ISSN/0393-3016

**PAOLO DI LAZZARO, DANIELE MURRA**
Divisione Fisica della Fusione
Laboratorio Sorgenti, Antenne e Diagnostiche
Centro Ricerche Frascati, Roma

# UN SECONDO SGUARDO ALLA FISICA DI TUTTI I GIORNI
## Curiosità e aneddoti scientifici

RT/2018/3/ENEA

ENEA
AGENZIA NAZIONALE PER LE NUOVE TECNOLOGIE,
L'ENERGIA E LO SVILUPPO ECONOMICO SOSTENIBILE

PAOLO DI LAZZARO, DANIELE MURRA
Divisione Fisica della Fusione
Laboratorio Sorgenti, Antenne e Diagnostiche
Centro Ricerche Frascati, Roma

# UN SECONDO SGUARDO ALLA FISICA DI TUTTI I GIORNI
## Curiosità e aneddoti scientifici

RT/2018/3/ENEA

ENEA
AGENZIA NAZIONALE PER LE NUOVE TECNOLOGIE,
L'ENERGIA E LO SVILUPPO ECONOMICO SOSTENIBILE

I rapporti tecnici sono scaricabili in formato pdf dal sito web ENEA alla pagina www.enea.it

I contenuti tecnico-scientifici dei rapporti tecnici dell'ENEA rispecchiano
l'opinione degli autori e non necessariamente quella dell'Agenzia

The technical and scientific contents of these reports express the opinion
of the authors but not necessarily the opinion of ENEA.

**UN SECONDO SGUARDO ALLA FISICA DI TUTTI I GIORNI**

Curiosità e aneddoti scientifici

P. Di Lazzaro, D. Murra

**Riassunto**

Presentiamo una raccolta di 14 articoli di divulgazione scientifica, che segue la prima raccolta intitolata Curiosità Scientifiche, uno sguardo alla Fisica di tutti i giorni, pubblicata nel 2014 nella collana dei Rapporti Tecnici Enea, la quale è stata finalista al Premio Nazionale di Divulgazione Scientifica organizzato dall'Associazione Italiana del Libro e dal CNR, e in 3 anni ha registrato più di 5.000 contatti sul sito www.academia.edu

Lo scopo della raccolta è di osservare le esperienze quotidiane attraverso l'occhio di un Fisico, per capire il funzionamento di oggetti che usiamo quotidianamente, e provare il sottile piacere di conoscere i meccanismi nascosti dietro gli eventi della vita di tutti i giorni, la cui comprensione permette di prevedere le conseguenze di alcune azioni e di valutare meglio le nostre scelte.

Il lettore troverà curiosi aneddoti su Meucci, Galilei e Archimede, potrà stupirsi degli arcobaleni lunari, di come percepiamo i colori, e della nostra straordinaria capacità di mescolare le informazioni provenienti dai 5 sensi. E proveremo a rispondere ad alcune domande. Come è possibile oscillare sull'altalena senza ricevere nessuna spinta? Come funziona il nastro adesivo e perché si chiama scotch? Possiamo proteggerci dai rumori dei vicini di casa? Come funziona il CD? Perché la centrifuga separa e schiaccia contemporaneamente? Quale lampadina illumina meglio e permette di risparmiare sulla bolletta? Cosa hanno in comune porte, forbici, scope, schiaccianoci e carriole? Perché i freni delle automobili sono moltiplicatori di forza?

Il fil rouge che collega gli articoli è il piacere della scoperta di come funziona un oggetto, la sorpresa del perché un fenomeno accade, ma ciascun articolo è indipendente dagli altri, quindi questa raccolta può essere consultata di volta in volta su un argomento specifico, oppure letta d'un fiato.

**Parole chiave:** Curiosità scientifiche, Didattica, Fisica di tutti i giorni, Divulgazione scientifica, Fenomeni fisici.

***Abstract***

*We present a collection of fourteen popular science articles, which follows a first collection entitled "Curiosità Scientifiche, uno sguardo alla Fisica di tutti i giorni" published in 2014 as ENEA Technical Report.*

*The main purpose is casting a glance at the daily experiences with the eye of a Physicist, showing how Science helps to understand 'how it works' with reference to familiar objects and to some phenomena we observe every day. While catching the mechanisms governing some events, we may predict the consequences of habitual actions, thus becoming aware of our choices in everyday life.*

***Keywords:*** *Physics education, Physical phenomena, Teaching, Physics in everyday life, Popular science.*

# INDICE

# UN SECONDO SGUARDO ALLA FISICA DI TUTTI I GIORNI: CURIOSITA' E ANEDDOTI SCIENTIFICI

*Homines dum docent discunt.*

– Seneca, *Epistulae morales ad Lucilium*

## PREFAZIONE

La prima raccolta di articoli di divulgazione scientifica degli stessi autori *Curiosità Scientifiche, uno sguardo alla Fisica di tutti i giorni* è stata pubblicata nel 2014 nella collana dei Rapporti Tecnici Enea, e ha avuto un notevole successo di critica e di pubblico: finalista al terzo premio nazionale di divulgazione scientifica organizzato dall'Associazione Italiana del Libro e dal CNR, in 3 anni ha registrato più di 5.000 contatti sul sito Academia.edu dedicato alla condivisione delle pubblicazioni scientifiche internazionali **www.academia.edu/6492827/Curiosità_scientifiche_uno_sguardo_alla_Fisica_di_tutti_i_giorni** e probabilmente un maggiore numero di contatti sul sito madre Enea **http://openarchive.enea.it/bitstream/handle/10840/4908/RT-2014-03-ENEA.pdf?sequence=1** .

Questo successo ci ha dato l'entusiasmo e l'energia necessari a scrivere la seconda raccolta di articoli che avete sotto gli occhi. Lo scopo è di offrire una chiave di lettura per capire le leggi fisiche nascoste negli oggetti di uso quotidiano e nei fenomeni che osserviamo tutti i giorni, la cui comprensione permette di prevedere le conseguenze di alcune azioni e di valutare meglio le nostre scelte.

Come nella prima raccolta, ciascun fenomeno/oggetto viene spiegato in modo intuitivo, senza formule matematiche. Nella seconda parte dell'articolo, viceversa, l'argomento viene affrontato usando strumenti matematici elementari, adatti ad ottenere informazioni quantitative, in modo da soddisfare chi desidera trovare un'analisi puntuale del fenomeno. Insomma, in questa raccolta la matematica (elementare) si affaccia tra curiosità e sorprese nascoste negli oggetti, negli aneddoti, nei fenomeni in cui ci imbattiamo spesso.

Laddove i concetti e le equazioni comportano nozioni fisiche e matematiche più avanzate, al di là della scuola dell'obbligo, il lettore è indirizzato alle note in fondo all'articolo, dove troverà dimostrazioni e descrizioni ad un livello più elevato, oppure riferimenti alle pubblicazioni originali, dove è possibile apprendere maggiori dettagli.

Abbiamo raggruppato quattordici articoli in cinque temi: Curiosità, La Fisica e il nostro corpo, La Fisica negli oggetti di uso comune, la Fisica in casa, la Fisica in viaggio. Il *fil rouge* che collega tutti gli articoli è il piacere di scoprire come funziona un oggetto, la sorpresa del perché accade un fenomeno, l'ammirazione per la genialità di alcuni scienziati, ma ciascun articolo è indipendente dagli altri, quindi questa raccolta può essere consultata di volta in volta su uno specifico argomento, oppure letta d'un fiato!

Anatole France, premio Nobel per la letteratura, scrisse "*S'impara solo divertendosi*". E allora, non resta che augurarvi buona lettura e, soprattutto, buon divertimento!

*Curiosità*

# IL PUGNO DI SABBIA DI MEUCCI

*Febo mi disse: "Esprimi un desiderio, vergine cumana: sarà esaudito". Io presi un pugno di sabbia e glielo mostrai, chiedendo che mi fossero concessi tanti anni di vita quanti granelli di sabbia c'erano in quel mucchietto. Sciocca, mi dimenticai di chiedere che gli anni fossero di giovinezza.*

– Ovidio, *Metamorfosi, XIV* (8 d.C.)

All'epoca fece scalpore la causa legale tra l'inventore italiano Antonio Meucci (Firenze, 1808 – New York, 1889) e l'ingegnere scozzese Graham Bell (Edimburgo, 1848 – Cape Breton, 1922), entrambi emigrati negli USA, riguardo la paternità dell'invenzione del telefono. Meucci aveva inventato e realizzato uno strumento di comunicazione voce a filo, un 'telegrafo parlante' chiamato 'telettrofono', allo scopo di parlare con la moglie, costretta a letto, dal laboratorio situato nello scantinato dello stesso stabile. Meucci comprese l'enorme potenzialità e importanza commerciale del telettrofono, ma le limitate risorse finanziarie e la scarsa conoscenza del mondo degli affari gli impedirono di avviare la procedura per la concessione del brevetto. Nel 1871 Meucci si limitò a presentare una notifica (brevetto temporaneo da rinnovare ogni anno) e consegnò alcuni prototipi alla Western Telegraph Union, la società dei telegrafi, per convincerli a finanziare lo sviluppo del telettrofono. Successivamente, i funzionari della Telegraph dissero di averli persi, e la società gli rifiutò i denari necessari a rinnovare la notifica nel 1874. Questo rifiuto era finalizzato ad appropriarsi indebitamente dell'invenzione: infatti, due anni dopo, il 6 Febbraio 1876, la Western depositò il brevetto a Washington, attribuendo l'invenzione a Bell, che aveva lavorato sui prototipi di Meucci. Insomma, si trattava di una vera e propria truffa ai danni dell'inventore italiano.

Bell costruì il suo impero finanziario grazie ai proventi derivati dalla concessione di questo rivoluzionario brevetto. Meucci protestò, aiutato dalla comunità italiana, e dopo un decennio di battaglie legali il 13 Gennaio 1887 il brevetto di Bell venne annullato per frode e dichiarazione del falso, annullamento poi sancito dalla Corte suprema. Purtroppo Meucci morì nel 1889 e il brevetto Bell, che scadeva nel 1893, non fu più contestato.

Centotredici anni dopo, nel 2002, la Camera dei Deputati degli Stati Uniti ha riconosciuto che l'inventore del telefono non è Alexander Graham Bell, come scritto nei libri di testo, bensì Antonio Meucci. Un riconoscimento tardivo, ma… *sic transit gloria mundi*.

Durante le vicende legali, Bell e Meucci si incontrarono diverse volte davanti al giudice. Un aneddoto narra che, uscendo dall'udienza, Meucci prese un pugno di sabbia da un posacenere e, rivolgendosi a Bell, disse: "*Forse a me rimarrà solo un pugno di sabbia, ma tu non sei uno scienziato, non sapresti nemmeno dirmi quanti granelli ho in mano*".

La sfida di Meucci di calcolare a mente il numero di granelli di sabbia contenuti in una manciata sembra difficile da vincere. In realtà, con opportune approssimazioni, è possibile stimare questo numero tramite semplici operazioni che si possono fare a mente.

La dimensione di un granello di sabbia dipende dalla sua natura, se grossa o fine. Il diametro di un singolo granello è compreso tra 0,1 mm e 2 mm. Granelli con diametri più grandi o più piccoli sono definiti rispettivamente ghiaia o limo. Scegliamo un diametro intermedio di 1 mm. Per semplificare il calcolo, ammettiamo che tutti i granelli di sabbia abbiano lo stesso diametro e che siano allineati uno sopra l'altro (nella realtà questo non accade, ma stiamo cercando di ottenere una stima, non un numero esatto). Ricordando che 1 cm = 10 mm, in un centimetro entrano 10 granelli. Quindi in un centimetro cubo (1 cm × 1 cm × 1 cm) entrano 10×10×10 = 1.000 granelli.

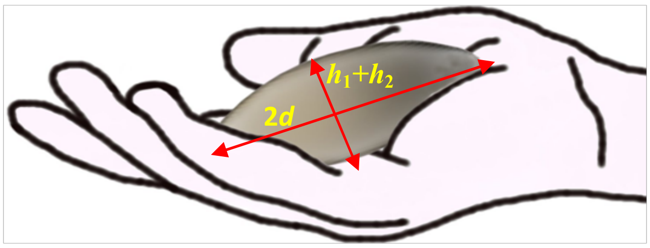
Bisogna determinare quanti centimetri cubici di sabbia sono contenuti in una manciata. E' possibile fare un calcolo del volume di una manciata di sabbia, come spiegato nella nota [1], ma è meglio fare una misura. Abbiamo raccolto una manciata di sabbia da una spiaggia calabrese, e l'abbiamo versata in un contenitore graduato. Dopo aver ripetuto diverse volte questa operazione, il volume medio di una manciata è risultato essere 36 centimetri cubici. Quindi, in una manciata di sabbia ci sono circa 1.000 × 36 = 36.000 granelli da un millimetro l'uno.

Questa stima dipende in modo drastico dal diametro medio dei granelli di sabbia: ad esempio, se dimezziamo il diametro medio del granello da 1 mm a 0,5 mm (in pratica, una sabbia più fine della precedente e abbastanza comune nelle nostre spiagge) ripetendo gli stessi calcoli otteniamo una manciata formata da 288.000 granelli, cioè 8 volte più numerosa della manciata di granelli da 1 mm.

Se consideriamo i limiti inferiore e superiore del diametro del granello di sabbia pari rispettivamente a 0,1 mm e 2 mm, il numero di granelli di sabbia in una manciata può variare da 36 milioni a 4.500. Qualsiasi numero compreso fra quattromilacinquecento e trentasei milioni è una risposta valida alla domanda di Meucci. Si tratta di un intervallo di valori molto ampio, e se Bell avesse risposto un numero a caso, nel tentativo di indovinare, c'erano buone probabilità che il numero scelto sarebbe stato compreso tra questi estremi. Chissà…

**Nota**

[1] E' possibile calcolare il volume di granelli di sabbia che entrano in una mano, anche se una manciata di sabbia non ha una forma regolare. Proviamo ad approssimare la manciata ad una doppia calotta sferica, mostrata nella figura 1, di diametro $2d$ ed altezze $h_1$ e $h_2$. Per una mano maschile adulta possiamo assumere $2d$ = 6 cm, $h_1$ = 1.5 cm e $h_2$ = 1 cm.



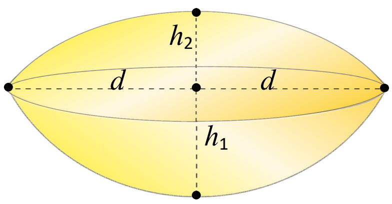




***Figura 1****. Per calcolare il volume di un mucchio di sabbia raccolto in una mano abbiamo approssimato la manciata ad una forma costituita da due calotte sferiche sovrapposte, come mostrato nel solido geometrico a destra.*

Il volume di una calotta sferica è dato da $V = h \times \frac{\pi}{6} \times (3d^2 + h^2)$ , quindi il mucchio di sabbia nella mano è composto dalla somma dei volumi delle due calotte, $V_1 \cong 23$ cm$^3$ e $V_2 \cong 15$ cm$^3$, per un volume totale $V_{tot} = V_1 + V_2 = 38$ cm$^3$.

Questo calcolo potrebbe dare risultati poco accurati, perché piccole variazioni dei valori di *d* e *h* comportano notevoli variazioni del volume. Di conseguenza, è meglio misurare sperimentalmente il volume della manciata di sabbia, come riportato nel testo. Notiamo però −con soddisfazione− che il valore misurato di 36 cm$^3$ è molto vicino al valore calcolato pari a 38 cm$^3$. Questo significa che l'approssimazione della manciata ad una doppia calotta sferica è realistica e che abbiamo usato valori di *d* e *h* molto vicini a quelli reali.

*Curiosità*

# ARCHIMEDE, IL PRIMO DETECTIVE DELLA STORIA, SCOPRE IL TRUFFATORE CON L'IDROSTATICA

> *Quando Gerone regnava in Siracusa, per le sue fortunate imprese volle deporre in un tempio una corona d'oro promessa in voto agli dei immortali. Decise il prezzo dell'opera con un artista e gli consegnò la quantità di oro necessaria. A suo tempo la corona finita fu consegnata, con soddisfazione del re, ed anche il peso della corona risultò coincidere con quello dell'oro. Più tardi, Gerone sospettò che l'artista avesse sottratto una parte dell'oro e l'avesse sostituita con un ugual peso di argento. Non riuscendo a trovare il modo di dimostrarlo, pregò Archimede di studiare la questione. Un giorno che, tutto preso da questo pensiero, Archimede era entrato in un bagno, si accorse che mano a mano che il suo corpo si immergeva, l'acqua traboccava. Questa osservazione gli indicò la via per risolvere il problema. Senza indugi balzò fuori dal bagno in preda alla gioia e si precipitò nudo verso casa, gridando con tutte le forze che aveva trovato quel che cercava: "Eureka! Eureka!".*
>
> – Marco Vitruvio Pollione, *De architectura, IX, 3* (15 a.C.)

Questo aneddoto narrato da Vitruvio può lasciare perplessi: come è possibile scoprire se la corona non era di oro puro immergendosi nella vasca da bagno?

La risposta non è immediata, e testimonia l'acutezza di pensiero di Archimede (Siracusa, 287 a.C. – Siracusa, 212 a.C.) uno dei più geniali scienziati di tutti i tempi.

Per capire il ragionamento facciamo un passo indietro, quando Archimede aveva osservato e descritto la spinta idrostatica, che si basa sul cosiddetto 'principio di Archimede'. In sintesi, un fluido (cioè un gas o un liquido) esercita una forza opposta alla forza di gravità, cioè una spinta verso l'alto su ogni oggetto immerso nel fluido stesso. Questa spinta è uguale al peso del fluido <u>spostato</u> dal volume dell'oggetto.

Anche l'aria, essendo un fluido, esercita tale forza, ma il peso dell'aria spostato dal nostro corpo e da qualsiasi oggetto solido è molto piccolo, quindi la spinta verso l'alto è impercettibile. Il principio di Archimede in aria si osserva solo riempiendo un palloncino con un gas più leggero dell'aria, ad esempio elio. Viceversa, gli effetti del principio di Archimede si osservano facilmente immergendo gli oggetti in acqua. Infatti, l'oggetto affonda quando il suo peso è maggiore del peso dell'acqua spostata dal volume dello stesso oggetto, perché la spinta idrostatica è minore del peso dell'oggetto. Se viceversa la spinta idrostatica è maggiore del peso dell'oggetto, questo galleggia.

Se consideriamo un oggetto omogeneo (cioè senza zone vuote al suo interno), ricordando che la densità di un oggetto è definita come il rapporto tra massa e volume e che il volume dell'acqua spostata è identico al volume dell'oggetto, il principio di Archimede prevede che l'oggetto galleggia se ha una densità minore della densità dell'acqua, e viceversa affonda se ha una densità maggiore di quella dell'acqua.

Traduciamo in semplici formule matematiche quanto detto. Il peso P dell'acqua spostata è uguale a

$$\mathbf{P_{acqua} = m \times g = d \times V \times g} \qquad (1)$$

dove m è la massa dell'acqua spostata, g è una costante di proporzionalità tra massa e peso, d è la densità del liquido, V è il volume dell'acqua spostata. Per definizione, m = d×V

Il peso dell'oggetto immerso è uguale a:

$$P_{oggetto} = m_o \times g = d_o \times V_o \times g \qquad (2)$$

dove $m_o$ è la massa dell'oggetto immerso, $d_o$ è la densità dell'oggetto e $V_o$ è il volume dell'oggetto.

L'oggetto galleggia se la spinta idrostatica (cioè il peso dell'acqua spostata) è maggiore del peso dell'oggetto, quindi se $P_{acqua} > P_{oggetto}$ (il simbolo > significa 'maggiore di'), ovvero, dalle equazioni (1) e (2), se $d \times V \times g > d_o \times V_o \times g$. Il volume dell'acqua spostata è identico al volume dell'oggetto, $V = V_o$ e quindi l'oggetto galleggia se $d > d_o$ ovvero se la densità dell'acqua è maggiore della densità dell'oggetto [1].

Viceversa, ripetendo gli stessi ragionamenti, l'oggetto affonda se $d_o > d$ ovvero se la densità dell'oggetto è maggiore della densità dell'acqua. Nel terzo possibile caso, in cui $d_o = d$, l'oggetto non affonda e non galleggia, rimane immerso in equilibrio, senza toccare il fondo del recipiente, né la superficie dell'acqua [2].

Una volta compreso il principio di Archimede, possiamo intuire l'idea venuta a seguito alla sua immersione nella vasca da bagno. Probabilmente Archimede fece fondere un lingotto d'oro e uno di argento, entrambi di peso uguale a quello della corona. L'oro ha una densità maggiore dell'argento, quindi il lingotto d'oro ha un volume inferiore al lingotto di argento, a parità di peso. Se prepariamo un recipiente pieno di acqua fino all'orlo e vi immergiamo la corona, possiamo misurare il peso –e quindi il volume– di acqua traboccata. Ripetendo la stessa operazione con il lingotto d'oro e infine con il lingotto di argento, è possibile confrontare l'acqua traboccata nei tre casi, e se il peso dell'acqua spostata dalla corona è intermedio tra il peso d'acqua spostata dal lingotto di argento e quello spostato dal lingotto d'oro, è chiaro che la corona d'oro contiene anche una percentuale di argento.

Tuttavia, questo metodo non può fornire risultati accurati: infatti, non è facile misurare con precisione la quantità di acqua traboccata, e se la quantità di argento aggiunta all'oro fosse piccola, la differenza tra la quantità di acqua traboccata rischia di essere minima, confrontabile con l'errore di misura, rendendo dubbio il risultato.

Gli studi di Archimede di cui abbiamo notizia rendono plausibile [3] e più elegante immaginare che Archimede abbia usato un metodo più preciso, immergendo in acqua una bilancia a bracci uguali, ai quali appendere la corona e un lingotto di oro di peso uguale, come mostrato nella figura 1.

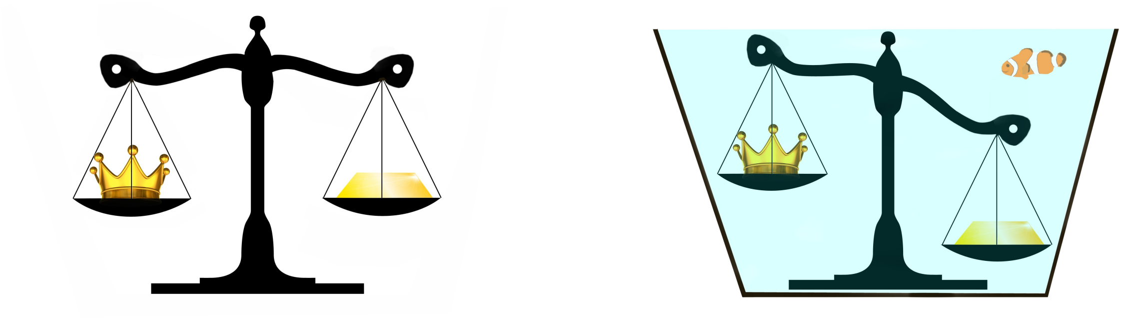


***Figura 1.*** *La corona e il lingotto d'oro hanno lo stesso peso e quindi la bilancia è in equilibrio (a sinistra). A destra, la stessa bilancia immersa in acqua si squilibra se i due oggetti appesi hanno volume diverso. Infatti, la spinta idrostatica è maggiore per l'oggetto avente volume maggiore. Ricordando che, a parità di peso, il volume è maggiore se la densità è minore, possiamo concludere che la corona non è fatta di oro puro, ma contiene un metallo più leggero dell'oro.*

Essendo i pesi uguali e i bracci della bilancia uguali, in aria la bilancia è in equilibrio. Se la corona fosse d'oro puro la bilancia rimarrebbe in equilibrio anche quando immersa in acqua, perché avendo appeso sui due bracci lo stesso materiale (stessa densità) e uguale peso, anche il volume è uguale, sebbene di forma diversa, e quindi la spinta idrostatica è la stessa. Se invece la bilancia immersa si dovesse alzare dalla parte della corona, si dedurrebbe che la corona ha subito una maggiore spinta idrostatica verso l'alto a causa del maggiore volume, dato che i pesi sono uguali.

In conclusione, se la bilancia immersa si alza dalla parte della corona significa che la corona ha una densità minore dell'oro puro e pertanto è stata fabbricata impiegando anche altri metalli, come l'argento, che hanno una densità minore dell'oro.

In ogni caso, grazie al genio di Archimede il truffatore non aveva scampo!

Proponiamo un quesito ai lettori più curiosi. E' possibile risalire alla percentuale di argento utilizzata, cambiando la lunghezza di uno dei due bracci della bilancia immersa fino ad ottenere l'equilibrio. Il lettore sa indicare come?

*Suggerimento: la bilancia è in equilibrio quando il prodotto lunghezza braccio × peso è identico nei due bracci della bilancia…*

**Note**

[1] Più precisamente, se la densità d dell'oggetto è minore della densità $d_0$ dell'acqua l'oggetto 'affonda' fino a che il volume immerso $V_i$ è tale da soddisfare l'uguaglianza $d \times V_i = d_0 \times V_0$, per cui una parte di volume $V_i$ si troverà immersa ed una parte di volume $V - V_i$ resta fuori dall'acqua, come nel caso degli iceberg parzialmente immersi nei mari artici.

[2] Qualche lettore potrebbe obiettare che le navi e i traghetti galleggiano, pur essendo realizzati quasi interamente di ferro e di altri metalli aventi densità molto maggiori dell'acqua. D'accordo con il principio di Archimede, le grandi navi da crociera e i traghetti galleggiano se il peso del volume di acqua spostata è uguale al peso dell'imbarcazione.

[3] L'ipotesi che Archimede abbia immerso in acqua una bilancia per scoprire l'inganno della corona è speculativa, perché non ci sono giunti documenti dell'epoca che ne parlino in modo esplicito. Tuttavia, questa ipotesi è resa plausibile dall'intrinseca imprecisione della misura dell'acqua traboccata suggerita dall'aneddoto di Vitruvio. Il primo a formulare l'ipotesi della bilancia immersa è stata Galileo Galilei, 'il padre della Scienza moderna', come disse di lui Albert Einstein. Galilei iniziò presto a studiare le opere di Archimede, e l'influenza del genio siracusano sulla sua formazione culturale è testimoniata da una frase nelle Opere (XVI, p. 399) dove Galilei definì Archimede 'il mio maestro'. Nella sua opera giovanile 'La bilancetta' Galilei presenta il "*Discorso del S. Galileo Galilei intorno all'arteficio che usò Archimede nel scoprir il furto dell'oro nella corona di Hierone con la fabrica d'un nuovo strumento detto dall'autore bilancetta"*, così come descritto nella parte finale di questo articolo.

I lettori interessati a seguire il ragionamento di Galilei possono consultare la pagina web https://it.wikisource.org/wiki/La_bilancetta_(Favaro)/La_bilancetta

*Curiosità*

# SIAMO SICURI DI SAPERE TUTTO SULLE RUOTE?
# IL PARADOSSO DI GALILEI

> *Io non veggo che ad altra decisione si possa venire, che a dire, infiniti essere tutti i numeri, infiniti i quadrati, infinite le loro radici, né la moltitudine de' quadrati esser minore di quella di tutti i numeri, né questa maggior di quella, ed in ultima conclusione, gli attributi di eguale maggiore e minore non aver luogo ne gl'infiniti, ma solo nelle quantità terminate. (...) Queste son di quelle difficoltà che derivano dal discorrer che noi facciamo col nostro intelletto finito intorno a gl'infiniti, dandogli quelli attributi che noi diamo alle cose finite e terminate; il che penso che sia inconveniente, perché stimo che questi attributi di maggioranza, minorità ed egualità non convenghino a gl'infiniti, de i quali non si può dire, uno esser maggiore o minore o eguale all'altro.*
>
> – G. Galilei, *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze attenenti alla mecanica e i movimenti locali* (1638)

In questo discorso, Galileo Galilei (Pisa, 1564 – Arcetri, 1642) conclude che conviene astenersi dal ragionare sul concetto di infinito. Quali motivi spinsero il genio pisano ad una conclusione così rinunciataria?

Confrontando i numeri naturali 0, 1, 2, 3, ... e i loro quadrati 0, 1, 4, 9, ... osserviamo che i numeri 2, 3, 5, 6, 7, 8, 10 e così via non sono presenti nell'insieme dei quadrati dei numeri naturali. Galilei nota che nei primi cento numeri naturali vi sono solo dieci numeri quadrati, nei primi diecimila numeri naturali vi sono solo cento numeri quadrati, e così via. E' evidente che l'insieme dei numeri quadrati è assai meno 'folto' dell'insieme dei numeri naturali. Eppure, l'insieme di numeri quadrati contiene tanti elementi quanti sono i numeri di partenza, perché ad ogni numero naturale corrisponde il suo quadrato, e viceversa, ad ogni numero quadrato corrisponde la sua radice, che è un numero naturale. In altre parole, i numeri quadrati sono altrettanto numerosi dei numeri naturali, ovvero, una parte è altrettanto numerosa del tutto!

Il paradosso appare irrisolvibile a Galilei e sarà superato più di due secoli dopo, nel 1874, da George Cantor con l'ardita introduzione della diversa cardinalità degli insiemi infiniti [1].

Galilei aveva ragionato su un altro paradosso del concetto di infinito, conosciuto come 'il paradosso della ruota'. Consideriamo la ruota di un carro, formata da un cerchio esterno che tocca il terreno e da un cerchio interno più piccolo, intorno al mozzo. I due cerchi sono ovviamente concentrici, vedi la figura 1.

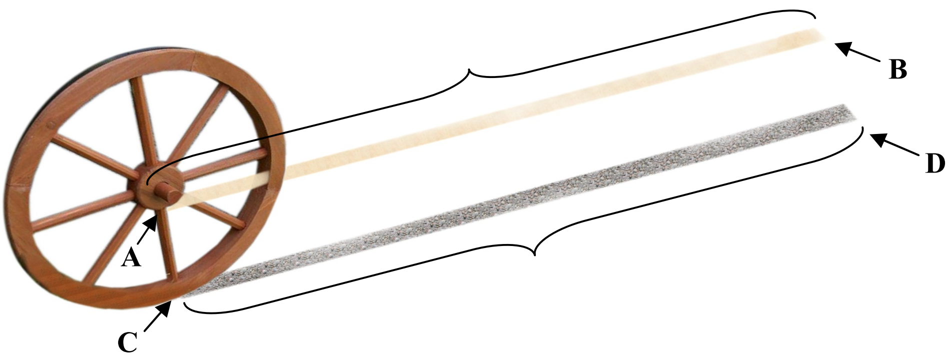



***Figura 1.*** *La ruota da carro percorre un giro e si ferma. In questo tragitto, la distanza CD percorsa a terra è uguale alla circonferenza del cerchio maggiore della ruota. Nello stesso giro, il cerchio piccolo intorno al mozzo percorre la stessa distanza perché i due cerchi sono solidali e concentrici, quindi AB = CD. Pertanto, in un singolo giro due circonferenze diverse sviluppano la stessa lunghezza! Si tratta del paradosso della ruota proposto da Galileo Galilei.*

Dopo un giro completo del cerchio maggiore da C fino a D, il cerchio più piccolo partendo da A arriverà a B. Ma i due cerchi sono solidali, fanno parte della stessa ruota e percorrono insieme lo stesso tragitto: quindi, abbiamo CD = AB. In altre parole, in un singolo giro della ruota i due cerchi sviluppano la stessa distanza, nonostante la differente lunghezza delle circonferenze! Galilei si domanda: "*Or come dunque può senza salti scorrere il cerchio minore una linea tanto maggiore della sua circonferenza...*".

Galilei si ingegna a trovare una spiegazione al paradosso, e scrive [2]: "*quando il S. Simplicio mi propone più linee diseguali, e mi domanda come possa essere che nelle maggiori non siano più punti che nelle minori, io gli rispondo, che non ve ne sono né più, né manco né altrettanti; ma in ciascheduna infiniti. O veramente se io gli rispondessi, i punti nell'una esser quanti sono i numeri quadrati; in un'altra maggiore quanti tutti i numeri; in quella piccolina quanti sono i numeri cubi, non potrei io havergli dato sodisfazione col porre più in una che nell'altra, e pure in ciascheduna infiniti?*"

In altre parole, se un segmento può essere diviso in molte parti ancora divisibili, si deve ammettere che esso sia composto da infinite parti, ma se queste parti sono infinite allora devono necessariamente essere prive di estensione, perché infinite parti estese hanno una lunghezza infinita mentre il segmento ha una lunghezza limitata. Quindi, come nel caso dei numeri naturali e dei loro quadrati, c'è la possibilità di costruire una corrispondenza biunivoca tra due insiemi di differente grandezza e numerosità, nel caso della ruota tra la circonferenza più grande e quella più piccola. Ad esempio, proiettando dal centro della ruota della figura 1 un segmento che interseca un punto della circonferenza più piccola e un punto della circonferenza più grande, otteniamo una corrispondenza biunivoca tra le due circonferenze in qualunque momento della rotazione, perché qualsiasi circonferenza o segmento è composto di un numero infinito di punti.

Se la spiegazione dell'infinito numero di punti di un segmento appariva soddisfacente da un punto di vista filosofico, Galilei non riuscì a trovare una soluzione 'fisico-matematica' al paradosso della ruota e questo lo portò a negare la possibilità di indagare l'infinito con gli strumenti matematici. Da qui, la conclusione citata all'inizio *"Queste son di quelle difficoltà che derivano dal discorrer che noi facciamo col nostro intelletto finito intorno a gl'infiniti, dandogli quelli attributi che noi diamo alle cose finite e terminate; il che penso che sia inconveniente."*

Galilei si trova in buona compagnia nel negare la possibilità di studiare l'infinito. Ben due secoli dopo, ancora nel 1831, colui che è riconosciuto il Principe dei Matematici, il più grande di tutti i tempi, Karl Friederch Gauss (Braunschweig, 1777 – Gottinga, 1855), si esprimeva negli stessi termini di Galilei. In una lettera al suo allievo Schumacher, Gauss scrive: "*Io devo protestare nel modo più deciso contro l'uso dell'infinito come qualcosa di compiuto: questo non è permesso in Matematica. L'infinito è solo un modo di dire, ed intende un limite cui certi rapporti possono approssimarsi vicino quanto vogliono*."

Pochi decenni dopo, una via, seppur parziale, per 'dominare' matematicamente l'infinito fu aperta dai lavori di Cantor, cui fecero seguito gli studi di Hilbert, Dedekind e altri [1, 3].

**Note**

[1] P. Di Lazzaro, D. Murra: *9 e 99 – Curiosità e stravaganze nel mondo dei numeri* (Youcanprint editore, 2016) ISBN: 9788892622876 www.youcanprint.it/youcanprint-libreria/narrativa/9-e-99-curiosit-e-stravaganze-nel-mondo-dei-numeri-9788892622876.html

[2] Galileo Galiei, *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze attenenti alla mecanica e i movimenti locali* (Leida 1638) pp. 33-34.

[3] Vedi ad esempio la parte relativa al concetto di infinito nel seminario alla pagina web di academia.edu www.academia.edu/31080593/Curiosità_e_stravaganze_nel_mondo_dei_numeri

*Curiosità*

# L'ARCOBALENO, COLORI PENNELLATI DAL SOLE

*In quel punto, se fra la tempesta opaca il Sole rifulge coi suoi raggi contro le asperse gocce dei nembi che gli stanno di fronte, allora nelle nere nuvole compaiono i colori dell'arcobaleno.*

– Tito Lucrezio Caro*, De rerum natura, Libro VI* (I sec. a.C.)

L'arcobaleno è un fenomeno affascinante: l'arco di colori che si staglia nel cielo appaga il desiderio di bellezza e ci mette di buonumore perché di solito appare dopo un temporale, preannunciando il ritorno del bel tempo. In questo articolo rispondiamo ad alcune curiosità: come si forma l'arcobaleno e perché a volte ne appaiono due? Perché ha una forma curva? Alla fine dell'arcobaleno c'è un tesoro? Due persone vicine vedono lo stesso arcobaleno? Esiste l'arcobaleno notturno? Posso creare un arcobaleno in casa?

I grandi pensatori greci, pur dotati di notevoli capacità intuitive e un approccio scientifico ai fenomeni naturali, non avevano molti argomenti a disposizione per fornire una valida spiegazione del fenomeno. Aristotele (Stagira, 384 a.C. – Calcide, 322 a.C.) nel suo libro "Meteorologia" scrive che i raggi del Sole, riflessi dalle nuvole, arrivano all'occhio percorrendo differenti distanze e, di conseguenza, con un diverso colore. Dopo Aristotele, i più importanti studiosi che provarono a spiegare l'arcobaleno furono Alessandro di Afrodisia, l'arabo Al-hazen, gli inglesi Roger Bacon e Robert Grosseteste, fino al monaco tedesco Teodorico di Friburgo (Vriberg, 1250 circa – 1310 circa) il quale diede per primo l'interpretazione corretta, basata sulla combinazione di rifrazione e riflessione della luce del Sole sulle gocce di pioggia disperse in cielo. Ma il risultato di Teodorico rimase lettera morta fino al XVII secolo, quando gli studi sulla luce e sul colore ebbero un rinnovato impulso e personaggi del calibro di Cartesio e Newton ribadirono lo stesso ragionamento.

Vediamo in dettaglio il ragionamento di Teodorico, cercando di rivelare alcuni dettagli 'mancanti' nelle spiegazioni che si trovano sui libri e sui siti internet. Con l'aiuto della figura 1, osserviamo cosa succede ai raggi di luce quando colpiscono una goccia d'acqua sferica. Poiché la luce proviene dal Sole, quindi da molto lontano, i raggi che arrivano sulla goccia nella figura 1 sono disegnati paralleli tra di loro. Per effetto del passaggio dall'aria all'acqua, i raggi entranti vengono deflessi e sono raffigurati con le linee tratteggiate.

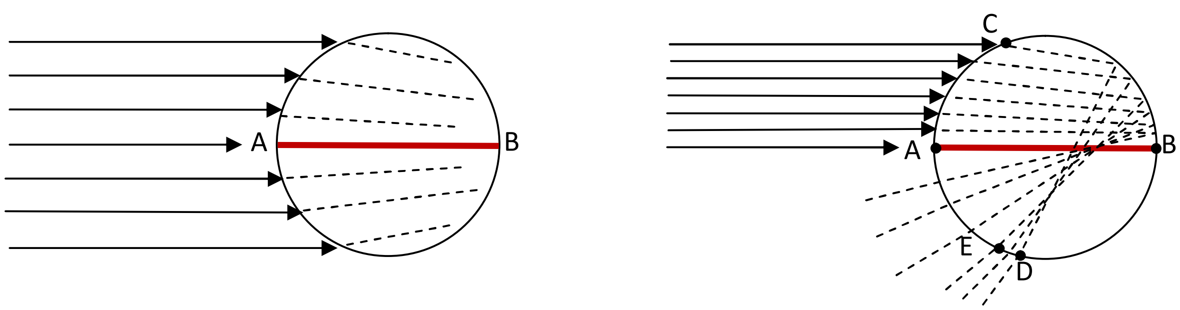



***Figura 1.*** *A sinistra, i raggi del Sole arrivano sulla goccia d'acqua sferica. Una parte dei raggi di luce è riflessa, ma la maggioranza entra nella goccia. I raggi vengono deflessi (rifratti, segmenti tratteggiati) verso il basso se entrano nella semisfera superiore e verso l'alto se entrano nella semisfera inferiore. A destra, i raggi che entrano nella semisfera superiore raggiungono la superficie opposta, dove una piccola percentuale viene riflessa all'interno della goccia fino ad uscire dalla semisfera inferiore con diverse direzioni, come spiegato nel testo.*

Dividiamo la goccia in due semisfere, separate dal piano perpendicolare al disegno e passante per il diametro AB, parallelo alla direzione dei raggi solari. I raggi di luce che colpiscono la semisfera inferiore vengono piegati (*rifratti*) verso l'alto e si allontanano dal punto di vista dell'osservatore che si trova in basso rispetto alla goccia. Torneremo a parlare di questi raggi tra poco.

La figura 1 a destra mostra i raggi che colpiscono la semisfera superiore, i quali subiscono una rifrazione crescente dal punto A al punto C. I raggi rifratti arrivano sulla superficie posteriore della goccia dove vengono in parte riflessi e in parte escono dalla goccia. I raggi riflessi attraversano di nuovo la goccia e, arrivati sulla parete frontale, sono in parte riflessi e in gran parte escono dopo aver sperimentato un'ulteriore rifrazione (cambio di direzione) per il passaggio acqua-aria. Analizzando la direzione dei raggi che escono dalla goccia nella figura 1 notiamo un addensamento tra i punti E e D, da dove i raggi proseguono lungo una particolare direzione angolata di circa 40°- 42° rispetto alla direzione di arrivo dei raggi del Sole.

Sappiamo che la luce del Sole è composta dalla somma di diversi colori, dal rosso al giallo, dal verde al blu fino al violetto, con tutte le sfumature intermedie. Il fenomeno della rifrazione descritto nella figura 1 avviene in modo differente per ciascun colore: infatti, l'inclinazione dei raggi rifratti è tanto maggiore quanto più il colore si avvicina al blu e tanto minore quanto più è vicino al rosso. Nella regione compresa tra A ed E escono i raggi entrati vicino al centro della goccia e perciò poco rifratti e con un piccolo angolo di riflessione: per questo motivo le direzioni di uscita dei colori sono simili, i colori si sovrappongono, sicché la luce che esce da quella parte appare 'bianca'. Viceversa, nella zona tra E e D la direzione di uscita del rosso è differente da quella del verde e quella gialla è differente da quella del blu, quindi i colori non si sommano spazialmente e rimangono distinti.  Ciò avviene per tutte le gocce d'acqua disperse nel cielo, per cui un osservatore che guarda in alto vedrà luce rifratta da ciascuna goccia con angoli diversi a seconda dell'altezza della goccia d'acqua. In pratica, vedrà il colore che esce dalle gocce più in basso con una direzione meno inclinata rispetto all'orizzontale, mentre delle gocce più in alto vedrà il colore che esce con la maggior inclinazione. Lungo la direzione di 40° - 42°, quindi, l'osservatore sarà investito da raggi di colore diverso, come illustrato nella figura 2.

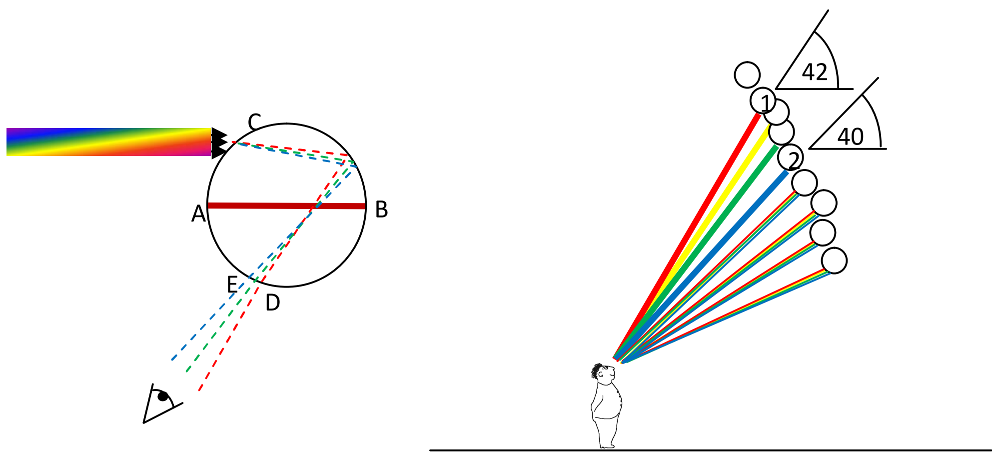



***Figura 2.*** *A sinistra, i colori dei raggi del Sole che entrano nella goccia in alto, lontano dal centro, vengono deflessi, ciascun colore con un diverso angolo di rifrazione. Dopo una riflessione, ciascun colore uscirà dalla goccia verso il basso in una direzione (angolo) diversa dagli altri colori. A destra, l'osservatore vede i colori rifratti solo dalle gocce che si trovano all'altezza 'giusta', provenienti da strati di gocce poste in una posizione tale per cui ci sia un angolo di circa 40° - 42° tra i raggi del sole che arrivano sulle gocce e l'osservatore, vedi anche la figura 5. Di conseguenza, ciascun osservatore vede un differente arcobaleno, i cui colori provengono da strati di gocce poste in differenti posizioni.*

Nella figura 2 a destra, tra la goccia indicata con il n. 1 e quella indicata con il n. 2 l'osservatore vede i colori separati, mentre al di sotto della goccia n. 2 i colori arrivano sovrapposti, per cui la luce riflessa appare bianca, o meglio, si somma al colore blu diffuso dal cielo e lo e sbiadisce [1].

Cosa accade ai colori rifratti dalle gocce che si trovano sopra la n. 1 della figura 2?

Per le gocce sotto la n. 2 i raggi che arrivano all'osservatore sono quelli partiti dalla regione della goccia compresa tra A ed E della figura 1, mentre per le gocce più in alto della n. 1 l'osservatore potrebbe vedere i raggi compresi tra D e il punto più basso della goccia stessa, vedi la figura 1 a destra. Ma tali raggi non esistono, come si vede nelle figure 1 e 2.

Pertanto, le gocce che si trovano sopra l'arcobaleno non inviano raggi rifratti verso l'osservatore, e di conseguenza quella parte di cielo appare più scura di quella che si trova sotto l'arcobaleno, come mostrato nella figura 3. La zona scura è definita 'banda di Alessandro', da Alessandro di Afrodisia, che per primo la descrisse tra il secondo ed il terzo secolo d. C.

***Figura 3***. *Foto di un arcobaleno doppio. La zona di cielo compresa fra l'arcobaleno primario (più intenso, in basso) e quello secondario (in alto) appare più scura, per i motivi spiegati nel testo.*

Analizziamo ora i raggi che colpiscono la goccia nella sua parte inferiore. Come si vede nella figura 1, per questi raggi la rifrazione deflette la luce in alto, e dopo la riflessione sulla parete posteriore della goccia la direzione di uscita è verso l'alto, per cui quella luce non può essere vista da un osservatore che si trovi più in basso della goccia. Tuttavia, se consideriamo una seconda riflessione, i raggi luminosi escono dalla goccia diretti di nuovo verso il basso, come mostrato nella figura 4.

Il lettore potrebbe chiedersi perché nel caso dei raggi che arrivano sulla parte superiore della goccia si considera una sola riflessione ed ora ne consideriamo due. La risposta è che in ogni interfaccia aria-acqua osserviamo sia la riflessione che la rifrazione. Potremmo anche vedere cosa accade, ad esempio, ai raggi che vengono riflessi sei volte all'interno della goccia e poi escono, ma siccome ad ogni riflessione il 96% dell'intensità luminosa viene perduta, è chiaro che già alla terza riflessione interna la potenza luminosa residua è talmente debole da non essere distinguibile rispetto alla luce diffusa dal cielo.

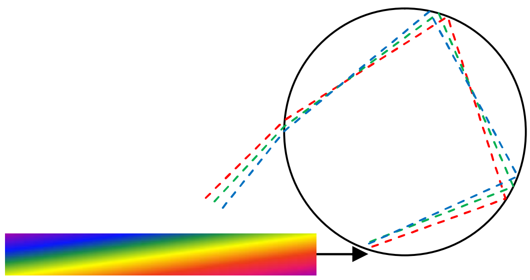


***Figura 4.*** *I raggi di luce che entrano nella parte inferiore della goccia ed escono dopo una singola riflessione sono indirizzati in alto e non possono essere osservati da terra. Ma i raggi riflessi due volte possono uscire dalla goccia verso il basso, quindi sono osservabili. A causa della doppia riflessione, i raggi colorati, dal rosso fino al viola, escono con direzioni invertite rispetto a quelli dell'arcobaleno primario, generato dai raggi che entrano nella parte superiore della goccia. Vedi la figura 3.*

Come mostrato nella figura 4, anche per i raggi che arrivano sulla semisfera inferiore della goccia e subiscono due riflessioni c'è una direzione in cui i colori si separano. Di conseguenza, esiste un altro intervallo di angoli, tra 50° e 53° rispetto alla direzione di arrivo della luce solare, in cui appare un altro arcobaleno, chiamato secondario, i cui colori hanno una posizione invertita rispetto all'arcobaleno primario. La zona di cielo tra questi due arcobaleni è più scura che altrove, vedi la figura 3, per il motivo illustrato in precedenza.

Quanto è 'facile' osservare sia l'arcobaleno primario che quello secondario?

L'arcobaleno primario è causato da una sola riflessione della luce sulla parete interna della goccia, che riflette circa il 4% dell'intensità della luce incidente, mentre l'arcobaleno secondario è prodotto da una doppia riflessione, per cui la luce che arriva ai nostri occhi è circa 1/0,04 = 25 volte meno intensa di quella dell'arcobaleno primario, e $1/(0{,}04)^2$ = 625 volte meno intensa della luce che investe la goccia. Risultato: l'arcobaleno secondario è sempre presente, ma la sua intensità luminosa è talmente debole da non permetterci di vederlo spesso.

Quali sono le condizioni indispensabili affinché si osservi almeno l'arcobaleno primario?

Oltre alla luce diretta del Sole (non basta la luce diffusa dalle nuvole, perché i raggi devono essere paralleli) e alla presenza di gocce d'acqua sospese in aria, è necessaria un'altezza del Sole inferiore a 42° rispetto all'orizzonte perché, superata tale elevazione, la direzione di provenienza dell'arcobaleno sarebbe sotto l'orizzonte, come mostrato nella figura 5, e quindi impossibile da vedere. Un altro requisito utile è la presenza di nuvole scure sullo sfondo, in modo che la luce riflessa dalle gocce d'acqua risulti molto contrastata.

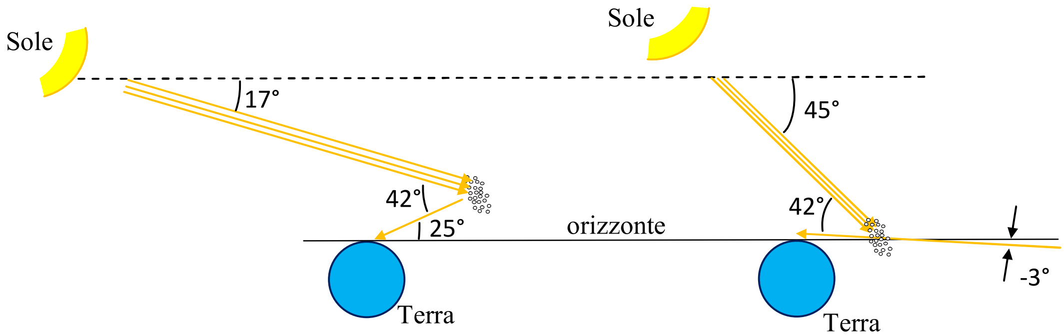



***Figura 5.*** *Per vedere l'arcobaleno, l'altezza angolare del Sole rispetto all'orizzonte deve essere minore di 42°, come nel disegno a sinistra in cui l'altezza del Sole è di 17°. Infatti, per altezze del Sole superiori ai 42°, i colori dell'arcobaleno sono indirizzati verso l'alto, sopra la nostra testa, come mostrato nel disegno a destra in cui l'altezza del Sole è di 45°.*

Rimane un punto da chiarire: perché l'arcobaleno ha una forma curva?

Per rispondere a questa domanda, facciamo ancora riferimento alla figura 5. Sappiamo che i raggi colorati arrivano inclinati di 42° rispetto alla direzione dei raggi del Sole e nel caso della figura 5 a sinistra i raggi arrivano ai nostri occhi con un angolo pari a 42°–17° = 25° rispetto al nostro orizzonte. In questo caso, immaginando che il nostro occhio sia al vertice di un cono la cui base si trova sullo strato di goccioline d'acqua disperse in aria, possiamo vedere solo i colori che arrivano dalle goccioline che si trovano sulla circonferenza della base del cono con un semiangolo di 25°. Ovviamente, solo metà della base del cono immaginario che parte dai nostri occhi è rivolta al cielo, mentre l'altra metà è proiettata verso terra, quindi i raggi colorati avranno una forma ad arco pari a metà della circonferenza del cono che ha l'apertura angolare 'giusta' per vedere i raggi colorati. L'apertura angolare giusta cambia a seconda dell'altezza del Sole rispetto all'orizzonte, come illustrato nella figura 5.

Secondo una vecchia leggenda, alla fine dell’arcobaleno si trova un tesoro, o una pentola piena d'oro. Chissà, forse è vero, perché nessuno potrà mai arrivare alla fine dell’arcobaleno per verificare o smentire la leggenda. Infatti, come spiegato nella didascalia della figura 2 e nella spiegazione della forma ad arco, quando ci spostiamo si sposta anche l'arcobaleno visto dai nostri occhi, quindi la corsa verso la base dell’arcobaleno non può avvicinarci ad essa.

Anche la luce riflessa dalla Luna può generare un arcobaleno. Per assistere ad un arcobaleno lunare le condizioni sono stringenti, perché la Luna deve essere piena per riflettere la maggiore quantità possibile di luce del Sole, ed il cielo deve essere terso e buio, non illuminato né da luci artificiali né dalla Luna stessa, per cui il momento migliore è al sorgere o al tramontare del nostro satellite. Nell’articolo “Cosa sono i colori?” in questa raccolta, spieghiamo i motivi per cui i nostri occhi non sono in grado di riconoscere bene i colori di notte. Di conseguenza, l’arcobaleno lunare ci appare come un arco luminoso biancastro. Benché raro, l’arcobaleno lunare non è impossibile da vedere. Aristotele narra che in 50 anni sono stati osservati due arcobaleni lunari. All’epoca era più facile osservare sia le stelle, sia l’arcobaleno lunare, perché non c’era l’inquinamento luminoso che affligge gran parte delle zone abitate del nostro pianeta!

Infine, una curiosità: è possibile ‘creare’ un arcobaleno?

Sì, è possibile, se prestiamo attenzione ad alcuni dettagli. Le goccioline d’acqua devono essere per quanto possibile uguali e sferiche: il metodo migliore è usare un nebulizzatore (ad esempio un flacone di detergente spray) riempito di acqua e spruzzare in alto, in modo da dare tempo alle goccioline di diffondersi prima di cadere a terra. La luce che investe le goccioline deve essere composta da raggi paralleli: lasciate stare lampadine o torce o faretti, che producono risultati deludenti. Usiamo il Sole, il vero generatore dell’arcobaleno: mettendoci spalle al Sole, dopo aver spruzzato le goccioline di acqua, un piccolo arcobaleno non mancherà di fare capolino!

**Nota**

[1] Una spiegazione dei motivi per cui il cielo sereno diffonde luce blu (e anche perché le nuvole sono a volte bianche, a volte grigie) si trova nell’articolo “Nel blu, dipinto di blu” a pagina 15 della raccolta *Curiosità Scientifiche, uno sguardo alla Fisica di tutti i giorni* RT/2014/3/ENEA (2014) http://openarchive.enea.it/bitstream/handle/10840/4908/RT-2014-03-ENEA.pdf?sequence=1

# ASCOLTARE IL SAPORE? GUARDARE LE VOCI?
# COME IL CERVELLO MANIPOLA LE INFORMAZIONI SENSORIALI

*De 5 sensi, vedere, uldir, odorato sono di pocha prohibitione, tatto e gusto no.*

– Leonardo da Vinci, *Codice Trivulziano, fol. 7 v* (1480)

Da oltre un secolo sappiamo che le informazioni provenienti da ciascuno dei cinque sensi sono condizionate e modificate dalle informazioni provenienti dagli altri sensi non coinvolti nell'esperienza in corso, che contribuiscono –spesso inconsciamente– a rendere l'impressione generale degli oggetti che ci circondano e a valutare gli eventi che accadono.

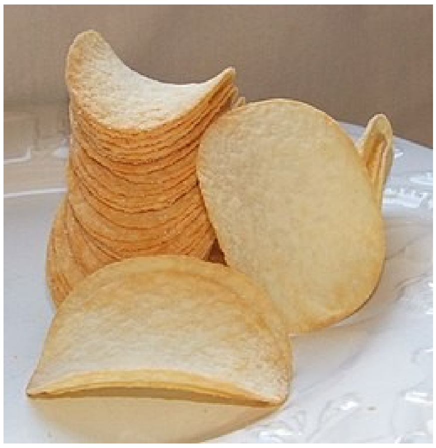
Un pioniere di questi studi sull'interazione tra le diverse percezioni sensoriali è stato il fisiologo e medico Ivan Pavlov (Rjazan', 1849 – Leningrado, 1936), che ha scoperto il 'riflesso condizionato' nel 1903. Durante gli studi sui processi digestivi (che gli permisero di vincere il Premio Nobel in medicina) Pavlov osservò un cane affamato che produceva saliva quando udiva il rumore dei passi della persona che portava il cibo, ancora prima di vederlo. Per verificare in modo sistematico questa osservazione, Pavlov fece precedere l'arrivo del cibo da un altro stimolo, il suono di un campanello. Dopo un periodo di addestramento in cui il cane ascoltava il suono e subito dopo vedeva il cibo, Pavlov notò che la salivazione veniva prodotta dopo il suono, anche se il cibo non arrivava. Quindi lo stimolo visivo del cibo che produceva salivazione era stato sostituito dallo stimolo acustico del suono di un campanello che produceva lo stesso effetto. Questa forma di condizionamento psichico della secrezione venne chiamato pavloviano, in onore del suo scopritore.

Gli allievi di Pavlov estesero gli esperimenti all'uomo, dimostrando che alcuni stimoli non collegati al cibo possono generare secrezioni salivari, la cosiddetta 'acquolina in bocca'. In altri esperimenti, ad un gruppo di persone venivano presentate contemporaneamente e per un certo numero di volte una luce e un suono. Successivamente, senza preavviso, veniva accesa la luce, senza suono: diverse persone riportarono la sensazione di ascoltare il suono che non c'era.

***Figura 1**. Immagine da risonanza magnetica della testa umana. La freccia indica la posizione del talamo. Da Wikipedia, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Brain_chrischan_thalamus.jpg*

Oggi sappiamo che alimentarsi è una delle due attività umane che coinvolge il maggior numero di sensi. Diversi studi hanno dimostrato che la percezione del sapore di bevande e di cibi è l'effetto di un processo dominato dall'olfatto, mentre le papille gustative giocano un ruolo meno importante.

Inoltre, la vista, il tatto e l'udito contribuiscono al gusto della pietanza, perché tutte le percezioni sensoriali sono elaborate e mescolate dal cervello per produrre la percezione che chiamiamo 'sapore'. Più precisamente, è il talamo (vedi la figura 1) che integra e arricchisce i segnali provenienti dai sensi, grazie alle connessioni col sistema limbico, il quale trasporta i contenuti emozionali della percezione sensitiva.



Nell'ambito degli studi sull'interazione tra i sensi, nel 2004 lo psicologo Charles Spence fece un esperimento su un gruppo di 20 persone, alle quali venne chiesto di indossare una cuffia davanti ad un microfono e mordere le patatine prese da contenitori anonimi. Le persone dovevano dare un morso e descrivere la consistenza di ciascuna patatina, assegnando un voto sulla loro 'croccantezza'. I partecipanti ascoltavano nelle cuffie il suono prodotto dal loro morso amplificato dal microfono, senza sapere che i suoni, prima di essere inviati nelle cuffie, venivano processati in modo da alterare il volume e di tagliare o accentuare frequenze sonore alte (rumori acuti) oppure basse (rumori gravi).

Alla fine dell'esperimento quasi nessuno dei partecipanti si accorse che le patatine di diversi contenitori erano uguali. La maggior parte identificava più fresche e di maggior consistenza le patatine morse mentre l'equalizzatore selezionava i rumori più acuti e il volume più alto, e viceversa meno fresche le patatine morse mentre l'equalizzatore riduceva il volume ed esaltava le frequenze basse.

I risultati di questo esperimento (vedi la nota [1]) dimostrano che la percezione e la degustazione del cibo sono alterate dall'ampiezza e dalla frequenza del rumore generato dalla masticazione. D'altronde, è lo stesso suono che esiste solo nella nostra mente, perché la percezione uditiva [2] è il risultato dell'elaborazione cerebrale di impulsi elettrici generati da onde di pressione meccaniche, come spiegato nell'articolo "E se i vicini di casa sono rumorosi?" in questa raccolta. Più in generale, ciascuno stimolo trasmesso dai 5 sensi (gusto, olfatto, tatto, udito, vista) viene inviato al cervello tramite una serie di impulsi elettrici, aventi varie durate e frequenze (numero di impulsi al secondo) che poi sono elaborati nelle zone cerebrali specializzate per essere trasformati in quello che noi chiamiamo sapore, odore, sensazione tattile, suono, colore e forma.

In altri esperimenti, Spence ha dimostrato che il colore del contenitore del cibo o della bevanda influenza la percezione del sapore di mousse e caffè, mentre la musica di sottofondo modifica il gusto della birra e la forma bombata dei cioccolatini cambia la sensazione di dolcezza. Incredibilmente, la vista e l'udito possono alterare il sapore di bevande e cibo che ci aspetteremmo siano determinate solo dal gusto e dall'olfatto.

Le industrie alimentari sono molto interessate a queste ricerche ed esperimenti, ad esempio per trovare il confezionamento/recipiente migliore –in termini di colore, forma e persino rumore per aprirlo– per incrementare il consumo di un prodotto.

Anche le bombolette spray sono state oggetto di studio per trovare il rumore dell'effusore più adatto ad aumentare nel cliente la sensazione di freschezza e piacevolezza del deodorante. Strano a dirsi, ma nel caso dei deodoranti spray è l'udito che modula la sensazione di freschezza tattile sulla pelle!

Infine, vogliamo accennare ad una ulteriore interazione tra vista e udito, non relazionata al consumo di bevande o cibo. Si tratta di una ‘illusione acustica’ nel riconoscimento di una parola o di un singolo fonema, scoperta nel 1976 da Harry McGurk e John MacDonald. Nell’articolo dall’eloquente titolo *‘Ascoltando le labbra e guardando le voci’* [3] i due autori riportano il video di una donna in primo piano che muove le labbra in modo da pronunciare ripetutamente la sillaba ‘*ga*’ mentre l’audio riporta la sillaba ‘*ba*’. Incredibilmente, gli spettatori del video percepiscono la sillaba ‘*da*’ che è diversa sia da quella pronunciata che da quella ascoltata. Nel caso opposto (labbra del filmato pronunciano ‘*ba*’ mentre l’audio è doppiato in ‘*ga*’) la maggior parte delle persone percepisce ‘*bagba*’ oppure ‘*gaba*’. Viceversa, le persone riportano la sillaba corretta quando ascoltano il solo audio senza video (quindi senza input visivo) oppure guardano il video senza audio. Questa illusione acustica è ‘robusta’ nel senso che anche conoscendo l’effetto a priori, la persona che guarda il video doppiato continua ad essere ingannata. Studi successivi hanno dimostrato che l’illusione acustica non si limita alle sillabe, ma si estende a diverse parole.

L’esperimento di McGurk e MacDonald rivela che la percezione delle parole non è un processo puramente auditivo, ma viene influenzato dalla vista. Ovviamente, l’illusione acustica avviene solo quando le informazioni visive e audio sono in contraddizione, e in questo caso l’elaborazione cerebrale sembra dare maggiore credibilità alla percezione visiva, fino a cambiare la percezione del suono.

La conoscenza dell’effetto McGurk permette di ottenere informazioni utili nello studio del riconoscimento delle parole in ambienti rumorosi, e nei meccanismi coinvolti in alcuni casi di afasia (segnatamente, nel caso di incapacità di riconoscere una o più parole). Inoltre, di questo effetto si tiene conto nel valutare l’attendibilità di testimoni di un fatto e nel doppiaggio cinematografico e televisivo.

**Note**


[1] M. Zampini, C. Spence: *The role of auditory cues in modulating the perceived crispness and staleness of potato chips*, Journal of Sensory Studies vol. 19, pp. 347-363 (2004).

[2] D. Murra, G.P. Gallerano, P. Di Lazzaro: *Suono e rumore, una differenza ‘spettrale*’, Energia, Ambiente e Innovazione vol. 3, pagg. 73-78 (2015). www.enea.it/it/seguici/pubblicazioni/pdf-eai/n-3-maggio-giugno-2015/10-suono-e-rumore.pdf

[3] H. McGurk, J. MacDonald: *Hearing lips and seeing voices*, Nature, vol. 264, pp. 746–748 (1976).

# COSA SONO I COLORI?

*I colori, come i lineamenti, seguono i cambiamenti delle emozioni.*

– Pablo Picasso

Dobbiamo ammetterlo: siamo fortunati a vivere in un mondo ricco di colori e forme variegate, che spesso ci stupiscono ed emozionano. Forme e colori che possiamo apprezzare grazie ai nostri occhi. L'occhio umano è un mirabile esempio di perfezionamento evolutivo. Si tratta infatti di un organo efficiente e versatile: può cambiare rapidamente il suo piano focale per rendere nitide le immagini degli oggetti che guardiamo da molto lontano e da vicino, il campo visivo è di 180 gradi –praticamente possiamo vedere tutti gli oggetti che si trovano oltre il piano ideale dove si trovano gli occhi, anche gli oggetti laterali– funziona in un amplissimo intervallo di intensità luminose –la minima intensità percepibile è paragonabile al limite teorico imposto dalle leggi della fisica quantistica ed è un miliardo di volte più piccola della massima intensità percepibile– e la risoluzione spaziale delle immagini è vicina a quella minima imposta dal limite di diffrazione [1].

Il funzionamento della visione e del riconoscimento dei colori ha incuriosito l'uomo sin dall'antichità e molto abbiamo scoperto, in particolare negli ultimi due secoli. Ma ad oggi, quanti sanno rispondere alla domanda: cosa sono i colori? Sono un fatto oggettivo o una sensazione?

La risposta non è ovvia. La visione è un fenomeno complesso, tuttora oggetto di ricerca interdisciplinare in diversi campi, dalla fisica alla psicologia, dalla neurofisiologia alla biochimica. Proviamo ad entrare nell'argomento in punta di piedi, semplificando i concetti, per quanto possibile.

La parte dell'occhio sensibile alla luce è la retina, un tessuto formato da 10 strati di cellule interconnesse, vedi la figura 1. Gli studi di anatomia comparata mostrano che nello sviluppo dell'embrione di molti animali vertebrati –uomo incluso– una parte del tessuto cerebrale si protrae in avanti, rimanendo collegata al cervello tramite lunghe fibre. Si tratta della retina, che è quindi una parte del cervello che entra in contatto con la luce che ci circonda.

Quando un raggio di luce giunge sulla retina, vedi la figura 1, attraversa tutto il suo spessore fino ad essere assorbito da due pigmenti fotosensibili –la rodopsina (porpora visiva) e la iodopsina– che circondano due tipi di recettori, chiamati bastoncelli e coni, rispettivamente. La luce assorbita provoca una serie di reazioni chimiche che modificano la struttura dei due pigmenti in modo da chiudere i canali usati dallo ione sodio per uscire all'esterno del cono o del bastoncello. Ne segue un accumulo di carica elettrica nel recettore, che produce un impulso nervoso che si propaga alle cellule bipolari della retina.

In altre parole, la luce che entra nell'occhio provoca una serie di reazioni chimiche nei fotorecettori che producono un eccesso di carica elettrica, rapidamente trasmessa ad altre cellule della retina e infine al cervello attraverso il nervo ottico [2].

Nella retina umana ci sono circa 7 milioni di coni, prevalentemente localizzati nella regione centrale chiamata fovea, e 110 milioni di bastoncelli, localizzati ovunque ad eccezione di una zona di 0,5 mm di diametro nella fovea centrale. I coni sono specializzati nel riconoscimento dei colori nella visione diurna, mentre i bastoncelli sono molto sensibili alla luce, ma non producono segnali se stimolati da luce intensa e quindi sono specializzati per la ricezione di luce debole, ad esempio nella visione notturna o in luoghi poco illuminati.

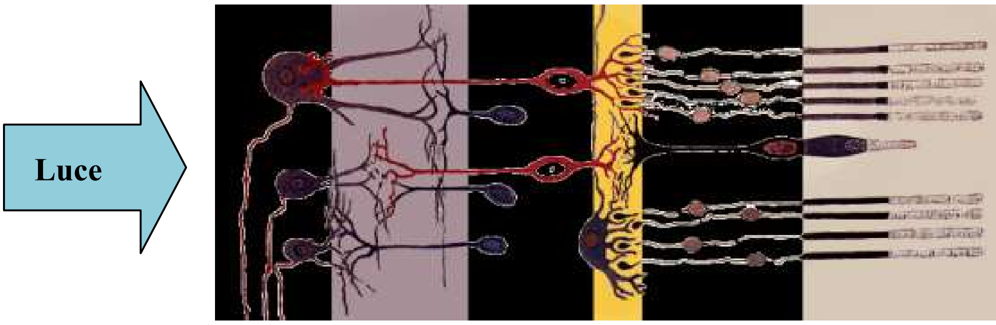



***Figura 1***. *Schema di alcuni dei 10 strati cellulari della retina. La luce entra dalla parte sinistra. Da sinistra a destra troviamo le cellule gangliari connesse alle fibre del nervo ottico, le cellule amacrine e bipolari, le cellule orizzontali (su sfondo giallo). Infine, a destra si trovano i fotorecettori: al centro si riconosce un cono circondato da 9 bastoncelli, e tutti terminano nell'epitelio pigmentato. Notiamo che tutte le cellule sono connesse fra loro, sia in modo 'orizzontale' che 'verticale'. Questa interconnessione multipla riveste una notevole importanza nel meccanismo della visione dei colori, come spiegato nella nota [2]. Tratto da Wikipedia,* https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Fig_retine.png

La figura 1 mostra che coni e bastoncelli si trovano nella parte 'sbagliata' della retina, opposta a quella esposta alla luce. In pratica, la luce deve attraversare diversi strati di cellule prima di essere rivelata da coni e bastoncelli. Il motivo della posizione 'a rovescio' dei fotorecettori non è stato ancora chiarito, ma potrebbe esserci un'interessante connessione con le funzioni dell'ipotalamo, come spiegato nella nota [3].

Tornando ai colori, si può dimostrare che qualsiasi colore può essere ottenuto mescolando 3 colori, addizionati o sottratti in proporzioni diverse (tranne se uno dei tre colori può essere ottenuto mescolando gli altri due). In particolare, usando il rosso (R), il verde (V) e il blu (B), detti colori primari, qualsiasi colore può essere ottenuto in modo additivo. Ad esempio, il colore bianco si ottiene quando R, V e B sono sommati nelle stesse quantità; il giallo si ottiene quando R e V sono sommati nelle stesse quantità mentre B è assente. Un caso particolare è il marrone, perché si ottiene come il giallo, quando i valori di R e V sono piccoli: in pratica, il marrone è un giallo a bassa brillanza. I primari R, V e B sono utilizzati oggi nei televisori, nei monitor dei computer e nei sistemi di grafica digitale. Potete provare anche voi a creare tutti i colori conosciuti mescolando luci rosse, verdi e blu in diverse proporzioni, come suggerito nella nota [4].

Queste nozioni di base ci aiutano a rispondere alla domanda: come funziona il riconoscimento dei colori? Nel 1802 Thomas Young (Milverton, 1773 – Londra, 1829) propose una teoria, cosiddetta 'tricromatica', che fu successivamente perfezionata da Hermann von Helmholtz (Potsdam, 1821 – Berlino, 1894). La teoria tricromatica suppone che nell'occhio ci siano tre diversi pigmenti, un tipo che assorbe il rosso, uno che assorbe il verde e uno il blu. In questo modo, la luce proveniente dall'oggetto osservato viene assorbita dai tre pigmenti (oggi sappiamo che si tratta dei pigmenti che si trovano sui coni) in modo diverso a seconda del colore dell'oggetto stesso: se è rosso, solo il cono con pigmento R assorbe il rosso e invia segnali; se è giallo i coni R e V assorbono la stessa quantità di luce e mandano lo stesso segnale mentre il cono B non manda nessun segnale, e così via. Questi segnali elettrici provenienti dai coni R, V e B vengono inviati al cervello che in qualche modo li elabora e '*decide*' il colore a seconda delle diverse proporzioni dei tre segnali [4].

La teoria di Young ed Helmholtz è in grado di spiegare molte proprietà della visione dei colori, ma non tutte: questa teoria è adeguata ad una trattazione elementare e divulgativa, ma bisogna sapere che la percezione dei colori è un fenomeno più complesso, come accennato nella nota [2].

La percezione dei colori cambia variando l'intensità della luce. Infatti, se l'illuminazione è molto debole, gli oggetti ci appaiono di un colore poco definito e a volte diverso dal colore degli stessi oggetti visibile in piena luce. Il motivo è che i coni, che distinguono i tre colori primari, hanno bisogno di una certa quantità di luce per attivarsi, e in condizioni di scarsa illuminazione non mandano segnali. In un ambiente semibuio, con poca luce, entrano in gioco i bastoncelli, che si attivano a basse intensità luminose, ma sono insensibili al colore rosso (che quindi appare nero in una stanza semibuia) e hanno una modesta sensibilità tra il verde e il blu. La resa cromatica dei bastoncelli è assai scarsa, comunque diversa rispetto a quella dei coni: di conseguenza, i colori degli oggetti cambiano –a parità di spettro di illuminazione– con l'intensità della luce, a seconda di quanti coni e bastoncelli sono attivati dallo stimolo luminoso.

I colori cambiano anche quando cambia lo spettro di emissione della sorgente luminosa. Ad esempio, la luce emessa da un gruppo di candele –diciamo 100 candele– ha uno spettro di emissione spostato verso il verde-rosso, quindi non emette luce blu-viola, e non permette di riconoscere il colore blu di un oggetto, che appare quasi nero. Il colore blu dello stesso oggetto è invece è ben visibile con la stessa intensità luminosa di 100 candele emessa dal Sole attenuato da una tenda bianca semi opaca. Ciò accade perché la luce del Sole ha uno spettro che comprende tutti i colori, dal rosso fino al violetto, ben più ampio dello spettro emesso dalla fiamma delle candele. Per questo motivo, è necessario valutare con attenzione le sorgenti di illuminazione dei quadri esposti in un museo: i colori dello stesso dipinto appaiono diversi se illuminati con lampade a LED oppure alogene o a incandescenza, perché ciascun tipo di lampada emette luce con un diverso spettro (vedi l'articolo "Lampadine a incandescenza, a basso consumo, a LED… cerchiamo di fare un po' di luce!" in questa raccolta). Per lo stesso motivo, in un negozio di abbigliamento prima di scegliere un capo, specialmente se scuro, conviene guardarlo fuori dal negozio, alla luce del Sole: il suo colore apparirà diverso da quello osservato nella cabina di prova con illuminazione artificiale.

In questo articolo abbiamo sintetizzato alcuni concetti della visione, mostrando che si tratta di un affascinante fenomeno multidisciplinare, con alcuni aspetti ancora poco conosciuti e misteriosi… Ma siamo almeno in grado di accennare una risposta al quesito iniziale, cioè se i colori sono un fatto oggettivo, oppure una sensazione?

La risposta che ci sembra più corretta è che i colori sono sia un fatto oggettivo, sia una sensazione.

I colori sono un fatto oggettivo, nel senso che ogni oggetto riflette e diffonde il suo specifico colore, ad esempio verde, perché la materia di cui è composto assorbe i colori della luce che lo illumina ad eccezione della componente verde. Quindi il colore è il risultato oggettivo dell'interazione fra la radiazione illuminante –con il suo specifico spettro– e gli atomi ed elettroni di cui è composta la materia dell'oggetto illuminato con le proprie bande di assorbimento. Di conseguenza, il colore cambia se cambia la materia dell'oggetto, questo è ovvio, ma il colore cambia anche illuminando lo stesso oggetto con luce a diverso spettro, come negli esempi dei quadri esposti al museo e dei capi di abbigliamento in un negozio, e come mostrato nella figura 2.

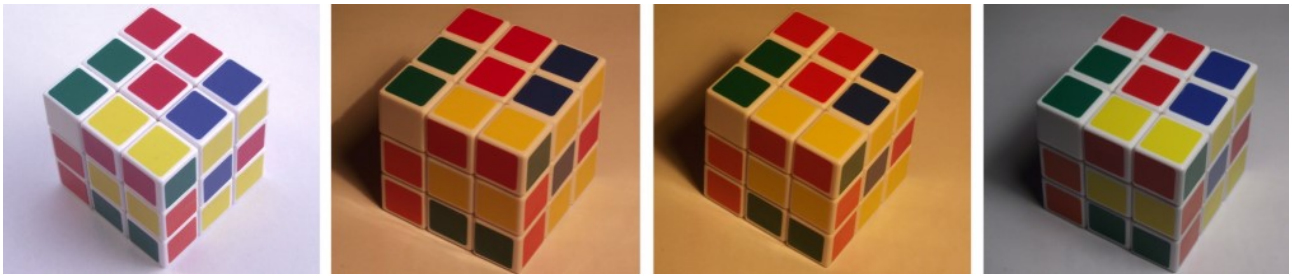


***Figura 2.** Un cubo di Rubik –e il tavolo sullo sfondo– fotografato in diverse condizioni di illuminazione, eliminando l'automatismo del bilanciamento dei colori della fotocamera. Da sinistra a destra: luce naturale, lampada a incandescenza, lampada fluorescente 'calda', lampada fluorescente 'fredda'. Analizzando i valori R, V e B delle stesse faccette risulta che i colori cambiano drasticamente nelle diverse foto. Ad esempio il giallo della faccia superiore della seconda foto da sinistra in realtà è arancione: tuttavia, noi lo percepiamo ancora giallo, seppur un poco più scuro della prima foto a sinistra. Il motivo è lo sfondo, che influenza il colore percepito tramite una sorta di normalizzazione del colore fatta dall'elaborazione cerebrale allo scopo di migliorare il contrasto dell'immagine, come spiegato nel testo. Foto degli autori.*

I colori sono anche una sensazione, perché la retina trasforma la luce che arriva all'occhio in impulsi nervosi [2] e la successione di impulsi elettrici viene trasformata dal cervello nella sensazione che noi chiamiamo 'colore'. E' la sensazione del colore che ci emoziona, ad esempio ammirando un arcobaleno, come descritto nell'articolo "L'arcobaleno, colori pennellati dal Sole" in questa raccolta.

E' interessante notare che il colore ha aspetti soggettivi, vedi ad esempio la nota [5], dovuti all'elaborazione cerebrale che tiene conto dell'esperienza pregressa e considera i colori adiacenti, quelli dello sfondo e il contesto prima di '*decidere*' quale sia il colore dell'oggetto che stiamo osservando. Un esempio è la falsa percezione dei colori nelle foto della figura 2. Tramite un software di analisi di immagini, possiamo analizzare i valori R, V e B di ciascuna faccetta colorata nelle diverse foto della figura 2. Risulta che i colori cambiano in modo drastico quando cambia l'illuminazione. Ad esempio il giallo e il blu della faccia superiore nella prima foto da sinistra diventano rispettivamente arancione e grigio nella seconda foto da sinistra: tuttavia, noi li percepiamo ancora giallo e blu, seppure più scuri rispetto alla prima foto. L'elaborazione cerebrale assume che lo sfondo '*deve essere*' bianco e se non lo è a causa dello spettro di illuminazione, il cervello cambia i colori facendoli percepire come sarebbero '*se lo sfondo fosse bianco*'. Questa rielaborazione e normalizzazione dei colori –basata sulla nostra raffinata capacità di valutare sia le caratteristiche spettrali dell'illuminante, sia le caratteristiche della superficie illuminata– è utile perché permette di migliorare la valutazione del contrasto di oggetti adiacenti, ed è chiamata 'costanza di colore'. La costanza di colore permette di riconoscere che una banana è gialla anche se viene illuminata da luce rossa, ad esempio. In pratica, il sistema occhio-cervello cambia il colore osservato in modo che sia coerente con l'esperienza pregressa –cioè con le immagini di oggetti simili che abbiamo in memoria– e con le aspettative date dal contesto (situazione e oggetti vicini) d'accordo con la psicologia della Gestalt.

I lettori interessati ad approfondire l'errata percezione dei colori, il metamerismo, la costanza di colore, troveranno in internet materiale su cui riflettere, a cominciare dalla famosa scacchiera di Adelson [6] per proseguire con l'articolo [7] e il filmato [8]. Alcune presentazioni degli autori sulle illusioni ottiche, incluse quelle che coinvolgono i colori, sono riportate nella nota [9].

**Note**

[1] P. Di Lazzaro, D. Murra: *Luce e visione, un binomio (quasi) perfetto* Energia, Ambiente e Innovazione vol. 4, pagg. 58-63 (2014). www.enea.it/it/seguici/pubblicazioni/pdf-eai/n-4-2014/Luceevisione.pdf

[2] Al contrario di quanto postulato dalla teoria tricromatica, i fotorecettori nella retina (coni e bastoncelli) non sono direttamente connessi al nervo ottico, ma sono collegati agli altri strati di cellule della retina, vedi la figura 1, che sono interconnesse fra di loro. Le cellule più importanti nel meccanismo visivo sono:

- ✓ i fotorecettori, coni e bastoncelli, quando ricevono uno stimolo luminoso generano impulsi elettrici modulati in ampiezza, la quale è proporzionale alla quantità di luce ricevuta e assorbita dai pigmenti, in particolare per i coni nei tre colori primari;
- ✓ le cellule amacrine, i neuroni bipolari e le cellule orizzontali, intrecciate fra di loro, elaborano i segnali nervosi provenienti da uno o più fotorecettori, e li codificano in brevi impulsi elettrici (spikes) emessi a varie distanze di tempo l'uno dall'altro (in modulazione di frequenza). In altre parole, nella retina c'è una trasformazione di segnali elettrici modulati in ampiezza in segnali modulati in frequenza, con modalità non ancora note;
- ✓ le cellule gangliari, che combinano i segnali modulati in frequenza e li inviano agli assoni che formano il nervo ottico, fino a raggiungere i corpi genicolati laterali e infine la corteccia visiva del cervello, dove avviene l'interpretazione dei segnali e la percezione del colore [1]. Recentemente è stato scoperto che anche le cellule gangliari svolgono l'azione di fotorecettori della luce blu, come accennato nella nota [3].

In pratica, le informazioni provenienti dai fotorecettori vengono combinate, modulate e codificate già nella retina prima di essere inviate al cervello. Questo fatto non deve stupire, pensando a quanto scritto all'inizio dell'articolo: la retina è un tessuto cerebrale proteso verso l'esterno.

[3] Il motivo per cui i fotorecettori si trovano nella posizione opposta a quella esposta alla luce non è ovvio. Ad esempio il polpo –l'animale più intelligente ed elevato fra gli invertebrati– ha un occhio strutturato in modo simile al nostro, inclusa la retina composta da tessuto cerebrale estroflesso, e i suoi fotorecettori sono posizionati dalla parte 'giusta', ovvero la parte della retina esposta alla luce.

In uno studio pubblicato sulla rivista Biochemistry nel 2003 è stato osservato che nelle cellule gangliari (le prime cellule raggiunte dalla luce, vedi la figura 1) è presente la melanopsina, un pigmento che assorbe luce blu. La cellula gangliare è quindi fotosensibile e può agire come 'terzo fotorecettore'. Oltre che al nervo ottico, i fotorecettori gangliari sono connessi anche alle cellule nell'ipotalamo addette alla regolazione dei livelli di melatonina, che influenzano la capacità di attenzione delle persone perché correlate con il ciclo circadiano, cioè il ciclo di sonno e veglia. Ad esempio, di sera la quantità di luce blu cui siamo esposti diminuisce, la melatonina aumenta, e ci viene sonno. Ma la luce blu di smartphone e tablet assorbita dalle cellule gangliari inganna l'ipotalamo e contrasta il naturale aumento di melatonina, favorendo l'insonnia.

E' possibile, ma non ancora certo, che le cellule gangliari fotosensibili possano giustificare la posizione di coni e bastoncelli dalla parte opposta rispetto all'arrivo della luce.

[4] Vi consigliamo un sito interattivo dove potete divertirvi a provare tutte le combinazioni dei 3 colori primari R, V e B per ottenere quasi tutti i colori conosciuti. Si trova alla pagina web https://phet.colorado.edu/sims/html/color-vision/latest/color-vision_it.html

[5] Di che colore è il vestito? https://attivissimo.blogspot.it/2015/03/non-ridete-i-colori-di-quel-vestito.html

[6] E.H. Adelson: *On seeing stuff The Perception of Materials by Humans and Machines*, Proceedings of the. SPIE Vol. 4299, pp. 1-12, Human Vision and Electronic Imaging VI, B. E. Rogowitz; T. N. Pappas; Eds. (2001). Vedi anche la spiegazione dell'illusione della scacchiera di Adelson su https://it.wikipedia.org/wiki/Illusione_ottica

[7] A. Farini: *Occhio specchio dell'anima: il sistema visivo umano visto dalla fisica* http://prometeo.sif.it/papers/online/sag/028/03-04/pdf/06-fisica-e.pdf

[8] Vedi ad esempio sul sito di RAI Scuola www.raiscuola.rai.it/articoli-programma-puntate/sorprendentemente-cambio-colore-punt-12/31792/default.aspx

[9] Due lezioni didattiche in cui gli autori parlano delle illusioni ottiche, incluse quelle che coinvolgono il colore, si possono seguire alle seguenti pagine web sul sito Academia.edu:

*Luce visione, percezione, un sorprendente viaggio tra i colori e le illusioni dell'arte figurativa*: www.academia.edu/5372694/Luce_visione_percezione_un_sorprendente_viaggio_tra_i_colori_e_le_illusioni_dell_arte_figurativa

*Perché la percezione è diversa dalla visione? Forme e colori nell'arte e nelle reliquie*

www.academia.edu/26089014/Perch%C3%A9_la_percezione_%C3%A8_diversa_dalla_visione_Forme_e_colori_nell_arte_e_nelle_reliquie

## *Oggetti di uso comune*

# SU E GIÙ SULL'ALTALENA…

> *E mentr'io attenderò al molino, il fattore mi ruberà i frutti della campagna; e se mi porrò invece a badare a questa, il mugnajo mi ruberà la molenda. E di qua il mugnajo e di là il fattore faranno l'altalena, e io nel mezzo a godere …*
>
> – Luigi Pirandello, *Il fu Mattia Pascal* (1904)

Tra gli oggetti che non possono mancare in un parco giochi c'è l'altalena, che tutti conosciamo come oggetto semplice da usare. In effetti, al contrario del pedalare in bicicletta, che richiede una capacità di equilibrio dinamico, per usare l'altalena non occorre una grande esperienza: basta poco perché un bambino riesca a darsi una spinta da solo, senza aspettare l'aiuto del genitore o del nonno.

Già, ma 'darsi una spinta' è comprensibile quando c'è una controparte in grado di ricevere la nostra spinta e di restituircela: ad esempio, se ci troviamo sopra un monopattino e vogliamo spostarci, è sufficiente 'spingere' un elemento esterno e fisso, come una parete o il suolo, in modo da ricevere una spinta uguale e contraria d'accordo con il 'terzo principio della dinamica' [1]. Se, però, intorno a noi non vi è alcuna parete su cui possiamo esercitare la nostra spinta, non riusciremo a muoverci con la piattaforma. Senza un elemento esterno il nostro è un 'sistema isolato' e per un tale sistema vale il primo principio della dinamica: "*un corpo tende a rimanere nel proprio stato di quiete o di moto uniforme finché non intervengono forze esterne*". Quindi, ciccia, rimaniamo fermi!

Allora, come facciamo a far oscillare l'altalena? Se c'è il nonno che spinge, la risposta è facile: il nonno è fermo con i piedi a terra e, dando una spinta al bambino, riceve una spinta all'indietro che trasmette al terreno. Le due spinte (in avanti al bambino e all'indietro alla Terra) si equivalgono, ma mentre l'accelerazione all'indietro della Terra è piccolissima e impercettibile, quella in avanti del bambino è consistente.

Senza il nonno a spingere, però, il bambino e l'altalena formano un sistema isolato (a parte il vincolo della struttura dell'altalena sul terreno) perché il bambino non ha nulla intorno su cui spingere. Inizialmente, per la verità, è sufficiente puntare i piedi a terra e spostarsi indietro e poi, una volta seduti sul seggiolino ed alzati i piedi da terra, il bambino può avviare le sue piccole oscillazioni. La partenza, quindi, avviene in quanto sfruttiamo l'elemento esterno (il terreno) per aumentare l'altezza del seggiolino e, di conseguenza, la sua 'energia potenziale' [2]. Una volta staccati dal terreno, questa energia si trasforma in 'energia cinetica' [3] cioè in velocità. Il movimento avanti-indietro è una trasformazione di energia, da quella interamente potenziale (nel momento in cui il bambino è fermo nella posizione più alta) a quella interamente cinetica (nel momento in cui il bambino arriva alla posizione più bassa, in cui raggiunge la massima velocità dell'oscillazione).

Tutto giusto, ma sappiamo che l'attrito dell'aria e quello del vincolo della corda sull'altalena tenderanno a frenare l'oscillazione fino a fermarla: quindi deve esistere un meccanismo che consente di recuperare l'energia persa, se non a guadagnarne altra in modo da aumentare l'ampiezza delle oscillazioni.  Guardando i bambini che si divertono oscillando sulle altalene si capisce che un meccanismo di recupero dell'energia deve esserci. Per scoprirlo, analizziamo cosa fa il bambino durante il suo moto oscillatorio e cerchiamo di capire dove acquista l'energia e a spese di cosa riesce darsi una spinta.

La posizione assunta dal bambino durante il movimento è schematizzata nella figura 1. Quando l'altalena è nelle due posizioni estreme di oscillazione in alto il bambino è molto 'sdraiato', mentre, quando passa per la posizione centrale, è seduto normalmente. Cosa cambia a livello di forze fisiche?

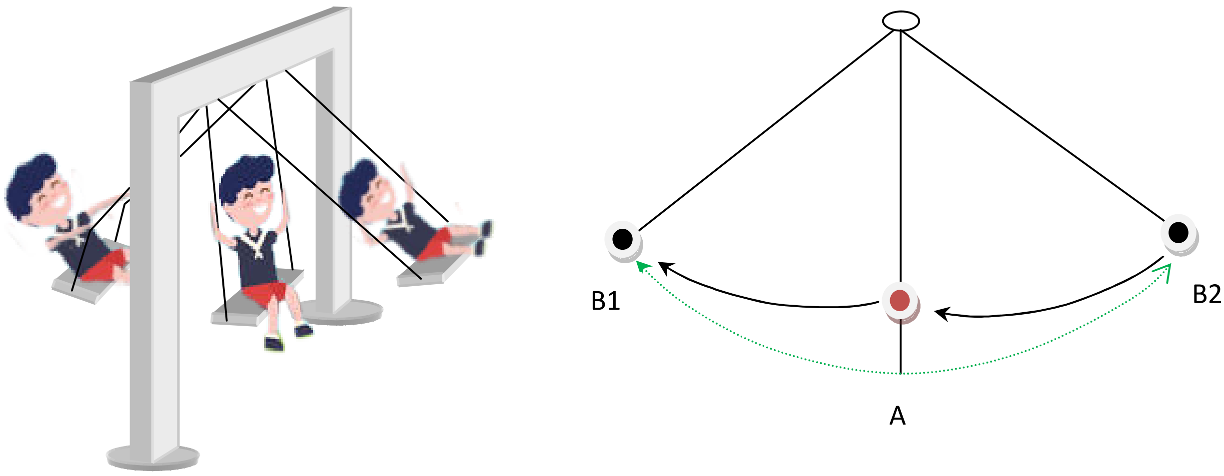



***Figura 1****. Schema dell'oscillazione di un bambino sull'altalena. Nel punto A la velocità è massima, e tutta l'energia è cinetica, mentre nei punti di inversione della direzione B1 e B2 la velocità è zero, quindi l'energia cinetica è nulla e tutta l'energia è potenziale. Nei punti intermedi fra B ed A l'energia totale è data dalla somma di energia cinetica e potenziale, cui bisogna sottrarre l'energia perduta per attrito, ma quest'ultima viene compensata dal movimento del baricentro del bambino, come spiegato nel testo. A destra, il cerchio colorato sta ad indicare la posizione del baricentro del bambino rispetto al seggiolino che segue la traiettoria tratteggiata: in A il baricentro è più in alto, rispetto al seggiolino, in confronto alla posizione assunta in B1 e B2.*

E' evidente che inclinare indietro il tronco del corpo (alzando le gambe per mantenere l'equilibrio) abbassa il centro di massa, o baricentro [4]. Infatti, l'innalzamento della parte inferiore delle gambe è più che compensato dall'abbassamento del torace e della testa, dato che queste ultime pesano di più.

Perché questo movimento del baricentro, in alto ed in basso, comporta un guadagno di energia?

Sappiamo che l'oscillazione tra i punti B1 e B2 della figura 1 comporta un trasferimento di energia, da un massimo di energia potenziale (posizioni B1 e B2) ad un massimo di energia cinetica (posizione A). Se non ci sono perdite per attrito o forze esterne, la velocità che il bambino assume in A è sempre la stessa e gli consente di arrivare ai punti B1 e B2 in virtù della conservazione dell'energia.

Se durante il movimento tra B1 ed A il bambino alza il suo baricentro, si accorcia il braccio del pendolo (ovvero la distanza tra il fulcro ed il baricentro del bambino). Questo accorciamento comporta l'aumento della velocità del bambino poiché in un sistema che ruota intorno ad un asse si conserva (cioè non varia) la grandezza denominata '*momento della quantità di moto*' m×v×r (dove m = massa del bambino, v = velocità del bambino sull'altalena, r = distanza tra baricentro del bambino e fulcro, ovvero l'attacco delle corde dell'altalena) [5]. In pratica, se r diminuisce, v aumenta in modo che il prodotto m×v×r resti costante. Questo effetto è responsabile, ad esempio, dell'aumento della velocità di rotazione dei pattinatori quando portano le braccia al petto, perché avvicinando le braccia diminuisce r e quindi deve aumentare v in modo che $m \times v \times r$ non cambi. Dunque, nel punto A la velocità del bambino aumenta per compensare la riduzione del braccio r del pendolo. Aumentando v, anche la sua energia cinetica aumenta, e quindi aumenta anche l'energia totale.

Poiché l'energia cinetica è aumentata, anche l'energia potenziale finale dovrà aumentare, per cui il punto di arrivo B2 sarà leggermente più alto rispetto alla precedente oscillazione. Ma sul punto B2 il bambino abbassa il suo baricentro senza influire, questa volta, sulla velocità di rotazione in quanto in quell'istante la velocità è nulla, e nullo è il valore del momento della quantità di moto. E' pur vero che abbassando il baricentro ha diminuito anche la sua energia potenziale, ma non tanto da compensare l'aumento di energia dovuta all'aumento della velocità in A per cui il bilancio finale è attivo: il sistema altalena-bambino ha guadagnato energia! Più precisamente, ha recuperato l'energia persa per attrito e il bambino può continuare a dondolare.

Rimane da trovare il 'colpevole' dell'aumento di energia: sono sbagliate le leggi della dinamica o il sistema altalena-bambino non è un sistema isolato?

La risposta giusta è la seconda. Infatti, il bambino compie un lavoro variando la posizione del suo baricentro [2], sfruttando il vincolo della struttura dell'altalena sul terreno. In pratica, nell'alzare il baricentro il bambino dà una spinta in basso al seggiolino, il quale trasmette la spinta alla struttura dell'altalena e da questa al suolo. La spinta del nonno –intuitivamente più comprensibile– equivale a quella che il bambino esercita alzandosi ed abbassandosi sul seggiolino. Il movimento sull'altalena viene generato come reazione di una spinta data al pianeta Terra. Ma, siccome ad un bambino che gioca sull'altalena nell'emisfero Nord ne corrisponde sicuramente un altro nell'emisfero Sud, alla fine è come se si dessero una spinta a vicenda e la Terra non si muove.

E se improvvisamente tutti i bambini dell'emisfero Sud smettessero di giocare all'altalena?!?

**Note**

[1] Il terzo principio della dinamica, nella formulazione originaria di Newton, afferma che "*ad ogni azione corrisponde sempre una uguale ed opposta reazione*", dove il termine 'azione' deve essere inteso nell'accezione generale di forza.

[2] Per ogni corpo di massa m che si trova ad un'altezza h dal suolo, possiamo definire energia potenziale gravitazionale la grandezza: $E_{pot} = m \times g \times h$ dove g è l'accelerazione di gravità pari a $9{,}81\ m/s^2$.

Consideriamo un oggetto di massa m fermo a una altezza h1, che viene lasciato cadere sotto l'azione della forza di gravità fino all'altezza h2. In questa caduta, la forza di gravità compie un lavoro (cioè, impiega energia per spostare l'oggetto): deduciamo che l'oggetto, anche se inizialmente fermo, ha in sé una forma di 'energia immagazzinata', detta 'energia potenziale gravitazionale', la cui variazione rappresenta il lavoro L compiuto dalla forza gravitazionale per spostarlo da una posizione iniziale a una posizione finale:

$$L = m \times g \times h1 - m \times g \times h2 = m \times g \times (h1 - h2)$$

Per la legge di conservazione dell'energia, la variazione dell'energia potenziale si trasforma in energia cinetica –vedi la nota [3] – al netto della dissipazione di energia causata da attrito. Se l'attrito è trascurabile, la somma dell'energia potenziale e dell'energia cinetica di un oggetto rimane costante.

[3] Si definisce energia cinetica di un corpo di massa m in moto a velocità v, la quantità $E_{cin} = 0{,}5 \times m \times v^2$. Diamo una dimostrazione elementare di questa formula. Se un corpo di massa m si sposta dalla posizione $S_1$ alla posizione $S_2$, il lavoro compiuto dal corpo sarà dato dal prodotto della forza per lo spostamento e, tenendo conto della legge fondamentale della dinamica, per cui la forza è data dalla massa del corpo m moltiplicata per la sua accelerazione a, il lavoro L sarà dato da

$$L = m \times a \times (S_2 - S_1). \qquad (1)$$

L'accelerazione del corpo nel segmento considerato è definita come il rapporto tra la velocità $v_2$ del corpo nel punto $S_2$ meno la velocità $v_1$ nel punto $S_1$ fratto l'intervallo di tempo trascorso:

$$a = (v_2 - v_1)/(t_2 - t_1). \qquad (2)$$

Sostituendo l'equazione (2) nell'equazione (1) otteniamo

$$L = m \times (v_2 - v_1) \times (S_2 - S_1)/(t_2 - t_1) \qquad (3)$$

Osserviamo che il rapporto $(S_2 - S_1)/(t_2 - t_1)$ nell'equazione (3) è uguale alla velocità media del corpo nell'intervallo considerato, che si può scrivere come media aritmetica $(v_2 + v_1)/2$. Di conseguenza, il lavoro può essere espresso nella forma:

$$L = m \times (v_2 - v_1) \times (v_2 + v_1)/2 = 0{,}5 \times m \times (v_2^2 - v_1^2) = E_{cin2} - E_{cin1}$$

per cui il lavoro compiuto dal corpo eguaglia la variazione della sua energia cinetica $E_{cin} = 0{,}5 \times m \times v^2$. Notiamo l'analogia con il lavoro definito nella nota [2], pari alla variazione dell'energia potenziale: l'analogia sussiste perché la somma di energia cinetica e di energia potenziale di un corpo rimane costante, al netto delle perdite dovute, ad esempio, alla forza di attrito.

Ogni corpo in movimento (cioè dotato di velocità v diversa da zero) può compiere un lavoro grazie alla sua energia cinetica: pensiamo all'acqua che scorre in un fiume, che grazie alla sua energia cinetica mette in moto le pale del mulino, compiendo lavoro. Oppure al giocatore che calcia il pallone e compie lavoro perché trasferisce l'energia cinetica del piede al pallone che a sua volta si muove e acquista velocità e quindi energia cinetica.

[4] Il baricentro è definito come il centro di massa (o centro di gravità) di un corpo o di un sistema di corpi, cioè quel punto che si muove come se in esso fosse concentrata la massa, e come se ad esso fosse applicata la forza esterna agente sul corpo o sul sistema di corpi.

Conoscere il baricentro di un corpo è molto utile perché permette di ignorare la forma e l'eventuale disomogeneità di densità del corpo (o del sistema di corpi) e quindi consente di controllare gli effetti della forza applicata –e di seguire il movimento dell'oggetto– come se fosse costituito da un solo punto, il baricentro, con grande risparmio di calcolo e di tempo. Il baricentro può essere interno o esterno al corpo: ad esempio, nel caso di una ciambella omogenea e simmetrica, il baricentro si trova nel centro del buco, quindi fuori dalla ciambella.

[5] Il momento della quantità di moto è una quantità vettoriale (cioè dotata di direzione e verso) che rende conto della rotazione nello spazio di un corpo massivo e rigido. Ad esempio, un corpo di massa m che si muove a velocità v ruotando intorno ad un punto che si trova ad una distanza r dal corpo, ha un momento della quantità di moto pari a $m \times v \wedge r$, dove il simbolo $\wedge$ denota un prodotto vettoriale, cioè un prodotto scalare (normale) moltiplicato per il seno dell'angolo compreso tra i due vettori (in questo caso v ed r) e dove la direzione del vettore risultante dal prodotto è perpendicolare al piano in cui giacciono i due vettori da moltiplicare. In formula, il modulo del momento della quantità di moto è pari a: $m \times v \times r \times \sin\theta$, dove $\theta$ è l'angolo compreso tra v ed r. Essendo per definizione il modulo di $\sin\theta$ minore o uguale a 1, notiamo che il momento della quantità di moto è massimo quando $\sin\theta = 1$, cioè per $\theta = 90$ gradi, ovvero quando v ed r sono perpendicolari, ed è nullo quando $\sin\theta = 0$, cioè per $\theta = 0$ gradi, ovvero quando v ed r sono paralleli.
Alcuni esempi pratici di applicazione del momento della quantità di moto sono descritti nell'articolo "Gomma a terra? Sollevare un grande peso? Datemi una leva ed un punto d'appoggio…" in questa raccolta.

# COME FUNZIONA IL NASTRO ADESIVO E PERCHE' VIENE CHIAMATO "SCOTCH"?

*Se non riesci a riparare una cosa con del nastro adesivo, vuol dire che ne stai usando troppo poco.*

– Charles Cecil, *Broken sword 5* (2013)

Alzi la mano chi non ha mai usato il nastro adesivo! Tutti conosciamo la sottile striscia di materiale flessibile avvolta in rotoli, con una faccia adesiva. Se pressato su una o più superfici, vi rimane aderente, con la possibilità di toglierlo quando non serve più, senza lasciare tracce indelebili. Ma come funziona il meccanismo di adesione? E perché viene universalmente chiamato 'scotch' ovvero, 'scozzese'? Invero si tratta di un nome curioso, considerando l'uso frequente e generoso che ne facciamo…

In questo articolo proviamo a soddisfare qualche curiosità sull'origine del nastro adesivo, e su come funziona l'effetto di adesione tra il collante del nastro e le superfici cui viene applicato.

L'idea di realizzare un nastro adesivo risale al XIX secolo: il chirurgo Horace Day sembra sia stato il primo ad applicare una gomma naturale adesiva su strisce di tessuto, da applicare durante le operazioni chirurgiche. Era il 1845 e si trattava di un'idea innovativa, ma non conosciamo molti dettagli sul collante né sulla reversibilità dell'applicazione [1]. Nel 1901 il farmacista Oscar Troplowitz, proprietario della ditta chimica Beiersdorf AG, mise in commercio il primo cerotto adesivo chiamato Leukoplast, il quale, una volta perfezionato, è diventato il cerotto Hansaplast ancora in vendita oggi.

L'invenzione di un nastro adesivo più simile a quello che conosciamo oggi è dovuta a Richard (Dick) Drew (Saint Paul, 1889 – Santa Barbara, 1980), un giovane ingegnere che lavorava alla 3M (Minnesota Mining and Manufacturing Company) occupandosi dello sviluppo di carte abrasive usate nella rifinitura della carrozzeria delle automobili. In questo ambito, venne a sapere di un problema dell'industria automobilistica degli anni '20 del secolo scorso. All'epoca, le auto a due colori erano particolarmente apprezzate dagli acquirenti, ma non era facile ottenere una linea di demarcazione netta della vernice nelle zone di confine tra i colori. Infatti, i fogli di carta fissati sulla carrozzeria tramite tessuti adesivi proteggevano la parte coperta, ma il tessuto adesivo ai bordi faceva passare una parte dei solventi della vernice generando diversi effetti indesiderati, dalla perdita di adesione all'irregolare linea di demarcazione dei colori, alla vernice strappata insieme al tessuto adesivo tolto. Drew iniziò a studiare una soluzione al problema, nel tempo libero e con risorse personali perché i responsabili alla 3M pensavano fosse una ricerca in cui non valeva la pena di investire tempo e denaro. Drew dimostrò che i suoi capi avevano torto, realizzando nel 1925 il primo nastro adesivo flessibile, avvolto in un rotolo in modo da essere tagliato su misura secondo le necessità e adatto a mascherare con precisione le zone di carrozzeria [2]. L'adesivo era composto di una miscela di colla da falegname, oli e resine varie che risultava sufficientemente viscoso per fissarsi alla carrozzeria ma non troppo aderente, in modo da poterlo staccare senza danneggiare la vernice, e impermeabile ai solventi.

L’invenzione ebbe una grande diffusione nell’industria automobilistica ed il successo commerciale permise alla 3M di investire nella ricerca di materiali ancora più efficaci. Già nel 1930 Drew sviluppò colle sintetiche applicate a nastri di cellophane trasparente, fino all’avvento negli anni ’50 di polimeri sintetici sia per il nastro che per il collante adesivo. I miglioramenti delle prestazioni dei nastri adesivi favorirono il loro uso non più limitato all’industria automobilistica, ma per ogni necessità di riparazione, decorazione, imballaggio, confezionamento, fissaggio, isolamento elettrico e protezione di molti materiali. Oggi risultano catalogate almeno 26 differenti tipologie di nastri adesivi [3]. Oltre agli usi classici, sono disponibili nastri per usi terapeutici in kinesiterapia e altri per chiusura di piccole ferite, per marcare i pavimenti e le strade, per aumentare l’attrito di una superficie, di sicurezza (il nastro lascia una traccia se è stato tolto, rivelando una manomissione), per ottenere l’adesione direzionale (in una direzione resiste allo strappo e nella direzione perpendicolare no) e nastri con collanti a pH neutro per restaurare pagine e libri di valore. La figura 1 mostra alcuni nastri adesivi commerciali.

***Figura 1**. Da sinistra a destra: nastro isolante elettrico in vinile nero; nastro a tenuta d’acqua per sigillare tubature; nastro elastico in cotone e acrilico per trattare infortuni muscolari; nastro medicale per unire i margini delle ferite; nastro di sicurezza per rivelare manomissioni e aperture. Foto tratte da Wikipedia [3].*

Come accennato, negli anni ’20 Drew aveva trovato una miscela di collanti adatta ad aderire alla carrozzeria dell’automobile con una semplice pressione, staccabile senza danneggiare la parte verniciata, e impermeabile ai solventi delle vernici. Nei primi prototipi il collante era distribuito su due striscioline ai bordi del nastro, come mostrato nella figura 2. L’effetto adesivo non era ottimale e a volte il nastro si staccava dalla carrozzeria durante la verniciatura.

Un aneddoto racconta che dopo alcuni tentativi falliti, il verniciatore si sia rivolto bruscamente a Drew dicendo "*take this tape back to those Scotch bosses of yours and tell them to put more adhesive on it!*" che possiamo tradurre come *–riporta questo nastro a quegli scozzesi dei tuoi capi, e di’ loro di metterci più colla!–* Per ‘scozzese’ il verniciatore intendeva riferirsi alla leggendaria parsimonia del popolo scozzese. Drew accettò il consiglio, mise il collante su tutta la superficie del nastro e grazie alla freddura del verniciatore aveva trovato un nome commerciale, breve e di impatto, che avrà un grande successo: ‘Scotch’ ovvero ‘Scozzese’.

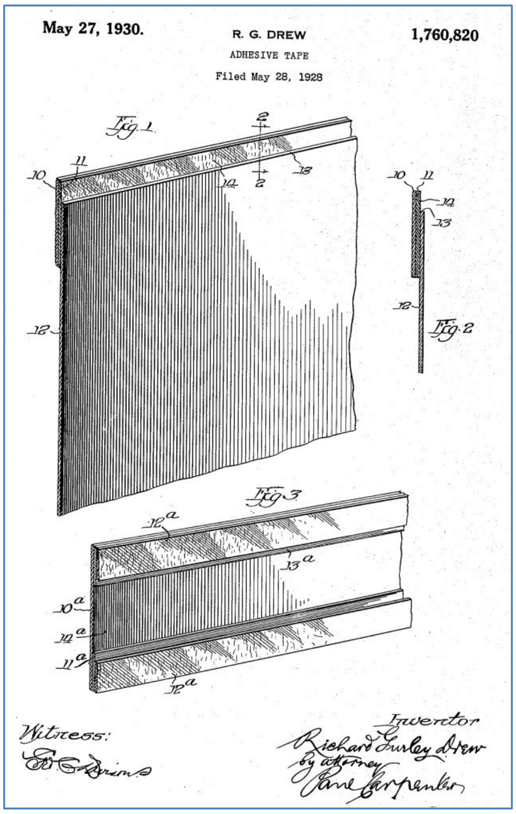
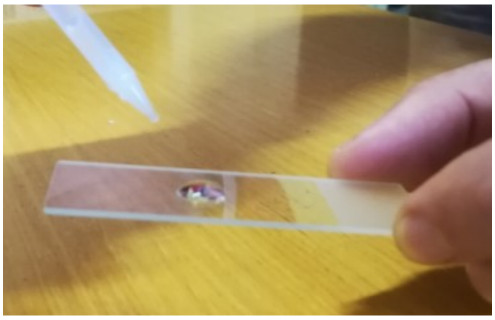



*Figura 2 **Illustrazione del disegno del nastro adesivo nel brevetto di Drew. Tratto da http://patft.uspto.gov/*

Chiarita l'origine aneddotica del nome, resta la curiosità di capire il meccanismo che consente ad uno strato così sottile di adesivo di attaccarsi in modo tenace su una superficie. Come funziona la colla, e perché l'effetto di adesione dipende dalla natura delle superfici da incollare?

Non è facile rispondere a questa domanda. L'adesione è il risultato di processi fisico-chimici articolati, la cui comprensione non è ancora completa, nonostante gli studi interdisciplinari e gli sforzi di fisici, chimici e ingegneri che si sono dedicati a questa problematica. Ai lettori che desiderano approfondire i vari processi dell'adesione, consigliamo di leggere l'articolo nella nota [4]. Qui di seguito ci limitiamo ad esporre i concetti di base, opportunamente semplificati.

Grazie alle forze di van der Waals [5] che si basano sull'attrazione elettrostatica di molecole vicine –e quindi sono attive solo quando la distanza tra i materiali che si avvicinano è molto piccola, vedi la nota [5]– due oggetti posti a contatto tendono a rimanere tanto più uniti quanto più sono vicini, ovvero quanto maggiore è l'effettiva superficie di contatto. Ogni oggetto solido, anche il più liscio, presenta una superficie con molte asperità e rugosità microscopiche, talmente piccole da essere invisibili ad occhio nudo. Di conseguenza, quando uniamo due oggetti, il contatto si ha solo in corrispondenza dei picchi di rugosità e l'effettiva area di contatto è circa diecimila volte più piccola della superficie degli oggetti. Ad esempio, se posiamo un libro la cui copertina ha dimensioni 25 cm per 30 cm sopra un tavolo, l'effettiva area di contatto fra libro e tavolo è dell'ordine di circa (25 × 30)/10.000 = 0,075 centimetri quadrati, piccolissima! In queste condizioni, le forze adesive di van der Waals (che agiscono solo sugli effettivi punti di contatto) sono trascurabili e infatti il libro non aderisce al tavolo dove è posato. Per ottenere l'effetto adesivo bisogna aggiungere una sostanza (collante) che deve essere fluida, in modo da riempire i microscopici avvallamenti delle asperità delle superfici da incollare, aumentando perciò la superficie di contatto effettiva e incrementando quindi l'azione delle forze di van der Waals. Anche un piccolo strato di acqua o di olio può svolgere l'azione di riempimento delle asperità delle superfici a contatto, aumentando l'adesione e la resistenza allo staccamento, ma non può impedire lo slittamento dei due oggetti perché la viscosità di acqua e olio è piccola. Possiamo fare una semplice prova a casa, unendo due vetri dopo aver bagnato uno dei due con una goccia di acqua. Se proviamo a sollevare lentamente il vetrino posto sopra, anche il vetrino sottostante si solleva, come se fosse incollato, vedi la figura 3. Ma se spingiamo lateralmente uno dei due vetrini, questo scivolerà senza opporre resistenza. Quindi, un collante deve essere fluido per riempire le microasperità e aumentare la superficie di contatto, ma deve anche essere viscoso, in modo da impedire lo slittamento degli oggetti incollati.



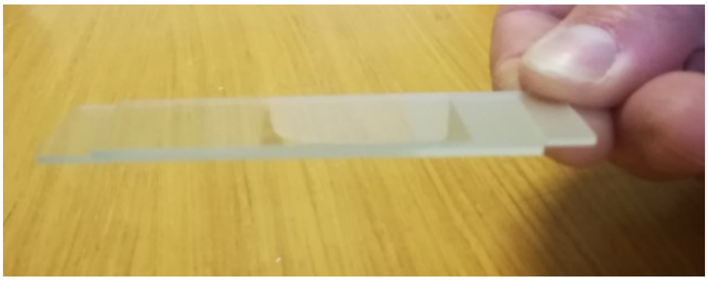


***Figura 3***. *A sinistra in alto, mettiamo una goccia d'acqua su un vetrino. A destra in alto, dopo aver poggiato un secondo vetrino sul primo, lo solleviamo: anche il vetrino sottostante si solleva, rimanendo incollato al vetrino superiore. Eppure, l'acqua non è considerata un collante! Il motivo dell'effetto adesivo dell'acqua è spiegato nel testo. A causa della scarsa viscosità dell'acqua, il vetrino sottostante può facilmente scivolare di lato, come mostrato nella figura in basso, pur mantenendosi unito al vetrino sovrastante. Foto degli autori.*

Un'ampia superficie di contatto è necessaria, ma non è sufficiente da sola a garantire l'adesione del nastro adesivo sull'oggetto. Infatti, un importante contributo all'adesione viene dato dalle microscopiche bollicine d'aria che rimangono intrappolate nelle più piccole irregolarità della superficie che non sono riempite dall'adesivo del nastro. Queste bollicine agiscono come microscopiche ventose le quali, se tirate verso l'esterno nello staccare il nastro, si oppongono al distacco perché risucchiano il nastro verso la superficie, aumentando la forza di adesione dello scotch. In pratica, quando esercitiamo una forza di trazione sullo scotch per staccarlo dalla superficie, il nastro trascina verso di sé le bolle che quindi aumentano di volume. Di conseguenza la pressione dell'aria all'interno di ciascuna bolla diminuisce e si oppone al distacco, perché la pressione negativa (vuoto) esercita una forza di risucchio che tende a mantenere lo scotch aderente alla superficie. Se tiriamo il nastro con più energia, la forza di trazione vince il risucchio delle microscopiche ventose e le bollicine si espandono e si fondono con quelle vicine. Quando la rete di bolle così ingigantite raggiunge il bordo del nastro, l'aria esterna viene risucchiata all'interno della bolla ed uguaglia la pressione interna con quella atmosferica, facendo svanire l'effetto ventosa e facilitando il distacco del nastro nella zona precedentemente occupata dalla bolla. L'ingresso dell'aria esterna dentro la bolla, ripetuto nel breve lasso di tempo dello 'strappo' del nastro per tutte le bolle, genera il tipico crepitio che ascoltiamo quando stacchiamo lo scotch dalla superficie.

**Note**

[1] C.W. Bemmels: Adhesive Tapes, in *Handbook of Adhesives*, Irving Skeist, ed., Huntington, New York, R.E. Krieger Publishing Company, pp. 584–592 (1962).

[2] *A century of innovation, the 3M story* (pubblicato da 3M, 2002) ISBN 0-9722302-1-1 http://solutions.3mindia.co.in/3MContentRetrievalAPI/BlobServlet?lmd=1196937557000&locale=en_IN&assetType=MMM_Image&assetId=1180593935343&blobAttribute=ImageFile

[3] Vedi ad esempio https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_adhesive_tapes

[4] C. Gay and L. Leibler: *On stickiness* Physics Today vol. 52, pp. 48-52 (1999).

[5] Le forze di van der Waals raggruppano diverse interazioni intermolecolari, che avvengono tra molecole neutre, o tra molecole polari –dotate cioè di un momento di dipolo elettrico intrinseco e permanente– o tra molecole neutre e polari. In ogni caso si tratta di forze elettrostatiche, che si basano sull'attrazione di cariche elettriche opposte tra molecole vicine. Infatti, nel caso di forze di van der Waals tra molecole neutre si verifica una distribuzione istantanea e non simmetrica degli elettroni intorno ai nuclei che genera un momento di dipolo elettrico momentaneo. Il valore medio dell'interazione tra questi momenti di dipolo non è nullo, anche se i momenti stessi sono a valor medio nullo. Viceversa, nel caso di interazione tra molecole neutre e polari, il campo elettrico generato da queste ultime polarizza le molecole neutre che acquistano un momento di dipolo elettrico. Questo momento indotto si orienta in modo da favorire l'interazione attrattiva. Infine, nel caso di molecole polari, tra di esse si esercita una mutua azione di orientamento che tende ad allineare i dipoli in modo da generare attrazione elettrostatica. A seconda dei materiali e dei loro dipoli, la forza di attrazione di van der Waals varia come l'inverso della sesta o della settima potenza della distanza tra le molecole, e quindi tende rapidamente a zero quando le molecole si allontanano.

Sul web si possono trovare diverse trattazioni, elementari e specialistiche, che descrivono l'origine della forza di attrazione fra due materiali posti in contatto.

Una curiosità: il geko sfrutta le forze attrattive di van der Waals per camminare sui muri verticali. Vedi ad esempio https://it.wikipedia.org/wiki/Forza_di_van_der_Waals

*Oggetti di uso comune*

# LA VOCE DEL PADRONE

> *La musica, la quale oltrepassa le idee, è del tutto indipendente anche dal mondo fenomenico, semplicemente lo ignora, e in un certo modo potrebbe continuare ad esistere anche se il mondo non esistesse più.*
>
> – Arthur Schopenauer, *Il mondo come volontà e rappresentazione* (1819)

Secondo il filosofo Arthur Schopenauer (Danzica, 1788 – Francoforte sul Meno, 1860) la musica è la più nobile delle arti perché è immateriale e si può apprezzare solo nel momento in cui viene eseguita.

In effetti, ai tempi di Schopenauer, la musica poteva essere ascoltata esclusivamente nell'istante in cui un artista suonava un brano, al contrario delle arti figurative che sono tangibili e visibili in qualsiasi momento. La 'cattura' o registrazione di un'esecuzione musicale non era neppure pensabile. Fino a quando Thomas Alva Edison (Milan, 1847 – West Orange, 1931), di cui parliamo anche nell'articolo "Lampadine a incandescenza, a basso consumo, a LED… cerchiamo di fare un po' di luce" in questa raccolta, riuscì a progettare e realizzare uno strumento adatto a memorizzare un brano musicale, per poterlo riascoltare in qualsiasi momento. Si tratta del fonografo, brevettato da Edison nel 1878, il cui principio di funzionamento si basa sulle proprietà delle onde sonore. Ma prima di tutto, che cosa è un suono?

Un suono o un rumore sono generati da un oggetto vibrante, che quando si muove in avanti spinge l'aria creando una zona di maggiore densità e quando torna indietro forma una zona di aria rarefatta. La successione di zone a maggiore e minore densità di aria è l'onda sonora che si propaga fino a raggiungere il nostro orecchio. L'oggetto vibrante può essere la membrana di un tamburo, la corda di un violino, l'ancia di un oboe come pure le nostre corde vocali o una porta su cui picchiamo le nocche.

Quando l'onda sonora oscilla in modo periodico si ha un 'suono', altrimenti si tratta di un rumore [1]. La frequenza di oscillazione dell'onda sonora determina l'altezza del suono: una frequenza di 100 cicli al secondo (o Hertz, il cui simbolo è Hz) è una nota bassa, una frequenza di 3.000 cicli al secondo corrisponde ad una nota acuta. La voce umana, modulata dalle cavità orale e nasale, può emettere frequenze che vanno da 80 a 400 Hz circa per gli uomini e da 300 a 1.000 Hz circa per le donne.

Quindi, per 'memorizzare' una nota o una voce bisogna 'scrivere' un'informazione che oscilla centinaia o migliaia di volte al secondo. A pensarci bene, non è facile! Edison aveva davanti a sé un problema arduo. Riuscì a risolverlo in modo ingegnoso ed elegante, realizzando il primo fonografo.

Il funzionamento del fonografo è basato su una membrana leggera che viene spinta, avanti e dietro, dall'onda sonora. Il movimento della membrana viene trasmesso ad una punta che preme su un foglio di carta stagnola avvolto intorno ad un cilindro rotante. La punta esercita una pressione che incide la carta stagnola creando dei solchi più o meno profondi a seconda dell'intensità del suono e oscillanti alla stessa frequenza dell'onda sonora. Il cilindro, mentre ruota intorno al proprio asse, è mosso longitudinalmente da

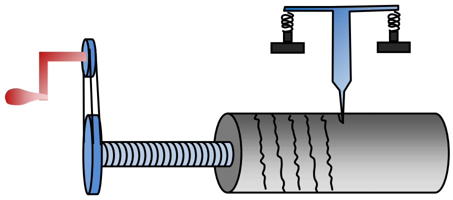


*Figura 1: Schema del fonografo brevettato da Edison in cui una puntina crea un solco elicoidale sul rivestimento in carta stagnola di un cilindro che ruota e contemporaneamente trasla.*

una vite senza fine, sicché la punta incide un solco elicoidale lungo la superficie laterale del cilindro, come mostrato nella figura 1.

Ma come è possibile 'memorizzare', ad esempio, il suono di una nota a 440 Hz emessa per un secondo?

Per incidere un'onda con dei picchi distanziati di soli 1/440 = 0,0022 secondi sono necessarie sia una velocità del cilindro abbastanza elevata da registrare oscillazioni veloci, sia una punta molto sottile per non limitare la minima distanza tra due picchi. Nonostante queste difficoltà, Edison riuscì ad incidere un solco sul suo cilindro corrispondente al suono da registrare.

Una volta ottenuta la 'scrittura' del suono, il problema successivo era riprodurre il suono memorizzato sotto forma di solchi creati su carta stagnola. L'idea di Edison era di far girare il cilindro e farlo scorrere longitudinalmente alla stessa velocità usata nella fase di registrazione, posizionando nel solco del cilindro una puntina metallica –con una molla di richiamo– in grado di seguire fedelmente gli avvallamenti e le risalite del solco e di trasmettere il movimento della puntina ad un'altra membrana, il cui moto oscillante avrebbe messo in moto l'aria con la stessa frequenza, ricreando l'onda sonora originale. Tutto giusto in linea di principio, a parte la difficile resa della qualità del suono e soprattutto della sua intensità, perché il movimento della membrana che riproduceva il suono era limitato dalla scarsa profondità del solco. Edison, comunque, riuscì a riprodurre la filastrocca "*Mary had a little lamb*" che lui stesso aveva appena 'inciso'.

Il problema dell'intensità sonora fu risolto grazie al posizionamento della membrana all'interno di un condotto metallico che convogliava le vibrazioni dell'aria verso un'apertura da porre sull'orecchio, vedi la foto a lato. Edison apportò ulteriori migliorie al suo primo prototipo, tra cui la sostituzione della carta stagnola con la cera e la tecnica di scrittura non più in verticale bensì con oscillazioni orizzontali della puntina. Ma il principale difetto del fonografo era la difficoltà di replicare e produrre in serie il cilindro su cui era stato inciso il suono. Finché Emil Berliner (Hannover, 1851 – Washington D.C., 1929) ebbe l'idea vincente di sostituire il cilindro con un disco in gommalacca, che poteva essere stampato e, quindi, riprodotto con facilità. Il solco su un disco non rappresenta più un'elica bensì una spirale e ciò ha presentato inizialmente dei problemi, in quanto la velocità del solco più esterno è più elevata di quella del solco vicino al centro. Si trattava di inconvenienti facilmente risolvibili ed infatti il disco ha soppiantato i cilindri, conoscendo un enorme successo soprattutto da quando sono stati realizzati i dischi in polivinilcloruro, noto come PVC, da cui il nomignolo '*vinile*' che è diventato sinonimo di disco musicale.


Mentre i dischi in gommalacca (foto a sinistra) ruotavano a 78 giri al minuto, quelli in vinile potevano girare più lentamente, perché su questo materiale i solchi sono più sottili. Infatti, se un'oscillazione di 1000 Hz viene realizzata con picchi distanti 1 mm, occorre una velocità di 1000 mm al secondo per poterla memorizzare e riprodurre. Se la distanza tra i picchi si accorcia, diminuisce la velocità di incisione e di riproduzione. Così, nel 1948 la Columbia Records mise in vendita il primo disco in vinile di 30 centimetri di diametro che girava alla velocità di 33 e 1/3 giri al minuto, e della durata di circa 30 minuti per facciata.

Curiosamente, non era stata la Columbia Records ad introdurre la velocità di 33 e 1/3, bensì la rivale RCA, diversi anni prima, ma fu un fiasco dovuto alla scarsa qualità del suono, perché su gommalacca quella velocità era insufficiente per riprodurre adeguatamente le alte frequenze. Comunque la RCA non stette a guardare, e nel 1949 produsse il primo vinile a 45 giri, un nuovo formato creato per riprodurre un solo brano musicale per facciata. Il numero di 45 giri al minuto non fu scelto a caso, ma corrisponde alla differenza tra i 78 giri del vecchio formato e i 33 giri di quello della Columbia.

Tralasciando le importanti innovazioni elettroniche e meccaniche introdotte negli anni successivi (dalle membrane si è passati all'amplificazione elettronica, alle valvole e poi ai transistor, dalla puntina di acciaio a quella di diamante, dalla manovella al motore elettrico) sottolineiamo l'avvento della stereofonia (dal greco 'stereo', solido, e 'phōnḗ', suono) tra gli anni '60 e '70 del secolo scorso, che migliorò nettamente la qualità del suono riprodotto dai giradischi. Inizialmente, per riprodurre un suono 'doppio' si era pensato di registrare due tracce distinte e poi farle riascoltare simultaneamente, ma era difficile ottenere la sincronia dei due suoni. La soluzione si ottenne recuperando la prima idea di Edison, il solco scavato in profondità piuttosto che lateralmente. Registrando un segnale tramite oscillazioni orizzontali, ed un altro con oscillazioni verticali, nel 1957 l'Audio Fidelity Records produsse il primo disco stereofonico della storia.

La tecnica di incisione stereofonica si è evoluta ed oggi non si usano puntine che oscillano destra-sinistra e alto-basso, ma i solchi sono scavati obliqui, 45° rispetto alla verticale, come mostrato nella figura 2.

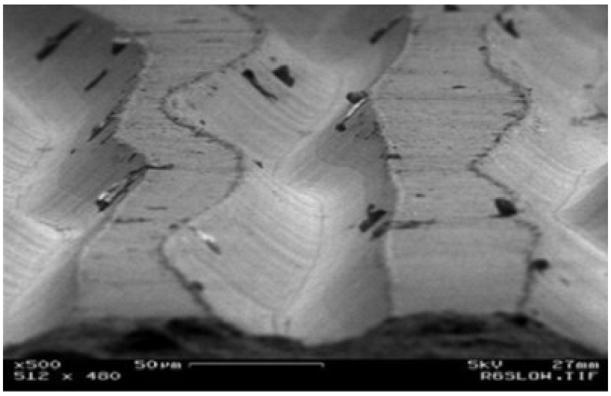



***Figura 2**: Foto al microscopio elettronico di un microsolco stereofonico. Per gentile concessione dell'Università di Rochester: URnano, www2.optics.rochester.edu/workgroups/cml/opt307/spr05/chris*

Il vinile ha conosciuto una lunga vita commerciale, ma ha dovuto lasciare il posto alla 'rivoluzione digitale' che nel 1982 ha portato al primo Compact Disk, meglio conosciuto come CD. Digitalizzare il suono vuol dire trasformare l'onda sonora in una serie di numeri che rappresentano il valore dell'onda in ciascun istante, ma che possono valere solo un multiplo intero del minimo valore misurabile. Ad esempio, se l'onda sonora ad un dato istante vale 1,256 e il minimo valore misurabile è 0,2 allora 1,256 viene approssimato a 1,2 che è il multiplo di 0,2 più vicino al valore originale. Di conseguenza, un suono digitalizzato contiene meno informazioni del suono originale (perdiamo memoria di quel 1,256 – 1,2 = 0,056 dell'esempio precedente) ma ha l'enorme vantaggio di poter essere 'copiato' senza rischiare di rovinarlo (come avviene, ad esempio, alle copie fatte su un nastro magnetico) in quanto non si aggiunge rumore ad una serie di numeri.

Vinile e CD hanno un unico punto in comune: la forma circolare del supporto. Mentre nei dischi in vinile si registrava l'oscillazione di una puntina, i CD hanno una successione di 'solchi' che variano la capacità della superficie di riflettere la luce emessa da un piccolo diodo laser posto di fronte al CD. Se la parte riflette la luce laser, questo sarà considerato il valore 1, se non riflette rappresenta il valore 0, vedi la figura 3. Usando il codice binario (vedi la nota [2]) qualsiasi numero può essere espresso da una serie di 0 e 1. Ad esempio, il numero 10 in codice binario diventa 1010, il numero 21 diventa 10101 e così via. Una forma d'onda che rappresenta la vibrazione della corda di un violino, una volta digitalizzata e poi trasformata in una sequenza di numeri binari può essere stampata su un CD come una successione di buchi, vedi la figura 3, ed ecco come la musica da oscillazioni della densità dell'aria si trasforma in una serie di numeri.

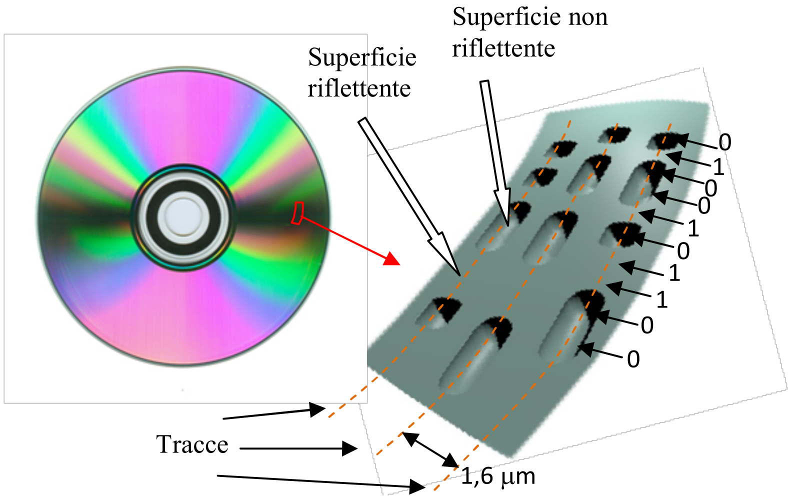



***Figura 3***. *Rappresentazione delle tracce incise in un CD ROM, con i pit (buchi che non riflettono la luce laser) e i land (aree riflettenti). A destra mostriamo la successione di numeri in codice binario dati dall'estensione di pit (valore 0) e land (valore 1).*

Infine, lasciateci raccontare un curioso aneddoto sulla scelta della durata della registrazione in un CD. Nel caso del vinile a 33 giri, la durata registrabile è di 1 ora complessiva, mentre nel caso di un 45 giri è pari mediamente a due canzoni. In entrambi i casi si tratta di una durata comprensibile. Viceversa, un CD può riprodurre al massimo 1 ora, 14 minuti e 33 secondi! Perché è stata scelta questa strana durata?

Tutto nasce dalla guerra commerciale tra l'olandese Philips e la nipponica Sony, due colossi che nei primi anni '80 stavano per decidere lo standard per il nuovo supporto discografico. Inizialmente si era stabilito che la durata fosse di 60 minuti e rimaneva da fissare solo la dimensione del nuovo disco: Sony proponeva un diametro di 120 mm e Philips 115 mm. Poi, improvvisamente, la Sony pretese di portare la durata a 74 minuti e 33 secondi. Cosa era accaduto? Tutta colpa, o merito, della moglie del vice presidente della Sony, amante della musica classica, la quale suggerì al marito che il nuovo supporto avrebbe dovuto contenere per intero la nona sinfonia di Beethoven. E' noto che una sinfonia può durare diversi minuti in più o in meno, in funzione dei tempi tenuti dal direttore d'orchestra, sicché si cercò l'esecuzione più lunga, che fu rinvenuta nel disco della EMI con direttore d'orchestra Furtwängler: 74 minuti e 25 secondi. Aggiungete la pausa tra una traccia e l'altra ed ecco spiegato il mistero della scelta di un'ora, 14 minuti e 33 secondi.

Probabilmente nella scelta influirono anche interessi commerciali, dal momento che il diametro del CD da 115 mm non era sufficiente per registrare oltre 74 minuti, scombinando i piani della Philips a vantaggio della Sony. In ogni caso, passò la proposta giapponese ed oggi abbiamo CD da 120 mm in grado di farci ascoltare quasi un'ora e un quarto di musica.

Anche i CD stanno preparandosi ad uscire di scena, superati dalle nuove memorie a stato solido, dove, in un centimetro quadrato, si può memorizzare la Divina Commedia o l'intero ciclo delle sinfonie di Mozart. Ma gli amanti del vinile sono convinti che la musica ascoltata dai vecchi dischi resti inarrivabile, seconda solo all'esecuzione dal vivo, e ancora si possono trovare moderni giradischi in vendita nei negozi di elettronica. Il progresso tecnologico ha ridotto gli ingombri ed eliminato i fruscii, ma forse ha tolto un po' di poesia…

**Nota**

[1] D. Murra, G.P. Gallerano, P. Di Lazzaro: *Suono e rumore, una differenza 'spettrale*' Energia, Ambiente e Innovazione vol. 3, pagg. 73-78 (2015). www.enea.it/it/seguici/pubblicazioni/pdf-eai/n-3-maggio-giugno-2015/10-suono-e-rumore.pdf

[2] Sul sito youmath.it possiamo trovare una semplice descrizione del significato dei numeri binari e della trasformazione da decimale a binario e viceversa: www.youmath.it/lezioni/algebra-elementare/lezioni-di-algebra-e-aritmetica-per-scuole-medie/1816-sistema-numerico-binario.html

# E SE I VICINI DI CASA SONO RUMOROSI?

*Avere buoni vicini di casa è come avere una casa più grande.*

*– Proverbio cinese*

Che cosa è il suono? Come arriva alle nostre orecchie? Come si calcola l'intensità sonora delle voci e dei rumori dei vicini di casa? Come possiamo ridurre i rumori esterni all'ambiente dove ci troviamo?

Del suono abbiamo già parlato nell'articolo "La voce del padrone" in questa raccolta, ma qui proponiamo una descrizione più dettagliata. Quando espiriamo, l'aria nei polmoni viene spinta dal diaframma verso la laringe e le corde vocali. Nel pronunciare una parola, le corde vocali si aprono e chiudono velocemente e questa vibrazione spinge le molecole d'aria a contatto, le quali trasmettono l'impulso alle molecole vicine. Questo movimento crea una zona dove le molecole di aria sono più dense (perché sono state spinte ad avvicinarsi) accanto ad una zona in cui le molecole sono rarefatte (perché le molecole che si sono avvicinate lasciano uno spazio vuoto dietro a sé). In questo modo si crea un'alternanza di zone di aria più dense seguite da zone meno dense, ovvero una 'onda di pressione' detta 'onda sonora' che si propaga fino ad entrare nel condotto uditivo delle orecchie e urtare la membrana del timpano, facendola vibrare. Il timpano trasmette le sue vibrazioni ad alcuni ossicini che le amplificano e le trasmettono alla coclea [1], dove le vibrazioni meccaniche sono convertite in impulsi elettrici. Questi impulsi sono infine trasmessi dai nervi acustici alle aree corticali dove si realizza la decodifica degli impulsi elettrici e nasce la sensazione uditiva.

In sintesi, il suono è la percezione a livello cerebrale di una onda di pressione che colpisce il timpano e viene trasformata in impulsi elettrici. In altre parole, non esistono suoni al di fuori della nostra mente, ma solo onde meccaniche di compressione e rarefazione dell'aria. La percezione del suono è frutto dell'elaborazione cerebrale.

Le corde vocali possono vibrare solo quando c'è un passaggio d'aria. Anche quando proviamo a cantare a bocca chiusa, c'è comunque l'espirazione attraverso il naso. Infatti, se chiudiamo bocca e naso, non riusciamo ad emettere suoni. Attenzione: il passaggio d'aria è inteso sia in uscita (espirazione) che in entrata (inspirazione): ad esempio, Bobby McFerrin è un cantante celebre per la sua capacità di cantare e contemporaneamente riprodurre il suono di diversi strumenti, emettendo suoni appropriati e continui sfruttando sia l'espirazione che l'inspirazione.

Tutti i fenomeni sonori si comportano in modo simile alla voce: all'inizio c'è un impulso che genera la deformazione di un materiale il quale comincia a vibrare (ad esempio le nocche che bussano sulla porta, le eliche che muovono l'acqua dove sono immerse, un tamburo percosso). La vibrazione trasmette una spinta oscillante alle molecole del mezzo (acqua, aria) a contatto, creando una variazione di densità delle molecole, che corrisponde ad una disuguaglianza di pressione che genera il movimento dell'onda sonora fino a giungere alle nostre orecchie.

Il tipo di suono (acuto, grave, forte, debole) dipende dalla frequenza e dall'ampiezza della vibrazione. Se bussiamo su due porte diverse (ad esempio una porta di legno e una di metallo, oppure due porte di legno con dimensioni diverse) queste vibrano con diverse frequenze e ampiezze, a causa della differente struttura ed elasticità di legno e metallo o della diversa dimensione, quindi le porte producono suoni diversi.

Nella nota [2] in fondo all'articolo dimostriamo in termini matematici che la velocità del suono dipende dalla densità e dalla comprimibilità del mezzo (gassoso, liquido, solido) in cui il suono si propaga. Intuitivamente, maggiore è la densità delle molecole, maggiore è la pressione necessaria a muoverle. Ed è facile capire che maggiore è la comprimibilità (capacità delle molecole di avvicinarsi, riducendo il volume occupato), maggiore è l'energia spesa (e quindi persa) per avvicinare le molecole, rallentando il processo di spostamento dell'onda di pressione.

Le sostanze solide e liquide si possono comprimere poco, perché le loro molecole e atomi sono molto vicini e quando una forza tenta di comprimerli intervengono forze repulsive che si oppongono all'avvicinamento. Al contrario, i gas sono caratterizzati da una grande distanza tra molecole, e possono essere compressi facilmente. Ad esempio, l'acqua ha una densità 770 volte maggiore dell'aria e una comprimibilità 15.000 volte minore dell'aria. La piccola comprimibilità dell'acqua compensa e supera l'effetto della maggiore densità rispetto all'aria, e di conseguenza la velocità del suono nell'acqua è di 1.410 metri al secondo (m/s), più di quattro volte superiore alla velocità del suono nell'aria che è di 340 m/s a 15 °C. Nella nota [3] è spiegato come varia la velocità del suono a diverse temperature dell'aria.

I solidi sono più densi ma meno comprimibili dei liquidi, sicché la velocità del suono in un solido è ancora più elevata. Ad esempio, nel rame la velocità del suono è circa 4.500 m/s e nel legno è circa 3.400 m/s. Stiamo parlando di velocità elevatissime, di alcuni chilometri al secondo!

Oltre ad essere più veloce, l'onda di pressione sonora nei liquidi e nei solidi è anche molto più intensa che nell'aria, perché la pressione sonora è proporzionale al prodotto fra la densità del mezzo e il quadrato della velocità del suono, vedi l'equazione (2) nella nota [2]. Per questo motivo è possibile ascoltare rumori e voci della stanza accanto se appoggiamo l'orecchio alla parete! Infatti, le onde sonore della stanza accanto si propagano in aria e raggiungono la parete, che assorbe una parte dell'onda di pressione e comincia a vibrare. La parete trasmette la vibrazione all'aria della nostra stanza fino ad arrivare al nostro orecchio. In questa seconda interfaccia (parete-aria della nostra stanza) a causa della scarsa densità dell'aria viene perduta gran parte della pressione della vibrazione della parete e l'onda sonora risulta attenuata, poco percepibile. Viceversa, se poggiamo la testa alla parete, le vibrazioni si trasmettono per via ossea al sistema uditivo, con minori perdite di pressione perché la seconda interfaccia è tra parete e ossa craniche, entrambe solide.

Proviamo a stimare la percezione dell'onda sonora generata nella stanza accanto. Consideriamo una voce maschile alla frequenza di 125 Hz ad un livello sonoro 'normale' di 60 decibel (dB). Nella nota [4] è spiegato cosa significa decibel. La parete in mattoni assorbe circa il 3% dell'intensità sonora e dalla definizione di dB abbiamo che la parete assorbe 45 dB (il calcolo esplicito si trova nella nota [5]). Quindi, se una persona nella stanza accanto poggia la testa sul muro può ascoltare un livello sonoro di circa 45 dB, equivalente a deboli rumori in ambiente domestico. In altre parole, attaccati al muro si ascolta una voce meno intensa di quella percepita da una persona vicina a chi parla, ma ancora udibile.

Appena ci stacchiamo dal muro, poiché la seconda interfaccia parete-aria trasmette a sua volta circa il 3% del livello di intensità dell'onda sonora assorbita dalla parete, il livello sonoro scende a circa 30 dB, equivalente al sussurro percepito a circa 1 metro di distanza, e il riconoscimento delle parole diventa difficile.

Per semplicità, in questa stima abbiamo trascurato le riflessioni multiple dell'onda sonora sulle pareti (che aumentano l'assorbimento della parete), la dipendenza dell'assorbimento della parete dalla frequenza della voce (per cui le voci femminili a frequenza più alta vengono maggiormente assorbite rispetto a quelle maschili), le curve isofoniche e di compensazione (che tengono conto dello spettro di sensibilità dell'udito). Di conseguenza i valori numerici ottenuti sono approssimati, ma comunque indicativi del fenomeno.

Sappiamo che per ogni interfaccia tra solido e aria solo una piccola percentuale (il 3% circa a 125 Hz) del suono continua a propagarsi, mentre il restante 97% viene perduto. Questo ci offre la chiave per attenuare i suoni esterni al nostro appartamento, inclusi i rumori dei vicini di casa: è sufficiente rivestire le pareti con materiali porosi, ovvero materiali in cui ci sono molte zone di interfaccia tra solido e aria. Ad esempio il polistirolo, il sughero, le schiume poliuretaniche sono materiali molto porosi, contengono molte bollicine d'aria e quindi sono fonoassorbenti. Ma i suoni si propagano anche attraverso le finestre, che devono essere a doppio vetro, in modo da avere ben 4 interfacce aria/vetro, per cui alla fine viene trasmessa una percentuale infinitesima del rumore esterno. Ad esempio, con una perdita del 97% per ogni interfaccia aria/vetro, un calcolo simile a quello riportato nella nota [5] permette di calcolare che un intenso rumore esterno pari a 100 dB si riduce ad appena 39 dB dopo aver attraversato la finestra a doppi vetri.

La scelta del materiale delle pareti è di fondamentale importanza non solo per insonorizzare la nostra casa, ma anche per aumentare o diminuire il riverbero, ovvero la persistenza del suono oltre la durata impressa dalla sorgente sonora, causato dalle riflessioni multiple delle onde sonore dalle pareti. Ad esempio, nel caso di ambienti destinati al parlato, come sale da conferenza o cinematografi, il tempo di riverbero va diminuito a meno di mezzo secondo, per evitare di ascoltare la sovrapposizione di un suono al fonema precedente, mentre in una sala destinata ad esecuzioni musicali il tempo di riverbero va aumentato ad almeno un paio di secondi, per rinforzare e legare tra loro i suoni, rendendo gli intervalli melodici (una nota appresso all'altra) come fossero armonici (note suonate in sovrapposizione). Un approfondimento può essere trovato nell'articolo divulgativo su suono e rumore citato nella nota [6].

**Note**

[1] La coclea è la parte più complessa dell'organo uditivo. Si compone di tre canali membranosi avvolti a spirale. Il canale che occupa la rampa vestibolare e quello che occupa la rampa timpanica confluiscono a livello dell'apice della spirale miscelando i loro liquidi (perilinfa). Tra i due dotti membranosi, vestibolare e timpanico, è ospitato il dotto cocleare, che contiene un secondo liquido -endolinfa- e infine la struttura più sofisticata, il cosiddetto organo del Corti, una sorta di motore bio-elettrico dove le cellule ciliate producono impulsi elettrici tramite trasduzione meccanico-elettrica. L'energia bio-elettrica raggiunge la cellula gangliare, dove avviene una rimodulazione del segnale che viene quindi inviato ai nuclei cocleari ventrali e dorsali. In pratica, la coclea funziona come una pila elettrica, e il mantenimento di un gradiente elettrochimico è garantito dalla ricchezza di potassio nella endolinfa e di sodio nella perilinfa. Per una introduzione elementare al funzionamento della coclea, vedi ad esempio http://it.wikipedia.org/wiki/Coclea_(anatomia)

[2] Si può dimostrare che la velocità $v$ del suono è data dalla radice quadrata della derivata della pressione rispetto alla densità del mezzo in cui si propaga l'onda sonora: in formula,

$$v = \sqrt{\frac{dP}{d\rho}} \qquad (1)$$

dove dP è la variazione di pressione P generata dall'impulso iniziale e d$\rho$ è la variazione della densità $\rho$ del mezzo dovuta al movimento delle molecole del mezzo stesso. Nel caso del gas, tramite la relazione $dP/d\rho = \gamma P/\rho$ possiamo calcolare la velocità del suono come

$$v = \sqrt{\frac{\gamma P}{\rho}} \qquad (2)$$

dove $\gamma$ è un numero che varia da $\gamma = 1{,}7$ a $\gamma = 1{,}3$, a seconda dei gradi di libertà delle molecole gassose. Poiché la lunghezza d'onda sonora è molto più grande del cammino libero medio delle molecole del mezzo, possiamo utilizzare l'equazione adiabatica per calcolare la velocità del suono, in quanto nell'onda non c'è un passaggio di calore rilevante. L'equazione adiabatica nel caso di un gas si può scrivere come

$$PV^{\gamma} = \text{costante}, \qquad (3)$$

dove V è il volume del mezzo. Utilizzando l'equazione della velocità del suono (2) l'equazione adiabatica (3) e la legge dei gas perfetti, dopo qualche passaggio matematico otteniamo

$$v = v_{media}\sqrt{\frac{\gamma}{3}} \qquad (4)$$

dove $v_{media}$ è la velocità media delle molecole del gas. Quindi, la velocità del suono in un gas è poco più della metà della velocità media delle molecole che costituiscono il gas.

[3] Dall'equazione (2) nella nota [2], sappiamo che la velocità del suono $v$ è proporzionale all'inverso della radice quadrata della densità del mezzo. All'aumentare della temperatura, la densità diminuisce e quindi

aumenta $v$. In aria a T = 0°C, P = 1 atmosfera e $\gamma$ = 1,4, usando l'equazione (2) abbiamo $v$ = 331 m/s. Per calcolare $v$ a qualsiasi temperatura possiamo usare la legge empirica

$$v = (331 + 0{,}6 \times T) \text{ m/s} \qquad (5)$$

per cui a T = 15°C abbiamo $v$ = 340 m/s mentre a T = 20°C $v$ = 343 m/s.

[4] Il sistema uditivo umano è in grado di percepire suoni e rumori in un ampio intervallo di pressioni sonore: la soglia del dolore da pressione sonora è oltre un milione di volte più grande della minima pressione udibile. A causa di questa enorme dinamica uditiva, è conveniente usare una scala di percezione sonora in decibel (dB) definita come il logaritmo in base 10 dell'intensità sonora normalizzata alla minima intensità udibile, pari a $I_0 = 10^{-12}$ W/m$^2$, moltiplicato per 10. In formula,

$$I_{dB} = 10 \times \log(I/I_0). \qquad (6)$$

Dalla definizione di dB, si capisce che la misura del suono non segue più la scala lineare cui siamo abituati: non è più vero che al raddoppio della grandezza corrisponde un raddoppio del numero che ne rappresenta la misura. Ad esempio, data un'intensità sonora di 60 dB, se raddoppio l'intensità la formula (6) dà 63 dB, non 120 dB! Infatti, $10\times\log(2I/I_0) = 10\times\log 2 + 10\times\log(I/I_0)$ = 3 dB + 60 dB = 63 dB.

Essendo l'intensità sonora I proporzionale al quadrato della pressione meccanica P dell'onda sonora, grazie alle proprietà dei logaritmi possiamo riformulare la formula (6) come

$$I_{dB} = 10\times\log(P/P_0)^2 = 20\times\log(P/P_0), \quad (7)$$

dove $P_0 = 3 \times 10^{-5}$ Pascal è la pressione corrispondente all'intensità $I_0$. Quando un suono/rumore è al limite di udibilità, $I = I_0$ (cioè $P = P_0$) e sostituendo i valori nelle equazioni (6) e (7) abbiamo $I_{dB} = 0$.

[5] Invertendo l'equazione (6) abbiamo che 60 dB corrispondono ad una intensità sonora $I = 10^{-6}$ W/m$^2$. Il 3% di I corrisponde quindi a $3\times10^{-8}$ W/m$^2$. Ponendo questo valore nella equazione (6) otteniamo $I_{dB}$ = 44,8 dB, che nel testo approssimiamo a 45 dB.

[6] D. Murra, G.P. Gallerano, P. Di Lazzaro: *Suono e rumore, una differenza 'spettrale'*, Energia, Ambiente e Innovazione vol. 3, pagg. 73-78 (2015). http://www.enea.it/it/seguici/pubblicazioni/pdf-eai/n-3-maggio-giugno-2015/10-suono-e-rumore.pdf

*La Fisica in casa*

# LA CENTRIFUGA: COME SEPARARE, SCHIACCIARE E ASCIUGARE CON UNA FORZA… SPAZIALE

> *La comparsa degli elettrodomestici ha radicalmente trasformato il modo in cui vivono le donne e di conseguenza anche gli uomini (…) L'aumento della partecipazione al mercato del lavoro ha elevato lo status delle donne in casa e nella società, riducendo la preferenza per i figli maschi e aumentando gli investimenti nell'educazione femminile.*
>
> – Ha-Joon Chang, *23 cose che non ti hanno mai detto sul capitalismo* (il Saggiatore, 2012)


La lavatrice è considerata una delle invenzioni più utili di tutti i tempi e l'elettrodomestico che ha avuto il maggiore impatto nella vita di tutti i giorni [1]. Il motivo è semplice, basti pensare che prima dell'avvento della lavatrice il lavoro casalingo più impegnativo, in termini di fatica e di tempo dedicato, era il lavaggio a mano della biancheria. Lavaggio che spesso veniva eseguito fuori casa, presso un lavatoio comune o addirittura sulle rive di un torrente.

Chi ha ideato e realizzato la prima lavatrice?

Per rispondere, bisogna intendersi sui requisiti per definire un oggetto 'lavatrice'. A cavallo tra il 1600 e il 1800 furono realizzati cestelli di legno, o di corda intrecciata, immersi in getti di acqua e dotati di manovelle per imprimere un moto di rotazione. Un oggetto più simile all'attuale lavatrice fu realizzato nel 1874 dal mercante William Blackstone, che regalò alla moglie un barile di legno riempito con acqua calda saponata che aveva all'interno un perno dotato di pioli che, ruotando, muovevano i panni sfregandoli l'uno contro l'altro, in modo da riprodurre in qualche modo il lavaggio a mano. Il funzionamento era manuale. Blackstone mise in vendita questi oggetti, divenendo il primo produttore di lavatrici. Il passo decisivo per eliminare la fatica manuale del lavaggio fu perfezionato 35 anni dopo, quando Alva Fisher (Chicago, 1862 – 1947) brevettò la prima lavatrice il cui cestello ruotava grazie ad un motore elettrico [2]. La figura 1 mostra la pubblicità della prima lavatrice elettrica, chiamata Thor e prodotta dalla Hurley Machine Company di Chicago.


***Figura 1.*** *Pubblicità della lavatrice Thor, prima lavatrice elettrica brevettata da Fisher nel 1909 e prodotta dalla Hurley Machine Company. Tratto da http://1908-s212808.blogspot.it/2015/05/la-prima-lavatrice-elettrica.html*

Parlando di lavatrici moderne, viene in mente la centrifuga, ovvero la fase di rotazione ad alta velocità del cestello che svolge la funzione di espellere l'acqua e strizzare i panni. Quando tiriamo fuori i panni dalla lavatrice dopo la centrifuga notiamo che sono ben pigiati sulla parete del cestello, come se fossero stati schiacciati con una forza enorme. Nasce quindi la curiosità di sapere quanto è intensa la forza centrifuga esercitata sui panni durante il ciclo di rimozione dell'acqua.

L'accelerazione centrifuga $a_c$ di un oggetto in moto rotatorio è definita dalla seguente equazione

$$\mathbf{a}_{\boldsymbol{c}} = \frac{\boldsymbol{V}_{\boldsymbol{T}}^{2}}{\boldsymbol{R}} \qquad (1)$$

dove $V_T$ è la velocità tangenziale ed R il raggio della traiettoria, nel nostro caso il raggio del cestello.

La velocità è definita come il rapporto fra lo spazio percorso e il tempo impiegato. Lo spazio percorso da qualsiasi punto sulla superficie esterna del cestello della lavatrice in un giro è pari alla circonferenza della base cilindrica del cestello –cioè $2\pi\times R$– mentre il tempo impiegato a completare un giro è $T = 1/f$ dove f è la frequenza di rotazione, data dal numero di giri per unità di tempo. Di conseguenza, la velocità tangenziale è data dalla seguente equazione

$$\mathbf{V}_{\boldsymbol{T}} = \frac{\boldsymbol{2\pi\times R}}{\mathbf{1/f}} = \boldsymbol{2\pi} \times \boldsymbol{R} \times \mathbf{f} \qquad (2)$$

Combinando le equazioni (1) e (2) otteniamo una formula che mette in relazione l'accelerazione centrifuga, il raggio del cestello e le frequenza di rotazione:

$$\mathbf{a_C = 4\pi^2\times R\times f^2} \qquad (3)$$

Per una lavatrice a carico frontale con cestello da 48 cm di diametro (quindi R = 24 cm = 0,24 m) che durante la fase centrifuga ruota alla frequenza di mille giri al minuto (f = 1.000/60 = 16,7 giri al secondo) dall'equazione (2) otteniamo $V_T$ = 25,2 m/s e dall'equazione (1) $a_C$ = 2.640 m/s$^2$. Questo valore di accelerazione centrifuga è estremamente elevato: ricordando che l'accelerazione di gravità è g = 9,8 m/s$^2$ e che la forza che muove e accelera un oggetto è data dal prodotto della massa dell'oggetto per l'accelerazione, un panno di massa m viene schiacciato sulla superficie del cestello con una forza $(m\times a_C)/(m\times g) = a_C/g$ = 2.640/9,8 = 269 volte maggiore del suo peso!

L'equazione (3) mette in evidenza che l'accelerazione centrifuga sulla parete è linearmente proporzionale al raggio del cestello. Ne segue che il valore di accelerazione $a_C$ = 2.629 m/s$^2$ è efficace solo se R = 24 cm, ovvero solo sulla parete del cestello. La maggior parte degli indumenti non riesce a toccare il cestello a causa degli altri indumenti interposti, quindi, d'accordo con l'equazione (3), ciascun indumento subisce un'accelerazione centrifuga diversa, che dipende dalla sua posizione, ovvero dalla sua distanza R dal centro del cestello. Ad esempio, un panno posto a 5 cm dalla superficie del cestello si trova ad una distanza dal centro R = 24 – 5 = 19 cm e la formula (3) fornisce un'accelerazione $a_C$ = 2.083 m/s$^2$ che è il 21% più bassa dell'accelerazione per R = 24 cm ma pur sempre ragguardevole: 2.083/9,8 = 212 volte l'accelerazione di gravità!

Possiamo quindi concludere che anche i panni che si trovano distanti dalla superficie del cestello sono sottoposti ad una forza centrifuga enorme, pari a oltre 200 volte il loro peso.

Anche l'acqua viene sottoposta alla stessa accelerazione centrifuga e spinta verso la superficie del cestello: l'acqua passa attraverso la trama dei tessuti trascinando via lo sporco (vedi la nota [3] per sapere come) e viene espulsa uscendo attraverso i fori sulla parete del cestello. Al termine della fase di rotazione a 1.000 giri al minuto i panni sono quasi asciutti sia perché l'acqua è stata espulsa, sia perché i panni sono stati schiacciati con una forza di oltre 200 volte il loro peso.

La lavatrice è l'apparecchio più comune tra quelli che usano la forza centrifuga. Ce ne sono molti altri, anche a livello industriale, come ad esempio le centrifughe usate per la separazione dello zucchero dalla melassa e per la scrematura del latte, e in generale per separare materiali aventi diversa densità [4].

Una piccola macchina centrifuga di uso casalingo è l'asciuga insalata, un cestello cilindrico di plastica forata che può ruotare intorno al proprio asse tramite una manovella. Se il cestello ha un diametro di 30 cm (R = 0,15 m) e lo facciamo ruotare alla frequenza di due giri al secondo, l'equazione (3) permette di calcolare $a_C = 23{,}7\ m/s^2$, quindi l'insalata sul bordo del cestello viene schiacciata con una forza fino a 23,7/9,8 = 2,4 volte il suo peso.

Un altro strumento che usa la forza centrifuga è il simulatore per esercitare gli astronauti a sopportare le accelerazioni cui saranno sottoposti in fase di decollo/atterraggio nelle missioni spaziali per raggiungere la Stazione Spaziale Internazionale (circa 4 volte l'accelerazione di gravità). Sottolineiamo l'importanza della durata: infatti, un'accelerazione pari a 4 volte quella di gravità può sembrare poca cosa (e in effetti viene raggiunta per un tempo brevissimo anche in alcuni punti di cambio direzione delle montagne russe nei Luna park), ma se viene esercitata per 9 minuti consecutivi, come nel caso del decollo delle missioni spaziali, bisogna essere addestrati a sopportare a lungo lo schiacciamento del torace che rende difficile la respirazione, come avverrebbe se 4 persone di peso uguale al tuo fossero sedute sopra di te.

Abbiamo già visto nei precedenti esempi che la forza centrifuga spinge gli oggetti lontano dall'asse di rotazione. Più densi sono gli oggetti, maggiore è la forza centrifuga cui sono sottoposti. E' noto che quando una soluzione (liquido più particolato) viene lasciata in quiete, le particelle tendono a sedimentare (cioè a separarsi a seconda della loro densità) scendendo sul fondo del recipiente spinte dalla forza di gravità che è proporzionale alla densità delle particelle. La velocità di sedimentazione è proporzionale alla forza applicata: le centrifughe usate per materiali biologici servono a separare i componenti di un campione (ad esempio sangue) tramite una forza centrifuga molto più elevata della forza peso gravitazionale. Queste centrifughe possono avere dimensioni e prestazioni diverse, a seconda dell'uso cui sono destinate. Ai due estremi troviamo le centrifughe a bassa frequenza (da 200 a 2.000 giri al minuto), e le centrifughe ad alta frequenza (da 18.000 a 80.000 giri al minuto). Le prime sono usate in citologia, ematologia, microbiologia, colture cellulari, biotecnologie. Le seconde, dette supercentrifughe, sono usate in minipreparazioni di DNA, precipitazione di acidi nucleici, separazione di componenti subcellulari.

Un modello di centrifuga compatto può raggiungere una frequenza f = 10.000 giri al minuto e la notevole accelerazione $a_C$ = 175.282 m/s$^2$, pari a 17.867 volte l'accelerazione –e quindi la forza– di gravità! La velocità di rotazione è talmente elevata che i campioni si riscaldano per attrito urtando le molecole di aria. E' quindi necessario refrigerare la camera dove i campioni ruotano e, per velocità ancora più elevate, è necessario che l'aria sia rarefatta, quindi la camera deve essere dotata di una pompa che aspira l'aria dall'interno in modo che i campioni ruotino sotto vuoto.


Come accennato, il principale scopo delle centrifughe per materiali biologici è la separazione delle particelle a seconda della loro densità [4]. Ad esempio, la centrifuga compatta del precedente esempio che gira alla frequenza f = 10.000 giri al minuto per circa 5 minuti permette di separare il sangue –contenuto in un tubo capillare– in strati. Il volume di globuli rossi divisi per il volume totale del campione di sangue permette di ottenere la percentuale del volume sanguigno occupata dalla parte corpuscolare del sangue, cioè il valore di ematocrito.

**Note**

[1] Vedi, ad esempio, www.ilfattoquotidiano.it/2014/08/12/elettrodomestici-ma-quale-web-la-vera-rivoluzione-contemporanea-fu-la-lavatrice/1089412/

[2] A.J. Fisher: *Drive mechanism for washing machines*, US Patent 966677A. Richiesta sottomessa il 27 Maggio 1909. Brevetto concesso il 9 Agosto 1910 https://www.google.com/patents/US966677

[3] L'acqua da sola non può trascinare con sé lo sporco più tenace: è necessario un detersivo. Perché il detersivo toglie le macchie? Si tratta di un argomento più chimico che fisico, ma proviamo a toglierci questa curiosità usando concetti semplificati (i chimici ci perdoneranno!).

Il detersivo contiene sostanze dette 'tensioattive' cioè molecole che hanno un'estremità idrofila (con forte affinità all'acqua) e l'altra estremità idrofoba (non si lega all'acqua, ma a proteine e i grassi in genere e repulsione per l'acqua). Grazie a queste estremità con affinità diverse, i tensioattivi si posizionano spontaneamente nella zona di contatto (interfaccia) tra acqua e grasso. Di conseguenza, nella lavatrice i tensioattivi si inseriscono tra la fibra tessile bagnata e la macchia di grasso, aumentando l'angolo di contatto tra macchia e fibre, fino a staccare la macchia dal tessuto. Appena tolto dal tessuto, il grasso viene circondato e incapsulato dal tensioattivo –perché l'interfaccia tra acqua e grasso corrisponde alla superficie esterna della molecola di grasso– e quindi il grasso è isolato e non può più attaccarsi ad altre fibre: rimane quindi sospeso nell'acqua, fino ad essere espulso dalla centrifuga.

[4] Per capire in termini matematici perché e in quali condizioni una centrifuga separa due corpi di densità diverse, è necessario generalizzare l'equazione (3) al caso del moto di una particella di densità $d_s$ che si muove in un fluido viscoso di densità $d$. La forza centrifuga cui è sottoposta la particella (supposta sferica) di

diametro D spinge la particella verso l'esterno ma, a causa della viscosità del materiale in cui si muove, la forza centrifuga è contrastata dalla forza di attrito, per cui l'accelerazione efficace è data dall'equazione

$$a_{tot}=4\pi^2\times f^2\times R\times\left[1-\frac{d}{d_s}\right]-\frac{18\times\mu\times v}{d_s\times D^2} \qquad (4)$$

dove f è il numero di giri al secondo, R è la distanza radiale della particella dall'asse di rotazione, μ è la viscosità del fluido e v è la velocità della particella.

Notiamo che l'equazione (4) si riduce all'equazione (3) quando la densità della particella è molto maggiore della densità del fluido e quando la viscosità è piccola e viceversa la particella è grande.

Quando le due forze si equivalgono (accelerazione totale nulla), la particella continuerà a muoversi ad una velocità v costante, che possiamo ottenere uguagliando a zero l'accelerazione totale nell'equazione (4):

$$v = (4\pi^2\times f^2\times R\times(d_s - d)\times D^2)/18\mu. \qquad (5)$$

Integrando nel tempo l'equazione (5) e nell'ipotesi che lo spessore dello strato di materiale trattato sia piccolo rispetto alla distanza radiale media <R> si ottiene la distanza media X percorsa dalla particella nel fluido:

$$X = (4\pi^2\times f^2\times\langle R\rangle\times(d_s - d)\times D^2)\times V/(18\mu Q) \qquad (6)$$

dove Q è la portata volumetrica di miscela da separare immersa nel volume V del fluido. Notiamo che V/Q equivale al tempo necessario a percorrere la distanza X.

La particella viene separata dal fluido quando X nell'equazione (6) è maggiore del percorso che la particella deve compiere dentro la centrifuga per raggiungere la parete separatrice (ad esempio il bordo del cestello forato nel caso della lavatrice). L'equazione (6) ci dice che X è tanto più piccola quanto minore è la differenza tra $d$ e $d_s$, e quindi per separare particelle che hanno una densità simile a quella del fluido in cui si muovono è necessario aumentare la frequenza f, sfruttando la dipendenza quadratica di X da f.

# LAMPADE A INCANDESCENZA, A BASSO CONSUMO, A LED… FACCIAMO UN PO' DI LUCE!

*Dio disse: «Ci siano luci nel firmamento del cielo, per distinguere il giorno dalla notte; servano da segni per le stagioni, per i giorni e per gli anni e servano da luci nel firmamento del cielo per illuminare la terra». E così avvenne: Dio fece le due luci grandi, la luce maggiore per regolare il giorno e la luce minore per regolare la notte, e le stelle. Dio le pose nel firmamento del cielo per illuminare la terra e per regolare giorno e notte e per separare la luce dalle tenebre.*

*– Genesi, cap. 1*

In principio era il fuoco…

Sì, perché di notte, magari senza Luna, cos'altro si poteva utilizzare per illuminare?

Fortunatamente l'uomo ha scoperto dai tempi più remoti come generare e controllare il fuoco, sicché le notti dei nostri antenati non sono state troppo buie e fredde. Ma dalla luce 'artificiale' creata nella preistoria fino a quella usata nel XIX secolo non ci sono state particolari innovazioni. Si è passati da un ramo che brucia per pochi minuti a torce avvolte in stracci imbevuti di olio o bitume e capaci di fornire luce per ore, fino alle candele e alle lampade a petrolio, ma il principio di funzionamento era sempre lo stesso: una reazione chimica, chiamata combustione, che generava la fiamma. In una parola: fuoco.

Grazie all'invenzione della corrente elettrica, Thomas Alva Edison (Milan, 1847 – West Orange, 1931) mise a punto un nuovo sistema per generare la luce. Per essere precisi, Edison si limitò a perfezionare un modello di lampadina già oggetto di studio da parte di altri scienziati, ma la sua abilità nel campo del 'marketing' gli consentì non solo di brevettare questa invenzione ma anche di passare alla storia come colui che ha 'illuminato il mondo'. Da qualche anno la lampadina a incandescenza di Edison è in disuso, soppiantata dalle lampade a fluorescenza prima e da quelle a LED poi. La lampada a incandescenza rimane in vendita nella tipologia 'alogena', basata sullo stesso principio di quella di Edison ma con una variante.

Cerchiamo di capire qual è il principio di funzionamento dei vari tipi di sistemi di illuminazione e per quali motivi le lampade a incandescenza sono state abbandonate.

La lampada a incandescenza di Edison contiene il filamento di tungsteno, un metallo estremamente duro, che si trova all'interno di un bulbo di vetro riempito con gas inerte, che non reagisce chimicamente con il filamento.

Una volta avvitata la lampadina nella sua sede, pigiando l'interruttore si chiude un circuito elettrico in cui scorre corrente che passa nel filamento. In ogni circuito elettrico, il flusso di corrente è ostacolato da una caratteristica del circuito chiamata, non a caso, 'resistenza'. Tra la tensione applicata al circuito, l'intensità di corrente e la resistenza esiste una semplice relazione, nota come legge di Ohm, dal nome del fisico tedesco Georg Ohm (Erlangen, 1789 – Monaco di Baviera, 1854) il quale condusse gli studi sulla corrente elettrica nei primi anni del 1800. Indicando con V la tensione applicata al circuito (detta anche differenza di potenziale), con I l'intensità di corrente che vi scorre e con R la resistenza elettrica, la legge di Ohm si può scrivere

$$\mathbf{V = I \times R}$$

La legge di Ohm si può leggere in diversi modi, a seconda di quale sia la variabile e quale la costante: l'intensità di corrente aumenta quando aumenta la tensione (se R è costante), oppure l'intensità di corrente è tanto più bassa quanto più è alta la resistenza (se V è costante) o, ancora, il valore della resistenza di un circuito è dato dal rapporto tra tensione e intensità di corrente.

La potenza elettrica P dissipata in circuito, che paghiamo al nostro fornitore di energia, è data dal prodotto della tensione per la corrente, ovvero $P = V \times I$, per cui, usando la legge di Ohm possiamo scrivere

$$\mathbf{P = I^2 \times R} \text{ o anche } \mathbf{P = V^2 / R} \qquad (1)$$

Da queste formule possiamo dedurre quanta potenza elettrica viene 'consumata' da una lampadina a incandescenza. Infatti, essendo V = 220 volt la tensione applicata e R = 500 Ω la resistenza del filamento (Ω è il simbolo della resistenza e si legge, appunto, *ohm*), d'accordo con la seconda delle equazioni (1) la potenza di tale lampadina è pari a $220^2 / 500 = 88$ watt.

In realtà, chi ha dimestichezza con gli strumenti di misure elettriche può verificare che la resistenza di una lampadina ad incandescenza spenta è di poche decine di ohm. Di fatto, la resistenza iniziale rimane bassa per una frazione di secondo, il tempo necessario al filamento per raggiungere una temperatura di circa 2500 °C, alla quale la sua resistenza elettrica aumenta e raggiunge il valore di 500 Ω.

Il fatto che una lampada, ad esempio, da 90 watt nominali nei primi istanti dopo l'accensione consumi 900 watt, ovvero 10 volte la potenza nominale, è il motivo per cui le lampade ad incandescenza hanno una vita breve se sono accese e spente frequentemente. Inoltre, il passaggio dalla temperatura ambiente a più di 2000 gradi in pochi istanti crea uno stress meccanico non indifferente.

Ma non è la durata della lampadina ad incandescenza che ne ha decretato la fine. In effetti, nonostante le lampade che l'hanno sostituita, le cosiddette lampade a basso consumo, siano state presentate capaci di una vita media pari almeno a 5 volte quelle di una lampada ad incandescenza con lo stesso potere luminoso, gli autori di questa raccolta hanno visto rompersi molte lampadine a basso consumo nello stesso tempo in cui lampade a incandescenza continuavano imperterrite a fare il loro lavoro. Il motivo dell'abbandono delle lampade a filamento è piuttosto dovuto alla loro bassa efficienza. Per capire perché, dobbiamo aprire una piccola parentesi sui principi elementari dell'elettromagnetismo.

Noi siamo circondati da radiazione elettromagnetica, formata da onde di energia che si propagano nello spazio e che si differenziano fra loro tramite la 'lunghezza d'onda', cioè la distanza tra i picchi di due onde consecutive. I nostri occhi riescono a vedere solo una piccolissima parte della radiazione elettromagnetica, che chiamiamo 'luce'. La luce visibile è composta da diversi colori, ciascuno con una lunghezza d'onda caratteristica: il rosso ha una lunghezza d'onda di circa 0,65 μm, il giallo di circa 0,6 μm, il verde 0,5 μm ed il blu/violetto di circa 0,45 μm. Ricordiamo che 1 μm = un millesimo di millimetro.

Ogni corpo che si trova ad una data temperatura emette una radiazione elettromagnetica avente uno spettro, ovvero una certa distribuzione di intensità che varia a seconda delle lunghezze d'onda (cioè tra i vari colori). Lo spettro dipende dalla temperatura. Più è alta la temperatura, più diminuisce la lunghezza d'onda corrispondente all'emissione massima, vedi la figura 1.

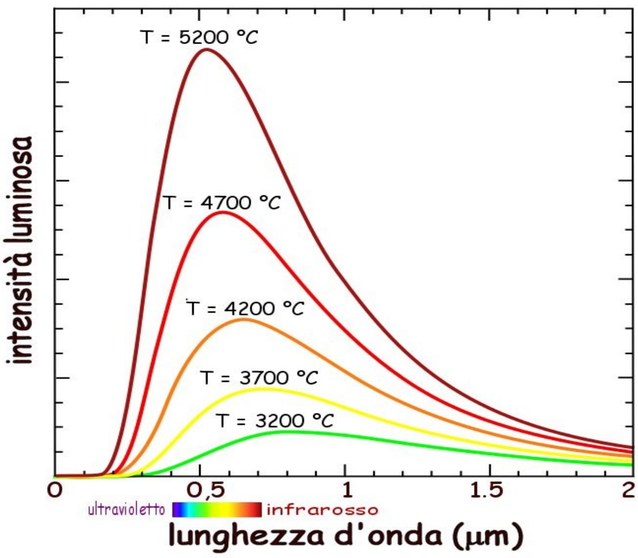



*__Figura 1__ Intensità luminosa emessa da un corpo caldo al variare della lunghezza d'onda della luce, per 5 diverse temperature del corpo.*

Un filo di tungsteno percorso da corrente elettrica raggiunge una temperatura superiore a 2000 °C e a questa temperatura il picco di intensità della radiazione emessa è intorno a 0,9 μm, nell'infrarosso, invisibile ai nostri occhi. Quindi, la maggiore intensità di radiazione emessa dalla lampadina a incandescenza è invisibile, cioè inutile ad illuminare. Solo una piccola porzione della radiazione è emessa nello spettro visibile. Come risultato, gli 88 watt elettrici consumati al contatore producono solo 4 watt di luce visibile mentre 84 watt sono sprecati in emissione infrarossa, cioè calore. Infatti, le lampadine a incandescenza sono intoccabili a causa dell'alta temperatura raggiunta dal bulbo.

Una possibile soluzione è innalzare la temperatura del filamento, in modo che il picco dell'intensità della radiazione emessa si sposti all'interno delle lunghezze d'onda della luce visibile, vedi la figura 1. Questo è proprio il caso delle lampade alogene.

Ma come, dirà qualcuno, con la lampada a incandescenza sprechiamo il 95% di energia in calore ed ora vogliamo scaldarle di più?

Il calore emesso da una lampadina a incandescenza non è solo dovuto ai 2500 °C del filamento, ma anche alla radiazione infrarossa emessa che non vediamo, ma che percepiamo come calore. Aumentare la temperatura consente di diminuire la radiazione infrarossa e aumentare la radiazione visibile. Infatti, la figura 1 mostra che a 4700 °C il picco di intensità è emesso ad una lunghezza d'onda di 0,58 μm, cioè nella zona tra l'arancione ed il giallo. Spostare il picco di emissione dall'infrarosso al giallo comporta un aumento di circa il 30% di efficienza rispetto all'emissione della lampada tradizionale. Questo è il motivo per cui le lampade a incandescenza sono state abbandonate.

Tuttavia, innalzando la temperatura si creano due inconvenienti: il filamento si consuma più velocemente e il vetro del bulbo non sopporta una temperatura così alta. Il primo problema è stato risolto inserendo nel gas all'interno del bulbo una sostanza alogena (da cui il nome di tali lampadine) come lo iodio, che reagisce con il tungsteno evaporato a causa dell'alta temperatura creando un composto –l'alogenuro di tungsteno– il quale a contatto con il filamento incandescente si decompone ridepositando il tungsteno atomico sul filamento stesso. In questo modo il filamento si scompone e si ricompone di continuo, allungando la vita della lampada. Il secondo problema è stato risolto sostituendo il vetro con il quarzo, che può sopportare temperature molto più alte. Purtroppo, il quarzo è trasparente alla radiazione ultravioletta che, in una lampada alogena, è presente in quantità non trascurabile. Sappiamo che la radiazione ultravioletta può creare danni alla pelle e agli occhi. Per questo motivo, le lampade alogene vanno rivolte verso il soffitto, oppure sono incapsulate in un secondo involucro in cui la finestra di uscita è di vetro. Un ulteriore accorgimento è di evitare di toccarle direttamente con le dita (anche quando sono spente), in quanto la nostra pelle contiene sostanze grasse che, se rilasciate sul bulbo, rischiano di carbonizzarsi a causa dell'elevata temperatura della lampada, danneggiando lo stesso bulbo.

Con la lampada alogena l'efficienza luminosa aumenta, rispetto alla lampada di Edison, ma il vero salto in efficienza è stato fatto con le lampade a basso consumo, le cui antenate sono le lampade 'al neon'. L'invenzione della lampada al neon è di un ingegnere francese, Georges Claude (Parigi, 1870 – Saint Claude, 1960) il quale fece passare corrente elettrica in un tubo di vetro contenente gas neon a bassa pressione, ottenendo emissione di luce rossastra. Il principio fisico delle lampade al neon è basato sulla produzione di luce da parte degli atomi del gas bersagliati dagli elettroni liberi che si muovono dall'elettrodo negativo verso l'elettrodo positivo. Il dispositivo di Claude fece molta impressione al salone dell'auto di Parigi del 1910, quando fu presentato per la prima volta. Da allora, i tubi al neon (quelli originali) sono stati usati prevalentemente nelle insegne pubblicitarie di tutto il mondo, mentre oggi l'uso più comune è nei *cercafase*, quei cacciaviti che si illuminano quando sono a contatto con il polo che porta la fase nella corrente alternata.

I moderni 'tubi al neon', invece, pur sfruttando lo stesso principio fisico, usano una miscela di gas che contiene mercurio il quale, depositato in piccolissime dosi all'interno del tubo, nel momento in cui passa la corrente evapora e tali vapori, eccitati dal passaggio di corrente fra gli elettrodi, sono responsabili dell'emissione luminosa. Ma non direttamente la luce che vediamo! La luce dei vapori di mercurio, infatti, emette nello spettro dell'ultravioletto vicino e quindi è invisibile. La vernice bianca che riveste i tubi di queste lampade assorbe la luce ultravioletta emessa dall'interno della lampada e la riemette a lunghezze d'onda maggiori, dal blu fino al rosso. Questo fenomeno è chiamato *fluorescenza*, e prende il nome dal fluoro, elemento che, se investito da luce di un colore, brilla di un colore diverso (dal blu al verde o dal giallo al rosso, cioè da una lunghezza d'onda corta ad una più lunga). Dal nome dell'effetto fisico che le caratterizza, deriva il loro vero nome: 'lampade fluorescenti'.

Nelle lampade fluorescenti il motivo principale dell'emissione di luce non è la temperatura del materiale ma lo scontro tra elettroni e atomi del gas, quindi il colore della luce emessa non è legato alla temperatura. Infatti, in queste lampade il picco di emissione è nell'ultravioletto e, se valesse il principio di proporzionalità inversa tra lunghezza d'onda e temperatura, queste lampade avrebbero una temperatura di oltre 10.000 °C!

La luce emessa dal gas delle lampade fluorescenti non è composta da uno spettro continuo, come nella figura 1, bensì da poche righe centrate su alcune lunghezze d'onda caratteristiche della miscela di gas nel tubo. La vernice ridistribuisce queste righe ultraviolette in tante lunghezze d'onda diverse e la loro combinazione ci restituisce il familiare colore 'bianco'. A seconda del materiale usato per la vernice, cambia la distribuzione dei colori emessi, sicché alcune lampade appaiono di un bianco 'freddo' ed altre di un bianco 'caldo'. Il colore di queste lampade può essere classificato in termini di 'temperatura di colore'. Come abbiamo visto nella figura 1, le sorgenti di luce che emettono radiazione a causa della loro temperatura hanno il colore del picco di emissione che dipende dalla temperatura stessa. Nelle lampade fluorescenti non c'è questa dipendenza, ma è possibile utilizzare lo stesso criterio per classificarne il colore prevalente in termini di temperatura. Ad esempio, un colore 'caldo', centrato sul giallo/rosso, corrisponde ad una temperatura di colore di circa 2400 °C (o 2700 K, se si usa la scala assoluta delle temperature, in gradi Kelvin), mentre un colore 'freddo', centrato sul verde/blu, corrisponde ad una temperatura di circa 3700 °C (~ 4000 K).

Non perdendo più energia in radiazione infrarossa, l'efficienza di emissione di luce visibile è elevata e le lampade fluorescenti rendono mediamente 5 volte più delle lampade a incandescenza: per questo motivo le lampade fluorescenti sono chiamate 'a basso consumo'.

Da qualche anno hanno fatto ingresso nuovi tipi di lampade: i LED, con un diverso principio fisico di emissione di luce, che non dipende dalla temperatura né dal passaggio di corrente in un gas. Nei LED c'è un passaggio di corrente in un solido, o meglio, in una regione di confine tra due solidi.

La parola 'LED' è l'acronimo inglese 'Light Emitting Diode' (diodo ad emissione di luce) e il termine 'diodo' indica una coppia di semiconduttori accostati. Il diodo è un componente elettronico che consente il passaggio di corrente solo in una direzione. Ciò è causato dalla natura dei due semiconduttori che compongono il diodo, uno con prevalenza di cariche negative ed uno in cui prevalgono le cariche positive (ma non va confuso con una batteria!). Quando i due semiconduttori vengono connessi, la presenza delle cariche di diverso segno sull'interfaccia fa sì che solo applicando la tensione con il polo positivo dove si trovano le cariche positive la corrente possa fluire e non viceversa. Ma il LED è un diodo particolare. Infatti, nel LED il passaggio di corrente è accompagnato da una ricombinazione di elettroni (negativi) con gli ioni (positivi) che si trovano in una piccola regione compresa nell'interfaccia dei semiconduttori. Questa ricombinazione genera energia sotto forma di luce con un'efficienza più alta delle lampade fluorescenti, perché non c'è bisogno di convertire l'ultravioletto in luce visibile.

A seconda del materiale che compone il LED si hanno diodi con emissione di colore rosso, giallo, verde o blu (l'invenzione di quest'ultimo ha decretato l'assegnazione del Premio Nobel in Fisica nel 2014 a tre scienziati giapponesi). Il colore è ben definito intorno ad una particolare lunghezza d'onda, e per ottenere luce bianca è necessario mescolare la luce proveniente da almeno tre

LED, uno rosso, uno verde ed uno blu (il motivo è spiegato nell'articolo "Cosa sono i colori?" in questa raccolta).

Oltre all'elevata efficienza luminosa, le lampade a LED hanno il vantaggio di funzionare a bassa tensione. Si tratta di un vantaggio relativo, in verità, perché nelle nostre case la tensione di esercizio è fissata a 220 volt e occorre un circuito elettronico che abbassi il valore di tensione. Tale circuito, che comporta una piccola dissipazione di energia, si trova tra l'attacco a vite e il bulbo.

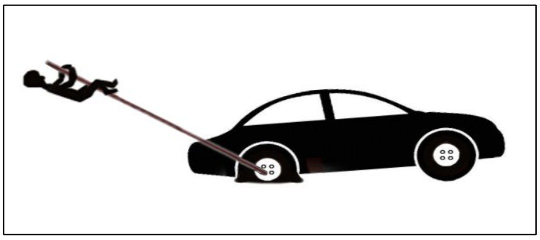
In questo articolo abbiamo mostrato come nel campo dell'illuminazione sono stati fatti grandi passi avanti, partendo da lampade a incandescenza che 'sprecano' il 95% di energia e sono intoccabili a causa del calore, fino ad arrivare ai LED che possono essere piccoli come un francobollo e sviluppano la stessa intensità luminosa di una lampada a incandescenza consumando una potenza 10 volte inferiore. Eppure, la vecchia lampadina a filamento non sarà dimenticata tanto facilmente, in particolare per la sua resa cromatica, più simile alla luce naturale in confronto alle nuove lampade.

Se dalla scoperta del fuoco alla lampada di Edison sono passati centinaia di migliaia di anni, dalle prime lampadine di uso quotidiano a quelle a LED sono passati solo cento anni. Insomma, per quanto riguarda l'illuminazione artificiale negli ultimi decenni ne abbiamo viste 'di tutti i colori' ma chissà che il futuro non ci riservi qualche altra luminosa sorpresa…

# GOMMA A TERRA? SOLLEVARE UN GRANDE PESO? DATEMI UNA LEVA ED UN PUNTO D'APPOGGIO…

*Datemi un punto d'appoggio e vi solleverò la Terra e il cielo.*

– Archimede



Trovare la gomma della ruota dell'automobile a terra è una situazione spiacevole e non rara, purtroppo. I lettori che hanno smontato e montato ruote avranno notato che si fa meno fatica a svitare i bulloni quando si spinge la 'chiave' alla sua estremità, cioè il più lontano possibile dai bulloni. Perché?

Il motivo è lo stesso che fa aprire le porte di casa con meno forza quando si spinge la porta in un punto lontano dai cardini intorno ai quali la porta gira. Non a caso, infatti, le maniglie delle porte (e delle finestre) sono montate più lontano possibile dai cardini.

Da queste due semplici osservazioni (i bulloni della ruota si svitano più facilmente applicando la forza lontano dai bulloni, e la porta gira più facilmente spingendola in un punto lontano dall'asse dei cardini) possiamo intuire che quando si applica una forza per far ruotare un oggetto, la spinta di rotazione è proporzionale alla distanza tra il punto di applicazione della forza e l'asse di rotazione.

Ai fisici, si sa, piace introdurre dei nomi che permettono di individuare senza ambiguità cosa si sta descrivendo: in questo caso, la distanza tra il punto di applicazione della forza e l'asse di rotazione è chiamato 'braccio della forza' e il prodotto tra braccio della forza e la forza stessa è chiamato 'momento' della forza. La spinta per girare un oggetto è data dal momento della forza, e, a parità di forza applicata, il momento è maggiore se aumenta il braccio della forza.

Oltre i nomi, ai fisici piace la sintesi, e tutta la precedente descrizione si riassume simbolicamente in una sola equazione come:

$$\mathbf{M = f \times B} \qquad (1)$$

dove M è il momento della forza, uguale al prodotto della forza applicata f per il braccio della forza B, vedi la figura 1 e la nota [1].

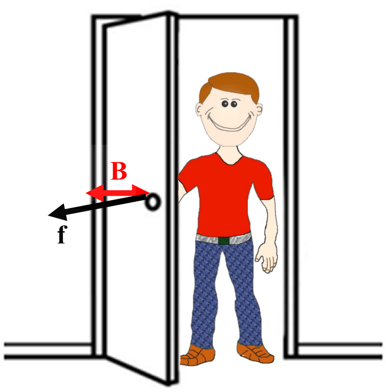



***Figura 1.*** *La freccia nera indica la direzione della forza f applicata alla maniglia per aprire la porta. In rosso la distanza B tra maniglia e asse di rotazione della porta. Il momento della forza motrice (cioè la spinta per girare la porta) è dato dall'equazione (1) e quindi a parità di forza f la spinta è tanto maggiore quanto più grande è B, cioè quanto più distante è la maniglia dai cardini della porta.*

Il momento di una forza è alla base del funzionamento di molti oggetti di uso comune, ad esempio, le forbici, lo schiaccianoci, la scopa, la carriola, la canna da pesca. In questi oggetti il braccio della forza è dato dalla distanza tra il punto di applicazione della forza e un punto fisso chiamato 'fulcro'. Il momento della forza motrice deve superare un 'momento resistente' dato dal prodotto tra il braccio della forza resistente, ovvero la distanza tra forza resistente e il fulcro, e la resistenza offerta dall'oggetto (ad esempio la noce nel caso dello schiaccianoci, la stoffa da tagliare con le forbici, il peso all'interno della carriola). La figura 2 mostra visivamente queste grandezze.

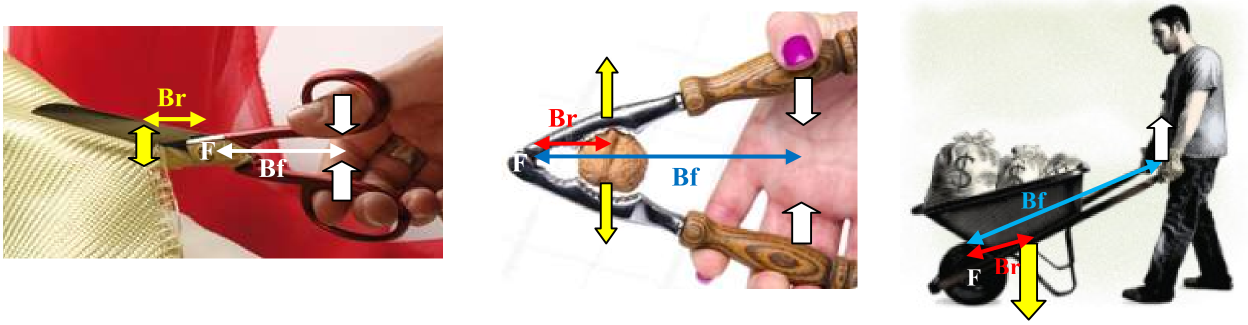



***Figura 2****. Frecce bianche = forza motrice applicata. Frecce gialle = forza resistente. F = Fulcro. Br = braccio della forza resistente. Bf = Braccio della forza motrice. In tutti i tre casi della figura Bf è maggiore di Br, quindi le forbici, lo schiaccianoci e la carriola sono leve vantaggiose.*

Gli oggetti mostrati nella figura 2 sono chiamati con il termine generico di 'leve'. La leva è la più antica macchina semplice usata dall'uomo per vincere forze resistenti. Nei 'Problemi di meccanica' attribuiti ad Aristotele (Stagira, 384 a.C. – Calcide, 322 a.C.) si trova la prima trattazione teorica delle leve, ma è Archimede (Siracusa, 287 a.C. – Siracusa, 212 a.C.) che formula la legge che mette in relazione la distanza dal fulcro della forza impressa sulla leva con la distanza del peso da sollevare in modo da ottenere l'equilibrio dei momenti delle forze.

Quando la lunghezza del braccio della forza motrice è maggiore del braccio della forza resistente, la leva si dice 'vantaggiosa' perché la forza motrice necessaria ad uguagliare il momento della forza resistente è minore della forza resistente e quindi si fa meno fatica a rompere la noce con lo schiaccianoci, a tagliare una stoffa con le forbici e a trasportare un peso con la carriola, vedi la figura 2.


Un esempio di leva 'svantaggiosa' è la scopa per raccogliere la spazzatura. Infatti, nella scopa il fulcro è sull'estremità alta del manico, e la resistenza è data dalla spazzatura sul pavimento, per cui Br è pari all'intera lunghezza della scopa. Noi applichiamo la forza motrice in qualche punto intermedio del manico, per cui Bf è sempre minore di Br, vedi la figura 3, e per uguagliare il momento resistente bisogna applicare una forza maggiore della forza resistente. Un accorgimento utile è spingere il manico della scopa in un punto più basso possibile, in modo da aumentare Bf.

***Figura 3****. Usando la scopa, teniamo bloccata l'estremità superiore del manico, che agisce da fulcro F, e spingiamo un punto intermedio del manico, che è il punto di applicazione della nostra forza motrice. Dato che la forza resistente è data dalla spazzatura a terra, il braccio della forza resistente Br (distanza spazzatura-fulcro) è sempre maggiore del braccio della forza motrice Bf (distanza tra punto di spinta e fulcro). Di conseguenza, la scopa è una leva non vantaggiosa perché per uguagliare il momento resistente bisogna applicare una forza motrice (freccia bianca) maggiore della forza resistente (freccia gialla).*

Proviamo a rendere quantitative le considerazioni e gli esempi sopra descritti. In tutte le leve illustrate nelle figure 2 e 3 l'azione inizia quando il momento della forza motrice Mf uguaglia (e poi supera) il momento della forza resistente Mr. Ricordando l'equazione (1) uguagliamo i due momenti:

$$\mathbf{Mf = Mr}, \text{ cioè } \mathbf{f \times Bf = fr \times Br}, \qquad (2)$$

dove fr è la forza resistente.

Dividendo l'uguaglianza (2) per fr e Bf otteniamo:

$$\mathbf{f / fr = Br / Bf} \qquad (3)$$

L'equazione (3) conferma quanto detto in precedenza: se il braccio della forza resistente Br è minore del braccio della forza motrice Bf, allora la forza applicata f è minore della forza resistente fr e la leva è vantaggiosa, perché si fa meno fatica a vincere la forza resistente. L'equazione (3) ci permette di dare informazioni precise su 'quanto' una leva sia vantaggiosa.

Facciamo alcuni esempi pratici. Per ciascuno degli oggetti illustrati nelle figure 2 e 3 (una forbice, uno schiaccianoci, una carriola e una scopa che abbiamo a casa), abbiamo misurato Br e Bf, ottenendo i seguenti risultati.

<u>Forbice</u>: Br = 2 cm, Bf = 8 cm. Quindi Br / Bf = ¼. Usando l'equazione (3) abbiamo f / fr = ¼, quindi f = fr/4 e possiamo concludere che una forbice consente di vincere la forza resistente (di una stoffa, di una carta da tagliare) applicando una forza motrice 4 volte minore della forza resistente: la forbice è una leva molto vantaggiosa!

<u>Schiaccianoci</u>: Br = 4,5 cm, Bf = 12,5 cm. Quindi Br / Bf = 0,36. Usando l'equazione (3) abbiamo f = fr × 0,36 quindi lo schiaccianoci consente di schiacciare una noce applicando una forza pari al 36% della resistenza allo schiacciamento. Lo schiaccianoci è una leva vantaggiosa.

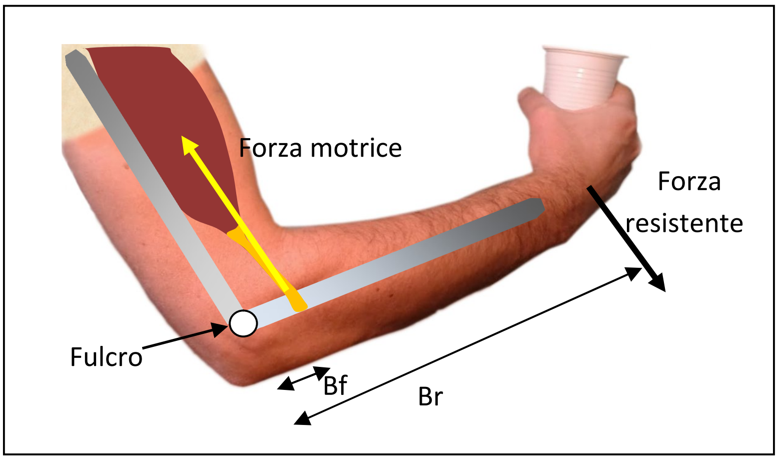
<u>Carriola</u>: Br = 38 cm, Bf = 125 cm. Quindi Br / Bf = 0,3. Usando l'equazione (3) abbiamo f = fr × 0,3 quindi la carriola consente di sollevare un oggetto applicando una forza pari al 30% del peso dello stesso oggetto. La carriola è una leva molto vantaggiosa.

<u>Scopa</u>: Br = 135 cm, Bf = 42 cm. Quindi Br / Bf = 3,21. Usando l'equazione (3) abbiamo f = fr × 3,21 quindi la scopa sposta la spazzatura applicando una forza motrice 3,21 volte superiore alla forza resistente della spazzatura. La scopa è una leva non vantaggiosa: per fortuna, di solito la spazzatura pesa poco!

Invitiamo i lettori a ripetere le misure con forbici, schiaccianoci, scope che trovano a casa: probabilmente i risultati di Br e Bf saranno leggermente diversi perché le dimensioni degli oggetti variano a seconda del modello, ma di sicuro otterrete che la leva più vantaggiosa (che fa faticare di meno) è la forbice, purché il fulcro sia vicino all'oggetto da tagliare. Poi, a scendere di convenienza, la carriola, lo schiaccianoci e infine la scopa che è una leva svantaggiosa: richiede l'applicazione di una forza almeno 3 volte superiore alla forza resistente della spazzatura!

Una curiosità: molte parti del nostro apparato osteomuscolare funzionano come leve. Per sollevare un bicchiere, ad esempio, muoviamo il nostro avambraccio tenendo fermo il gomito che funge da fulcro, come mostrato nella figura 4. Se trascuriamo il peso dell'avambraccio, il peso del bicchiere è la forza resistente e il muscolo bicipite funge da forza motrice.

***Figura 4****. Il nostro avambraccio funziona come una leva svantaggiosa. Infatti, il braccio della forza resistente Br è molto più lungo del braccio della forza motrice Bf, in quanto il tendine del bicipite è vicino al gomito,che è il fulcro della nostra leva.*




Per ragioni anatomiche, molte leve del nostro corpo sono svantaggiose. Infatti, il muscolo che sviluppa la forza motrice è 'agganciato' all'osso in un punto molto vicino al fulcro e quindi il braccio della forza motrice è corto. Nel caso del bicchiere sollevato nella figura 4, ad esempio, il braccio resistente va dal gomito fino al centro della mano ed è lungo 35 cm circa, mentre il braccio della forza motrice che fa muovere l'avambraccio va dal gomito all'attacco del tendine del bicipite, ed è lungo circa 5,5 cm, con un rapporto Br / Bf = 6,4. Ovvero, il bicipite deve sviluppare una forza più di 6 volte maggiore del peso di un oggetto per tenerlo in mano!

D'altronde, per muovere velocemente un arto, è necessario che il braccio della forza motrice sia corto, ed evidentemente la Natura ha selezionato coloro che si muovono velocemente rispetto a quelli che faticano poco…

**Nota**

[1] Nella formula (1) e nel seguito dell'articolo ignoriamo che f, B ed M sono vettori (cioè grandezze che possiedono direzione e verso) e confondiamo il prodotto vettoriale $f \wedge B = f \times B \sin\theta$ con il normale prodotto scalare $f \times B$, che è corretto solo quando $\sin\theta = 1$, cioè solo quando l'angolo compreso fra f e B è $\theta = 90$ gradi, come nel caso dell'apertura della porta mostrata nella figura 1, e con buona approssimazione anche nei casi delle forbici e dello schiaccianoci della figura 2 e della scopa nella figura 3. I lettori ci perdoneranno questa semplificazione, perché in questo articolo siamo più interessati alla proporzionalità (relazione scalare) tra i vettori M, f e B e meno interessati alla loro direzione.

Un cenno sui vettori e sul significato del prodotto vettoriale si trova nella nota [5] dell'articolo "Su e giù dall'altalena…" in questa raccolta.

# FRENI A DISCO, ELEVATORE IDRAULICO…
# COME FUNZIONANO I MOLTIPLICATORI DI FORZA?

*Ci fu un uomo che a 12 anni, con aste e cerchi, creò la matematica; che a 16 compose il più dotto trattato sulle coniche dall'antichità in poi; che a 19 condensò in una macchina una scienza che è dell'intelletto; che a 23 dimostrò i fenomeni del peso dell'aria ed eliminò uno dei grandi errori della fisica antica; che nell'età in cui gli altri cominciano appena a vivere, avendo già percorso tutto l'itinerario delle scienze umane, si accorge della loro vanità e volge la mente alla religione; che, infine, risolse quasi distrattamente uno dei maggiori problemi della geometria e scrisse dei pensieri che hanno sia del divino che dell'umano. Il nome di questo genio è Blaise Pascal.*

– F.R. de Chateaubriand, *Genio del cristianesimo* (1802)

Blaise Pascal (Clermont Derrand, 1623 – Parigi, 1662) è stato un genio precoce e la lista delle sue scoperte, invenzioni e contributi nei campi della matematica e della fisica è incredibilmente lunga, considerando che a soli 31 anni aveva abbandonato gli studi scientifici per dedicarsi alla teologia.

Gli studi di Pascal che hanno avuto maggiore impatto nella vita di tutti i giorni sono relativi alla fisica dei fluidi (gas e liquidi) avendo, ad esempio, inventato la siringa e scoperto che la pressione applicata in un punto di un fluido contenuto in un recipiente si trasmette a ogni punto del fluido e alle pareti del recipiente, in tutte le direzioni. Se il fluido è incomprimibile –che è vero con buona approssimazione per la maggior parte dei liquidi– la pressione si trasmette inalterata. Su questa scoperta, che porta il nome di 'principio di Pascal', si basa il funzionamento dell'elevatore idraulico e dei freni delle autovetture. Vediamo come.

Ricordando che la pressione è definita come la forza esercitata da un fluido per unità di superficie (quindi la pressione P è data dalla forza F diviso la superficie S), l'idea è di premere con una piccola forza su una piccola superficie di liquido. Per il principio di Pascal la pressione si trasmette inalterata su tutte le superfici del recipiente che contiene il liquido e se il recipiente ha una forma a U asimmetrico come nella figura 1, la stessa pressione che abbiamo esercitato a sinistra verso il basso premerà la superficie grande a destra verso l'alto. Se a destra la superficie è grande, per mantenere la stessa pressione anche la forza sarà grande.

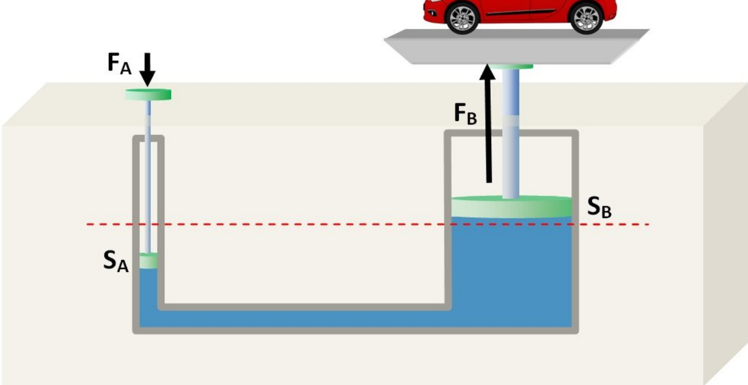



***Figura 1**. Principio di funzionamento dell'elevatore (o torchio) idraulico, usato in molte officine per sollevare le autovetture agendo con forze piccole. La linea tratteggiata indica il livello del liquido a riposo.*

Nel 'moltiplicatore di forza' della figura 1 abbiamo una piccola spinta sulla piccola superficie a sinistra con la quale riusciamo a sollevare un grande peso poggiato su una grande superficie a destra. Il fattore moltiplicativo della forza è uguale al rapporto tra la superficie a destra e quella a sinistra.

Cerchiamo di tradurre in termini matematici i ragionamenti sviluppati sinora. A sinistra della figura 1 spingiamo con una forza $F_A$ su uno stantuffo il cui pistone ha una superficie $S_A$. La pressione $P_A$ esercitata dallo stantuffo sul liquido incomprimibile è

$$\mathbf{P_A = F_A/S_A}. \qquad (1)$$

Per il principio di Pascal, la pressione $P_A$ si trasmette inalterata allo stantuffo a destra della figura 1, quindi la pressione $P_B$ che spinge in alto lo stantuffo a destra è uguale a $P_A$:

$$\mathbf{P_A = F_A/S_A = P_B = F_B/S_B}\ . \qquad (2)$$

Di conseguenza,

$$\mathbf{F_A/S_A = F_B/S_B}. \qquad (3)$$

Dall'equazione (3) otteniamo facilmente che

$$\mathbf{F_B = (S_B/S_A) \times F_A}\ . \qquad (4)$$

L'equazione (4) ci dice che la forza $F_B$ è $S_B/S_A$ volte più grande di $F_A$. Quindi, se la superficie $S_B$ del pistone a destra è molto più grande della superficie $S_A$ del pistone a sinistra, otteniamo un moltiplicatore di forza tale da poter sollevare un carico pesante esercitando una piccola forza $F_A$. Ad esempio, con un rapporto tra le superfici $S_B/S_A = 250$, premendo il pistone piccolo con $F_A = 9$ Kg peso, l'equazione (4) ci dice che otteniamo una forza di sollevamento del pistone grande pari a $F_B = 250 \times 9 = 2.250$ Kg peso, ovvero 2,25 tonnellate, in grado di sollevare un'autovettura di grande cilindrata.

Il lettore più attento potrebbe chiedersi: ogni spostamento di oggetti dotati di massa è sempre fatto a spese di una energia, di un lavoro: eppure, in questo articolo non si parla di energia. Dov'è nascosta?

In effetti l'energia c'è, anche se nell'equazione (4) che riassume il principio di Pascal compaiono solo forze e superfici. Vediamo dove è 'nascosta'. Nell'elevatore idraulico della figura 1, la pressione $P_A$ data dall'equazione (1) ed esercitata sul pistone a sinistra, sposta un certo volume V di liquido che preme sul pistone a destra che solleva l'automobile. Per il principio di Pascal $P_A = P_B$ –vedi l'equazione (2)– e quindi possiamo chiamare la pressione P, senza suffissi. Per esercitare una pressione sul pistone in modo che muova un volume V occorre fornire un'energia E data dal prodotto della pressione per il volume spostato:

$$\mathbf{E = P \times V}\ . \qquad (5)$$

Per coloro che preferiscono la definizione più classica di energia uguale al prodotto forza per spostamento, notiamo che sostituendo nell'equazione (5) la definizione di pressione data nell'equazione (1), otteniamo l'energia in gioco come forza per spostamento del pistone, infatti:

$$\mathbf{E = P \times V\ =\ F_B/S_B \times S_B \times h\ =\ F_B \times h}$$

dove h è lo spostamento del pistone a destra, quello che solleva l'automobile, e per definizione $V = S_B \times h$. Dato che il volume di liquido spostato dai due pistoni è uguale, avremmo potuto usare $V = S_A \times H$, dove H è lo spostamento del pistone piccolo a sinistra, e ovviamente H è maggiore di h. Infatti, dato che il volume V del liquido è costante, abbiamo l'uguaglianza

$$\mathbf{S_A \times H = S_B \times h}$$

e quindi

$$S_B/S_A = H/h \qquad (6)$$

L'equazione (6) permette di rispondere ad una domanda sui limiti del torchio idraulico. Ovvero, usando rapporti $S_B/S_A$ molto grandi, il principio di Pascal permetterebbe di ottenere un moltiplicatore di forza enorme, quasi infinito?

In pratica, non è conveniente lavorare con grandi valori del rapporto $S_B/S_A$, a causa della conservazione del volume del liquido. Infatti, maggiore è il rapporto tra le superfici dei pistoni, maggiore è la corsa H del pistone piccolo –vedi l'equazione (6)– per ottenere una certa elevazione h del pistone grande, come si intuisce graficamente nella figura 1. Se aumentiamo troppo il valore di $S_B/S_A$ una grande corsa H del pistone piccolo sposta un volume di liquido tale da creare una elevazione h del pistone grande che è insufficiente al fine pratico dell'elevatore, ovvero sollevare un auto ad un'altezza h abbastanza grande da poter lavorare comodamente sulle componenti che si trovano sotto l'auto.

Il principio di Pascal è usato anche nei freni a tamburo e a disco dei mezzi di trasporto. Nel caso del freno a disco, la figura 2 mostra come il pedale preme un pistone che spinge il liquido in un tubicino e infine in un doppio pistone che preme una coppia di pastiglie di materiale ad alto coefficiente di attrito fino a toccare un disco solidale con l'asse della ruota, creando una forza di attrito che rallenta il disco e di conseguenza la ruota.

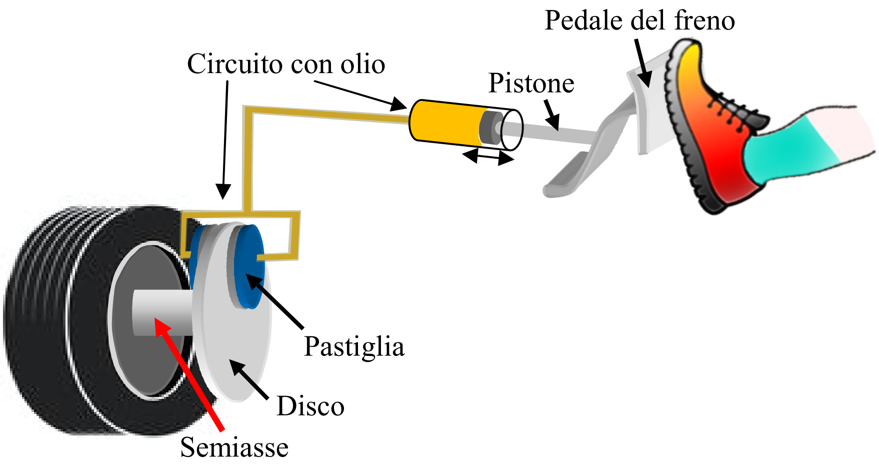



***Figura 2***. *Schema di funzionamento del freno a disco delle automobili, basato sul principio di Pascal. Una piccola pressione sul pedale si traduce in una grande pressione esercitata sulle pastiglie che premono il disco esercitando una grande forza di attrito che rallenta sia il disco che la ruota solidale al disco. Si tratta di un moltiplicatore di forza analogo a quello del sollevatore idraulico della figura 1.*

Anche nel freno della figura 2 valgono le stesse equazioni da (1) a (6) ricavate nel caso del sollevatore idraulico. E' necessario un attento progetto per ottimizzare il sistema frenante: bisogna trovare un compromesso fra la necessità di avere una grande forza sulle pastiglie a fronte di una piccola forza esercitata sul pedale, e al tempo stesso uno spostamento delle pastiglie sufficiente a raggiungere il disco pur avendo, per motivi di ingombro, un piccolo volume di liquido nei pistoni e nel tubicino del circuito frenante. A tal fine, le pastiglie vengono montate vicinissime al disco, in modo che un piccolo spostamento, dell'ordine del millimetro, sia sufficiente ad ottenere il contatto fra pastiglie e disco e quindi l'attrito che frena disco e ruota.

I freni a tamburo hanno lo stesso circuito idraulico dei freni a disco, ma il doppio pistone finale va a spingere due ganasce spostandole fino a toccare il tamburo, un cilindro solidale con la ruota, creando per attrito un effetto frenante. Anche in questo caso, le ganasce sono montate vicino al tamburo, in modo che un piccolo spostamento sia sufficiente per ottenere il contatto e quindi la forza di attrito frenante.

**CREDITI IMMAGINI**

Le seguenti immagini sono state reperite su internet (controllate a Febbraio 2018)

- ✓ *Pagina 19, figura 3. Foto arcobaleno doppio:* CC0 creative commons https://pixabay.com/it/arcobaleno-pioggia-paesaggio-natura-2880471/
- ✓ *Pagina 21, foto arcobaleno in giardino:* CC0 creative commons https://pixabay.com/p-2585848/?no_redirect
- ✓ *Pagina 23, foto patatine:* By Glane23 (Own work) CC BY-SA 3.0 https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0 o GFDL http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html via Wikimedia
- ✓ *Pagina 24, foto profumo spray:* CC0 public domain http://maxpixel.freegreatpicture.com/Spray-Glass-Bottle-Sprayer-Perfume-Bottle-Perfume-1514264
- ✓ *Pagina 42, foto fonografo di Edison:* Museo della Scienza e della Tecnologia "Leonardo da Vinci" CC BY-SA 4.0 https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0
- ✓ *Pagina 43, foto disco in gommalacca a 78 giri del 1947:* Istituto centrale per i beni sonori ed audiovisivi CC BY-SA 4.0 https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0, via Wikimedia Commons
- ✓ *Pagina 48, vignetta.* Tratta da https://www.leggioggi.it/2017/11/17/condominio-messa-a-norma-impianto-elettrico-comune/
- ✓ *Pagina 51, foto pubblicitaria della lavatrice elettrica BTH:* La Cucina Italiana, Aprile 1954, pag. 153.
- ✓ *Pagina 54, foto centrifuga compatta:* M. Manske, Creative Commons https://commons.wikimedia.org/wiki/File%3ATabletop_centrifuge.jpg

I disegni e le foto la cui origine non è specificata in questa pagina, nel testo o nelle didascalie, sono stati realizzati dagli autori.

ENEA
Servizio Promozione e Comunicazione
*www.enea.it*

Stampa: Laboratorio Tecnografico ENEA - C.R. Frascati
marzo 2018