

Difficoltà di apprendimento degli studenti in termodinamica: gettare un ponte tra micro e macro

Massimiliano Malgieri, Università di Pavia

Claudio Sutrinì, Università di Pavia



AIF Pavia – 43° Corso di aggiornamento in
Fisica – 6 Ottobre 2021



Le due lezioni che vi proporremo sono divise nel modo seguente:

- Nella prima verrà dato ampio spazio ad una panoramica delle difficoltà note degli studenti nello studio della termologia e termodinamica, derivanti soprattutto dalla letteratura di ricerca internazionale.
- Sempre nell'ambito della prima lezione, verrà presentato lo schema di un percorso didattico elaborato dal nostro gruppo, costruito progressivamente attraverso le tesi di Laurea Magistrale di Anna Valentini (2017) e di Monica Di Savino (2019).
- Nella seconda lezione, gli aspetti sperimentali / di laboratorio del percorso verranno affrontati direttamente.

Primo biennio:

Lo studio dei fenomeni termici definirà, da un punto di vista macroscopico, le grandezze temperatura e quantità di calore scambiato introducendo il concetto di equilibrio termico e trattando i passaggi di stato.

Secondo biennio e quinto anno:

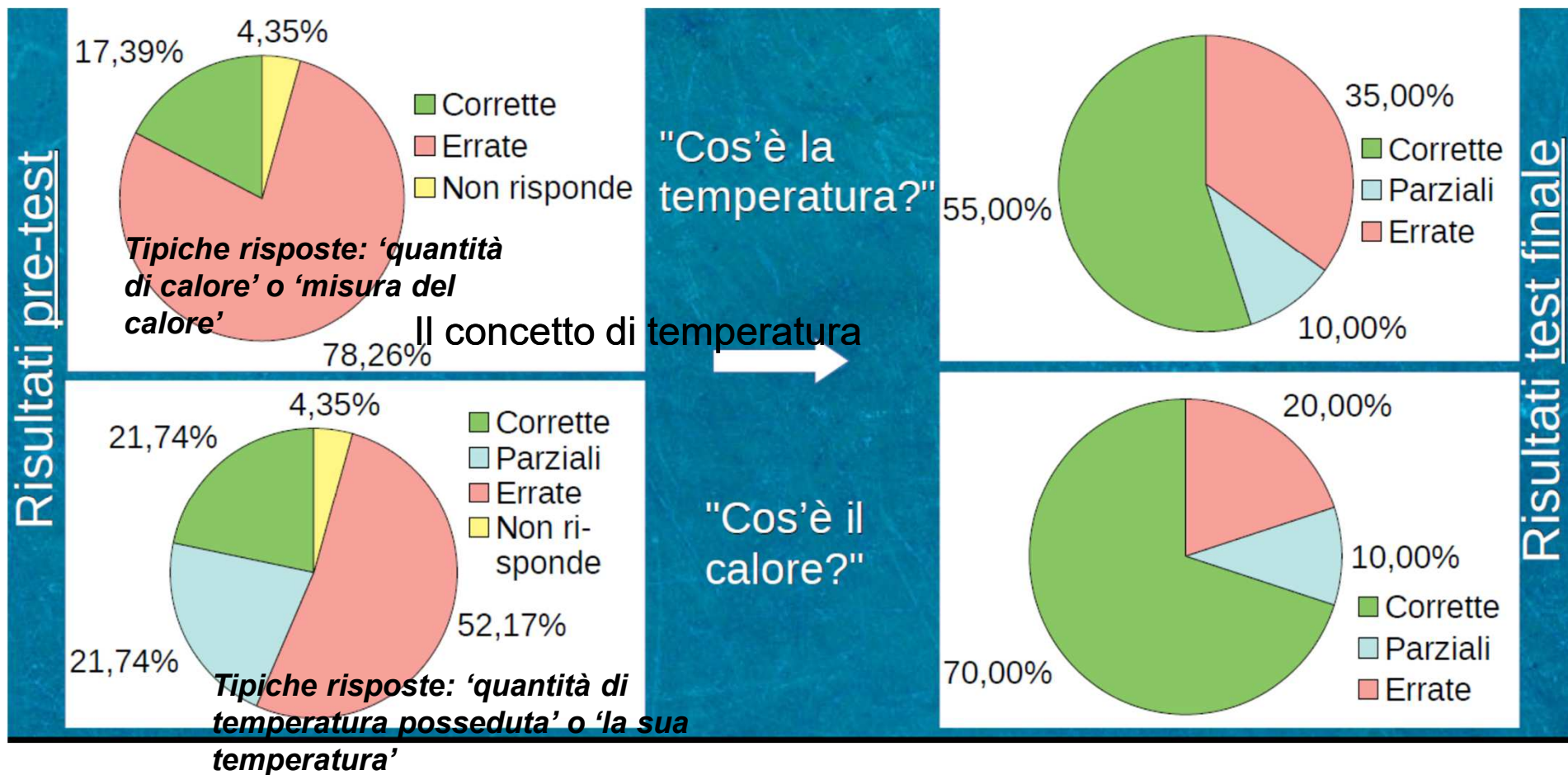
Si completerà lo studio dei fenomeni termici con le leggi dei gas, familiarizzando con la semplificazione concettuale del gas perfetto e con la relativa teoria cinetica; lo studente potrà così vedere come il paradigma newtoniano sia in grado di connettere l'ambito microscopico a quello macroscopico. Lo studio dei principi della termodinamica permetterà allo studente di generalizzare la legge di conservazione dell'energia e di comprendere i limiti intrinseci alle trasformazioni tra forme di energia, anche nelle loro implicazioni tecnologiche, in termini quantitativi e matematicamente formalizzati.

- Nonostante nel documento venga sottolineata l'importanza del legame tra gli ambiti ambito macroscopico e microscopico, la maggior parte dei libri di testo della scuola secondaria segue un approccio alla disciplina prevalentemente macroscopico, relegando la trattazione microscopica ad approfondimenti o sezioni presenti al termine del capitolo: così facendo, viene spesso lasciata agli studenti l'impressione che l'approccio microscopico abbia una valenza culturale ma non fornisca alcun nuovo contenuto fisico significativo.
- All'interno di queste trattazioni prevalentemente macroscopiche, l'entropia, ad esempio, rimane per gli studenti una quantità misteriosa, il cui significato fisico risulta spesso poco chiaro.
- Inoltre, secondo diversi autori, trascurare l'aspetto microscopico conduce anche a incomprensioni per quanto riguarda il primo principio e le trasformazioni termodinamiche.

Il concetto di temperatura

- La comprensione del concetto di temperatura e la sua differenziazione rispetto a quello di calore giocano un ruolo essenziale nella comprensione della termodinamica.
- La confusione tra calore e temperatura, esemplificata dalla famosa definizione erronea della temperatura come 'quantità di calore contenuta in un corpo' è presente fino al livello universitario.
- Altre tipiche definizioni erranee di temperatura sono 'intensità di calore', o semplicemente come sinonimo di calore. L'incidenza di queste difficoltà è confrontabile con quella delle difficoltà sul terzo principio della dinamica (quindi molto elevata).
- E' importante, fin dall'inizio, presentare la termodinamica come legata alla natura della materia e fornire un'interpretazione microscopica del concetto di temperatura. Le difficoltà risultano, tuttavia, piuttosto robuste.

I concetti di temperatura e di calore: risultati test pre-post (Di Savino, 2019)



Il concetto di temperatura

- Una delle difficoltà è che alcuni aspetti dell'insegnamento del concetto di temperatura vanno in conflitto diretto con i nostri dati sensoriali. La maggior parte degli studenti (e delle persone) interpretano il tatto come un sensore di temperatura, mentre non è esattamente questo.
- Molti studenti possono pensare la temperatura come una proprietà dei materiali, nel senso che alcuni materiali siano 'naturalmente' più caldi o più freddi di altri.
- Gli studenti possono avere grandi difficoltà ad accettare che, dopo essere rimasti molto tempo nello stesso ambiente, oggetti di diversi materiali si trovino alla stessa temperatura, come prevede il concetto fondante di equilibrio termico (Thomaz et al, 1995). Inoltre gli studenti possono pensare che se si trovano nello stesso ambiente, i liquidi siano più freddi dei solidi.

Il meccanismo del tatto per la sensibilità termica

- Similmente a come la comprensione del meccanismo della visione è imprescindibile per giungere a capire i fenomeni legati al colore, una discussione delle proprietà del tatto è importantissima (ma spesso trascurata) per la comprensione dei fenomeni termici.
- Il senso del tatto non è, propriamente, un sensore di temperatura. Tuttavia, in assenza di termometri, esso è l'unica fonte dalla quale noi riceviamo informazioni sulla temperatura.
- In realtà, la sensazione di caldo o freddo deriva da un sistema complesso di sensori, fra cui giocano un ruolo importante quelli che misurano *rapidità della variazione di temperatura della pelle* in contatto col corpo toccato.
- Questa evidentemente non dipende soltanto dalla temperatura del corpo toccato, ma da altri suoi parametri, in particolare dalla conducibilità del materiale.

Question 1

At bedsides there are usually woollen rugs that you can put your feet on when getting out of the bed.

1.1 How do you explain the different sensations you feel when putting your feet either on a stone floor or on a woollen rug?

1.2 If you could put thermometers in close contact with the stone of the floor and with the wool of the rug you would expect that:

- the temperature of the stone was higher than that of the wool;
- the temperature of the stone was lower than that of the wool;
- the temperature of the stone was practically the same as that of the wool.

Domanda da Thomaz et al., 1995. Oltre il 90% degli studenti del campione (scuola secondaria) fornisce risposte errate a questa domanda nel pre-test.

Explain your answer.

La temperatura come proprietà dei materiali

Name	Character of intuitive concept	Prototypic circumstances	Surprising extensions
Cold metal	Metals attract, hold, or absorb cold Conductors conduct heat more slowly than insulators	Touching a variety of objects all at room temperature or in a cold environment	Use of aluminum foil for wrapping cold objects in order to keep them cold
Insulators conduct	Insulators conduct heat fast and heat leaves so insulators don't feel hot Insulators absorb/trap heat	A wooden spoon/insulator standing in boiling water Touching a variety of objects all at room temperature	Insulator as best material to allow sensation of warmth from an object
Hot wool	Wool warms things	Surrounding an object in wool to keep it warm because it warms things	Wool cannot be used as an insulator for cold things

Conclusioni di Lewis e Linn (2003) basati su interviste cliniche sviluppate intorno a domande simili a quella precedente. Le idee che i metalli possano naturalmente trattenere il freddo, e che la lana possa riscaldare gli oggetti, sono riportati da diversi altri autori.

Temperatura: intensiva o estensiva?

- Gli studenti possono pensare alla temperatura come alla 'quantità di calore', il quale viene percepito come una sorta di fluido o sostanza (Ericson, 1979; Jara-Guerro, 1993), in analogia con la teoria storica del *calorico*.
- Gli studenti che utilizzano tale teoria ingenua saranno portati a pensare alla temperatura come a una quantità *estensiva* anziché *intensiva*.

1. Cup A contains 100 grams of water at 0°C but cup B contains 200 grams of water at 50°C . The contents of the two cups are mixed together in an insulated container (no heat transfer occurs). When it reaches thermal equilibrium, what is the final temperature of the water in the container?

- A) Between 0°C and 25°C
- B) 25°C
- C) Between 25°C and 50°C
- D) 50°C
- E) Higher than 50°C

Prima domanda del Thermodynamics Concept Survey (TCS). Gli ultimi due distrattori alludono ad una interpretazione della temperatura come quantità estensiva.

- Gli studenti pre-istruzione non hanno, solitamente alcun modello microscopico della temperatura. Il collegamento con la teoria della materia non porta tuttavia necessariamente ad acquisire idee scientificamente corrette.
- Talvolta, anche piccoli abusi di linguaggio o immagini particolarmente fuorvianti contenute nei libri di testo possono peggiorare la situazione.

Temperatura: immagini dei libri di testo

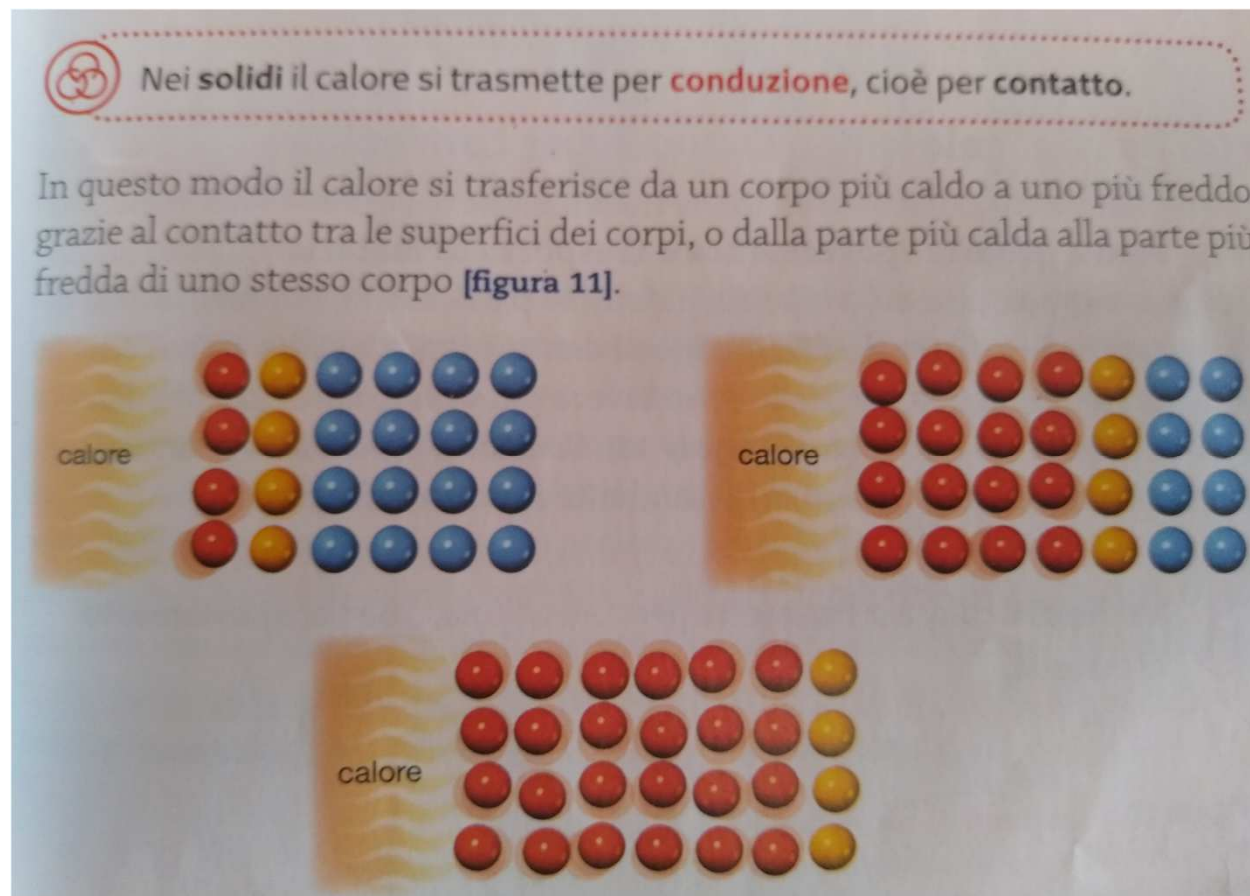


Immagine contenuta in un libro di scienze per la scuola media (Focus Natura – Green). Nonostante l'intenzione di fornire una rappresentazione microscopica, essa può generare la persistente concezione alternativa che gli atomi o le molecole stesse possano essere più caldi o freddi, anziché più o meno rapidi (l'idea del movimento è qui per la verità accennata, ma prevale la rappresentazione del colore).

Difficoltà con la legge dei gas perfetti

- La legge dei gas perfetti è difficile da comprendere appieno per gli studenti perché si tratta di un'equazione con più di due variabili (Rozier e Viennot, 1991). Gli studenti tendono ad utilizzare spiegazioni causali lineari, che coinvolgono due sole variabili, e nel fare ciò commettono diversi tipi di errori.
- In molti casi, è la temperatura la variabile ad essere ignorata, se il problema non coinvolge un trasferimento di calore. Tuttavia, anche la pressione può essere ignorata, stabilendo un collegamento diretto tra volume e temperatura. Questo è dovuto alla notevole difficoltà a interpretare il concetto di pressione (già dalla statica dei fluidi) e/o a una sovrapposizione tra i modelli microscopici di pressione e temperatura.
- In alcuni casi, oltre ad ignorare una o più variabili, gli studenti stabiliscono relazioni errate tra esse a causa di un modello microscopico distorto o incompleto. È il caso degli studenti che affermano che una riduzione di volume porterà direttamente ad un aumento di temperatura (ignorando la pressione) perché aumenteranno le collisioni tra le molecole.

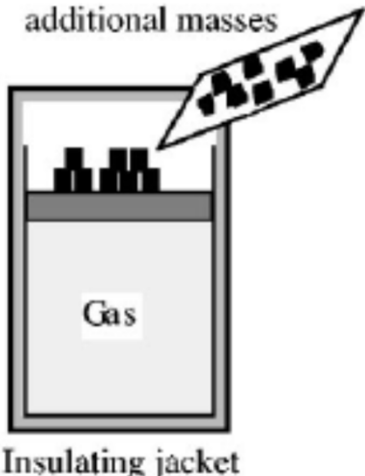
Il primo principio della termodinamica

- Ampiamente documentata (es. Loverude et al., 2002) è la difficoltà a comprendere che, compiendo lavoro ma senza trasferire calore (trasformazione adiabatica), si possa aumentare la temperatura di un sistema.

An ideal gas is contained in a cylinder with a tightly-fitting piston. Several small masses are on the piston.
(Neglect friction between the piston and the cylinder walls.)

The cylinder is placed in an insulating jacket. A large number of masses are added to the piston.

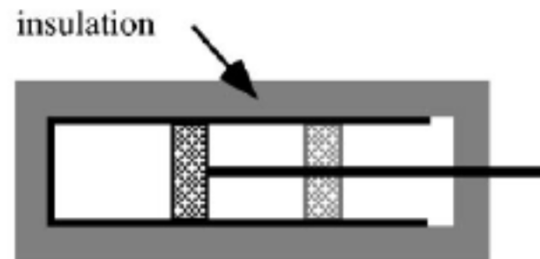
Tell whether the pressure, temperature, and volume of the gas will increase, decrease, or remain the same. Explain.



The diagram shows a vertical cylinder labeled 'Gas' inside a larger container labeled 'Insulating jacket'. The cylinder has a piston with several small black rectangular masses on top. An arrow points to the piston with the text 'additional masses', indicating that more masses are being added. The cylinder is shaded to represent the gas inside.

Il primo principio della termodinamica

A cylindrical pump contains one mole of an ideal gas. The piston fits tightly so that no gas escapes, but friction is negligible between the piston and the cylinder walls.



a. Version A

The pump is thermally isolated from its surroundings. The piston is quickly pressed inward as shown.

What will happen to the temperature of the gas? Explain your reasoning.

b. Version B

The piston is quickly pressed inward as shown. A sensor in the pump records an increase in temperature.

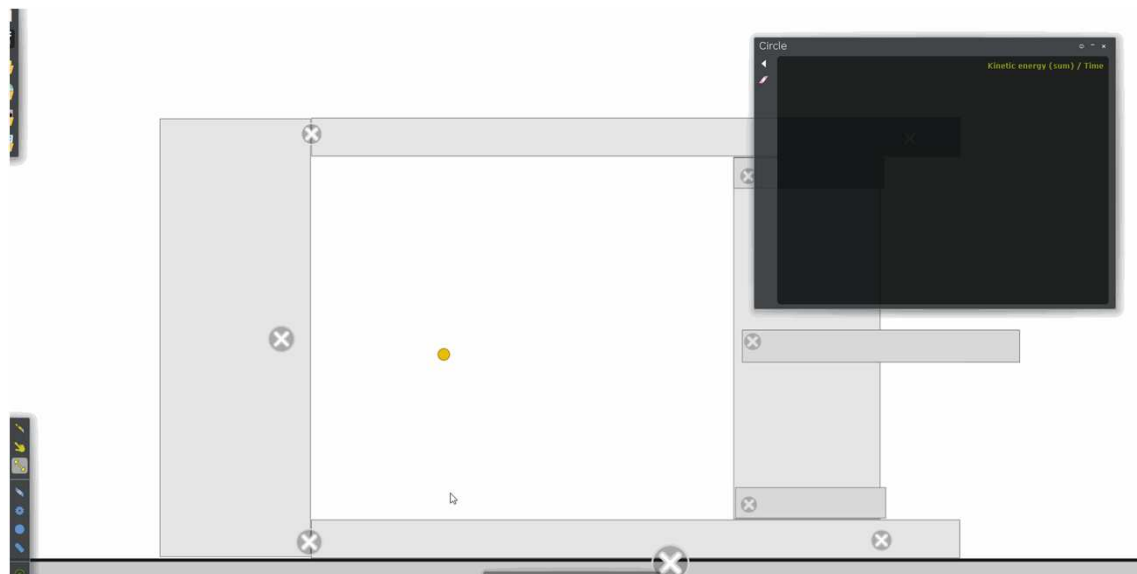
How can you account for the increase in internal energy of the gas? Explain your reasoning.

Il primo principio della termodinamica

- Molti degli studenti che comprendono come vi sia un aumento di temperatura, basano la loro spiegazione sull'equazione di stato dei gas perfetti, che non è sufficiente per spiegare in modo completo ed efficace l'aumento di temperatura in una compressione adiabatica.
- Gli autori trovano molti casi di difficoltà per gli studenti nel distinguere i concetti di energia interna e calore (in particolare), e/o di calore e lavoro. La disambiguazione di energia interna e calore va considerata con particolare attenzione in quanto secondo alcuni autori lo stesso utilizzo della frase "trasferimento di calore" induce questa difficoltà.
- Gli autori, inoltre, osservano notevoli difficoltà ad applicare alla termodinamica concetti derivanti dalla meccanica, che attribuiscono in gran parte alla mancanza di un modello mentale microscopico delle grandezze termodinamiche.

Il primo principio della termodinamica

- Altri autori hanno argomentato come gran parte delle difficoltà degli studenti con il primo principio possono essere superate o attenuate adottando in modo consistente un approccio microscopico. Infatti tale approccio permette di:
 - Distinguere e definire adeguatamente i concetti di temperatura, energia interna, calore.
 - Comprendere il meccanismo per il quale effettuare lavoro su un sistema termodinamico possa comportare un aumento della sua temperatura, anche in assenza di scambi di calore.



Il problema della definizione di calore

- Non esiste una definizione di calore sulla quale tutti i fisici siano d'accordo (Brookes ed Etkina, 2015). Si può dire tuttavia che ci sia un'opinione condivisa su ciò che il calore non è. Anche se è misurato in Joule ed è quindi una quantità di energia, il calore non è una forma di energia nello stesso senso in cui pensiamo all'energia cinetica o all'energia potenziale. Il calore non può essere una "normale" forma di energia perché non è una funzione di stato.
- Il calore è generalmente definito attraverso una delle due definizioni di energia "disordinata / casuale" (Helsdon, 1976) o "energia in movimento" / "energia in transito" (Zemansky, 1970). La seconda definizione è dominante sui manuali di fisica a livello introduttivo.
- Secondo alcuni autori, i residui linguistici della teoria del calorico presenti nel linguaggio della fisica andrebbero interamente eliminati; questo riguarda i termini "capacità termica" e soprattutto "trasferimento di calore", che appare particolarmente problematico in quanto il calore è, in sé, trasferimento di energia.

Il problema della definizione di calore

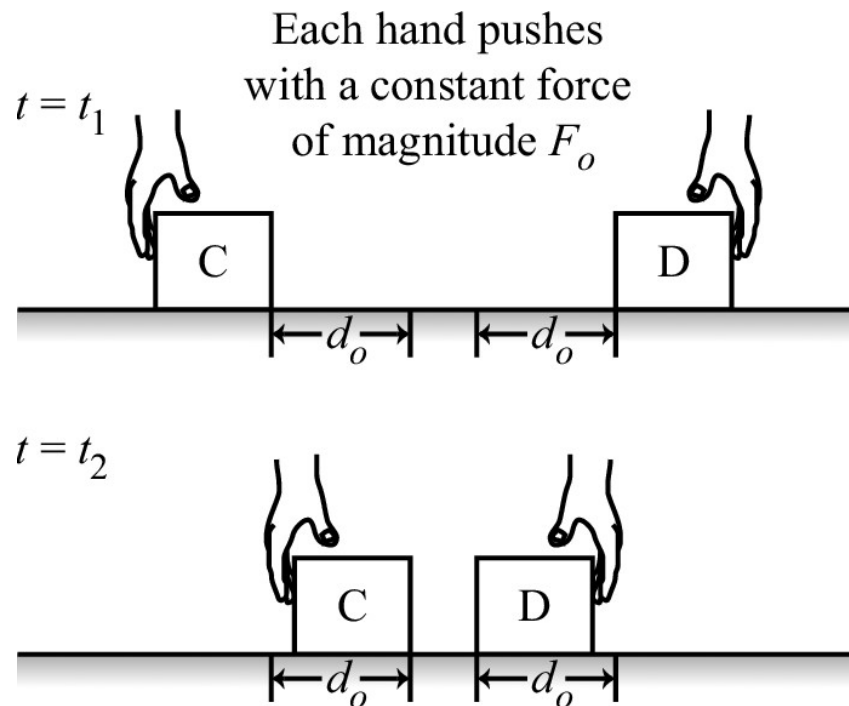
- Vi sono autori che hanno suggerito di eliminare interamente dalla fisica il "calore" come sostantivo, mantenendo solo il termine "riscaldamento" (*heating*) come nome di un processo, anziché di un oggetto. Questa proposta compare raramente nei libri di testo anglosassoni, mai in quelli di lingua italiana.
- Vi è la possibilità di definire il calore come un nome di origine storica, che viene dato all'energia trasferita quando essa transisce tra due corpi a causa della loro differenza di temperatura. Tuttavia, anche questa possibile definizione va in conflitto con utilizzi comuni del termine 'calore', come ad esempio la descrizione secondo cui nello sfregamento reciproco fra due corpi venga 'generato calore'.
- Besson propone di abolire entrambe le parole "calore" e "lavoro" e sostituirle con espressioni concettualmente più limpide, come trasferimento meccanico e trasferimento termico di energia.
- Il dibattito sulla migliore definizione di calore a livello didattico è lontano dall'essere concluso.

Il problema del segno del lavoro

- In molti libri di testo, il primo principio della termodinamica è introdotto utilizzando la cosiddetta 'convenzione ingegneristica', ossia $Q - L = \Delta U$. La ragione storica di questa convenzione sta nel fatto che generalmente si intendeva considerare macchine termiche, ossia sistemi che *assorbono* calore e *compiono* lavoro. Con la definizione indicata, entrambe le quantità Q ed L risultano essere positive per un'ordinaria macchina termica..
- Alcuni libri utilizzano tuttavia la 'convenzione fisica', ossia scrivono il primo principio della termodinamica nella forma $Q + L = \Delta U$. In questo caso, è positivo il calore *assorbito* dal sistema, e il lavoro compiuto *su* sistema. La forza che si sta considerando, in questo caso, è la resistenza esterna.
- In parte in ragione di questo, la scelta del segno del lavoro viene spesso definita come 'convenzionale'. Tuttavia, questo può rinforzare problemi sugli studenti nel calcolo del lavoro ben noti nello studio della meccanica, cioè autorizzarli a pensare che la scelta del segno del lavoro sia convenzionale *all'interno di uno stesso problema*, cioè che possa variare a seconda del sistema di riferimento scelto.

Difficoltà degli studenti col segno del lavoro in meccanica

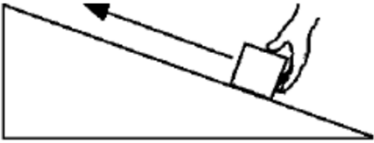
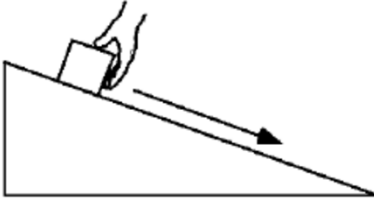
Nell'apprendimento della meccanica molti studenti possono considerare il lavoro come positivo o negativo a seconda della scelta del sistema di riferimento. Ad esempio, nel problema in figura, nel quale viene chiesto di indicare se il lavoro totale compiuto sul sistema sia positivo, negativo o nullo, circa la metà degli studenti risponde che il lavoro è nullo, perché i lavori fatti sui due bocchi sono uguali e di segno opposto (Lindsay et al., 2009)



Trasportata alla termodinamica, questa difficoltà potrebbe impedire agli studenti di riconoscere che il lavoro nelle espansioni e nelle compressioni ha segno opposto perché si prende in considerazione il lavoro della *stessa* forza; e viceversa, osservare che il lavoro ha segno opposto per compressioni ed espansioni potrebbe rinforzare questa difficoltà.

Altre difficoltà degli studenti con il concetto di lavoro

- In effetti, la tendenza degli studenti è di considerare sempre solo il lavoro prodotto dalla forza che causa il movimento, essi hanno tipicamente problemi a considerare, il lavoro, ad esempio, di una forza di reazione che si oppone a quella che spinge un corpo in moto. (Loverude et al., 2002)

<p>Case 1: The block moves up the incline and speeds up.</p>  <p>frictionless incline</p>	<p>Case 2: The block moves down the incline and slows down.</p>  <p>frictionless incline</p>
<p><i>Tell whether the following quantities are positive, negative, or zero. Explain.</i></p> <ul style="list-style-type: none">• <i>the work done on the block by the hand</i>• <i>the work done on the block by the earth</i>• <i>the work done on the hand by the block (if there is no such work, state so)</i>	

- Un altro problema che si pone è che, per molti studenti, la connessione tra calore e temperatura è così forte che il concetto di lavoro appare loro quasi come superfluo in termodinamica.

Molti manuali definivano l'energia come **capacità di compiere lavoro**, seguendo Maxwell (1871):

"the energy of a body may be defined as the capacity which it has of doing work, and is measured by the quantity of work which it can do".

- Questa definizione contrasta tuttavia con il secondo principio della termodinamica.
- La modificazione della definizione in **capacità di produrre cambiamenti** può essere soggetta a critiche simili alla precedente

Secondo molti autori (e.g. Besson) qualunque definizione semplice e breve di energia dovrebbe essere evitata, sostituita da una costruzione concettuale progressiva.

Vi sono molte altre possibili concezioni alternative degli studenti su calore e temperatura, meno diffuse o riportate da meno autori:

- La temperatura si può trasferire da un corpo a un altro
- Esistono il calore e il freddo, e entrambi si possono trasferire. Un corpo caldo contiene calore, un corpo freddo contiene freddo.
- I corpi o le sostanze possono contenere solo una quantità limitata di calore (idea secondo alcuni autori ispirata dal termine *capacità termica*).
- La temperatura è proporzionale al numero di urti fra molecole interne alla sostanza. Gli studenti con questo modello mentale tipicamente costruiscono un'idea distorta della legge dei gas perfetti, nella quale una riduzione di volume porta sempre di per sé, ad un incremento della temperatura.

Difficoltà legate al concetto di entropia

Le difficoltà degli studenti nella comprensione del concetto di entropia sono molto studiate, anche se spesso gli studi sono relativi al livello universitario. Fra queste possiamo menzionare:

- Difficoltà nel connettere la definizione "macroscopica" di entropia (formula di Clausius) con quella microscopica (definizione di Boltzmann)
- Difficoltà nel concepire l'entropia come funzione di stato.
- Concezione dell'entropia come una quantità che deve sempre aumentare, (o la cui variazione deve essere sempre ≥ 0) anche per sottosistemi non isolati.
- Concezione dell'entropia come una quantità conservata, e/o come una forma di energia (mancata disambiguazione con il concetto di energia)
- Difficoltà nel comprendere la relazione tra l'entropia del sistema e quella dell'ambiente

L'entropia come quantità conservata

A subsystem A is in thermal contact with its environment B , which together comprise an isolated system. Consider the following situations:

- I. Entropy of system increases by 5 J/K; entropy of the environment decreases by 5 J/K.
- II. Entropy of system increases by 5 J/K; entropy of the environment decreases by 3 J/K.
- III. Entropy of system increases by 3 J/K; entropy of the environment decreases by 5 J/K.
- IV. Entropy of system decreases by 3 J/K; entropy of the environment increases by 5 J/K.

Which of the above four situations can actually occur in the real world?

- A. I only
- B. II only
- C. III only
- D. II and III only
- E. II and IV only **[correct]**

	Fall 2004, postinstruction (version A), $N=539$ (%)
(A) Total entropy remains the same.	54
(B) Total entropy increases and system entropy increases.	5
(C) Total entropy decreases and system entropy increases.	7
Answers B and C ^a	4
Total entropy increases and system entropy can increase <i>or</i> decrease (correct).	30

La tendenza degli studenti a considerare l'entropia come una quantità conservata è ben esemplificata da questo item da Christensen et al. (2009).

L'entropia come quantità conservata

An object is placed in a thermally insulated room that contains air. The object and the air in the room are initially at different temperatures. The object and the air in the room are allowed to exchange energy with each other, but the air in the room does not exchange energy with the rest of the world or with the insulating walls.

- a) During this process, does the entropy of the **object** [S_{object}] *increase, decrease, remain the same*, or is this *not determinable* with the given information? **Explain your answer.**
- b) During this process, does the entropy of the **air in the room** [S_{air}] *increase, decrease, remain the same*, or is this *not determinable* with the given information? **Explain your answer.**
- c) During this process, does the entropy of the object *plus* the entropy of the air in the room [$S_{\text{object}} + S_{\text{air}}$] *increase, decrease, remain the same*, or is this *not determinable* with the given information? **Explain your answer.**
- d) During this process, does the entropy of the **universe** [S_{universe}] *increase, decrease, remain the same*, or is this *not determinable* with the given information? **Explain your answer.**

	N=1184 (four samples) (%)	Preinstruction, concrete context, N=609 (three samples) (%)
Total entropy of (system+surroundings)/(object+air in the room) remains the same.	67 ± 8	71 ± 7
N-N-S: entropy change of (system and surroundings)/(object and air) not determinable, but total entropy remains the same.	26 ± 12	38 ± 8
I-D-S: entropy of (system/object) increases (decreases) and entropy of (surroundings/air) decreases (increases), but total entropy remains the same.	25 ± 10	22 ± 6

Un item simile in un contesto concreto. Anche qui, l'idea di conservazione dell'entropia, in diverse varianti, è predominante (circa il 70%).

L'entropia come quantità conservata

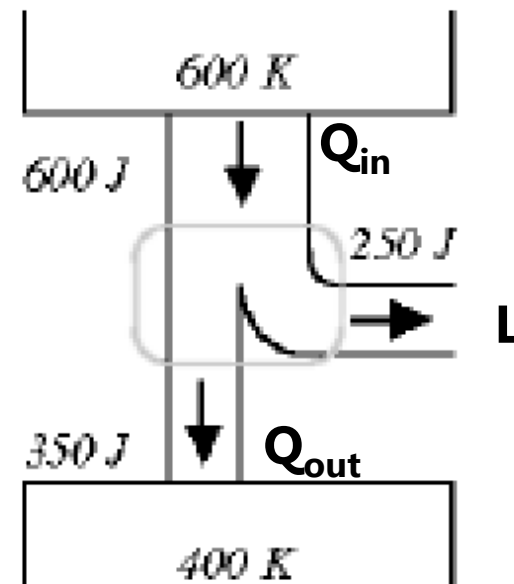
Secondo lo studio citato, l'idea dell'entropia come quantità conservata è una delle difficoltà prevalenti degli studenti.

Il problema è didatticamente delicato, perché un'enfasi eccessiva sul fatto che l'entropia NON è una quantità conservata può condurre all'idea errata di che essa debba sempre e comunque aumentare, oppure a difficoltà a concepirla come una funzione di stato.

Difficoltà collegate all'entropia come funzione di stato

- Ad un livello più avanzato, gli studenti possono abbandonare l'idea che l'entropia sia una quantità conservata, ma sviluppare in parallelo difficoltà a concepirla come una funzione di stato nel contesto dello studio delle macchine termiche.

Nella domanda sulla possibilità di realizzare in pratica la macchina termica mostrata in figura (Smith et al., 2009) gli studenti potrebbero rispondere che la macchina può essere realizzata pensando che l'entropia possa aumentare nel sistema, compensando la diminuzione di entropia dell'ambiente (non comprensione dell'entropia come funzione di stato).



1. La metafora dell'entropia come disordine è vaga.

Il primo problema della metafora del disordine è la vaghezza del termine stesso.

- La parola 'disordine' comunemente intesa ha una forte connotazione spaziale, e non riflette l'interpretazione più appropriata dell'entropia in relazione ai microstati disponibili. Inoltre la descrizione dell'entropia come disordine non specifica di per sé il livello di analisi al quale si manifesta quel disordine. Per esempio, cubetti di ghiaccio sparpagliati su un tavolo appaiono macroscopicamente disordinati, sebbene ovviamente i cubetti di ghiaccio stessi siano relativamente ordinati a livello molecolare. A quale livello di organizzazione si riferisce quindi il termine "disordine" (Donaldson 2011)?
- Una ricerca sugli studenti universitari di chimica ha confermato che gli studenti hanno difficoltà a comprendere il termine "disordine" (Sozbilir, 2001). Gli studenti intendevano "disordine" come caos, casualità o instabilità in alcuni casi, in altri lo associavano a un movimento rapido, giungendo a identificare l'entropia con l'energia cinetica.

2. Il disordine spaziale non rappresenta bene le caratteristiche dell'entropia

- Nella formulazione di Boltzmann, i microstati sono possibili modi di distribuzione dell'energia. L'entropia è quindi correlata al concetto di energia ma questa connessione è molto difficile da riconoscere usando la metafora del disordine spaziale è molto difficile da riconoscere (Granville 1985). Molti libri di testo enfatizzano il disordine in configurazioni spaziali (Song and He 2004; Wang 2007) con illustrazioni tipo fiammiferi sparsi come raffigurazioni di "maggiore entropia", tuttavia l'interpretazione di queste raffigurazioni è problematica.
- Il disordine spaziale può semplicemente riferirsi a una singola "istantanea" di un particolare sistema (cioè un microstato), mentre secondo la formulazione di Boltzmann l'entropia aumenta quando ci sono molti microstati disponibili, attraverso cui il sistema si muove dinamicamente.
- Non in tutte le situazioni il disordine visivo diminuisce mentre l'entropia aumenta.

3. La metafora non aiuta ad analizzare insieme l'entropia del sistema e dell'ambiente

- La metafora del disordine non aiuta a comprendere l'entropia in un modo che integri anche l'entropia totale dell'universo (Sözbilir e Bennett 2007). La metafora può essere di ostacolo nella comprensione di una caratteristica chiave del secondo principio, ossia che l'entropia totale dell'universo, non di un singolo sistema, non può diminuire (Carson e Watson 2002).
- Le esperienze di vita tipiche che riflettono la comprensione comune del disordine spaziale non sono, infatti, dal punto di vista del solo sistema in esame, processi spontanei (Lambert 1999). Una stanza da letto non diventa disordinata spontaneamente in senso fisico, in quanto il movimento di vestiti e altri oggetti nella stanza (sia per renderla 'ordinata' sia per renderla 'disordinata') rappresenta un processo non spontaneo reso possibile solo dalle azioni degli individui (e, in definitiva, associato a reazioni chimiche che aumentano l'entropia dell'universo).

Una metafora alternativa: l'entropia come grado di dispersione dell'energia

Una pentola calda disperde spontaneamente parte della sua energia nell'aria più fresca di una stanza. Inversamente, una stanza, anche se fresca, disperde una parte della sua energia in cubetti di ghiaccio più freddi che vi si trovino dentro. Ad una pressione elevata, se uno pneumatico per auto viene bucato, l'aria compressa tende a fuoriuscire e dissipare la sua energia più concentrata nell'atmosfera a pressione inferiore. A qualsiasi pressione, i gas ideali fluiranno spontaneamente in una camera nella quale sia fatto il vuoto, diffondendo l'energia.

Questi esempi motivano la possibile introduzione di una nuova metafora per rappresentare l'entropia: sistemi nei quali l'energia si trova ad essere distribuita in modo molto ineguale, nello spazio o su diversi gradi di libertà, sono sistemi a bassa entropia, perché l'energia tende invece a diffondersi in modo da essere distribuita in modo uniforme, nello spazio o sui diversi gradi di libertà.

Un punto di partenza: l'idea intuitiva di irreversibilità

2) Si consideri un pendolo che inizialmente è in oscillazione all'interno di una stanza. Il pendolo gradualmente rallenta fino a fermarsi. Ciò che è accaduto è che in innumerevoli urti con molecole d'aria il pendolo cede la sua energia cinetica alle molecole e infine si ferma.

Ora immagina lo stesso processo visto al contrario, come un film proiettato all'indietro. Il risultato è realistico?

Le leggi della meccanica impediscono che tutti gli urti si svolgano "al contrario" in modo che il pendolo prenda energia cinetica dalle molecole d'aria e da fermo cominci a oscillare con ampiezza crescente?

La termodinamica consente di spiegare perché in realtà questo processo non viene osservato?

- La domanda precedente esplora il rapporto tra irreversibilità intuitiva (legata in seguito all'irreversibilità termodinamica) e l'invarianza per inversione temporale delle equazioni del moto di Newton (paradosso di Loschmidt).
- In entrambe le sperimentazione (Malgieri et al., 2017, 2019) abbiamo ottenuto risultati molto incoraggianti dagli studenti di scuola secondaria con una sperimentazione con queste caratteristiche: 1) un approccio consistentemente microscopico, e 2) l'eliminazione della metafora dell'entropia come misura di disordine.

Una delle risposte degli studenti

“Ci si accorgerebbe subito se un pendolo da fermo cominciasse a muoversi spontaneamente e ci si accorgerebbe anche immediatamente che il filmato è proiettato al contrario. Il risultato infatti non è realistico: una volta che il pendolo ha ceduto energia cinetica non può riacquistarla, o meglio potrebbe, ma la condizione per cui lo farebbe sarebbe davvero poco probabile, tanto da poter essere considerata atipica. Le leggi della meccanica non impediscono che ciò avvenga, ma la condizione per cui avverrebbe consisterebbe nell'imprimere alle molecole d'aria la stessa velocità e facendo occupare loro la stessa posizione di prima; di conseguenza, nonostante sia possibile è davvero improbabile. Dal punto di vista termodinamico, capiterebbe che il sistema isolato= aria + pendolo, che si trova nella sua condizione di equilibrio, si discosti da essa. Ciò significa che si dovrebbe verificare una situazione antitermodinamica, per cui il sistema isolato si discosti dal suo stato di equilibrio, cioè di massima entropia. La possibilità che ciò avvenga è talmente poco probabile, che può essere considerata quasi nulla.”

Difficoltà specifiche di un approccio microscopico/statistico

An hospital in a certain city keeps record of the number of child births, dividing them into male and female. Which of the following cases is more likely to happen

- a) Among the next 10 children born, 8 will be female*
- b) Among the next 100 children born, 80 will be female*
- c) Cases a) and b) are equally likely to happen.*

- Molti autori hanno riportato, e la nostra esperienza personale sperimentazioni ha confermato, che domande come la precedente sono difficili per gli studenti (le risposte errate solitamente indicano l'alternativa c).
- In altre parole, vi è una diffusa mancata comprensione dell'idea che le fluttuazioni della media di un campione attorno alla media della sua distribuzione statistica diminuiscono con la grandezza del campione (concetto di media campionaria).
- La cosa non sorprende, perché si tratta di un argomento essenzialmente ignorato dalle indicazioni per i Licei (anche se presente in quelle per alcuni Istituti Tecnici) il che fa parte del dibattito sull'insegnamento della probabilità nei corsi di matematica. Questa difficoltà è tuttavia di notevole ostacolo nell'insegnamento della termodinamica da un punto di vista microscopico.