

FISICA DELLA CANDELA

Ledo Stefanini

*The guiding motto in the life of every
natural philosopher should be:
Seek simplicity and distrust it!
[Alfred Whitehead]*

AVVERTENZA PER GLI INSEGNANTI

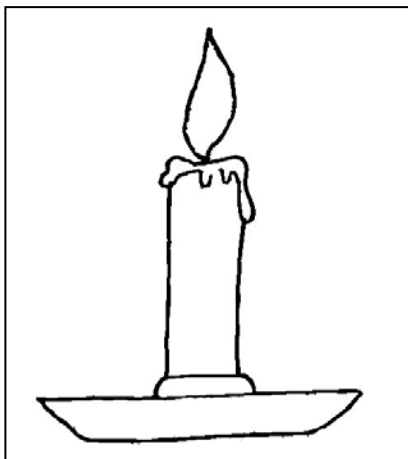
La capacità di meravigliarsi è propria della maturità culturale. La candela, la solita candela costituita da un cilindro di cera o paraffina con lo stoppino come asse, si può considerare un oggetto troppo semplice e facile da realizzare perché possa suscitare meraviglia; questo sarebbe però un atteggiamento superficiale e improntato sull'ignoranza dei processi che determinano il funzionamento della candela.

Quella che proponiamo con la presente scheda è un'attività inconsueta per la scuola italiana che non prevede quasi mai esperienze qualitative che abbiano come scopo quello di sollecitare le capacità di osservazione e riflessione personale dello studente. Inutile dire che, al contrario, la capacità di compiere osservazioni qualitative e di formulare ipotesi e, soprattutto, di scovare i problemi anche nei fenomeni che sembrano non presentarne, sarebbe una delle prime finalità dell'insegnamento. Prima di intraprendere questa attività didattica non possiamo non ricordare che Michael Faraday si occupò dello stesso soggetto in una serie di sei lezioni tenute nel 1860 presso la *Royal Institution of Great Britain* sotto il titolo "The Chemical History of a Candle". Il grande scienziato inglese, nelle sue lezioni, si è occupato dei fenomeni chimici; noi ci concentreremo su quelli fisici.

OSSERVAZIONI PRELIMINARI

Cominciamo da alcune banali **osservazioni di natura geometrica**:

1. Le candele hanno sempre forma cilindrica con un asse di simmetria rappresentato dallo stoppino. È vero che sono in vendita anche candele a sezione non circolare, ma si tratta di oggetti di arredamento, più atti a suscitare la curiosità che ad un vero e proprio funzionamento.
2. Le candele hanno dimensioni standard, con diametro nell'intervallo che va da 1 (circa) a 4 cm. È vero che sono in vendita anche candele di diametro inferiore (per esempio da applicare alle torte per i compleanni) ma la loro durata è troppo breve per poter fungere da sorgenti di luce.
3. Nel caso di diametri maggiori (candele votive) ciò che aumenta non sono le dimensioni della fiamma, ma solo la sua durata temporale. In altri termini, per realizzare una candela che arda a lungo, si può fare una candela di spessore normale molto lunga, oppure una candela corta, ma di diametro maggiore. Ciò che importa è il volume del cilindro.



Possiamo dire che tra il diametro d e l'altezza h di un insieme di candele di fissata durata sussiste la relazione:

$$d^2 h = \text{cost}$$

4. Le candele sono rettilinee e funzionano correttamente solo in posizione verticale. Se si inclina una candela, la fiamma rimane verticale.

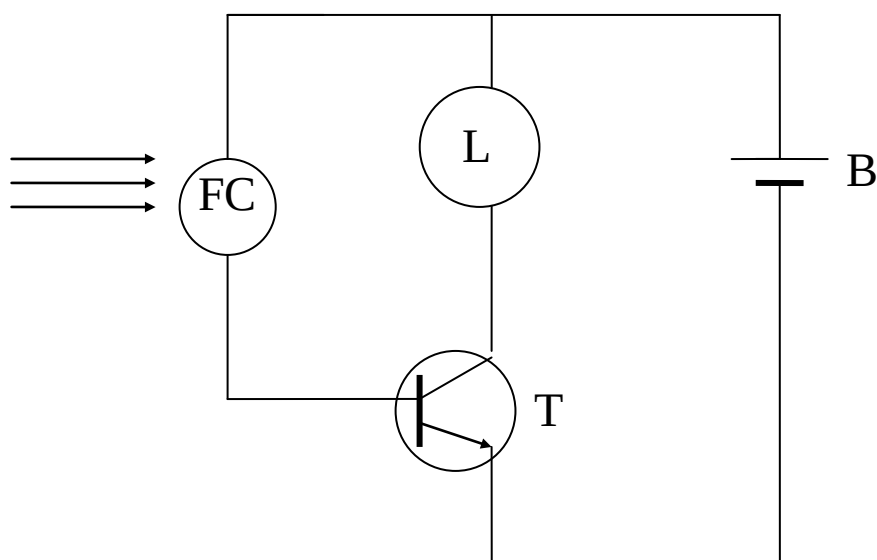
Per quanto riguarda il **funzionamento della candela**, proponiamo le seguenti osservazioni:

1. Il calore sviluppato dalla fiamma sale solo verso l'alto, come si può accertare ponendo una mano sulla verticale della fiamma, anche a grande distanza. Per contro, è possibile avvicinare un dito fino a poca distanza dallo stoppino, purché sia al di sotto della fiamma.
2. Le dimensioni della fiamma dipendono solo dalla lunghezza dello stoppino che emerge dalla cera.
3. La candela dev'essere "innescata". Una volta accesa, la combustione si mantiene da sé.
4. Se si interrompe la combustione per un momento, la candela rimane spenta.
5. Per spegnere la candela, basta soffiare sulla fiamma. La cosa è abbastanza sorprendente, perché soffiare su un braciere di legna o carbone è un modo per ravvivare la fiamma. D'altra parte è noto che la presenza di vento rende molto più difficile spegnere un incendio. Se si soffia sulla fiamma mediante una cannuccia ci si rende conto che l'effetto è molto diverso a seconda che il soffio sia diretto sul piede o sul corpo della fiamma. Se si soffia sul piede, la fiamma si spegne, se sul corpo la fiamma si piega, ma si ravviva.
6. La candela si può spegnere con la tecnica che diremo "del sagrestano": si copre per un momento la fiamma con una sorta di cappuccio a forma di cono.
7. Una tecnica di spegnimento è la seguente: si applica allo stoppino, sotto la fiamma, una molletta metallica, di quelle che si usano per tenere i capelli.

OSSERVAZIONI SUL FUNZIONAMENTO

Le tecniche di accensione e di spegnimento hanno in comune il fatto che si applicano solo per un tempo brevissimo: la combustione, una volta innescata, si mantiene; una volta interrotta, non riprende da sola.

Vi è un modo istruttivo e spiritoso di simulare il comportamento della candela con un circuito elettrico.



Il circuito che presentiamo è costituito da un alimentatore in continua B (una batteria) un transistor T, una fotocellula FC ed una lampadina L. La fotocellula è una resistenza elettrica sensibile alla luce. Quando è in ombra la sua resistenza è molto grande, e si riduce moltissimo quando viene illuminata. Quando la fotocellula è oscurata, si comporta come un interruttore aperto che comanda al transistor di non lasciar passare la corrente. Di conseguenza la lampadina L rimane spenta. Se, al contrario, la fotocellula è illuminata, si comporta come un interruttore chiuso e il transistor lascia passare una corrente tanto grande da accendere la lampadina. Pertanto, se indirizziamo sulla fotocellula il fascio di una torcia elettrica, la lampadina si accende quando la fotocellula viene illuminata e si spegne quando è in ombra. Questo se la lampada e la fotocellula sono lontane; ma immaginiamo che siano disposte l'una di fronte all'altra. Se la lampada è spenta, la fotocellula è in ombra e blocca il passaggio della corrente attraverso la lampada e quindi questa rimane spenta. Ma poniamo di inviare un lampo di luce sulla fotocellula. Questa allora comanda l'accensione della lampada che, a sua volta, illumina la fotocellula: il ciclo si chiude. È un esempio di *feedback positivo*. Questo è caratterizzato dal fatto che, una volta innescato, si mantiene da sé. È vero anche il contrario, se, per un attimo, la fotocellula smette di “vedere” la lampada, il processo si interrompe e non riprende più, a meno che non lo inneschiamo di nuovo. Questo circuito viene scherzosamente chiamato “candela elettronica” proprio perché si comporta come una vera candela; per esempio, possiamo “accenderla” con un cerino che si passa davanti alla fotocellula.

La similitudine tra il circuito e la candela è più stretta di quanto possa apparire.

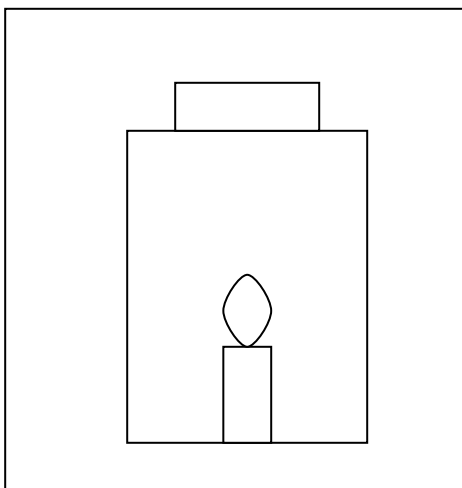
Cominciamo con l'osservare che la combustione avviene sulla parte superiore dello stoppino. La cera fonde alla base e sale per capillarità lungo lo stoppino. Ad un certo punto la temperatura è abbastanza alta da provocare la vaporizzazione della cera (o meglio paraffina) per cui nella parte alta si forma una miscela di due gas: ossigeno e paraffina sotto forma di vapore, ad alta temperatura. È in questa miscela gassosa che ha luogo la reazione chimica di combustione. Per rendersi conto che le cose stanno così, possiamo fare un semplice esperimento che veniva suggerito anche da Faraday nelle lezioni che abbiamo ricordato.

Dopo aver acceso una candela, la si lascia bruciare per un po' in modo che la fiamma si stabilizzi e poi la si spegne con un soffio. Si osserva un filo di fumo che sale dallo stoppino. Se si avvicina un fiammifero acceso a questo fumo, anche a parecchi centimetri al di sopra dello stoppino, la candela si riaccende immediatamente.

IL RUOLO DELLA CONVEZIONE

Il fatto che, una volta innescata, la combustione si mantiene, significa che è la combustione stessa ad auto-alimentarsi, cioè a produrre l'arrivo nella regione dello stoppino di ossigeno e paraffina. Della paraffina abbiamo già detto: viene fusa nel cratere che si forma nella parte superiore della candela e vaporizzata nella parte superiore dello stoppino. Perché la combustione si mantenga è però necessario allontanare l'anidride carbonica che si forma e sostituirla con ossigeno. Questo avviene per convezione; i gas prodotti dalla combustione sono caldi e quindi salgono verso l'alto richiamando aria dal basso. L'analogo di ciò che avviene in un camino a legna o una stufa a carbone: asportazione dei gas prodotti e richiamo di ossigeno. Sono i moti convettivi che fanno sì che la fiamma abbia la caratteristica forma simmetrica rispetto all'asse verticale. Tutto ciò spiega anche perché la candela funziona solo se disposta verticalmente e perché si spegne con le tecniche che abbiamo indicato con i numeri 6 e 7. Con la prima si impedisce all'anidride carbonica di disperdersi salendo nell'aria, con la seconda si impedisce l'afflusso della cera fusa. Il fatto che i moti convettivi giochino un ruolo essenziale nel funzionamento della candela è dimostrato dalla seguente, facile ed istruttiva, esperienza.

Si prenda un grosso vaso di vetro dotato di chiusura automatica. Sulla base, all'interno, si fissi un mozzicone di candela o un lumino.



Si accenda la candela e, rapidamente, si tappi il vaso. Sappiamo già che, se aspettiamo abbastanza a lungo, la candela si spegnerà; ma questo richiede alcuni minuti. Invece, noi lasciamo cadere il vaso (e un nostro collaboratore dovrà afferrarlo al volo) oppure lo lanciamo ad un altro pronto a prenderlo: la candela si spegne immediatamente. Ovviamente, il fenomeno non può essere dovuto alla mancanza di ossigeno o al vento prodotto dal moto.

Si tratta di un modo inusuale di spegnere le candele e il meccanismo è meno evidente che negli altri casi. L'insegnante accorto si guarderà bene dal fornire la spiegazione standard e conserverà il segreto almeno per

qualche giorno, sollecitando gli studenti a rifare la prova e pensare ad una spiegazione, che è la seguente: *i moti convettivi sono causati dalla spinta idrostatica e questa è presente solo se il fluido è pesante, cioè solo in presenza del campo gravitazionale. All'interno di un sistema in caduta libera – qual è il vaso – il campo gravitazionale è annullato e quindi non si possono produrre moti convettivi nell'aria che vi è contenuta. Si potrebbe anche dire che per il funzionamento della candela è essenziale che nello spazio in cui si trova esistano una verticale, un "alto" e un "basso". Un sistema in caduta libera è perfettamente inerziale e quindi privo di direzioni privilegiate: in un tale sistema una candela non può rimanere accesa.*

QUESTIONI DI STABILITÀ

Finora abbiamo risposto alla domanda: perché la candela rimane accesa?

Ma ve ne possono essere molte altre. Per esempio: perché la candela brucia uniformemente, cioè l'ampiezza della fiamma rimane pressoché costante? La cosa non è scontata. Infatti, se si appicca il fuoco ad una catasta di legna, l'ampiezza della fiamma aumenta nel tempo, fino a che la legna inizia a mancare. Per una candela, come per il fornello a gas, sembra che operi un meccanismo che fornisce alla combustione la cera a tasso costante.

A questo proposito si può osservare che, al diminuire della lunghezza della candela, la lunghezza dello stoppino rimane pressoché invariata. Significa che ciò che alimenta la fiamma (il combustibile) è la cera; lo stoppino serve solo come mezzo di trasporto della cera fusa verso l'alto. Dello stoppino si consuma solo, e lentamente, l'estremità superiore. La fiamma conserva le stesse dimensioni a causa del fatto che l'intensità della corrente di cera fusa è costante.

Una domanda che ci possiamo porre è come sia possibile realizzare una candela con una fiamma centrale di dimensioni superiori al normale. È chiaro che, se si mantiene lo stesso stoppino, il diametro della candela è influente sulle dimensioni della fiamma. Se vogliamo che queste siano maggiori è necessario aumentare il diametro dello stoppino. Nelle vecchie lucerne a petrolio, lo stoppino era costituito da una striscia di cotone di qualche centimetro di cui si poteva regolare, entro certi limiti, la lunghezza. Ad una maggiore lunghezza corrispondeva una maggiore luminosità. Quindi è la lunghezza dello stoppino emergente che determina le dimensioni della fiamma. Ora, la candela è una buona sorgente luminosa proprio a motivo del fatto che le dimensioni della fiamma rimangono costanti durante la combustione, per cui deve esservi un meccanismo di auto-regolazione. Osserviamo allora che se la lunghezza dello stoppino rimane costante, ciò è dovuto al fatto che la parte superiore viene bruciata con continuità. La parte bassa dello stoppino non brucia, perché protetta dallo strato di cera o paraffina che, si riscalda man mano che sale e ad un certo punto comincia a vaporizzare. A questa altezza lo stoppino rimane spoglio dello strato di cera e comincia a bruciare lui stesso, vaporizzandosi.

Poniamo che, per qualche motivo, le dimensioni della fiamma aumentino. Una tale eventualità produce una maggiore combustione dello stoppino che, in questo modo, si accorcia e produce una diminuzione della fiamma. L'opposto si verifica nel caso di un calo della fiamma. Si tratta di un semplice meccanismo, opposto a quello che mantiene accesa la candela e che, per questo si chiama *feed-back negativo*.

PERCHÉ CERA O PARAFFINA?



Un'altra osservazione che si può fare sulla candela è la seguente: nonostante la fiamma abbia un'alta temperatura, la cera rimane fredda anche a breve distanza dal cratere di fusione. Il motivo è ovvio: la cera è un ottimo isolante termico.

Questa proprietà ha a che fare con il funzionamento della candela?

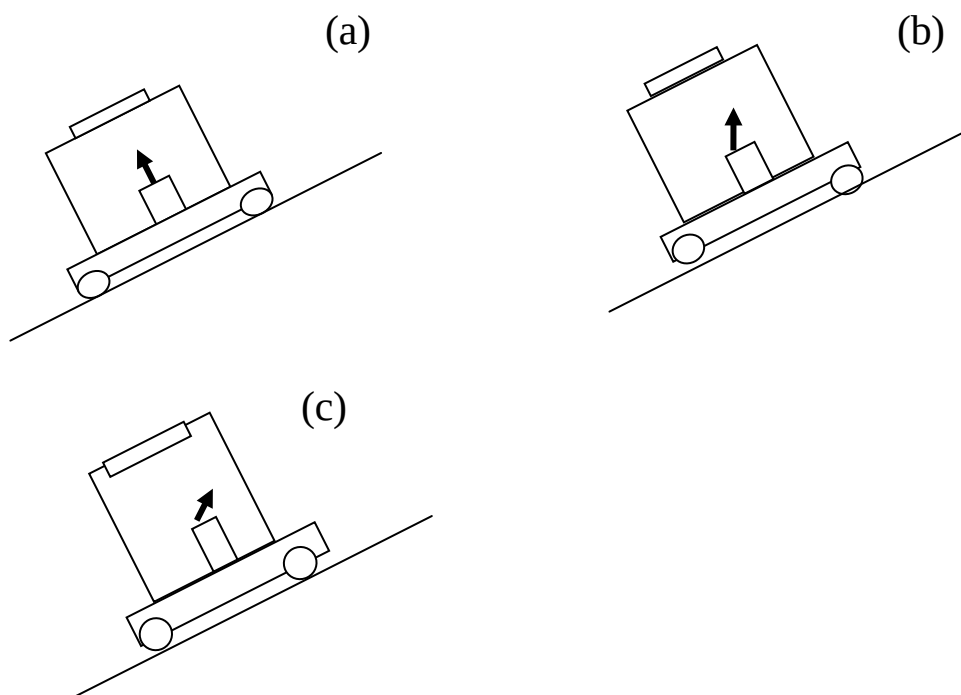
Le fiamma riscalda la cera, che è più in basso, non per convezione, ma solo per irraggiamento. La potenza radiante che raggiunge la cera che sta alla base dello stoppino è quindi molto bassa e non potrebbe produrre un innalzamento della temperatura sufficientemente alto da fonderla se la calore ricevuto si disperdesse rapidamente all'intero corpo della candela.

Invece, a causa della bassissima conducibilità della cera solida, il calore assorbito per irraggiamento rimane confinato ad un piccolo strato di cera che si riscalda e fonde. In questo modo può aderire e risalire lungo lo stoppino.

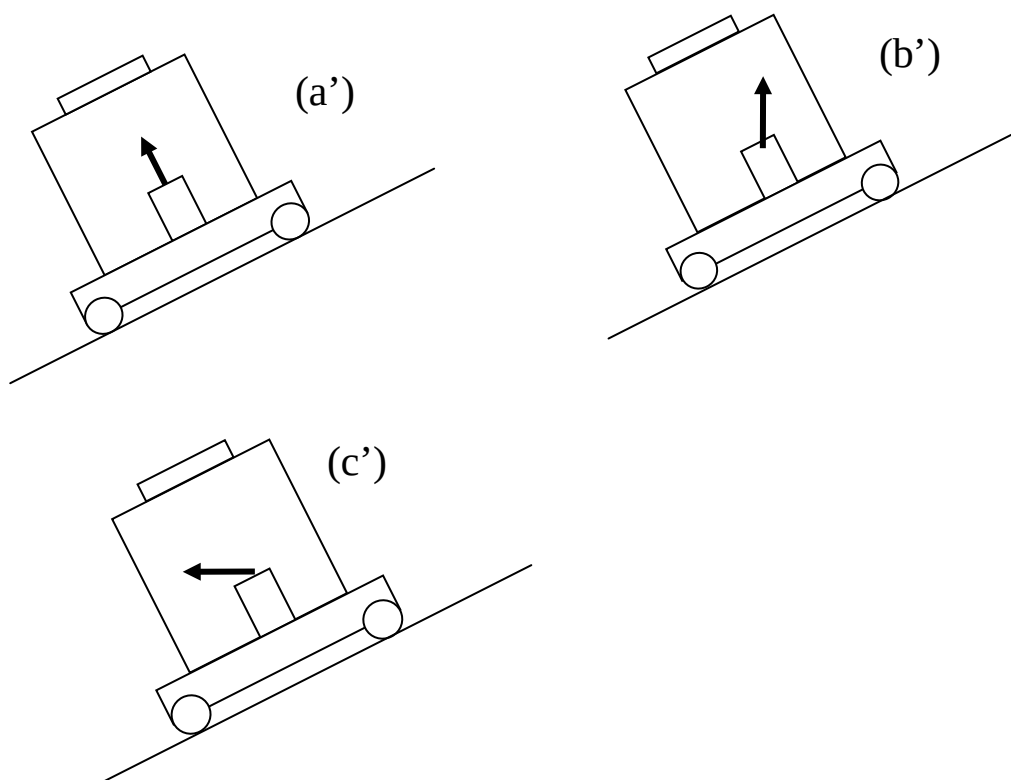
PER RIFLETTERE ULTERIORMENTE

Una domanda da rivolgere agli studenti a proposito di un *gedanken experiment* che è molto efficace dal punto di vista didattico, per gli allievi innanzitutto, ma anche per gli insegnanti.

All'interno di un grosso vaso di vetro dotato di chiusura, si fissa un lumino. Il vaso, a sua volta è posto su un carrello a bassissimo attrito che può correre su un piano inclinato particolarmente liscio. Si accende il lumino, si tappa il vaso e si lascia scendere liberamente il carrello lungo il piano. Si chiede in quale dei modi indicati in figura si disporrà la fiamma.



Dopo aver dato risposta al quesito, pensiamo di rifare l'esperimento lanciando il carrello in salita lungo il piano inclinato. Presentiamo ancora tre configurazioni possibili:

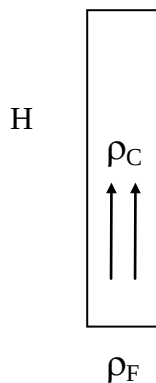


Le risposte corrette sono la (a) e la (a'). Infatti la fiamma si dispone sempre secondo la verticale locale che in ambedue i casi coincide con la perpendicolare al piano. Un altro modo di dire la stessa cosa è il seguente: delle due componenti del campo gravitazionale, quella perpendicolare al piano e quella parallela, la discesa libera cancella la seconda. Rimane pertanto solo la componente ortogonale al piano.

APPENDICE SU UN PROBLEMA DI STAGIONE



Da cosa dipende la velocità del fumo all'interno di una canna fumaria? Funziona meglio una canna lunga o una corta? Funziona meglio col freddo o col caldo?



Bernoulli insegna che la velocità dipende dalla densità dell'aria (calda e fredda) e dalla lunghezza del tubo. Infatti, la canna fumaria contiene aria calda con una densità ρ_C inferiore a quella dell'aria esterna (fredda) ρ_F . Dice Bernoulli:

$$\frac{1}{2}\rho_C v^2 = (\rho_F - \rho_C) Hg$$

È la conservazione dell'energia per unità di volume:

$$\frac{1}{2}\rho_C v^2 = \Delta\rho Hg$$

dove $\Delta\rho$ è la differenza di densità. Onde

$$v = \sqrt{2 \frac{\Delta \rho}{\rho_C} Hg}$$

Ora, la densità dell'aria dipende dalla sua temperatura secondo la solita equazione :

$$\rho_C T_C = \rho_F T_F$$

per cui

$$\Delta \rho = \rho_F - \rho_C = \rho_C \left(\frac{\rho_F}{\rho_C} - 1 \right) = \rho_C \left(\frac{T_C}{T_F} - 1 \right) = \rho_C \frac{\Delta T}{T_F}.$$

Con ciò, la velocità dell'aria nella canna sarà

$$v = \sqrt{2 \frac{\Delta T}{T_F} Hg}$$

La canna tira tanto meglio quanto più è alta e quanto più riesce a mantenere la differenza di temperatura tra l'interno e l'esterno.

Per esempio, con una temperatura di 0 °C, una differenza di temperatura di 50°C, all'interno di una canna di 4 m di lunghezza, la velocità è di qualche metro al secondo,

Ledo Stefanini
Università di Mantova - Pavia.