diversi (in modo di indagare forme diverse di conversione energetica),
- ♦ la naturalezza con cui si presenta un risultato provvisorio e frutto di una media tra valori che differiscono tra loro almeno del 20%.

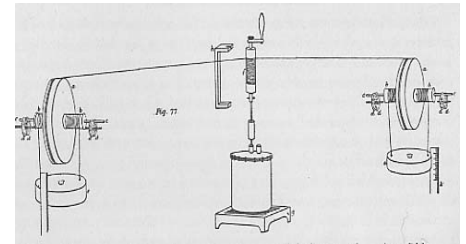
Se riportiamo le 817 libbre nelle nostre unità avremo una energia potenziale pari a $m g h$ che dovrà essere comparata a $J c m' \Delta t$ dove:

- J rappresenta il numero di Joule corrispondenti ad una caloria,
- c è il calore specifico dell'acqua che in base alla definizione di caloria vale $1 \text{ cal}/(^{\circ}\text{C g})$,
- m' rappresenta la massa di 1 g,
- Δt è pari a 1°F cioè $1/1.8^{\circ}\text{C}$
- g è la accelerazione di gravità (9.80 m/s^2)
- m rappresenta le 817 libbre
- h è pari a 1 piede (0.305 m).

Il fattore di conversione tra le libbre e i kg può essere trascurato perché compare da entrambi i lati della equazione (ma bisogna dividere per 1'000 perché la caloria si riferisce ai grammi e l'energia ai kg) e si ottiene pertanto:

$$J = \frac{817 \times 9.80 \times 0.305 \times 1.8}{1 \times 10^3} \approx 4.37 \text{ J/cal}$$

⁵ J.P. Joule, lettera al Philosophical Magazine n. 23/1845; citato da Enrico Bellone, Le leggi della termodinamica da Boyle a Boltzmann, ed. Loescher



contro un valore oggi accettato è di 4.180 J/cal. Joule continuò a lavorare sulla misura dell'equivalente; il miglior risultato fu ottenuto nel 1875 su incarico della British Association e risultò pari a 4.15.



2.3.6 HELMHOLTZ E IL SAGGIO SULLA CONSERVAZIONE DELLA FORZA

Hermann Ludwig Ferdinand *Helmholtz* (1821-1894) si laureò giovanissimo in medicina con una tesi *sulla struttura del sistema nervoso degli invertebrati* e iniziò subito dopo la carriera accademica come professore di anatomia e di fisiologia per proseguire poi come docente di fisica (sempre attento ai fondamenti di questa disciplina).

Il titolo della sua tesi è illuminante del forte interesse fisico-biologico che lo permea. Il saggio *Sulla conservazione della forza* è del 1847 ma sino al 1868 Helmholtz continuerà ad occuparsi a livello accademico di fisiologia; è tra l'altro l'inventore dell'apparecchio ancora usato per la osservazione dell'occhio durante le visite oculistiche.

Nel 1868 approda all'insegnamento della fisica a Berlino dopo essere passato attraverso alcune delle più prestigiose università tedesche (Königsberg, Bonn, Heidelberg).

I suoi scritti, oltre ai contributi notevolissimi nel settore della fisiologia (in particolare dell'udito e della vista) sono sempre dedicati ai fondamenti delle questioni che analizza, con un approccio epistemologico ben messo in evidenza. Molte delle questioni affrontate da Helmholtz saranno al centro delle rivoluzioni nella scienza fisica del 900.⁶

Il saggio sulla conservazione della forza è diviso in 6 parti nelle quali la questione della *conservazione della energia* (che ancora non si chiama così) viene esaminata in tutti i suoi aspetti. La introduzione è largamente dedicata alla inscindibilità dei due concetti di materia e forza e si conclude con una dichiarazione che ci dice tutto sul *programma di ricerca di Helmholtz*:



*La teoria naturalistica dovrà, dunque, se non vuole fermarsi a metà strada sulla via del comprendere, accordare le sue vedute con l'esigenza, prima illustrata, relativa alle forze semplici, e con ciò che da tale esigenza consegue. Il suo compito sarà compiuto, quando i fenomeni saranno stati tutti ricondotti a forze semplici, e quando si sia parallelamente dimostrato che tale analisi è l'unica possibile, che i fenomeni permettano. Inoltre, se il ricondurre i fenomeni a forze semplici si rivelasse come la necessaria forma concettuale, in cui è appresa la natura, allora bisognerebbe attribuire anche verità obiettiva alla suddetta analisi dei fenomeni in forze semplici.*⁷

A questo punto il lavoro di Helmholtz tratta dei sei capitoli in cui si può organizzare lo studio dell'energia nel suo tempo:

- ♦ il principio di conservazione della *forza viva*: è lo studio delle problematiche dell'energia cinetica e dei suoi nessi con il lavoro;

⁶ I suoi scritti sono disponibili nella collana *I classici della scienza* curata da L. Geymonat presso la Utet e vogliamo qui ricordarne alcuni, quasi tutti alla portata di un alunno di cultura liceale: *Sul rapporto tra le scienze della natura e la totalità della scienza* (1862); *Sui fatti che stanno a fondamento della geometria* (1868); *Sull'origine e sul significato degli assiomi geometrici* (1870); *I fatti nella percezione* (1878); *Sul significato fisico del principio di minima azione* (1886); *Contare e misurare considerati dal punto di vista della teoria del conoscere* (1887).

⁷ *Helmholtz, sulla conservazione della forza*, Opere, pag. 53, Utet

- ♦ il principio di *conservazione della forza*: è lo studio del teorema di conservazione dell'energia meccanica compreso il concetto di energia potenziale;
- ♦ l'applicazione del principio ai teoremi meccanici: è lo studio di tipo semiquantitativo dei *fenomeni ondulatori* attraverso la conservazione della energia, compresi i fenomeni luminosi la cui natura non viene ulteriormente indagata;
- ♦ l'*equivalente meccanico del calore*: si riesaminano i lavori di Mayer e di Joule e ci si confronta in particolare con le esperienze che consentiranno di introdurre il concetto di energia interna;
- ♦ l'*equivalente meccanico dei processi elettrici*: il confronto avviene con riferimento ai fenomeni elettrostatici, al galvanismo, alle correnti elettriche e ai fenomeni di termoelettricità ⁽⁸⁾
- ♦ l'*equivalente meccanico del magnetismo e dell'elettromagnetismo*



Il saggio si conclude con uno sguardo al mondo biologico:

Tra i processi naturali noti restano ancora da considerare quelli del mondo organico. Nelle piante i processi sono essenzialmente chimici, e oltre a ciò, almeno in singole piante, si verifica un limitato sviluppo di calore. In esse si deposita soprattutto una forte quantità di forze potenziali chimiche, il cui equivalente, nella combustione di sostanze vegetali, ci è ceduto come calore.

L'unica forza viva che, secondo le conoscenze da noi finora acquisite è, correlativamente a ciò, assorbita durante la crescita delle piante, corrisponde ai raggi chimici della luce solare.

Ci mancano, però, ancora tutte le informazioni necessarie a confrontare più da vicino gli equivalenti della forza, che in tal modo si perdono e si acquistano.⁽⁹⁾

Per gli animali abbiamo già alcuni punti di appoggio più vicini. Essi assumono le complesse combinazioni ossidabili, che sono prodotte dalle piante, insieme all'ossigeno e le espellono da sé per lo più dopo un processo di combustione come anidride carbonica ed acqua, in parte invece ridotte a composti più semplici.

Gli animali utilizzano dunque una certa quantità di forze potenziali chimiche, generando calore e forze meccaniche. Poiché queste ultime rappresentano una quantità di lavoro relativamente piccola rispetto alla quantità di calore, il problema della conservazione della forza si riduce, a un dipresso, all'altro problema, se la combustione e la trasposizione dei materiali che servono al processo nutritivo producano una quantità di calore uguale a quella che l'animale cede.

Questa domanda può, secondo le ricerche di Dulong e di Despretz avere una risposta affermativa, almeno approssimativamente. ⁽¹⁰⁾



⁸ Cioè alla capacità delle differenze di temperatura di giunzioni metalliche di produrre correnti elettriche.

⁹ Il bilancio energetico della fotosintesi con il conteggio del potere energetico dei fotoni (mancano oltre 60 anni alla comprensione fisica del fenomeno).

¹⁰ Helmholtz, *sulla conservazione della forza*, Opere, pag. 107, Utet

2.4 Quesiti di fine capitolo

1. Cos'è una funzione di stato? Citane almeno due. ¹¹
2. Cosa significa la frase: *le funzioni di stato non hanno memoria?*
3. Cos'è un ambiente adiabatico e, concretamente come lo si realizza? ¹²
4. Cos'è un vaso Dewar? Con quali accorgimenti vengono impedita la conduzione e l'irraggiamento? ¹³
5. Come viene definita l'energia interna di un sistema termodinamico? ¹⁴
6. In cosa è consistito l'esperimento di Joule dal punto di vista concettuale? ¹⁵
7. Cosa distingue la conduzione dalla convezione? Come avviene il trasporto di energia nei due casi? ¹⁶
8. Ad un corpo omogeneo di massa m si fornisce una quantità variabile di energia termica $\Delta\mathcal{E}$ e per effetto di essa il corpo subisce una variazione di temperatura Δt . Su quale proprietà osservabile si basa la definizione di calore specifico? ¹⁷
9. Quando si fornisce calore ad un solido possono avvenire quattro fenomeni diversi. Citarli e dire quali sono le costanti fisiche che vengono ad essi associate. ¹⁸
10. Perché tra 0° e 4°C è difficile raffreddare acqua agendo dall'alto verso il basso? ¹⁹

¹¹ E' una grandezza fisica dipendente solo dallo stato di un sistema termodinamico. Sono funzioni di stato, per esempio, la temperatura e l'energia interna.

¹² E' un ambiente isolato dal contesto esterno e caratterizzato, in particolare, dal fatto che le sue osservabili macroscopiche non cambiano quando cambiano le temperature dei corpi posti all'esterno.

¹³ E' un recipiente con una doppia parete in vetro sottile con il vuoto tra le due pareti e con le pareti a specchio. La doppia parete sottile annulla la conduzione e lo stesso fa per l'irraggiamento la parete a specchio.

¹⁴ Viene definita attraverso la misura del lavoro in ambiente adiabatico associando in particolare lo svolgimento di tale lavoro con qualche grandezza fisica misurabile (per esempio la temperatura).

¹⁵ Nell'andare a misurare gli effetti prodotti in un ambiente adiabatico da lavori (con azione di forze non conservative) che venivano mediati da processi fisici diversi ma tutti riconducibili ad un lavoro misurabile e nello stabilire che il lavoro produceva un medesimo effetto in maniera indipendente dal modo concreto in cui si sviluppava.

¹⁶ Nella prima la trasmissione del calore avviene senza trasporto di materia per trasmissione (dovuta a contatto diretto) delle vibrazioni del reticolo cristallino; un ruolo importante è anche giocato dalla presenza di elettroni liberi di muoversi che si comportano come un gas come accade nei metalli. Nella convezione (tipica dei fluidi) c'è trasporto di materia a causa delle diversità di densità che produce fenomeni di diffusione e di galleggiamento; la diversità di densità è a sua volta dovuta alla diversità di temperatura.

¹⁷ Il rapporto $\frac{\Delta\mathcal{E}}{m \Delta t}$ rimane costante e risulta dipendere solo dalla sostanza scelta

¹⁸ Calore specifico: \Rightarrow variazione di temperatura; Calore di evaporazione: \Rightarrow cambia la massa di liquido; Calore di fusione: \Rightarrow cambia la massa di solido; Calore di reazione: \Rightarrow si innescano reazioni chimiche

11. Illustrare in 3 righe la differenza tra capacità termica e calore specifico²⁰
12. In un calorimetro c'è una massa d'acqua m_1 a temperatura t_1 ; si versa una massa m_2 e il miscuglio si porta ad una nuova temperatura t . Scrivere l'equazione che collega le grandezze citate.²¹
13. Con riferimento alla domanda precedente da cosa si capisce che bisogna aggiungere a m_1 una quantità m_c detta equivalente in acqua del calorimetro?²²
14. Perché per isolare pareti e finestre delle abitazioni si usano materiali quali lana di vetro, polistirolo, lana di roccia, doppi vetri e mattoni forati?²³
15. Perché la lana è un ottimo isolante?²⁴
16. Tenendo presenti i concetti di calore specifico e di coefficiente di conduzione con che criterio vanno scelti i materiali in modo di garantire che un ambiente si scaldi poco d'estate e si raffreddi poco d'inverno?²⁵
17. Se l'aria è un isolante come mai essa costituisce il veicolo attraverso cui avvengono gli scambi termici nell'atmosfera? (2 o 3 righe)²⁶
18. La legge $\frac{\Delta \mathcal{E}}{\Delta t} = \frac{\sigma \Delta T}{\frac{d_1}{k_1} + \frac{d_2}{k_2}}$ in quale contesto si applica? Cosa sono d_1 , k_1 , d_2 , k_2 ?²⁷
19. Che implicazioni derivano dal fatto che l'acqua ha un calore specifico elevato?²⁸

¹⁹ L'acqua presenta un massimo relativo di densità a 4° pertanto raffreddandola dall'alto non si ha convezione (perché la parte meno densa si trova in alto) ma solo conduzione e il coefficiente di conduzione dell'acqua è molto basso.

²⁰ La capacità termica è la costante di proporzionalità tra calore assorbito e variazione di temperatura di un corpo. Il calore specifico è la capacità termica per unità di massa e dipende solo dal materiale $C = c m$

²¹ $m_1 (t - t_1) = m_2 (t_2 - t)$

²² Dal fatto che la temperatura finale risulta diversa da quella prevista dalla equazione a causa del calore che viene ceduto o assorbito dal calorimetro

²³ Perché in tutti questi casi si intrappola dell'aria impedendole moti convettivi; così la parete può condurre solo per conduzione e il coefficiente di conduzione dell'aria è molto basso.

²⁴ Perché le sue microfibre imprigionano l'aria impedendo i moti convettivi. Poiché i gas per conduzione sono isolanti la lana risulta un ottimo isolante termico.

²⁵ Elevato calore specifico in modo che le pareti facciano un effetto calmierante e bassa conducibilità per isolare l'interno e l'esterno.

²⁶ Le masse d'aria a temperatura diversa hanno densità diversa e si muovono puntando a compensare le differenze di densità. Ciò determina i moti convettivi che trasportano insieme alle masse d'aria anche l'energia termica.

²⁷ Quando si applicano in serie (cioè una dopo l'altra) due materiali diversi e si deve calcolare la potenza trasmessa; d_1 , k_1 , d_2 , k_2 sono gli spessori e i coefficienti di conduzione delle due sostanze. La relazione vale tutte le volte che due materiali della stessa sezione vengono posti l'uno dopo l'altro e non solo per gli isolanti o per un isolante e una parete.

²⁸ L'acqua *tempera* il clima cioè rallenta tutte le variazioni climatiche perché per dare una apprezzabile variazione di temperatura ad una grande massa d'acqua servono grandi quantità di energia. Ciò vale sia tra il dì e la notte, sia nei cicli stagionali.

20. In un dato contesto di temperatura, per diminuire la dispersione verso l'esterno di un ambiente di cubatura data quali 3 accorgimenti bisogna prendere. In particolare quale sarebbe la forma migliore? ²⁹
21. Perché gli arrostiti e i brasati cuociono meglio in un recipiente con il fondo più spesso? ³⁰
22. Enuncia il primo principio della termodinamica e spiega perché per l'energia interna si usa il Δ , cosa che non si fa per il calore e per il lavoro.
23. Su cosa si basa la prima stima di Mayer dell'equivalente meccanico per il calore?
24. Descrivi in 15 righe l'apparecchiatura utilizzata da Joule (mulinello) e precisa poi il margine di errore rispetto ai valori attuali dell'equivalente.
25. Quali sono le unità che utilizza Joule per il calcolo del lavoro della sua apparecchiatura?
26. Cita almeno tre tipologie di conversione energetica indagate da Joule.
27. Perché Helmholtz è considerato il padre della conservazione dell'energia?
28. Ricerca di falso: a) Mayer era un medico e trasse alcuni delle sue conclusioni dalla osservazione del sangue venoso nei paesi tropicali b) Joule si occupò anche degli aspetti energetici dei fenomeni luminosi c) Il mulinello non è l'unica apparecchiatura usata da Joule per la determinazione dell'equivalente d) Helmholtz di formazione era un medico e fisiologo e) Joule era un birraio.
29. Ricerca di vero: a) Mayer trasse una stima dell'equivalente meccanico del calore attraverso il confronto tra i calori specifici dei gas in trasformazioni a volume costante e a pressione costante b) per poter eseguire molte misurazioni, Joule faceva cadere i pesi che mettevano in rotazione il mulinello ad alta velocità c) Helmholtz nella sua memoria parla di "conservazione della energia" d) Helmholtz nella sua memoria fa anche una analisi approfondita dei meccanismi energetici negli esseri viventi.
30. Prendendo i dati dal testo svolgi autonomamente il calcolo che consente di trasformare i risultati di Joule negli equivalenti valori in unità del S.I.
31. Che differenza c'è nello sciogliere in acqua del sale grosso o del sale raffinato? ³¹

²⁹ Rendere spesse le pareti, minimizzare la superficie, usare un materiale con λ molto piccolo. La forma migliore sarebbe quella sferica (la sfera ha il massimo volume con il minimo di superficie).

³⁰ Perché un brusco sbalzo termico impiega più tempo a determinare un nuovo equilibrio. Inoltre la elevata capacità termica tende a rendere uniformi le temperature interne e a rallentare tutti i processi di variazione di temperatura.

³¹ Quando il sale si scioglie in acqua viene richiesta al liquido della energia per rompere i legami cristallini. Nel caso di cristalli più grandi tale energia sarà maggiore e pertanto l'acqua, seppure di poco, sarà un po' più fredda.

32. Alla luce del I principio della termodinamica sapresti spiegare perchè se si tiene aperta la porta di un frigorifero la temperatura del locale aumenta? ³²

³² Per la conservazione della energia nel locale viene aggiunta l'energia proveniente dalla alimentazione elettrica necessaria al funzionamento del frigorifero e dunque è maggiore l'energia ceduta dallo scambiatore termico caldo di quella assorbita dalle pareti interne del frigorifero.

Quesiti dalle Olimpiadi della Fisica

1. Per misurare il calore specifico di un metallo, questo è stato riscaldato elettricamente e si sono prese le seguenti misure in modo da rendere trascurabili le dispersioni di calore nell'ambiente:

massa del metallo ... 2 kg differenza di potenziale applicata ... 240 V

intensità di corrente ... 3 A durata del riscaldamento ... 20 s

variazione di temperatura del metallo ... 10°C

Qual è il calore specifico del metallo (ricorda che $V A = W$)?
...(Juniores 1995)³³

A ... $(240 \times 3^2 \times 2) : (2 \times 10 \times 20) \text{ J kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$

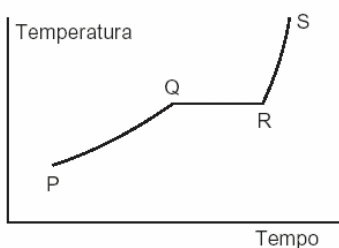
B ... $(2 \times 10 \times 20) : (240 \times 3 \times 60) \text{ J kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$

C ... $(2 \times 10 \times 20) : (240 \times 3) \text{ J kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$

D ... $(2 \times 10) : (240 \times 3 \times 20) : \text{ J kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$

E ... $(240 \times 3 \times 20) : (2 \times 10) \text{ J kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$

2. Un contenitore con una certa quantità di una sostanza solida è stato riscaldato uniformemente con un riscaldatore che eroga calore al tasso costante di 20 J/s. Le perdite di calore sono state rese trascurabili. Il grafico mostra l'andamento della temperatura della sostanza, rilevata a intervalli regolari di tempo. Dal grafico si può dedurre che:



I - la sostanza fonde completamente tra Q ed R.

II - il calore specifico della sostanza è maggiore tra P e Q che tra R ed S. III - la sostanza non ha assorbito calore tra Q ed R.

Quali delle precedenti deduzioni sono corrette? ... (Juniores 1995)³⁴

A ... Tutte e tre. B ... Solamente la I e la II.

C ... Solamente la II e la III. D ... Solamente la I.

E ... Solamente la III.

3. Se ti capita di versare dell'alcool sul braccio, per esempio per disinfettare una zona di pelle, provi una sensazione di freddo, anche quando l'alcool è alla stessa temperatura del tuo corpo. Questo avviene perché... (Juniores 1996)³⁵

A ... l'alcool è più caldo dell'ambiente circostante.

B ... l'alcool è un buon conduttore del calore.

C ... l'alcool condensa rapidamente sul braccio.

D ... l'alcool congela rapidamente a contatto con il braccio.

E ... l'alcool evapora rapidamente dal braccio.

³³ In effetti per calcolare il calore specifico occorre fare il rapporto tra la energia fornita (potenza elettrica per intervallo di tempo) e il prodotto tra massa e variazione di temperatura; dunque $c = (240 \times 3 \times 20) : (2 \times 10) \text{ J kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}$

³⁴ La I è vera come si vede dalla costanza della temperatura; la II è vera come si nota dal fatto che nello stesso tempo (stesso calore fornito) si ha una minore variazione di temperatura; la III è del tutto falsa

³⁵ La rapida evaporazione determina una rapida perdita di energia interna del braccio

4. In una giornata molto calda vuoi raffreddare una bibita. Perché la raffreddi di più se aggiungi un cubetto di ghiaccio a 0°C che una massa uguale d'acqua a 0°C ? ... (Juniores 1997)

A ... Il ghiaccio fonde lentamente e la bibita rimane fresca più a lungo.

B ... Il ghiaccio fondendo assorbe energia dall'acqua.

C ... Il ghiaccio rimane in superficie e ciò riduce l'effetto di riscaldamento della bibita da parte dell'aria calda.

D ... L'acqua di fusione del ghiaccio scende sul fondo del bicchiere e ciò assicura un raffreddamento più omogeneo della bibita.

E ... L'affermazione è sbagliata perché le masse del ghiaccio e dell'acqua sono uguali e quindi i due metodi di raffreddamento sono equivalenti.

5. In un'esperienza di laboratorio viene utilizzato uno stesso fornello Bunsen per riscaldare diverse sostanze. Le misure sono indicate nella tabella seguente.

Sostanza	massa (Kg)	aumento di temp. ($^{\circ}\text{C}$)	tempo riscaldam. (s)
Ferro	0,500	100	300
Ferro	0,100	50	60

Lo studente durante l'esperienza si è spesso distratto e potrebbe aver registrato in maniera errata qualche risultato. Si può affermare che... (Juniores 1997)

A ... i valori sono accettabili in quanto aumentando di cinque volte la massa, aumenta di cinque volte il tempo di riscaldamento.

B ... i valori sono accettabili in quanto ad un maggiore aumento di temperatura corrisponde un maggiore tempo di riscaldamento.

C ... non ci sono elementi sufficienti per rispondere.

D ... i valori non sono accettabili in quanto aumentando di cinque volte la massa la temperatura non può aumentare solamente di due volte.

E ... i valori non sono accettabili in quanto aumentando di cinque volte sia la massa sia il tempo di riscaldamento l'aumento di temperatura dovrebbe rimanere lo stesso.

6. A due blocchi di rame, P e Q, viene trasferita la stessa quantità di calore W . La temperatura iniziale dei due blocchi è di 20°C . Si osserva che alla fine la temperatura di P è cresciuta la metà di quanto è cresciuta la temperatura di Q. Se non ci sono perdite di calore si può affermare che... (Juniores 1998)

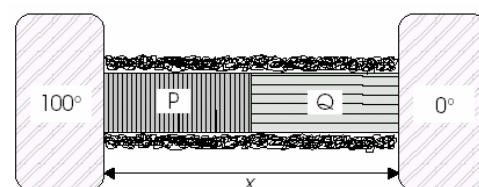
A ... la sostanza di cui è fatto P ha un calore specifico doppio di quella di cui è fatto Q.

B ... la capacità termica di P è doppia della capacità termica di Q.

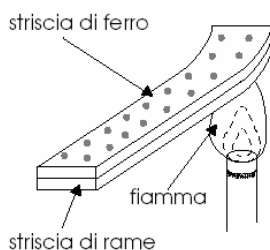
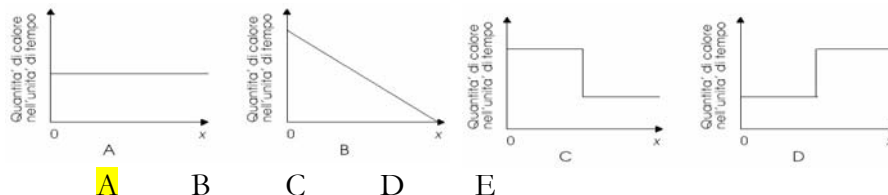
C ... la sostanza di cui è fatto P ha un calore specifico che è la metà di quella di cui è fatto Q.

D ... la capacità termica di P è la metà della capacità termica di Q.

7. Gli estremi di una sbarra sono inseriti, rispettivamente, in un forno a 100°C e in un recipiente contenente una grande quantità di ghiaccio ed acqua a 0°C . La sbarra è isolata termicamente al di fuori dei due recipienti ed è costituita da due parti, P e Q, di uguale lunghezza e



sezione, ma di materiali diversi; P conduce il calore meglio di Q. Dopo che si è stabilita una situazione stazionaria, quale dei seguenti grafici rappresenta meglio la velocità del flusso di calore nelle diverse posizioni x lungo la sbarra? ... (Juniores 1998) ³⁶



8. Per il rame ed il ferro si conoscono i seguenti valori caratteristici

	Ferro	Rame
A Coefficiente di dilatazione termica lineare	$11.7 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$	$16.8 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$
B Calore specifico	$0.60 \times 10^3 \text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$	$0.40 \times 10^3 \text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$
C Densità	$7.8 \times 10^3 \text{kg m}^{-3}$	$9.0 \times 10^3 \text{kg m}^{-3}$
D Conduttività termica	$80.4 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$	$390 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$

Due sottili strisce uguali, una di ferro ed una di rame, sono attaccate insieme. Riscaldando uniformemente con una fiamma la lamina bi-metallica così ottenuta questa si incurva, come si vede nella figura. Il fenomeno illustrato è giustificato da una delle caratteristiche indicate sopra: quale? ... (Juniores 1998)

9. Quando si prende dal congelatore un recipiente metallico spesso accade che questo si attacchi alla pelle. Ciò non succede con un contenitore di vetro perché il metallo ... (Juniores 1998)

- A ...ha calore specifico più basso di quello del vetro.
- B ...ha elettroni liberi che passano attraverso la pelle.
- C** ...conduce il calore meglio del vetro.
- D ...è più freddo del vetro.

10. Una certa quantità di olio da cucina caldo viene lasciata raffreddare fino alla temperatura ambiente. Puoi determinare il calore ceduto dall'olio durante il raffreddamento conoscendone soltanto ... (Juniores 1999)

- A ...la densità, il volume e la variazione di temperatura
- B ...il volume, il calore specifico e la variazione di temperatura
- C ...la densità, il volume e il calore specifico
- D ...la densità, il volume, la differenza di temperatura e il coefficiente di conduzione
- E** ...la massa, il calore specifico e la variazione di temperatura

11. Tutti i dati sperimentali indicati più sotto sono necessari per ricavare il calore specifico di una sostanza. Quale di essi contribuisce maggiormente all'incertezza del valore del calore specifico che viene calcolato? ³⁷

- A ...Potenza del riscaldatore: $W = (2000 \pm 10) \text{ W}$
- B ...Tempo: $t = (300 \pm 1) \text{ s}$

³⁶ Le due sbarrette sono in serie e sono dunque attraversate dalla stessa potenza. In quella con un λ più alto ci sarà un ΔT più basso.

³⁷ Gli errori relativi vanno come $1/200, 1/300, 1/25, 1/30$

C ...Massa: $m = (5.0 \pm 0.2)$ kg

D ...Variazione di temperatura: $\Delta T = (30 \pm 1)^\circ\text{C}$

12. Una quantità d'acqua, di massa m e, inizialmente, a temperatura t (misurata in $^\circ\text{C}$), viene mescolata in un recipiente termicamente isolante ad una quantità di ghiaccio, di massa M . Il ghiaccio si trova alla temperatura di fusione. Dopo un certo tempo si raggiunge l'equilibrio termico e non tutto il ghiaccio si è sciolto. Indicando con c il calore specifico dell'acqua e con L il calore latente di fusione del ghiaccio, la massa di ghiaccio sciolto è...(Juniores 1999)

A ... $\frac{ML}{cmt}$ B ... $\frac{cmt}{ML}$ C ... $\frac{cMt}{L}$ **D** ... $\frac{cmt}{L}$

13. Quattro aste metalliche a sezione circolare sono fatte dello stesso materiale. Le aste differiscono per la lunghezza, l , e per il raggio della sezione, r . I raggi delle sezioni e le lunghezze delle aste sono indicati qui sotto: quale delle quattro aste trasmette il calore più rapidamente? ... (Juniores 2000) ³⁸

A ... $r = 2\text{cm}$ e $l = 0.5\text{m}$ B ... $r = 2\text{cm}$ e $l = 2\text{m}$
 C ... $r = 0.5\text{cm}$ e $l = 0.5\text{m}$ D ... $r = 1\text{cm}$ e $l = 1\text{m}$

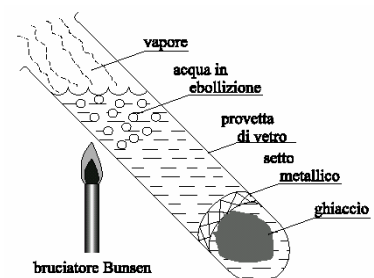
14. Per preparare una tazza di tè si devono portare 200 g d'acqua da 20°C a 80°C . Per fare questo occorre fornire calore per circa ... (Juniores 2000)

A ...25 kJ **B** ...50 kJ C ...75 kJ D ...100

kJ

15. Viene effettuato un esperimento come in figura. Perché il ghiaccio impiega molto tempo per fondersi benché l'acqua all'estremo opposto della provetta stia bollendo? ... (Juniores 2001)

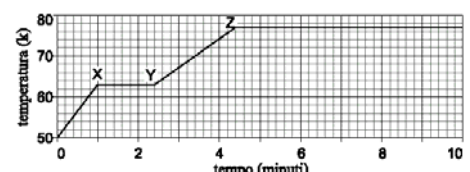
- A** ...Non può avvenire convezione nell'acqua.
 B ...Il ghiaccio irradia il calore molto debolmente.
 C ...L'anello metallico impedisce all'energia di raggiungere il ghiaccio.
D ...L'acqua è un cattivo conduttore di calore.



16. Se stai a piedi nudi con un piede sul pavimento in marmo e uno sul tappeto, il pavimento sembra più freddo del tappeto. Perché? ... (Juniores 2001)

- A ...Attraverso le fibre del tappeto non circola aria.
 B ...Il tuo piede riceve più energia dal tappeto che dal pavimento in marmo.
C ...Dal tuo piede si trasferisce più energia al pavimento che al tappeto.
 D ...Il pavimento è ad una temperatura più bassa del tappeto.

17. Un campione di un certo materiale è stato riscaldato per 10 minuti. Alla temperatura iniziale di 50 K il materiale, con massa 0.15 kg, si presentava allo stato solido. Il grafico qui sotto mostra l'andamento della temperatura del campione mentre gli viene fornito calore a ritmo costante, cioè uguali quantità di calore in tempi uguali e quindi



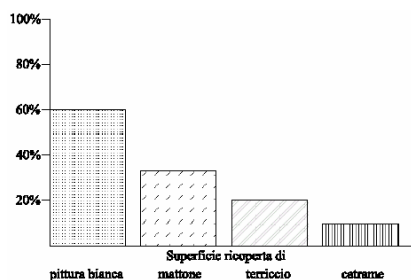
³⁸ Il flusso energetico è proporzionale a r^2 e inversamente proporzionale a l

potenza costante. Si sa che il riscaldatore fornisce calore al campione con una potenza di 50 W. Allora il calore trasferito al campione durante il processo di fusione è stato... (Juniores 2002)³⁹

- A ...22 J B ...70 J **C ...4'200J** D ...30'000 J

18. Perché uscendo dall'acqua dopo un bagno, ci si asciuga per non sentire freddo? ... (Juniores 2002)

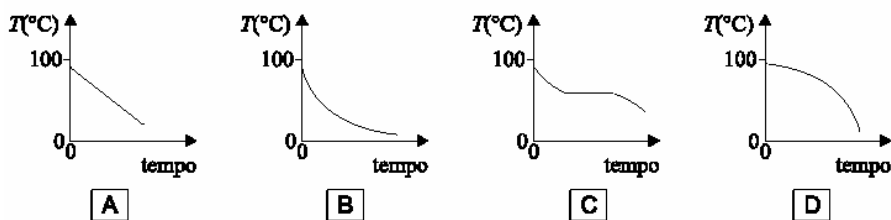
- A** ...Perché l'acqua sulla pelle bagnata evapora.
 B ...Perché l'acqua isola la pelle dall'aria calda.
 C ...Perché l'acqua è un buon conduttore del calore.
 D ...Perché l'acqua è più fredda dell'aria.



19. Superfici diverse riflettono porzioni diverse dell'energia radiante che arriva dal Sole. Il diagramma mostra la percentuale di energia termica riflessa da alcune superfici. Qual è il modo migliore di trattare un tetto piano, così da fargli assorbire al massimo l'energia termica? ... (Juniores 2003)

- A ...Coprirlo con uno strato di polvere di mattoni.
 B ...Coprirlo con uno strato di terriccio.
C ...Verniciarlo con catrame.
 D ...Verniciarlo con pittura bianca.

20. Una sostanza con punto di fusione a 60°C e` scaldata in una provetta fino ad una temperatura di 95°C. La stessa sostanza è poi lasciata raffreddare fino a temperatura ambiente. Quale dei seguenti grafici mostra meglio come cambia la temperatura T della sostanza mentre si raffredda? ... (Juniores 2003)



- A B **C** D

21. Qual è il motivo più importante per cui la pelliccia ripara dal freddo un orso polare? ... (Juniores 2004)

- A ...Il basso potere emissivo della pelliccia.
 B ...Il suo alto tasso di umidità.
 C ...La bassa conduttività dei liquidi presenti.
D ...La bassa conduttività dell'aria.

22. Il blocco 1 ha massa doppia rispetto a quella del blocco 2 ed è fatto di un materiale con calore specifico doppio rispetto a quello del materiale di cui è fatto il blocco 2. Entrambi i blocchi inizialmente si trovano alla stessa temperatura e, in seguito, vengono entrambi portati ad una stessa temperatura finale maggiore della precedente. La quantità di calore fornita al blocco 1 rispetto a quella fornita al blocco 2 è ... (Juniores 2004)

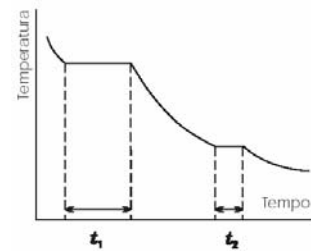
³⁹ Attenzione ai dati ridondanti; basta la durata XY del processo

- A ... quattro volte maggiore. B ... il doppio.
 C ... la metà D ... un quarto.

23. Il flusso di calore attraverso una lastra di vetro a facce piane parallele, in condizioni stazionarie: 1) è proporzionale alla differenza di temperatura tra le due facce della lastra. 2) raddoppia se l'area della lastra di vetro viene raddoppiata. 3) Vale 1.5kW per una lastra avente la superficie di 1.5m² sapendo che il gradiente di temperatura è di 2500K/m e la conducibilità termica del vetro è 0.9W/(m K). Quali delle precedenti affermazioni sono corrette? ... (I livello 1995)

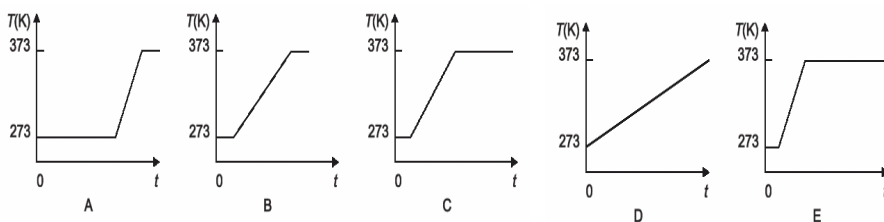
- A ... Tutte e tre B ... Solo la 1 e la 2 C ... Solo la 2 e la 3
 D ... Solo la 1 E ... Solo la 3

24. La temperatura di una massa di sostanza pura è stata misurata ad intervalli regolari mentre veniva raffreddata ottenendo il grafico temperatura-tempo mostrato nella figura. Durante l'esperimento l'ambiente circostante è stato mantenuto ad una temperatura costante di pochi gradi sotto il punto di fusione della sostanza. L'intervallo di tempo t_1 risulta maggiore dell'intervallo di tempo t_2 . Quali delle seguenti affermazioni possono essere dedotte da questi fatti. 1) La velocità con cui viene ceduto il calore durante t_1 è maggiore di quella durante t_2 . 2) Il calore ceduto durante t_1 è maggiore di quello ceduto durante t_2 . 3) Il volume della sostanza rimane costante durante t_1 e t_2 (I livello 1995)⁴⁰



- A ... Tutte e tre B ... Solo la 1 e la 2 C ... Solo la 2 e la 3
 D ... Solo la 1 E ... Solo la 3

25. Il calore specifico dell'acqua vale approssimativamente $4 \times 10^3 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$, il calore latente di fusione del ghiaccio $3 \times 10^5 \text{ J kg}^{-1}$ ed il calore latente di evaporazione dell'acqua $2 \times 10^6 \text{ J kg}^{-1}$. Un chilogrammo di ghiaccio a 0°C viene fuso interamente, poi viene riscaldato in fase liquida ed infine trasformato completamente in vapore usando un riscaldatore che fornisce una potenza costante. Quale fra i grafici seguenti rappresenta meglio l'andamento della temperatura del sistema al passare del tempo? ... (I livello 1996)⁴¹

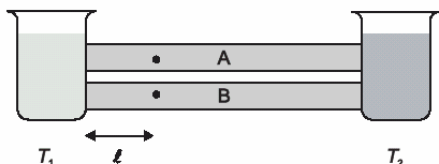


⁴⁰ Quesito interessante perché mette in gioco diverse leggi. Il flusso termico, a parità di condizioni è proporzionale al salto di temperature e poiché l'ambiente è stato mantenuto a temperatura inferiore a quella di fusione durante la liquefazione del vapore si ha un flusso termico superiore a quello che si ha durante la solidificazione. Dunque la 1 è corretta. Anche la 2 è corretta perché il calore ceduto è dato dal prodotto tra il flusso e l'intervallo di tempo e poiché $P_1 > P_2$ e $t_1 > t_2$ a maggior ragione si ha $Q_1 > Q_2$. La terza affermazione è intrigante perché durante i cambiamenti di stato la temperatura non cambia e, in maniera superficiale verrebbe da dire che non cambiano i volumi. Ma durante questa fase cambia lo stato e poiché le densità di liquido, solido e vapore sono molto diverse cambiano certamente anche i volumi.

A B C D **E**

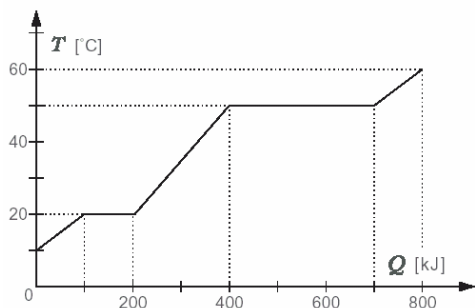
26. Nel Sistema Internazionale il calore specifico si misura in ... (livello 1996)⁴²

- A ...ms⁻²K⁻¹ B ...ms⁻¹K⁻¹ **C ...m²s⁻²K⁻¹**
 D ...m²s⁻¹K⁻¹ E ...m²kg⁻¹K⁻¹



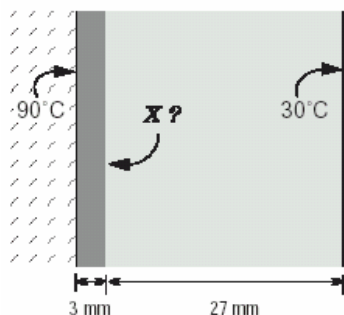
27. Tra due sorgenti a temperatura diversa vengono poste (in parallelo) due barrette omogenee, termicamente conduttrici di uguale forma e dimensioni. La conducibilità termica della barretta B è 5 volte maggiore di quella della barretta A. Ambedue le barrette sono immerse in un materiale isolante in modo che il calore fluisca solo sulle barrette stesse. Si misurano le temperature T_A e T_B di due punti sulle due barrette posti a uguale distanza l dalla prima sorgente. Che relazione sussiste tra le due temperature misurate? ... (livello 1996)⁴³

- A ... dipende dalla scelta della distanza l dei punti considerati
 B ... T_A = 1/5 T_B C ... T_A = 4/5 T_B **D ... T_A = T_B**
 E ... T_A = 5T_B



28. Il grafico rappresenta l'andamento della temperatura di una certa massa di sostanza pura, mentre le viene fornita energia. Da esso si deduce che il rapporto tra il calore di evaporazione ed il calore di fusione della sostanza pura è: ... (livello 1997)

- A ... 3:1** B ... 2:1 C ... 1:1 D ... 1:2
 E ... 1:3



29. In figura si vede la sezione del rivestimento di un serbatoio di acqua calda costituito da una parete metallica dello spessore di 3 mm e da una copertura di poliuretano espanso dello spessore di 27 mm, sono indicate le temperature della superficie della parete metallica a contatto con l'acqua e della superficie esterna del poliuretano espanso. La conducibilità termica del metallo è 4.0·10² Wm⁻¹K⁻¹ e quella del poliuretano espanso è 1.0 Wm⁻¹K⁻¹. La temperatura X sulla superficie di separazione fra la parete metallica e la copertura di poliuretano espanso, approssimata al grado, è... (livello 1997)⁴⁴

- A ... 50°C B ... 60°C C ... 84°C D ... 89°C
E ... 90°C

30. Il calore specifico di un certo metallo è 1/9 c_a e la sua densità è 6ρ_a dove c_a e ρ_a indicano, rispettivamente, il calore specifico e la densità dell'acqua. Volumi uguali di acqua e del metallo vengono riscaldati in

⁴¹ Il calore di fusione è 3·10⁵ J, quello per il riscaldamento del liquido è 4·10⁵ J e quello per la evaporazione è 2·10⁶ J; i tempi devono rispettare i rapporti reciproci e dunque la risposta corretta è la E

⁴² Ricordarsi che dalla relazione dell'energia cinetica il J è kg m²/s²

⁴³ Ci saranno due flussi diversi ma il gradiente termico è lo stesso

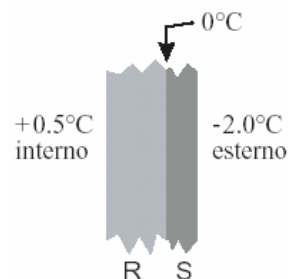
⁴⁴ Le due pareti sono in serie e dunque sono attraversate dallo stesso flusso termico; si può semplificare per la sezione ed esprimere tranquillamente gli spessori in mm perché si sta facendo un confronto e i fattori di conversione si elidono; così facendo si ottiene:

$$\frac{400}{3} (90 - x) = \frac{1}{27} (x - 30) \Leftrightarrow 3600(90 - x) = x - 30 \Leftrightarrow x = 89.98 = 90^\circ\text{C}$$

modo che le loro temperature aumentino della stessa quantità e si osserva che l'energia che si è dovuto fornire al metallo è k volte quella trasferita all'acqua. Quanto vale k ? ... (I livello 1997)

- A ... $k = 1/3$ **B** ... $k = 2/3$ C ... $k = 3/2$
 D ... $k = 4$ E ... $k = 54$

31. Un contenitore chiuso è termicamente isolato da pareti costituite da due strati di diversi materiali, indicati in figura con R e S. Lo spessore del materiale R che si trova all'interno del contenitore è il doppio di quello formato con il materiale S. Nella figura sono riportate le temperature interna ed esterna al contenitore e quella alla giunzione fra gli strati che ne costituiscono le pareti. Determinare il valore del rapporto fra la conducibilità termica di R e quella di S. ... (I livello 1998) ⁴⁵



- A ...1 B ...2 C ...4 **D** ...8 E ...16

32. Si faccia riferimento ai calori specifici di alcuni metalli, mostrati nella tabella a fianco. Un campione di 10 g di ciascuno di questi metalli viene riscaldato fornendo un'energia di 100 J. In quale metallo si riscontrerà il maggiore aumento di temperatura? ... (I livello 1998) ⁴⁶

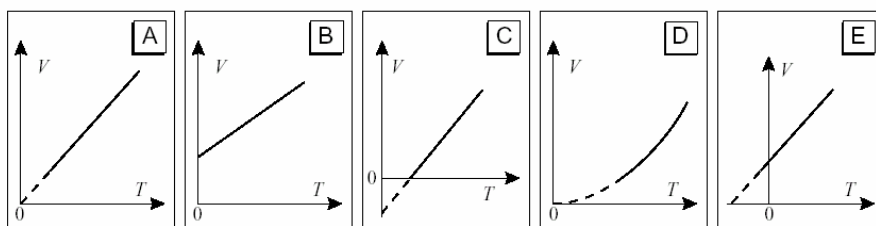
Metallo	Cal. specifico
Alluminio	0.92 J g ⁻¹ K ⁻¹
Argento	0.25 J g ⁻¹ K ⁻¹
Ferro	0.42 J g ⁻¹ K ⁻¹
Piombo	0.13 J g ⁻¹ K ⁻¹
Rame	0.38 J g ⁻¹ K ⁻¹

- A ...Alluminio B ...Rame **C** ...Piombo D ...Ferro
 E ...Argento

33. Una sonda spaziale, che si trova alla distanza di 3×10^{11} m dal Sole, è dotata di pannelli solari di superficie pari a 4 m^2 per ricevere l'energia sufficiente al suo corretto funzionamento. Quanto dovrebbe essere al minimo l'area dei pannelli solari per far funzionare la sonda, se questa dovesse essere posta alla distanza di 6×10^{11} m dal Sole? ... (I livello 1999) ⁴⁷

- A ...1 m² B ...2 m² C ...4 m² D ...8 m²
E ...16 m²

34. Quale dei seguenti grafici rappresenta meglio il volume V di una certa massa di un gas perfetto a pressione costante, in funzione della sua temperatura assoluta T ? (I livello 2000)



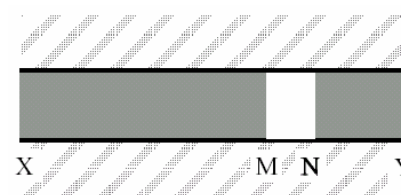
- A** B C D E

35. Il conduttore termico XY mostrato in figura è isolato termicamente lungo la sua superficie laterale e gli estremi X e Y sono mantenuti a

⁴⁵ $\frac{0.5}{2s} \lambda_1 = \frac{2}{s} \lambda_2$ da cui $\frac{\lambda_1}{\lambda_2} = 8$

⁴⁶ A parità di condizioni il calore specifico e la variazione di temperatura sono inversamente proporzionali.

⁴⁷ C'è un famoso esempio di Feynman sulla macchina sparaburro; gli stessi raggi al crescere della distanza vanno a intercettare un'area che va come il quadrato della distanza e poiché la distanza raddoppia l'area deve quadruplicare.



temperature differenti; al suo interno il conduttore è interrotto da uno strato MN di un materiale diverso. In condizioni stazionarie, la differenza di temperatura tra gli estremi dello strato MN non dipende:

- 1) dalla differenza di temperatura tra gli estremi XY del conduttore
- 2) dallo spessore dello strato MN
- 3) dalla posizione di MN lungo XY.

Quali delle precedenti affermazioni sono corrette? (I livello 2000) ⁴⁸

- A ... Tutte e tre B ... Sia la 1 che la 2
 C ... Sia la 2 che la 3 D ... Soltanto la 1 **E** ... Soltanto la 3
36. Una massa di 5kg di acqua alla temperatura di 10°C viene aggiunta ad una massa di 10 kg di acqua alla temperatura di 40°C. Trascurando la capacità termica del recipiente e le perdite di calore, la temperatura di equilibrio sarà prossima a ... (I livello 2000)
 A ... 20°C B ... 25°C **C** ... 30°C D ... 33°C
 E ... 35°C
37. Il calore specifico dell'acqua è 4'180Jkg⁻¹K⁻¹. Per aumentare da 20°C a 100°C la temperatura di 500 g di acqua è necessario fornire una quantità di energia E uguale a ... (I livello 2001)
 A ... 167 J B ... 334 J C ... 16.7 kJ
D ... 167 kJ E ... 334 kJ
38. Una parete di mattoni è lunga 5m, alta 3m e spessa 0.3m. Il coefficiente di conducibilità termica del mattone vale 0.6Wm⁻¹K⁻¹. Quando la temperatura interna è di 20°C e la temperatura esterna di 0°C, quanto vale la potenza termica che attraversa la parete? ... (I livello 2001)
 A ... 25 W B ... 60 W C ... 125 W
D ... 600 W E ... 1'250 W
39. Un forno solare usato per scaldare acqua è costituito da uno specchio concavo di area 0.40 m². La potenza radiante per unità di superficie, che arriva dal Sole sullo specchio, è P = 10³ Wm⁻². La migliore

⁴⁸ Questo quesito mi ha fatto venire in mente quello che accade quando si collegano in serie delle resistenze mettendo tra due fatte dello stesso materiale una terza resistenza di materiale diverso. Il ruolo delle temperature viene assunto dal potenziale e questa analogia mi ha guidato nello scrivere la soluzione. Se la resistenza eterogenea viene spostata mantenendone immutate le caratteristiche non cambia nulla. Ed ecco la soluzione.

Fissiamo un asse x con origine in X e orientato a destra. Poiché il flusso termico

$\phi = \lambda \sigma \frac{\Delta t}{\Delta x}$ ed è lo stesso lungo tutti i conduttori (che sono in serie) avremo:

$$t_N - t_M = \frac{\phi}{\lambda' \sigma} (x_N - x_M) \quad t_M - t_X = \frac{\phi}{\lambda \sigma} x_M \quad t_Y - t_N = \frac{\phi}{\lambda \sigma} (x_Y - x_N)$$

Se si sommano le ultime due equazioni si ha:

$$t_M - t_X + t_Y - t_N = \frac{\phi}{\lambda \sigma} (x_M + x_Y - x_N) \text{ da cui si ha:}$$

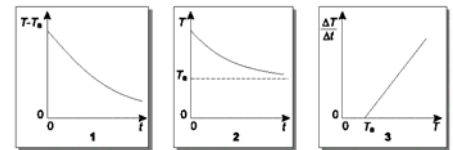
$$t_M - t_N = (t_X - t_Y) + \frac{\phi}{\lambda \sigma} (x_M - x_N) + \frac{\phi}{\lambda \sigma} x_Y \text{ dunque la 1 è falsa, la 2 è falsa, la 3 è vera.}$$

stima del minimo tempo necessario per riscaldare nel forno 1 kg di acqua da 20°C a 50°C è ... (I livello 2002) ⁴⁹

- A ... 0.8 min **B** ... 5 min C ... 20 min D ... 50 min
E ... 320 min

40. Un corpo si sta raffreddando in un ambiente ventilato alla temperatura costante T_a . Quali dei seguenti grafici rispettano la relazione tra la sua temperatura T e il tempo t ? ... (I livello 2003) ⁵⁰

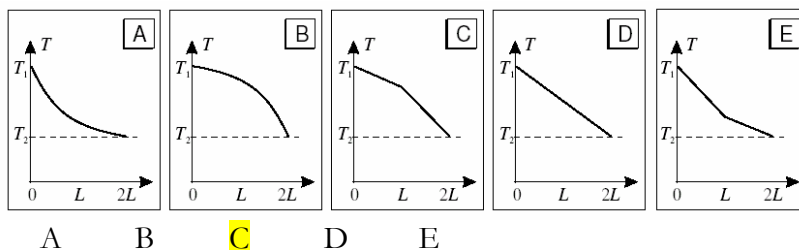
- A ... Tutti e tre **B** ... Solo lo 1 e il 2 C ... Solo il 2 e il 3
D ... Solo lo 1 E ... Solo il 3



41. Il calore specifico di un certo metallo è $c_a/9$ e la sua densità è $6\rho_a$, dove c_a e ρ_a indicano, rispettivamente, il calore specifico e la densità dell'acqua. Volumi uguali di acqua e del metallo vengono riscaldati in modo che le loro temperature aumentino della stessa quantità e si osserva che l'energia che si è dovuto fornire al metallo è k volte quella trasferita all'acqua. Quanto vale k ? ... (I livello 2003) ⁵¹

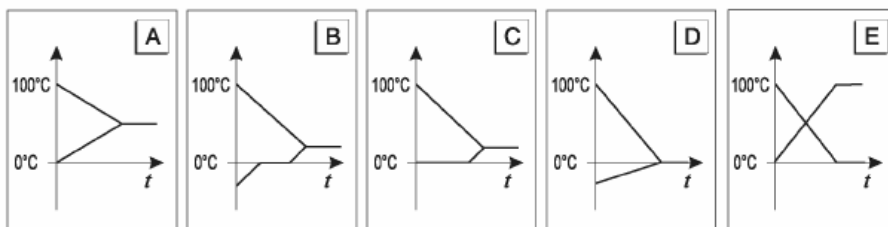
- A ... 1/3 **B** ... 2/3 C ... 3/2 D ... 4
E ... 54

42. Una barra metallica a sezione costante è costituita da due pezzi di materiale diverso: la conducibilità termica del materiale X è doppia rispetto a quella del materiale Y. I due pezzi hanno uguale lunghezza L e sono mantenuti in perfetto contatto termico tra loro mentre l'intera barra è isolata termicamente dall'ambiente. Le due estremità della barra sono mantenute a temperature costanti T_1 e T_2 . Quale dei grafici seguenti rappresenta meglio l'andamento della temperatura nei diversi punti della barra? (I livello 2004) ⁵²



A B **C** D E

43. Un pezzo di ghiaccio di 100 g a 0°C viene messo in un recipiente contenente 100 g di acqua a 100°C. Quale dei grafici seguenti rap-



⁴⁹ Determinare la Potenza che arriva sullo specchio e viene poi concentrata sul forno e tener conto che l'energia è potenza nel tempo.

⁵⁰ Si va all'equilibrio con legge esponenziale; prestare attenzione a cosa c'è sull'asse delle ordinate

⁵¹ $Q_m = c_a/9 \Delta T \rho_m V_m = 1/9 c_a 6 \rho_a V_a \Delta T = 2/3 c_a m_a \Delta T = 2/3 Q_a$

⁵² Se la conducibilità è più alta il salto termico, a parità di condizioni è più basso. L'andamento, nei tratti omogenei

presenta meglio l'andamento della temperatura dei due componenti della miscela in funzione del tempo? ... (I livello 2006)

A B **C** D E ⁵³

44. Quando una studentessa beve dell'acqua fredda, il suo corpo scalda l'acqua fino al raggiungimento dell'equilibrio termico. Se la studentessa, nell'arco di una giornata, beve circa un litro e mezzo d'acqua a 8.0 °C, quanta energia - sotto forma di calore - deve fornire approssimativamente il suo corpo all'acqua? (NOTA: si consideri la temperatura interna della studentessa pari a 37 °C). ... (I livello 2006) ⁵⁴

A ...44 kJ **B** ...180 kJ C ...190 kJ D ...230 kJ
E ...470 kJ

45. Una sbarra metallica ha lunghezza L e sezione trasversale di area A . Un'estremità della sbarra è tenuta a temperatura costante t_1 , l'altra a temperatura costante t_2 . Sia $t_1 > t_2$. Quali, tra le seguenti affermazioni riguardanti il flusso termico (quantità di calore trasportato per unità di tempo) attraverso la sbarra, sono corrette? ... (I livello 2007) ⁵⁵

1 - Il flusso termico è proporzionale a $1/(t_1 - t_2)$

2 - Il flusso termico è proporzionale ad A .

3 - Il flusso termico è proporzionale a L .

A Solo la 1 **B** Solo la 2

C Solo la 1 e la 2 D Solo la 1 e la 3

E Solo la 2 e la 3

46. Un bollitore di alluminio di massa $m = 0.80$ kg contiene 0.50 kg d'acqua a 20°C. Il bollitore viene riscaldato finché l'acqua bolle a 100°C e il bollitore può ritenersi in equilibrio termico con l'acqua. Qual è - approssimativamente - la quantità netta di calore assorbita dal bollitore di alluminio da quando l'acqua è a 20°C a quando è a 100°C? ... (I livello 2007) ⁵⁶

Nota: calore specifico dell'acqua $c_a = 4.19 \cdot 10^3$ J/(kg·K); calore specifico dell'alluminio $c_{al} = 904$ J/(kg·K)

A ...1.30 MJ B ...630 kJ C ...270 kJ

D ...160 kJ **E** ...60 kJ

47. Cinque oggetti sono fatti rispettivamente di piombo, argento, tungsteno, rame e cromo; hanno tutti massa di 10 g e sono alla temperatura di 20 °C. Se ad ogni oggetto vengono forniti 10 J di calore, quale di essi alla fine avrà la temperatura più bassa? ... (I livello 2008) ⁵⁷

A ... il piombo dato che presenta il calore di fusione più basso

⁵³ B e D sono escluse per la temperatura iniziale del ghiaccio; A ed E sono escluse dal fatto che durante la fusione la temperatura non cambia; in C si osserva il processo di fusione e il successivo processo di andata all'equilibrio del bagno

⁵⁴ L'energia che l'acqua assorbe dal corpo per andare all'equilibrio è:

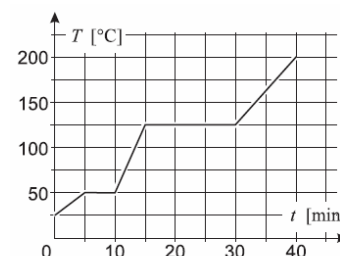
$$Q = c_a m_a \Delta T = c_a \rho_a V_a \Delta T = 4.19 \cdot 10^3 \cdot 10^3 \cdot 1.5 \cdot 10^{-3} \cdot 29 = 1.82 \cdot 10^5 \text{ J}$$

⁵⁵ Fare riferimento alla legge di Fourier per la conduzione termica

⁵⁶ Attenzione ai dati ridondanti, si parla di quantità netta e dunque non occorre conteggiare il calore assorbito dal bollitore e ceduto all'acqua.

⁵⁷ E' rilevante solo il calore specifico e dunque tra rame e cromo la risposta giusta è rame

- B ... l'argento, dato che ha la conducibilità termica più alta
 C ... il tungsteno, dato che ha il calore di vaporizzazione più alto
D ... il rame dato che ha il calore specifico più alto
 E ... il cromo, dato che ha il calore specifico più basso
48. Appena accesa una lampadina ad incandescenza, se vi avvicini la mano, senti caldo ma se tocchi il vetro del bulbo senti che è ancora freddo. Quale dei seguenti processi può spiegare questo fatto? ... (Juniores 2002)
- A ... Il filamento trasmette calore per convezione al gas dentro la lampadina e questo riscalda l'aria circostante.
B ... Il vetro del bulbo è trasparente alla radiazione termica proveniente dal filamento incandescente.
 C ... L'aria trasmette il calore meglio del vetro.
 D ... Il vetro del bulbo riflette la radiazione termica proveniente dal filamento incandescente.
49. Il primo principio della termodinamica può essere espresso dall'equazione $\Delta U = Q - W$ dove ΔU è la variazione dell'energia interna di un corpo, Q è il calore trasmesso al corpo e W il lavoro fatto dal corpo. Quali delle seguenti affermazioni relative all'applicazione dell'equazione ad un gas perfetto sono vere? 1) Se ΔU è positiva, allora la temperatura del gas aumenta. 2) Se Q è positivo, allora W è positivo. 3) Se Q è positivo, allora la temperatura del gas cresce. ... (I livello 1995)⁵⁸
- A ... Tutte e tre B ... Solo la 1 e la 2
 C ... Solo la 2 e la 3 **D** ... Solo la 1 E ... Solo la 3
50. Un campione di una sostanza di massa 5.00 kg assorbe calore da una sorgente che ne fornisce in maniera costante nel tempo una quantità pari a 41.9 kJ ogni minuto. Il grafico rappresenta la temperatura del campione al trascorrere del tempo. Il calore di vaporizzazione della sostanza è pari a ... (I liv 2012)
- A ... 12.6 kJ kg⁻¹ B ... 62.9 kJ kg⁻¹ **C** ... 126 kJ kg⁻¹
 D ... 210 kJ kg⁻¹ E ... 629 kJ kg⁻¹
51. Si sottrae una quantità $Q = 14.5$ MJ di energia termica a 5.0 kg di vapore acqueo inizialmente a 150°C che si trova in un recipiente chiuso. Si adotti come valore medio del calore specifico del vapore acqueo $c_v = 1.53$ kJ kg⁻¹ K⁻¹. Il risultato dell'operazione è: ... (I liv 2012)⁵⁹



⁵⁸ Bisognerebbe attendere la trattazione delle trasformazioni termodinamiche e un po' di teoria cinetica; come si vedrà l'energia interna del gas perfetto dipende solo dalla temperatura mentre Q e W possono variare liberamente rispettando l'equazione.

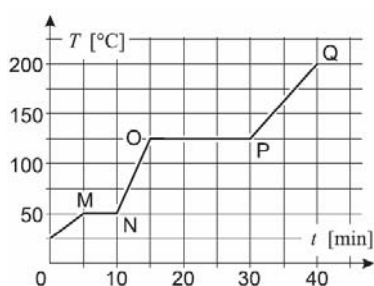
⁵⁹ Quesito dall'aria innocente che richiede però di calcolare il bilancio energetico per poter rispondere.

Per portare il vapore da 150°C a 100°C bisogna sottrarre $Q_1 = c_{vm} \Delta T = 0.383$ MJ. Per condensare il vapore a 100°C bisogna sottrarre $Q_2 = m\lambda_v = 11.3$ MJ, essendo λ_v il calore di vaporizzazione dell'acqua. Per portare l'acqua liquida da 100°C a 0°C bisogna sottrarre $Q_3 = c_{lm} \Delta T = 2.09$ MJ. Quindi per avere tutta acqua liquida a 0°C in totale bisogna sottrarre $Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 = 13.8$ MJ di energia. Per solidificare l'acqua a 0°C bisogna sottrarre ulteriori $Q_4 = m\lambda_f = 1.67$ MJ, essendo λ_f il calore di fusione dell'acqua. Si vede pertanto che i 14.5 MJ sottratti sono sufficienti a portare l'acqua a

- A ... Vapor acqueo.
- B ... Miscuglio di vapor acqueo e acqua liquida.
- C ... Acqua liquida.
- D** ... Miscuglio di acqua liquida e ghiaccio.
- E ... Ghiaccio.

52. Una persona è all'ombra in un'amaca in un giorno estivo in cui la temperatura è di 37°C, uguale a quella del suo corpo. In queste condizioni, il processo migliore grazie al quale il suo corpo smaltisce il calore prodotto dal suo metabolismo (ad un tasso di 130W) è la traspirazione. Il calore di vaporizzazione dell'acqua alla temperatura di 37°C è $\lambda = 2430$ kJ/kg. Il volume di sudore che evapora in un'ora è circa uguale a ... (I liv 2013)

- A ... 50 cm³
- B ... 100 cm³
- C** ... 200 cm³
- D ... 500 cm³
- E ... 1000 cm³

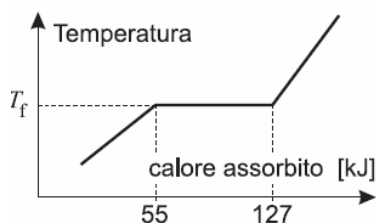


53. Il grafico illustra l'andamento della temperatura di un corpo omogeneo, inizialmente allo stato solido, che viene riscaldato, in funzione del tempo di riscaldamento. La massa del corpo è 5 kg e il calore che assorbe ogni minuto – ad un tasso costante – è 41.9 kJ. Qual è la quantità di calore assorbita da 1 kg del corpo tra l'istante in cui inizia la fusione e quello in cui termina l'ebollizione? ... (I liv 2013)

- A ... 105 kJ
- B** ... 210 kJ
- C ... 419 kJ
- D ... 1050 kJ
- E ... 2560 kJ

54. In un calorimetro di capacità termica 80 JK⁻¹ a 20°C, contenente 200 cm³ d'acqua alla stessa temperatura, si versano 300 g d'acqua a 70°C. Se non ci sono dispersioni di calore, qual è la temperatura raggiunta all'equilibrio? ... (I liv 2013)⁶⁰

- A ... 31.6°C
- B** ... 48.9°C
- C ... 58.9°C
- D ... 61.3°C
- E ... 65.2°C



55. Il diagramma a destra indica l'andamento della temperatura in funzione del calore assorbito da un oggetto di 3 kg di una sostanza pura inizialmente in fase solida. Tale sostanza riceve calore da una sorgente termica ad un tasso costante nel tempo. Nella tabella seguente sono raccolte alcune proprietà caratteristiche di cinque sostanze. Sapendo che la sostanza considerata è una di quelle in tabella, di quale si tratta? ... (I liv 2014)⁶¹

0°C, ma non per solidificare tutta la massa. Alla fine si otterrà quindi un miscuglio di acqua liquida e ghiaccio.

⁶⁰ Eguagliare il calore assorbito dal calorimetro e dall'acqua inizialmente contenuta a quello dell'acqua che vi viene versata

⁶¹ Bisogna guardare l'energia assorbita nella fusione che si legge dal diagramma

	Sostanza	Calore Specifico [J kg ⁻¹ K ⁻¹]	Calore latente [kJ kg ⁻¹]	Temperatura di fusione [K]
<input type="checkbox"/> A	Ferro	440	234	1808
<input type="checkbox"/> B	Mercurio	140	12	234
<input type="checkbox"/> C	Piombo	129	24	601
<input type="checkbox"/> D	Rame	385	212	1358
<input type="checkbox"/> E	Zinco	390	101	693

A B **C** D E

2.5 Problemi di fine capitolo

1. Potere calorico dei combustibili

Esercizio: Il potere calorico del gasolio $\lambda_g = 10'200$ kcal/kg, mentre quello del metano $\lambda_m = 8'950$ kcal/m³ con una densità $\delta = 0.678$ kg/m³.

a) Determinare λ_m in kcal/kg.

b) Se per fornire l'energia termica Q occorre bruciare $m_g = 2.5$ kg di gasolio quanto metano m_m bisogna bruciare?

⊗

$$\lambda_m = \frac{8'950 \text{ kcal/m}^3}{0.678 \text{ kg/m}^3} = 13'200 \text{ kcal/kg.}$$

A parità di calore la massa di combustibile è inversamente proporzionale al potere calorico e dunque:

$$m_m \lambda_m = m_g \lambda_g \text{ da cui } m_m = \frac{m_g \lambda_g}{\lambda_m} = \frac{2.5 \cdot 10'200}{13'200} = 1.93 \text{ kg}$$

⊙

2. Conservazione dell'energia in presenza di forze non conservative: una rondella che cade

Esercizio: Una rondella di ferro scivola lungo una corda di nylon di massa trascurabile e di lunghezza l_0 . Si conoscono la forza d'attrito dinamico F_a e il coefficiente di elasticità k del filo. Determinare la quantità di calore prodotto e la quota del lavoro della forza d'attrito che si trasforma in calore.

Suggerimento: indicare con l la lunghezza del filo quando la rondella lo abbandona e prestare attenzione al fatto che le forze dissipative sono due quella dell'attrito sulla rondella e quella dell'attrito sul filo e che queste forze non compiono lo stesso lavoro perché lo spostamento della forza d'attrito che agisce sulla rondella è l_0 mentre lo spostamento della forza che agisce sulla corda è $l - l_0$.⁶²

⊗

3. Determinazione di un calore radiante

Esercizio: Una lampada ad incandescenza di potenza $P = 100$ W viene immersa in un calorimetro trasparente contenente $V = 800$ cm³ di acqua. Se in $\tau = 4'$ l'acqua viene riscaldata di $\Delta T = 5.5^\circ\text{C}$ si trovi la frazione di energia che non rimane nel calorimetro e viene invece irradiata?⁶³

⊗

4. Conducibilità di pareti in serie e in parallelo

Esercizio: Si considerino delle pareti di materiale diverso con coefficiente di conducibilità λ_1 e λ_2 rispettivamente. Le pareti hanno la stessa sezione σ e lo stesso spessore d . Trovare il coefficiente di conducibilità equivalente nel caso in cui le due pareti:

⁶² Alla fine si trova che $Q = F_a l_0 + \frac{F_a^2}{2k}$

Per quanto riguarda i lavori $\mathcal{L}_1 = F_a l_0$ va completamente in calore mentre \mathcal{L}_2 viene per metà convertito in calore e l'altra metà incrementa la energia potenziale elastica della corda.

⁶³ La energia emessa alla lampada è di 24.0 kW mentre quella che finisce nel bagno si trova essere 18.4 kW pertanto la frazione irradiata è $5.6/24 \cdot 100 = 23.3 \%$

- a) vengano messe in serie, cioè collocate una dopo l'altra a formare una parete di spessore $2d$. In questo caso se le temperature agli estremi sono T_1 e T_2 quanto vale la temperatura nella zona di separazione?
- b) vengano messe in parallelo, cioè affiancate a formare una unica parete di area 2σ . In questo caso la potenza P come si ripartisce tra le due pareti?
- c) Dimostrare che, dal punto di vista della conducibilità, il collegamento in parallelo è più conveniente ⁶⁴

5. Olimpiadi prova di Il livello 2002: rapporto tra calore specifico e calore latente

Esercizio: Un liquido viene portato all'ebollizione assorbendo da un fornello una potenza P costante.

Il recipiente che lo contiene ha capacità termica trascurabile. Appena prima dell'ebollizione la temperatura del liquido cresce di 4 K al minuto e nei successivi 40 minuti tutto il liquido vaporizza.

Determinare il rapporto fra il calore specifico c del liquido e il calore latente di vaporizzazione L .



Indichiamo con m la massa del liquido e con Δt un generico intervallo temporale nel corso del quale il liquido cambia la sua temperatura di ΔT . Sarà allora (visto che $P\Delta t$ indica l'energia assorbita dal liquido):

$$P\Delta t = m c \Delta T$$

Indicato con τ il tempo necessario alla evaporazione una volta che si sia raggiunta la temperatura di ebollizione sarà:

$$P\tau = m L$$

Se si passa al rapporto si ha:

⁶⁴ a) Se le pareti sono in serie sono attraversate dallo stesso flusso. Si scrive la legge di Fourier per entrambe e si trova dapprima la temperatura T_3 intermedia che risulta pari alla media ponderata delle temperature $T_3 = \frac{\lambda_1 T_1 + \lambda_2 T_2}{\lambda_1 + \lambda_2}$. Da qui si trova, calcolando

il flusso della prima parete, $P = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2} \frac{\sigma}{d} (T_1 - T_2)$ e poiché la parete equivalente ha spessore $2d$ ne consegue che $\lambda = 2 \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2}$ Cioè alla media armonica (inverso della media degli inversi).

b) nel caso del parallelo i due flussi sono proporzionali ai rispettivi λ mentre per il flusso totale si ha $P = (\lambda_1 + \lambda_2) \frac{\sigma}{d} \Delta T$ e dunque tenendo conto che la parete equivalente ha sezione 2σ si ha che $\lambda = \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{2}$

c) chi è più grande tra $\lambda' = \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{2}$ e $\lambda'' = 2 \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2}$?

$\frac{\lambda_1 + \lambda_2}{2} \geq 2 \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2} \Leftrightarrow (\lambda_1 + \lambda_2)^2 \geq 4\lambda_1 \lambda_2 \Leftrightarrow (\lambda_1 - \lambda_2)^2 \geq 0$ sempre; dunque se si deve agevolare la conduzione si usa il collegamento in parallelo mentre se si deve impedirli si usa quello in serie.

$\frac{c}{L} = \frac{\Delta t}{\Delta T \cdot \tau}$ Il problema appare sottodeterminato perché conosciamo τ ma sono ignoti sia Δt sia ΔT , ma così non è; basta riflettere sui dati:

$$\frac{60 \Delta T}{\Delta t} = 4 \text{ K/l' e pertanto } mc = P \frac{\Delta t}{\Delta T} = P \frac{60}{4} = 15 P \text{ e dunque } \frac{\Delta t}{\Delta T} = 15$$

$$\frac{c}{L} = \frac{15}{\tau} = \frac{15}{40 \cdot 60} = \frac{1}{160} \text{ K}^{-1}$$



6. Olimpiadi Il livello 1996 problemi: umidità relativa e punto di rugiada

Esercizio: L'aria si dice satura di vapor acqueo quando è in equilibrio termodinamico con l'acqua nella fase liquida. Si definisce *umidità relativa* (o grado di umidità) il rapporto tra la massa di vapor acqueo presente in un dato volume d'aria atmosferica e la massa di vapor acqueo necessaria per saturarlo. Convenzionalmente l'umidità relativa si esprime in percentuale.⁶⁵

Il *punto di rugiada* è il valore della temperatura al di sotto del quale il vapor acqueo presente nell'aria diventa saturo e si condensa sotto forma di goccioline. Il punto di rugiada dipende, quindi, dalla quantità di vapore acqueo presente nell'aria.

Alcuni valori della densità di vapor saturo sono forniti in funzione della temperatura nella tabella accanto.

t °C	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24
δ g/cm ³	4.85	5.53	6.33	7.23	8.21	9.40	10.6	12.0	13.5	15.3	17.3	19.3	21.5

Un appartamento viene arieggiato mentre l'aria esterna ha una temperatura di 2°C e un'umidità relativa del 25%. Dopo che si è stabilito l'equilibrio con l'ambiente esterno, le finestre vengono chiuse e la temperatura dei locali viene innalzata fino a 22°C. Calcolare l'umidità relativa interna all'abitazione.

Tale livello di umidità relativa risulta sgradevolmente secco. Se si suppone costante la pressione dell'aria nell'appartamento, che ha un volume $V = 270 \text{ m}^3$, quanta acqua si dovrebbe far evaporare all'interno dell'abitazione per portare l'umidità relativa ad un valore del 52 % che risulta molto più gradevole?

Un bicchiere freddo, contenente una bevanda, viene tolto dal frigorifero e posto nell'appartamento umidificato al 52 %. Se sulla parete esterna del bicchiere si osserva una condensazione di vapor acqueo, determinare la massima temperatura T che la bevanda può aver raggiunto.



Dalla lettura della tabella si osserva che la densità del vapor saturo alla temperatura di 2 °C vale $\delta_2 = 5.53 \text{ g/m}^3$. Pertanto visto che dopo l'arieggiamento la umidità relativa è del 25% la densità del vapore presente nell'aria sarà pari a:

$$\delta'_2 = 0.25 \cdot 5.53 = 1.38 \text{ g/m}^3$$

⁶⁵ Le problematiche legate alla evaporazione e ai concetti di vapor saturo e tensione di vapore sono affrontati nel capitolo dedicato alla teoria cinetica dei gas.

Il testo non dice come avviene il riscaldamento dell'aria ma si può ipotizzare che esso avvenga a pressione costante (quella atmosferica) in modo che la densità del vapore risulti inversamente proporzionale alla temperatura ⁶⁶.

Se la trasformazione è a pressione costante dalla equazione del gas perfetto (visto che n è proporzionale alla massa) si può affermare l'esistenza di una proporzionalità inversa tra densità e temperatura assoluta ovvero sarà:

$$\frac{\delta'_2}{\delta'_{22}} = \frac{T_{22}}{T_2} \text{ e dunque } \delta'_{22} = \delta'_2 \frac{T_2}{T_{22}} = 1.38 \frac{273 + 2}{273 + 22} = 1.29 \text{ g/m}^3$$

Ma alla temperatura di 22° C la densità del vapore saturo vale 19.3 g/m³ e pertanto l'umidità relativa è:

$$u = \frac{1.29}{19.3} = 0.0667 = 6.67 \%$$

Per portare l'umidità relativa al 52% bisogna che la densità del vapore acqueo acquisti un valore pari a $\delta'' = 0.52 \cdot 19.3 = 10.0 \text{ g/m}^3$ e ad una tale variazione di densità deve corrispondere la evaporazione di una massa d'acqua

$$\Delta m = (\delta'' - \delta') V = (10.0 - 1.29) \cdot 270 = 2.35 \cdot 10^3 \text{ g} = 2.35 \text{ kg.}$$

Se si mette un bicchiere sufficientemente freddo in un ambiente con del vapore si avrà la condensazione del vapore per tutti i valori di temperatura inferiori a quella per cui la densità del vapore corrisponde a quella del vapor saturo. Questo valore di temperatura è la temperatura di rugiada e può essere trovata interpolando la tabella per il valore $\delta = \delta''$.

Se eseguiamo una interpolazione lineare tra i due valori dell'intervallo che contiene il valore desiderato avremo:

$$t_r = 10 + \frac{12 - 10}{10.6 - 9.40} (10.0 - 9.40) = 10 + 1.0 = 11.0^\circ \text{ C}$$



⁶⁶ Questa assunzione è abbastanza arbitraria perché in un ambiente chiuso dovrebbe aumentare la pressione e in un ambiente aperto si dovrebbero invece avere perdite di gas verso l'esterno e in tal caso non sarebbe lecito ipotizzare la proporzionalità inversa tra densità e temperatura.

Indice analitico

- acqua*: andamento anomalo della densità - 16; termoregolazione - 16; una sostanza molto particolare - 16
- anni 30 e 40 dell'ottocento*: stato delle ricerche - 18
- approccio riduzionista*: approccio termodinamico - 1
- calore*: non è una grandezza fisica ma un nome - 3; trasferimento di energia interna - 4
- calore di reazione*: definizione da una legge - 10
- calore latente di evaporazione*: definizione da una legge - 10
- calore latente di fusione*: definizione da una legge - 10
- calore specifico*: definizione da una legge - 10
- calori specifici e calori latenti*: tabella - 10
- calorimetri*: misuratori delle variazioni di energia interna - 5
- calorimetro ad acqua*: equazione di stato - 15
- capacità termica*: definizione - 10
- capitolo*: scopo; connettere energia interna ed energia meccanica - 1
- coefficiente di conduzione*: definizione e tabella - 10
- condizioni di equilibrio*: in termodinamica; cosa si trascura volutamente - 2
- conduzione del calore*: conduzione, convezione, irraggiamento - 7
- energia*: principio unificatore - 18
- energia interna*: definizione - 4; definizione a meno di una costante - 5; lavoro in ambiente adiabatico - 3; regolarità della natura - 6
- equazione di stato*: lega i parametri di stato - 3
- equivalente in acqua del calorimetro* - 15
- Esercizio*: Calcolo dell'energia necessaria per fondere e per riscaldare - 14; Conducibilità di pareti in serie e in parallelo - 40; Conservazione dell'energia in presenza di forze non conservative; una rondella che cade - 40; Contatto tra metalli diversi - 14; Determinazione di un calore radiante - 40; dimensionamento di uno scaldabagno - 11; Miscela di acqua e ghiaccio riscaldata da un fornello - 12; Olimpiadi II livello 1996 problemi; umidità relativa e punto di rugiada - 42; Olimpiadi prova di II livello 2002; rapporto tra calore specifico e calore latente - 41; Parete a due strati - 13; Potere calorico dei combustibili - 40; Potere calorico del legno - 12; Rame che scioglie del ghiaccio - 11; Riscaldamento di una lastra di marmo irradiata dal Sole - 14; Solidificazione nel vuoto di una massa d'acqua - 13
- funzioni di stato*: grandezze senza memoria - 3
- ghiaccio*: ottimo isolante - 16
- Helmholtz*: il programma di ricerca - 21; sulla conservazione della forza; $kraft=energia$ - 21
- Joule*: anni 40 dell'800 - 4; citazione; descrizione del mulinello - 19; conversione dei dati sperimentali in unità del SI - 20; determinazione sperimentale equivalenza tra calore e lavoro - 19
- lavoro di forze esterne*: in ambiente adiabatico dipende solo dallo stato iniziale e finale - 4

legge di Fourier - 11

Mayer: ambito di ricerca - 18

parametri di stato - 2

primo principio della termodinamica - 4; enunciato - 17

principio di conservazione dell'energia: formulazione generale - 17

Problemi di fine capitolo - 40–43

quantità di calore: definizione - 8

Quesiti dalle Olimpiadi della Fisica - 27–39

Quesiti di fine capitolo - 23–26

Riassumiamo: energia in meccanica - 1

riscaldamento: parola ambigua perchè ha 2 significati - 9

scambi termici: calore ceduto e assorbito - 9

scambio di calore: scambio termico; trasferimento di energia interna senza lavoro - 7

sistema isolato adiabaticamente - 3

sistemi isolati adiabaticamente: indispensabili per definire l'energia interna - 3

teoria molecolare - 7

variazione di energia interna: calore e lavoro; convenzioni sui segni - 17

vaso Dewar: ambiente adiabatico - 8

verifica di quantità misurabili - 5

