

# **CURIOSITÀ SCIENTIFICHE**

Uno sguardo alla fisica di tutti i giorni

PAOLO DI LAZZARO, DANIELE MURRA

ENEA - Unità Tecnica Sviluppo di Applicazioni delle Radiazioni  
Laboratorio Sorgenti di Radiazioni  
Centro Ricerche Frascati, Roma



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

# CURIOSITÀ SCIENTIFICHE

## Uno sguardo alla fisica di tutti i giorni

PAOLO DI LAZZARO, DANIELE MURRA

ENEA - Unità Tecnica Sviluppo di Applicazioni delle Radiazioni  
Laboratorio Sorgenti di Radiazioni  
Centro Ricerche Frascati, Roma

I Rapporti tecnici sono scaricabili in formato pdf dal sito web ENEA alla pagina  
<http://www.enea.it/it/produzione-scientifica/rapporti-tecnici>

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.

## **CURIOSITA' SCIENTIFICHE**

Uno sguardo alla fisica di tutti i giorni

PAOLO DI LAZZARO, DANIELE MURRA

### **Riassunto**

Presentiamo una raccolta di dodici articoli di divulgazione scientifica pubblicati sulla rivista mensile *Controluce*, qui riveduti e corretti.

Lo scopo degli articoli era di osservare le esperienze quotidiane attraverso l'occhio di un Fisico, per capire il funzionamento di alcuni oggetti che usiamo quotidianamente, e comprendere i meccanismi di alcuni fenomeni comuni. Come funzionano la pentola a pressione e la macchinetta del caffè? Perché la pellicola trasparente per alimenti aderisce alle pareti dei recipienti? Perché gli sci scivolano sulla neve e noi scivoliamo sul ghiaccio? Perché si genera una scintilla tra la chiave e la portiera dell'automobile? Perché il cielo è blu? Perché l'acqua è trasparente e incolore, mentre la neve, che è fatta della stessa acqua, è opaca e bianca? Perché fa più caldo in estate che in inverno? Qual è la differenza tra suono e rumore? Come funziona il processo visivo? Che differenza c'è tra visione e percezione? Perché le illusioni ottiche ci ingannano? Chi è stato il primo a misurare la velocità della luce, e come ha fatto?

L'esperienza degli autori nelle varie iniziative di divulgazione scientifica cui l'ENEA ha attivamente partecipato negli ultimi anni (Seminari per le scuole, Settimane scientifiche, Notti della Ricerca, Frascati Scienza, trasmissioni televisive) ha permesso di apportare alcuni miglioramenti rispetto agli articoli originali, pur mantenendo un taglio divulgativo. Di fatto, la lettura di questo Rapporto non richiede che il lettore sia in possesso di particolari nozioni di fisica e matematica. Questa scelta permette ad una vasta platea di lettori di soddisfare alcune curiosità, e consente ai docenti l'adattamento dei singoli articoli alle attività didattiche delle scuole di ogni ordine e grado.

**Parole chiave:** Didattica della Fisica, Fenomeni fisici, Insegnamento

## ***A CURIOSITY-DRIVEN GLANCE AT THE PHYSICS IN DAILY LIFE***

### ***Abstract***

*We present a collection of twelve popular science articles published in the monthly magazine Controluce, revised and corrected.*

*The main purpose of these articles was to cast a glance at the daily experiences with the eye of a Physicist, showing how Science helps to understand "how it works" with reference to some common objects that we use every day, and to catch the intimate mechanisms governing some common phenomena, thus predicting the consequences of habitual actions.*

*The experience gained by authors in various initiatives of scientific dissemination actively participated by ENEA in the last years (seminars for schools, Scientific Weeks, Nights of Research, Frascati Scienza, TV broadcasts) allowed to improve the original papers, while maintaining a popular approach. As a result, the reader is not required to know elements of physics and/or mathematics to enjoy this Report, thus allowing its adaptation for educational purposes in Schools of every level.*

**Keywords:** *Physics education, Physical phenomena, Teaching*



## INDICE

<b><i>PREFAZIONE</i></b>	<b>7</b>
<b><i>LA FISICA IN CASA: la cucina come un laboratorio</i></b>	
La pentola a pressione	8
La macchinetta moka per il caffè	9
Pellicola tenace	10
<b><i>LA FISICA IN VIAGGIO: a piedi, in auto, in vacanza, in ogni stagione</i></b>	
Scivolando sugli sci	12
Camminare sul ghiaccio?	13
Alta tensione	14
Nel blu, dipinto di blu	15
Il senso... della neve	16
Le stagioni di una volta	18
<b><i>LA FISICA E IL NOSTRO CORPO: suoni, visioni, illusioni</i></b>	
Tin tin sonando con sì dolce nota	21
Luce e visione, un binomio (quasi) perfetto	24
<b><i>LA FISICA CURIOSA E PRECISA: aldilà della nostra percezione</i></b>	
Più veloce della luce?	28
<b><i>RINGRAZIAMENTI</i></b>	<b>29</b>
<b><i>REFERENZE E BIBLIOGRAFIA</i></b>	<b>30</b>



## **CURIOSITA' SCIENTIFICHE: UNO SGUARDO ALLA FISICA DI TUTTI I GIORNI**

### ***PREFAZIONE***

Questo Rapporto raccoglie dodici articoli di divulgazione scientifica pubblicati sulla rivista mensile *Controluce* (<http://www.controluce.it/>) in un arco temporale di cinque anni. La scelta editoriale di *Controluce* era di guardare alle esperienze quotidiane dal punto di vista di un Fisico, per capire “come funzionano” alcuni oggetti di uso quotidiano, e per provare l’emozione di comprendere le ragioni delle nostre osservazioni e le conseguenze di alcune azioni abituali. Oggi, a distanza di tempo, questa scelta ha facilitato la collocazione degli articoli in diversi capitoli, da “*La Fisica in casa: la cucina come un laboratorio*” a “*La Fisica in viaggio: a piedi, in auto, in vacanza, in ogni stagione*”; da “*La Fisica e il nostro corpo: suoni, visioni, illusioni*” alla “*Fisica curiosa e precisa: aldilà della nostra percezione*”.

Gli articoli originali sono citati nel testo tramite il numero tra parentesi vicino al titolo, che rimanda alla lista bibliografica alle pagine 30 e 31, e sono stati tutti rivisti, integrati e corretti alla luce di nuove esperienze didattiche degli Autori presso scuole di ogni ordine e grado, dalla scuola materna all’Università, e nelle varie iniziative di divulgazione scientifica cui l’ENEA ha attivamente partecipato negli ultimi dieci anni (Seminari per le scuole, Settimane scientifiche, Notti della Ricerca, Frascati Scienza, trasmissioni televisive).

E’ opportuno sottolineare che negli articoli vengono proposte alcune delle possibili spiegazioni di fenomeni comuni e del funzionamento di oggetti di uso quotidiano. Per alcuni argomenti trattati si possono ipotizzare spiegazioni diverse, e uno degli scopi di questo Rapporto è stimolare il lettore a trovare ipotesi alternative a quelle proposte: non solo per curiosità, ma per soddisfazione personale. D’accordo con Virgilio, infatti, “*Felix qui potuit rerum cognoscere causas*” (felice è colui che ha potuto conoscere l’essenza delle cose).

Questo Rapporto si rivolge ad una vasta platea di lettori che desiderano soddisfare alcune curiosità, inclusi i docenti che possono adattare i singoli articoli alle attività didattiche delle scuole di ogni ordine e grado. A questo scopo, abbiamo mantenuto il taglio strettamente divulgativo degli articoli originali, sia nello stile di scrittura, sia evitando per quanto possibile passaggi matematici e formule. Anche questa è una sfida: spiegare i fenomeni fisici e le osservazioni quotidiane il giusto rigore scientifico ma senza usare il linguaggio della Scienza, che è “scritta” tramite formule matematiche.

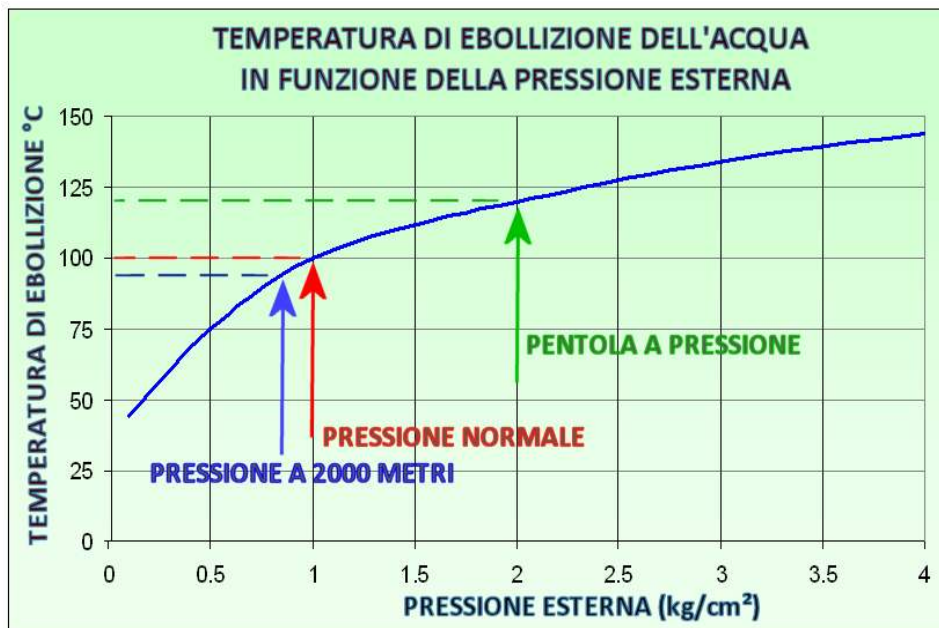


## La Fisica in casa: la cucina come un laboratorio

### LA PENTOLA A PRESSIONE [1]

La pentola a pressione è diventata di uso comune in cucina. La sua popolarità è dovuta al fatto che riesce a cuocere i cibi in meno tempo. Ma perché? E come funziona?

Il motivo fisico per cui la pentola a pressione cuoce velocemente i cibi è che la temperatura a cui bolle l'acqua cresce all'aumentare della pressione dell'aria circostante. Alla pressione di una atmosfera (pressione media al livello del mare) la temperatura di ebollizione è di cento gradi centigradi (100 °C), mentre in alta montagna (dove la pressione dell'aria è minore) l'acqua bolle a temperature più basse (vedi figura 1) e di conseguenza gli spaghetti cuociono meno bene. Ora, il coperchio della pentola a pressione è sigillato e non consente l'uscita del vapore generato dall'acqua riscaldata nella pentola, tranne una piccola quantità che esce tramite la valvola di esercizio (sfiato). Il calore del fornello fa evaporare sempre più acqua e la pressione del vapore sull'acqua aumenta. Di conseguenza, sale anche la temperatura di ebollizione dell'acqua fino a circa 125 °C e si crea un equilibrio termico con il vapore a contatto con il cibo che produce la cottura. A 125 °C i cibi cuociono molto più velocemente di quelli messi in acqua bollente a 100 °C nelle pentole tradizionali.



**Figura 1.** La linea blu mostra come aumenta la temperatura di ebollizione dell'acqua (scala verticale in gradi centigradi) con l'aumentare della pressione esterna esercitata da aria o vapore (scala orizzontale in bar).

Come si fa a capire quando l'acqua sta bollendo nella pentola a pressione? Basta osservare come si comporta la valvola di esercizio posta sul coperchio. Finché l'acqua si sta scaldando (e la pressione di vapore aumenta lentamente) la valvola sfiata in modo leggero e si avverte appena il soffio di vapore. Quando l'acqua comincia a bollire, la pressione del vapore cresce rapidamente, la valvola si alza e il soffio di vapore esce in modo più deciso e continuativo: è il momento di abbassare la fiamma sotto la pentola in modo che si arrivi ad una situazione di equilibrio, in cui la quantità di vapore che si crea viene fatta uscire dalla valvola in modo che la pressione e la temperatura all'interno della pentola rimangono costanti. E occhio ai tempi di cottura!

La temperatura superiore ai 100 °C raggiunta dall'acqua nella pentola a pressione ne permette l'uso anche come sterilizzatore di emergenza, ad esempio di strumenti chirurgici veterinari.

## LA MACCHINETTA MOKA PER IL CAFFÈ [1]

*Ah che bell 'o caffè  
pure in carcere 'o sanno fà  
co 'a ricetta ch'a Ciccirinella  
compagno di cella  
ci ha dato mammà (F. De Andrè)*

La macchinetta moka per il caffè espresso è uno degli oggetti più usati nelle nostre cucine. La usiamo tutti i giorni e con orgoglio, perché si tratta di una delle più brillanti e longeve invenzioni italiane, ma vi siete mai domandati come funziona?



**Figura 2.** Schema della macchinetta “moka” per il caffè espresso.

Dopo aver acceso il fornello, l'acqua nella caffettiera si scalda e comincia ad evaporare. Il vapore non può uscire, essendo ermeticamente chiuso nella caldaia nella parte bassa della caffettiera, vedi figura 2. Come nel caso della pentola a pressione, il calore del fornello fa evaporare sempre più acqua, e aumenta la pressione che il vapore esercita sull'acqua oramai caldissima. Questa pressione spinge l'acqua a salire per l'unica via di fuga, un tubicino che conduce al filtro a imbuto che contiene il caffè macinato, vedi figura 2. I grani di caffè macinato oppongono resistenza al passaggio dell'acqua, sicché la pressione del

vapore deve ulteriormente salire per spingere l'acqua a vincere questa resistenza. Tramite il fenomeno di percolazione (ovvero il movimento di un fluido –in questo caso l'acqua calda– in un materiale poroso –in questo caso il caffè macinato–) l'acqua attraversa la polvere di caffè estraendone le essenze e acquisendo sapore e aroma, per poi passare il contro-filtro e uscire dal condotto del camino nel recipiente di raccolta, nella metà alta della caffettiera. Il passaggio nel condotto raffredda in parte la miscela di acqua e caffè che quindi esce a temperatura inferiore a quella di ebollizione. Per migliorare l'estrazione di essenze e aromi bisogna rallentare la percolazione, ad esempio riducendo il calore (fiamma al minimo).

Perché il caffè fatto con la macchinetta moka è più buono e più forte di quello fatto “all'americana”, in cui si versa acqua bollente sul caffè in polvere e poi si filtra l'infuso? Per rispondere bisogna ricorrere alla stessa legge fisica utilizzata nel caso della pentola a pressione, per cui la temperatura di ebollizione dell'acqua aumenta se cresce la pressione esercitata dal gas o dal vapore sull'acqua, vedi figura 1. Nel caso della macchinetta moka, grazie all'elevata pressione del vapore, la temperatura di ebollizione dell'acqua sale a circa 115 °C. A questa temperatura l'acqua che risale il tubicino del filtro a imbuto fino ad arrivare al caffè riesce ad estrarre meglio le sostanze oleiche e aromatiche del caffè macinato, rispetto al caffè “all'americana”, per il quale si utilizza acqua bollita a pressione atmosferica, la cui temperatura non supera mai 100 °C.

## PELLICOLA TENACE [2]

La pellicola trasparente per alimenti è un oggetto di uso comune nelle nostre cucine: grazie ad essa è diventato facile sigillare recipienti contenenti carni e verdure prima di riporle. Vi siete mai domandati perché la pellicola aderisce così bene alle pareti dei recipienti ceramici, plastici e di vetro? E perché a volte aderisce anche ai bordi dei recipienti metallici?



Cotanta tenace adesione è dovuta principalmente alla polarizzazione dei dipoli elettrici all'interno dei materiali, che tendono ad orientarsi in modo da rendere minimo lo stato di energia. Possiamo immaginare le cariche elettriche presenti nel materiale che preferiscono "sdraiarsi" nella posizione più "comoda", per la quale l'energia è minima. Nel caso della pellicola trasparente il processo di srotolamento genera attrito, che favorisce una

polarizzazione elettrostatica. Questa polarizzazione orienta le molecole della pellicola secondo una direzione preferenziale, attirando cariche elettriche opposte sulla superficie di oggetti isolanti cui viene accostata, come i recipienti ceramici: si crea una specie di "ponte elettromagnetico". In un certo senso, la pellicola "convince", o meglio, "induce" il recipiente isolante ad orientare i suoi dipoli elettrici in modo da presentare sulla superficie delle cariche opposte a quelle della stessa pellicola. Sappiamo che cariche elettriche di segno opposto si attraggono, e quindi la pellicola viene attratta dalla superficie del recipiente e vi aderisce. L'adesione diminuisce quando l'ambiente è umido: infatti, se la pellicola si bagna con il sugo che ha sporcato il bordo del recipiente, gli elettroni si muovono rapidamente nel mezzo conduttore (l'acqua contenuta nel sugo) e l'adesione svanisce!

L'adesione della pellicola ai contenitori metallici è un fenomeno più complesso. Infatti, i metalli sono buoni conduttori di cariche elettriche perché nei metalli gli elettroni si muovono quasi liberamente, e quindi le cariche elettrostatiche presenti sulla superficie della pellicola dovrebbero essere annullate dagli elettroni liberi del metallo quando la pellicola e il metallo sono a contatto. Di conseguenza, l'adesione tra metallo e pellicola non dovrebbe avvenire. Questo comportamento viene però smentito da un semplice esperimento che possiamo fare tutti: srotoliamo circa 50 cm di pellicola tenendola in verticale, e avviciniamo un oggetto metallico verso la pellicola, come mostrato nella figura 3a. Ad una distanza di circa 15 cm la pellicola si muove spontaneamente verso il metallo a causa dell'attrazione elettrostatica, vedi figura 3b. Questa attrazione si spiega pensando alla pellicola carica positivamente che viene attratta dagli elettroni liberi sulla superficie del metallo. Quando il metallo e la pellicola si toccano, però, tendono a rimanere attaccati, vedi figura 3c, al contrario di quanto ci aspettiamo in base al ragionamento precedente. È interessante notare che questa adesione avviene sia quando il metallo è collegato a massa, sia quando non lo è.

L'adesione avviene perché quando pellicola e metallo si toccano, si instaurano le forze di van der Waals [3], che consistono di una debole interazione elettrostatica tra nubi elettroniche e nuclei degli atomi coinvolti, che viene modificata dalla presenza degli atomi delle molecole vicine e dall'ambiente circostante. La distanza tipica in cui agiscono le forze di van der Waals è di circa 0,4 miliardesimi di metro, quindi ci vuole un contatto intimo per ottenere l'adesione. A quel punto, lo

scambio di cariche elettriche tra metallo e pellicola diventa lento e graduale. Questo meccanismo di lento scambio di cariche spiega perché trascorsa circa un'ora dal primo contatto, la pellicola non aderisce più al metallo.



**Figura 3.** a) La pellicola trasparente appena srotolata viene avvicinata ad un coperchio metallico.

b) Quando la distanza tra pellicola e metallo è minore di 15 cm, la pellicola viene attratta dal coperchio.

c) La pellicola rimane sorprendentemente aderente al coperchio, e la forza di attrazione risulta maggiore della forza di gravità.

In questa prova il metallo non è collegato a terra perché tenuto in mano tramite il pomo di plastica isolante, e quindi il passaggio di cariche elettriche in grado di annullare la polarizzazione della pellicola è limitato. Ma lo stesso effetto di adesione si osserva anche per oggetti metallici di grandi dimensioni o collegati a terra.

Ripetendo la prova in giorni diversi, osserviamo che l'adesione tra pellicola e metallo non ha sempre la stessa forza: bisogna infatti tenere conto dell'umidità dell'aria, all'aumentare della quale la pellicola diviene più conduttiva e quindi meno aderente.

Il funzionamento delle pellicole per alimenti sembra più derivare da una scoperta casuale che da un'idea scientifica concepita *a priori*. La spiegazione del fenomeno di adesione ai metalli fornita in questo articolo, perciò, è una delle ipotesi possibili. Ad esempio, è possibile ipotizzare un effetto ventosa delle asperità superficiali quando la pellicola viene spalmata su una superficie metallica estesa. Queste spiegazioni alternative, tuttavia, non appaiono altrettanto convincenti agli autori.

## *La Fisica in viaggio: a piedi, in auto, in vacanza, in ogni stagione*

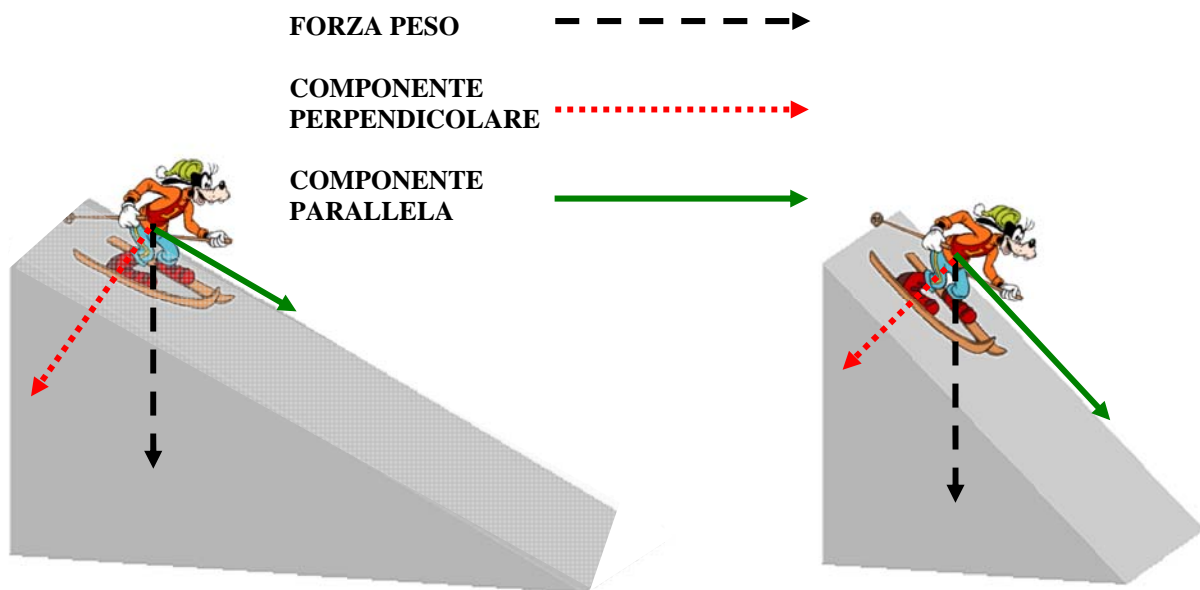
### SCIVOLANDO SUGLI SCI [4]

*Dal cucuzzolo della montagna, con la neve alta così,  
nella valle noi scenderemo con ai piedi un paio di sci, sci! (E. Vianello)*

Tutto vero, ma perché gli sci scivolano sulla neve?

Quando lo sci si muove, lo sfregamento tra la soletta dello sci e la neve genera una forza di attrito “dinamica” che si oppone al movimento. Questa forza di attrito è proporzionale alla pressione che gli sci esercitano sulla neve, cioè al peso dello sciatore diviso la superficie di contatto tra sci e neve. L’attrito produce calore, che scioglie un sottile strato di neve a contatto con la soletta dello sci. In pratica, tra la neve e gli sci si forma un velo di acqua (neve sciolta) che permette lo scivolamento. Questa pellicola di acqua si trova confinata tra due materiali termicamente isolanti (la plastica dello sci e la neve), sicché la pellicola di acqua tende a rimanere allo stato liquido quando è sotto lo sci, anche se la temperatura è bassa. Insomma, i nostri sci scivolano sull’acqua e non sulla neve!

Diverso è il motivo per cui lo sci rimane fermo sulla neve in una discesa a bassa pendenza, e comincia a muoversi solo quando la pendenza della discesa supera un certo valore. Questo comportamento è causato dalla forza d’attrito “statico”, che dipende dalla superficie di contatto e dalla sua forma, ed è proporzionale alla componente della forza peso dello sci e dello sciatore perpendicolare al terreno innevato, come mostrato nella figura 4.



**Figura 4.** La forza peso segue la direzione della forza di gravità, che è diretta sulla verticale verso il centro della Terra. E’ possibile scomporre la forza peso in due componenti: “forza perpendicolare” (freccia rossa) e “forza parallela” (freccia verde) al terreno innevato. La freccia rossa mantiene lo sciatore vincolato al terreno mentre la freccia verde lo spinge verso la discesa. La figura mostra come cambiano queste forze al variare della pendenza, per lo stesso peso. La lunghezza della freccia è proporzionale alla forza.

La figura 4 mostra che quando la pendenza aumenta, la forza perpendicolare al terreno (freccia rossa) diminuisce e di conseguenza aumenta la forza parallela al terreno (freccia verde) che spinge lo sci a muoversi in discesa. Nel momento in cui lo sci si muove, interviene l’attrito dinamico descritto in precedenza che produce lo scioglimento dello strato di neve su cui scivola lo sci. Anche quando lo sciatore curva in uno slalom e cambia la propria direzione verso una pendenza minore, in

cui diminuisce la forza parallela alla pista innevata che spinge gli sci a muoversi (vedi figura 4), l'attrito dinamico continua a produrre lo scioglimento dello strato di neve sotto gli sci che aiuta lo scorrimento, e tutto si risolve in un semplice rallentamento della velocità dello sciatore.

Queste poche nozioni dovrebbero permettere al lettore di sviluppare un ragionamento adatto a rispondere alla seguente domanda. Se uno sciatore percorre due volte lo stesso tracciato in massima pendenza della stessa pista, con due pesi diversi (per esempio la prima volta con uno zaino pesante e la seconda senza zaino), impiega meno tempo per arrivare a valle la prima o la seconda volta? Provate a rispondere. Oppure, se preferite, fate direttamente una prova su una pista da sci per trovare la risposta!

### CAMMINARE SUL GHIACCIO? [5]

D'inverno si sente spesso dire *Ho visto una placca di ghiaccio trasparente vicino casa, sembrava una lastra di vetro*. Ma perché sul ghiaccio si scivola e sul vetro no? Eppure il vetro è più liscio, meno rugoso del ghiaccio...



La causa principale dei ruzzoloni sul ghiaccio è simile a quella responsabile del movimento degli sci sulla neve. Quando la temperatura dell'aria è maggiore di zero gradi, sulla superficie del ghiaccio si forma un sottilissimo strato di ghiaccio fuso, cioè acqua, avente uno spessore inferiore a cento milionesimi di millimetro. Talmente sottile che non può impedire il contatto scarpa-ghiaccio. Tuttavia, il contatto tra

scarpa e ghiaccio genera una forza di attrito che produce calore. Questo calore scioglie un ulteriore strato di ghiaccio, che si somma al precedente e diventa un velo d'acqua tra la suola della scarpa e la superficie ghiacciata, che condiziona la presa della scarpa sul ghiaccio. Infatti l'acqua, come un lubrificante, riduce la forza d'attrito che sostiene il nostro passo: il risultato è l'aumento di velocità di scorrimento della scarpa sul velo d'acqua, la perdita di equilibrio e il temuto scivolone.

Ovviamente, più persone camminano sulla stessa lastra di ghiaccio e più questa tende a presentare un velo liquido superficiale che diventa molto insidioso per chi arriva subito dopo. Su una lastra di ghiaccio su cui ancora non ha passeggiato nessuno, infatti, la probabilità di cadere è minore, perché lo spessore di ghiaccio sciolto a causa della temperatura dell'aria è sottile. Al contrario, se il ghiaccio presenta già una patina d'acqua causata dal passaggio immediatamente precedente di altre persone, il pericolo di scivolare aumenta.

Tornando alla domanda iniziale, anche sul vetro l'attrito della nostra suola genera calore, ma non scivoliamo perché il calore non è così elevato da sciogliere il vetro...

Questa osservazione induce a riflettere sull'importanza dell'attrito in tutte le attività quotidiane. L'attrito, infatti, è generato dalla scabrosità microscopica delle superfici di due corpi in contatto che si oppone allo scorrimento, e pertanto interviene in tutte le azioni meccaniche. Ad esempio, noi riusciamo a camminare perché l'attrito radente tra suola e terreno esercita una forza resistente sulla quale ci "appoggiamo" per spingere il corpo in avanti; il rotolamento di tutte le ruote (autoveicoli, treni, carrelli) avviene perché l'attrito volvente offre una forte resistenza e blocca, istante per

istante, il punto di contatto tra ruota e terreno; i macchinari sono tenuti insieme da viti e bulloni che sono bloccati dalla forza di attrito radente. Insomma, anche se qualche volta ci fa scivolare sul ghiaccio, l'attrito è indispensabile per muoverci, sia a piedi che con i mezzi di trasporto, e per "tenere" gli oggetti fissati tra di loro. Scusate se è poco...

### ALTA TENSIONE [6]

Il fenomeno per cui un corpo si elettrizza a seguito di uno strofinio si chiama "*effetto triboelettrico*" (dal greco "tribein" che vuol dire sfregare, ed "elektron", nome dell'ambra, la resina fossile nota per i suoi effetti elettrostatici). Dal punto di vista microscopico, lo sfregamento di alcuni materiali produce la migrazione di elettroni da un corpo all'altro, e di conseguenza il caricamento elettrico, positivo per la parte che ha perso elettroni, negativo per la parte che li ha acquisiti. I materiali isolanti, come i tessuti sintetici, trattengono a lungo queste cariche, perché la loro struttura microscopica ostacola il movimento spontaneo degli elettroni alla superficie, come discusso nell'articolo "Pellicola tenace".

Sappiamo che cariche elettriche di segno opposto si attraggono, e quindi accade che la penna di plastica strofinata sulla maglia attrae e solleva un oggetto leggero, come un pezzetto di carta. In questo caso le cariche presenti sulla penna, agendo a distanza, richiamano sulla superficie della carta le cariche di segno opposto. A quel punto si crea una forza elettrica attrattiva tra cariche di segno opposto in grado di vincere la forza di gravità e la carta viene attirata e sollevata dalla penna. L'effetto triboelettrico si manifesta nella vita di tutti i giorni: basti pensare alla scintilla che scocca tra le nostre dita e la maniglia della portiera appena scesi dall'automobile. In alcuni casi, la scintilla parte quando la distanza tra mano e carrozzeria è di alcuni centimetri, che significa che la tensione è molto elevata, fino a diverse migliaia di Volt.



Ci sono due possibili cause perché si generi la scintilla: o noi ci siamo caricati in modo elettrostatico strisciando sul sedile dell'automobile per scendere, e quindi la carica che abbiamo accumulato si scarica verso la massa metallica dell'automobile (che si comporta come

un condensatore), oppure la carrozzeria dell'auto si è caricata durante il viaggio a causa dell'attrito con l'aria, ed è rimasta carica perché i pneumatici la isolano dal suolo. In questo ultimo caso, la carica accumulata dalla carrozzeria si scarica attraverso il nostro corpo utilizzandoci come conduttori verso terra. La scintilla si può evitare indossando scarpe con suola gommata isolante, ma... il risultato non è garantito! Infatti, bisogna tenere conto dell'effetto dell'umidità dell'aria: in caso di aria molto secca, ad esempio 20% di umidità relativa, la differenza di tensione tra i nostri indumenti sintetici e la maniglia della porta dell'auto può arrivare anche a ventimila Volt! Ma non bisogna allarmarsi: il flusso di carica (corrente) associato con queste scariche elettrostatiche è talmente piccolo, da non creare danni al nostro corpo. Per fortuna...

Nonostante le antipatiche scintille, l'automobile può proteggerci da un altro fenomeno elettrico spettacolare e devastante: il fulmine. Il telaio dell'auto, infatti, essendo di metallo, fa sì che all'interno del veicolo non ci siano forze dovute a cariche elettriche in superficie (se ci fossero tali forze, allora le stesse cariche si muoverebbero fino ad annullarle). Quindi, nel momento in cui un

fulmine si abbattesse sciaguratamente sull'automobile che ci ospita, l'enorme corrente elettrica scorrerebbe lungo il telaio dell'auto, scaricandosi a terra tramite il velo di acqua della pioggia che bagna la superficie dei pneumatici, senza conseguenze sulle persone all'interno. In termini tecnici, l'automobile si comporta come una "gabbia di Faraday", dal nome dello scienziato britannico che nel 1836 osservò che in un conduttore cavo elettricamente carico, le cariche si concentrano sulla superficie esterna e non hanno influenza su ciò che si trova all'interno [7].

### NEL BLU, DIPINTO DI BLU [8]

*Penso che un sogno così non torni mai più,  
mi dipingevo le mani e la faccia di blu.  
Poi d'improvviso venivo dal vento rapito,  
e cominciavo a volare nel cielo infinito (D. Modugno)*

Perché il cielo è blu? Per rispondere, dobbiamo capire che cosa è la luce. Noi siamo circondati da radiazione elettromagnetica, formata da onde di energia che si propagano nello spazio, e si differenziano tra loro tramite la "lunghezza d'onda", cioè la distanza tra i picchi di due onde consecutive. Ad esempio, il termosifone emana calore sotto forma di radiazione infrarossa che ha una lunghezza d'onda maggiore della luce visibile, sicché i nostri occhi non possono vederla, ma la nostra pelle percepisce la sensazione di calore. Analogamente, la radiazione ultravioletta ha una lunghezza d'onda più corta della luce visibile e non possiamo vederla, ma la melanina della nostra pelle si accorge della sua presenza e ci abbronziamo.

La parte della radiazione elettromagnetica che i nostri occhi riescono a vedere si chiama "luce". La luce è composta da diversi colori, ciascuno con una lunghezza d'onda caratteristica: il rosso ha una lunghezza d'onda maggiore del giallo, che a sua volta ha una lunghezza d'onda maggiore del verde, che ha una lunghezza d'onda maggiore del blu.



Quando guardiamo un oggetto luminoso, come una stella o una lampadina, i nostri occhi sono raggiunti da luce diretta, emessa dall'oggetto stesso. Invece, quando guardiamo un oggetto qualsiasi i nostri occhi sono raggiunti da luce diffusa, creata dall'interazione della radiazione elettromagnetica con gli elettroni degli atomi e delle molecole dell'oggetto. Gli atomi e le molecole, infatti, possono assorbire la luce oppure trasmetterla o ancora diffonderla in tutte le

direzioni, fino a raggiungere i nostri occhi [9]. I numerosi fenomeni di diffusione della luce cui assistiamo giornalmente differiscono tra loro in funzione del tipo di materiale o del mezzo diffondente, al variare delle dimensioni delle particelle del materiale/mezzo rispetto alla lunghezza d'onda della luce. Per esempio, la luce del sole che attraversa l'atmosfera viene in gran parte trasmessa, ma una piccola parte viene diffusa da parte delle piccole molecole di aria (azoto e ossigeno) che riescono a intercettare e diffondere meglio le lunghezze d'onda più corte



(corrispondenti al colore blu), che quindi arrivano ai nostri occhi. Questo fenomeno è conosciuto come “diffusione Rayleigh” [10] ed è responsabile del colore blu del cielo.

Dato che solo una piccola parte della luce è diffusa dall’aria, si capisce perché la luce riflessa dalla luna è insufficiente a farci vedere il cielo notturno colorato di blu.

Viceversa, i cristalli di ghiaccio che formano le nubi sono abbastanza grandi da diffondere tutte le lunghezze d’onda della luce, e di conseguenza le nubi ci appaiono bianche (il nostro cervello percepisce la somma di tutti i colori della luce come bianca). Si tratta del fenomeno di “diffusione acromatica”. La stessa diffusione acromatica è responsabile del celeste pallido del cielo sopra le grandi città: infatti, al colore blu dovuto alla diffusione Rayleigh si somma un colore biancastro dovuto alla diffusione acromatica delle particelle di inquinanti e smog.

Gli esempi sono numerosi e il lettore può divertirsi a trovare una spiegazione del colore di svariati oggetti, sempre applicando la semplice regola sulla diffusione della luce da parte di particelle aventi differenti dimensioni rispetto alle lunghezze d’onda dei colori: ad esempio, la diffusione acromatica spiega perché la schiuma delle onde e della birra, la carta, il sale e lo zucchero appaiono bianchi, mentre il fumo che sale dalla sigaretta è azzurro perché le particelle di fumo sono più piccole delle lunghezze d’onda verde, gialla e rossa, e così via. Magari con qualche piccola variazione sul tema per tenere conto dell’assorbimento della luce, come il colore grigio delle nubi dense...

Ma se il cielo è blu a causa delle molecole di aria che intercettano e diffondono la luce blu in tutte le direzioni, cosa accade alle altre lunghezze d’onda più lunghe, ad esempio il giallo e il rosso?

Così come il blu viene diffuso, il giallo-rosso viene trasmesso. Quindi, maggiore è il percorso fatto dalla luce solare nell’aria, maggiore sarà la presenza delle lunghezze d’onda giallo-rosse trasmesse, rispetto alla lunghezza d’onda blu. Questo è il motivo per cui al tramonto sia il sole che il cielo attorno acquistano sfumature di colore tra il giallo e il rosso: al tramonto, infatti, la distanza che i raggi solari percorrono nell’atmosfera terrestre è più di 30 volte quella percorsa a mezzogiorno.

E nel caso di assenza di particelle? Ad esempio, nello spazio c’è il vuoto, cioè mancano molecole che interagiscano con la luce e la diffondano verso gli occhi degli astronauti e verso la loro telecamera. Infatti, le immagini che provengono dalle navicelle spaziali e dai satelliti mostrano uno spazio interplanetario nero, a causa dell’assenza di luce diffusa.

## IL SENSO... DELLA NEVE [11]

*Lo scoprire consiste nel vedere ciò che tutti hanno visto, e nel pensare ciò che nessuno ha pensato (A. Szent-Gyorgy).*

Nel romanzo di Peter Høeg “*Il senso di Smilla per la neve*” [12] la protagonista riesce a trovare indizi decisivi per risolvere un misterioso caso di omicidio grazie alla sua profonda conoscenza del comportamento del manto nevoso al variare delle condizioni atmosferiche.

A pensarci bene, anche a noi, che non siamo nati in Groenlandia né siamo esperti come Smilla, la neve pone una serie di interrogativi ai quali è interessante provare a dare una risposta. A cominciare dal quesito che ha appassionato filosofi e studiosi per molti secoli: perché l’acqua è trasparente e incolore, mentre la neve, che è fatta della stessa acqua, è opaca e bianca?

Ci sono due motivi che possono spiegare questo mistero, entrambi dovuti al cambiamento della struttura dell’acqua al punto di congelamento. Allo stato liquido l’acqua è un materiale continuo, formato da tante piccole molecole tenute insieme dal “legame idrogeno”, mentre la neve è un materiale discontinuo, costituito da grandi cristalli di ghiaccio che si agglomerano pur restando

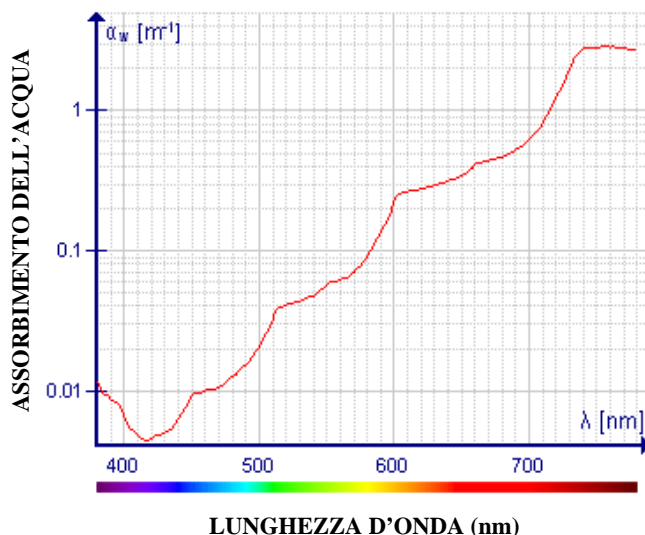
separati da tante piccole bolle di aria. La dimensione dei cristalli di neve è più grande della lunghezza d'onda di ogni colore della luce visibile (ricordiamo che la luce è una forma di energia che si propaga sotto forma di onde, e la distanza tra due picchi consecutivi dell'onda si chiama "lunghezza d'onda"). Questa "grande" dimensione dei cristalli (si fa per dire, si parla di alcuni millesimi di millimetro) permette di intercettare e diffondere tutta la luce, che noi vediamo bianca perché la somma di tutti i colori della luce visibile viene percepita dal nostro cervello come bianca. Il colore della neve, insomma, è dovuto allo stesso fenomeno di diffusione acromatica della carta e delle nuvole, già discussi nell'articolo "Nel blu dipinto di blu".

Il grande numero di interfacce (cioè superfici di separazione) tra aria e cristalli di neve, poi, è il motivo per cui la neve non è trasparente, in quanto la luce che attraversa la neve viene parzialmente riflessa su ogni superficie solida che incontra, diminuendo di intensità e perdendo completamente la direzione iniziale, proprio come avviene nei vetri satinati.

Per inciso, le tante piccole cavità di aria che si trovano intrappolate tra i fiocchi di neve appena caduti smorzano la riflessione del suono, e per questo motivo un manto di neve fresca attutisce i rumori, regalando a chi passeggia nelle vicinanze un irreal senso di ovattato silenzio.

Al contrario della neve, nell'acqua allo stato liquido le molecole sono abbastanza piccole da non diffondere la luce visibile, e non ci sono interfacce aria-acqua. Possiamo immaginare le onde luminose che fanno uno slalom tra le molecole di acqua senza essere assorbite e diffuse, sicché l'acqua, almeno in piccole quantità, si comporta in modo "trasparente".

Se andiamo a vedere le cose in dettaglio, però, scopriamo che dopo diversi metri di spessore, l'acqua non è completamente trasparente, perché presenta un piccolo assorbimento che non è lo stesso per tutte le lunghezze d'onda. Come si vede dal grafico nella figura 5, l'acqua assorbe il rosso 140 volte più che il blu!



**Figura 5.** A sinistra: spettro di assorbimento dell'acqua distillata in funzione della lunghezza d'onda della luce visibile. L'acqua ha un minimo di assorbimento nella regione violetto-blu (430 nm) e un massimo assorbimento nel rosso cupo (740 nm). A destra: foto di un relitto sul fondo del mare. A causa dello spettro di assorbimento dell'acqua, già ad una decina di metri di profondità la componente rossa della luce è assorbita completamente e il colore maggiormente trasmesso è il blu: per vedere gli altri colori, dobbiamo portare una sorgente di luce con noi nell'immersione.

Il grafico della figura 5 mostra che il valore dell'assorbimento della luce da parte dell'acqua è comunque debole, e per accorgerci del suo effetto sui colori abbiamo bisogno di uno spessore di

acqua superiore a diversi metri, per esempio immergendoci nelle profondità nel mare, come mostrato nella foto della figura 5. L'acqua in un bicchiere appare trasparente perché in pochi centimetri di spessore la differenza di assorbimento tra rosso e blu è troppo piccola per essere percepita. Al contrario di ciò che avviene nel caso del colore del sole al tramonto (che è rosso poiché il blu viene maggiormente diffuso dalle molecole di aria e non arriva ai nostri occhi quando il sole è all'orizzonte), la luce, dopo avere attraversato una decina di metri di acqua, perde le sue componenti rosse e gialle, e diviene preponderante quella blu, il colore degli abissi...

Tutto ciò è vero per l'acqua pura, ma cosa accade in presenza di inquinanti, purtroppo presenti nei fiumi, nei laghi e nei mari? In questo caso, le piccole molecole di sostanze inquinanti disciolte in acqua diffondono la luce in tutte le direzioni (quindi anche verso l'osservatore) seguendo la legge di Rayleigh, per cui le molecole più piccole diffondono maggiormente le lunghezze d'onda corte rispetto a quelle lunghe, quindi il blu-verde viene diffuso più del giallo-rosso [10].

Di conseguenza, mentre guardiamo la superficie di un lago ai nostri occhi arriva una complicata



sovrapposizione di colori dovuta al riflesso del cielo e al contributo della diffusione Rayleigh da parte degli inquinanti che, a seconda della profondità a cui si trovano, subiscono più o meno l'assorbimento mostrato nella figura 5. Infine, tutti questi colori vengono filtrati dalla sensibilità cromatica della retina, per cui noi percepiamo il verde meglio del blu e del rosso.

Non c'è da stupirsi, quindi, se l'acqua del lago presenta una tonalità dominante bluastra con sfumature verdi, che varia a seconda della luminosità del cielo.

### **LE STAGIONI DI UNA VOLTA [13]**

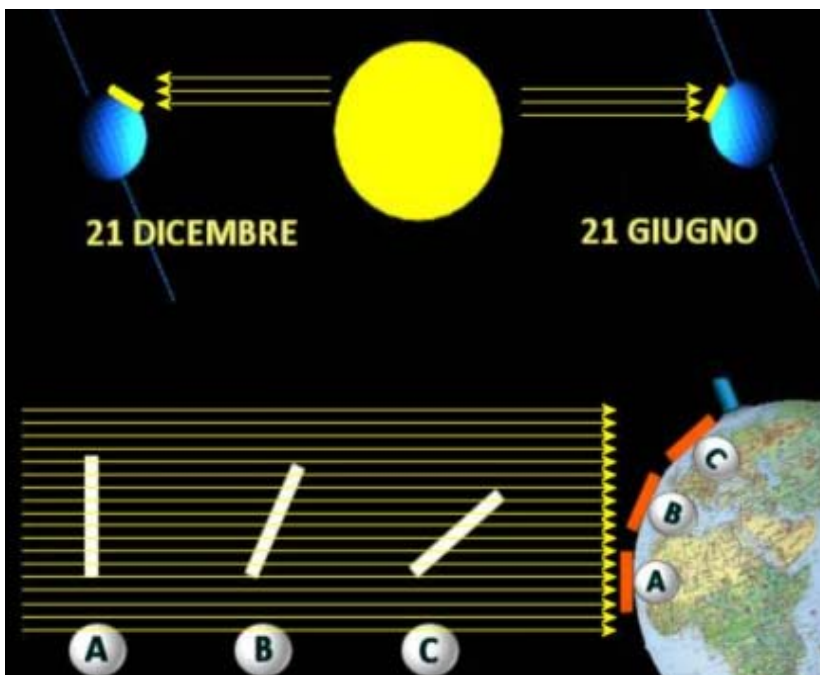
*Le stagioni di una volta non ci sono più!* E' una frase che si ascolta frequentemente. Ognuno ha una sua opinione a proposito, ma vi siete mai domandati perché ci sono le stagioni? Perché le temperature medie sono più calde in estate che in inverno?

La temperatura non dipende dalla distanza dal Sole: infatti, il nostro pianeta passa nel punto più vicino al Sole (perielio) in un giorno invernale, mentre durante l'estate si trova a passare nel punto più lontano dal Sole (afelio). E allora, perché è più caldo in estate?

Sappiamo che la Terra compie un movimento di rotazione intorno ad un asse ideale che passa per il Polo Nord e il Polo Sud. Questa rotazione produce l'avvicinarsi dei giorni e delle notti: il nostro mondo è come una gigantesca giostra che, dopo un giro completo che dura 24 ore, torna davanti allo stesso punto di partenza. Insomma, quasi allo stesso punto: infatti, mentre la Terra gira intorno a se stessa si muove anche velocemente intorno al Sole, e ha bisogno di girare un pochino di più per vedere il sole allo stesso posto. Infatti, sia la rotazione della Terra intorno al proprio asse che la sua

orbita intorno al sole sono antiorarie. Analogamente, se facciamo attenzione e osserviamo le stelle a mezzanotte di due giorni consecutivi le vediamo un po' spostate, di poco meno di un grado. Ovviamente, ad un anno di distanza la Terra ha completato il giro di  $360^\circ$  intorno al Sole e vediamo le stesse stelle nell'identica posizione di un anno prima. Queste considerazioni portano alla differenza tra ora solare vera e ora solare media (quella misurata dai nostri orologi e dalle meridiane), che esula dall'argomento di questo articolo, ma il lettore interessato può trovare un approfondimento e i calcoli nella referenza [14].

Proviamo ad entrare nel dettaglio dell'origine delle stagioni con l'aiuto della figura 6. L'asse intorno al quale ruota la Terra è inclinato rispetto al piano eclittico, ossia il piano della traiettoria della Terra intorno al Sole. Inoltre, lo stesso asse si mantiene parallelo a se stesso durante il moto intorno al Sole.



*Figura 6. In alto: le differenti condizioni di irraggiamento solare nel giorno del solstizio d'inverno (a sinistra) e nel giorno del solstizio d'estate (a destra). In basso: La barretta A perpendicolare ai raggi solari intercetta più raggi (e quindi più energia) delle barrette B e C che sono inclinate. Lo stesso accade alle diverse latitudini terrestri, come mostrato a destra.*

Di conseguenza, per un tratto dell'orbita terrestre attorno al Sole, da Aprile a Settembre, il Polo Nord è inclinato verso il Sole e quindi più di metà dell'emisfero a nord dell'equatore (detto emisfero boreale, dove ci troviamo noi) è esposto alla luce solare: di conseguenza i giorni sono più lunghi, come si vede nella figura 6: infatti, la durata del giorno è proporzionale alla lunghezza del parallelo terrestre che è illuminata, e inoltre aumenta la quantità di energia solare che arriva su ogni metro quadro di superficie. Abbiamo la primavera e l'estate. Nell'altra metà di orbita attorno al Sole, da Ottobre a Marzo, il Polo Nord è inclinato in direzione opposta al Sole e

nell'emisfero boreale si hanno giorni più brevi e minore irraggiamento solare, quindi le temperature si abbassano: abbiamo l'autunno e l'inverno.

Con l'aiuto della figura 6, cerchiamo di capire perché la quantità di raggi solari che arrivano sulla stessa superficie cambia durante l'orbita della Terra intorno al Sole. Quando i raggi solari arrivano perpendicolari ad una superficie, sono tutti intercettati dalla superficie stessa, e l'energia solare che arriva per ogni metro quadrato di terra è massima. Quando invece la superficie è inclinata rispetto ai raggi solari, non tutti i raggi sono intercettati, quindi l'energia solare che arriva sulla stessa superficie di terra diminuisce. Maggiore è l'inclinazione della superficie rispetto ai raggi, minore è l'energia solare che arriva sulla superficie.

Il 21 Giugno, momento in cui la Terra si trova nel punto della sua orbita dove il Polo Nord è maggiormente inclinato verso il Sole (posizione a destra in alto nella figura 6), i raggi solari a mezzogiorno cadono a perpendicolo sui punti della superficie terrestre che si trovano a  $23,5^\circ$  di

latitudine nord (corrispondenti al centro della barretta A sul mappamondo nella figura 6 in basso): questi punti si trovano su un parallelo che si chiama Tropic del Cancro. Sei mesi dopo, il Polo Nord è inclinato dalla parte opposta al Sole (posizione a sinistra in alto nella figura 6) e il Tropic del Cancro riceve raggi solari inclinati di circa  $47^\circ$  (barretta C nella figura 6 in basso). Di conseguenza, sullo stesso Tropic arriva solo il 67% della luce e del calore di sei mesi prima. In questa posizione, che corrisponde al 21 Dicembre, i raggi solari cadono a perpendicolo su un altro parallelo, il Tropic del Capricorno, a  $23,5^\circ$  di latitudine sud. Già, perché mentre in un emisfero è inverno, nell'altro è estate, sempre a causa dell'inclinazione dell'asse di rotazione!

Al lettore attento può rimanere una curiosità: se nel nostro emisfero riceviamo il massimo irraggiamento solare il 21 Giugno, perché caldo e afa ci colpiscono molto più tardi, a Luglio e Agosto? E viceversa, perché i giorni più freddi arrivano di solito ben dopo il 21 Dicembre, giorno di minimo irraggiamento solare? Il motivo è legato all'inerzia termica dell'atmosfera e del terreno, che ritarda l'effetto dei cambiamenti. Passare dall'estate all'inverno è come passare da una stanza calda al freddo esterno: i vestiti ed il calore immagazzinato nella stanza ci proteggono per un poco di tempo, e avvertiamo freddo con un certo ritardo, dopo essere usciti. Viceversa, quando rientriamo nella stanza abbiamo bisogno di tempo per assorbire calore e sentirci caldi come quelli che sono rimasti dentro. In modo analogo, le stagioni climatiche sono sempre in ritardo, di circa un mese o poco più, rispetto alle stagioni astronomiche.

## *La Fisica e il nostro corpo: Suoni, Visioni, Illusioni...*

### **TIN TIN SONANDO CON SI' DOLCE NOTA [15]**

*Tin tin sonando con sì dolce nota, che 'l ben disposto spirto d'amor turge* recita il canto X del Paradiso di Dante Alighieri. Anche senza scomodare il sommo poeta, capita spesso di ascoltare suoni, voci, rumori che ci accompagnano quotidianamente, senza fermarci a pensare come si originano. Che cosa è il suono? Come arriva alle nostre orecchie? Quale è la differenza tra suono e rumore? La velocità del suono è uguale quando si propaga in un gas, in un liquido o in un solido? Si possono ascoltare suoni provenienti da altri pianeti?

Quando pronunciamo una parola, l'aria proveniente dai polmoni fa vibrare le nostre corde vocali. La vibrazione è così veloce che le molecole di aria non fanno in tempo a scivolare intorno. E allora le molecole a contatto con le corde ricevono una spinta e trasmettono il movimento alle molecole vicine, creando una onda di pressione che, molecola dopo molecola, esce dalla bocca e si propaga, spingendo strati di aria posti sempre più lontano. Questa "onda di pressione" sonora arriva alle nostre orecchie, facendo vibrare la membrana del timpano. Il timpano trasmette le sue vibrazioni ad alcuni ossicini collegati alla coclea dove la vibrazione stimola le cellule nervose che generano impulsi elettrici trasmessi alla parte del cervello addetto alla percezione dei suoni.



Tutti i fenomeni sonori si comportano in un modo simile alla voce: all'inizio c'è una forza, un impulso che genera una vibrazione (le dita che bussano sulla porta e la fanno vibrare, le eliche del motore che girano e muovono l'acqua dove sono immerse, il soffio che urta le pareti interne del flauto). Poi, le molecole del mezzo (aria, acqua) a contatto con la sorgente vibrante vengono spinte e

trasmettono questa spinta alle molecole vicine e così via fino a giungere alle nostre orecchie.

Il tipo di suono (acuto, grave, forte, debole) dipende dalla frequenza e dall'ampiezza della vibrazione. E' chiaro che se busso su due porte di uguale dimensione ma differenti materiali (ad esempio, una di legno e una di metallo) queste vibrano con diverse frequenze e ampiezze, a causa della diversa struttura ed elasticità di legno e metallo, e quindi producono suoni diversi.

Quando due strumenti musicali differenti, ad esempio pianoforte e violino, emettono la stessa nota, con la stessa ampiezza e frequenza, il nostro orecchio percepisce due suoni differenti. Ciò che consente di distinguere i due strumenti è il "timbro" della nota. Il timbro è l'effetto della somma di diverse frequenze emesse contemporaneamente dallo strumento musicale. Quando suoniamo, ad esempio, la nota La della terza ottava del pianoforte, ascoltiamo un'onda che vibra a 440 cicli al secondo, ma anche onde a 880 cicli, 1320 cicli e così via, ovvero frequenze che risultano multiple di quella fondamentale e che vengono chiamate "armoniche". In realtà vengono emesse anche frequenze che non sono armoniche: ad esempio, la nota Do di un violino contiene anche il Mi, il Sol ed il Si bemolle. L'ampiezza di ciascuna delle frequenze emesse da uno strumento rendono l'onda risultante unica, diversa da strumento a strumento.

Tuttavia, noi percepiamo in modo diverso il suono emesso dallo stesso strumento quando viene usato in una sala da concerto o in una cattedrale. Il motivo è che lo spazio circostante (materiale, forma e dimensione delle pareti, della platea, della galleria e di tutti gli oggetti presenti nella sala)



agisce sul suono riflettendo meglio alcune frequenze ed assorbendone altre, quindi variando il timbro dello strumento.

Il fatto che l'ambiente in cui si propagano le onde sonore incide sulla qualità del suono implica che quando si progetta una sala da concerto bisogna tener conto di una notevole quantità di variabili (ampiezza, materiali e forma di pareti, soffitto, poltrone, galleria, platea, oggetti,

posizione dell'auditorio rispetto al palco) che vanno determinate con molta attenzione, anche tramite simulazioni numeriche al computer, in modo che la resa sonora dell'orchestra non ne risenta negativamente ma anzi ne sia esaltata. In un certo senso, la sala deve assumere la funzione di una vera e propria cassa armonica.

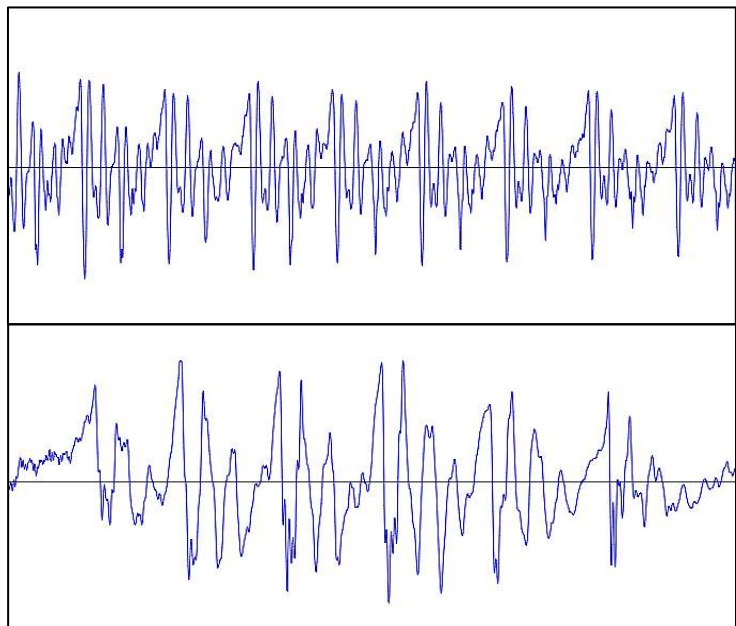
Oltre ai suoni, ci sono onde sonore meno piacevoli, i rumori. Che differenza c'è tra suono e rumore? Il rumore corrisponde a una vibrazione irregolare, non periodica della sorgente sonora, ed è composto dalla somma di tante frequenze. Una nota musicale invece crea un'onda di pressione con un profilo di intensità periodica, che si ripete tale e quale durante un certo intervallo di tempo.

Nel caso della voce umana le consonanti sono rumori prodotti da lingua, labbra, palato, denti, che formano onde sonore non periodiche. Invece le vocali (a e i o u) sono suoni selezionati cambiando forma e ampiezza della bocca, la quale funge da cavità risonante rinforzando alcune frequenze e assorbendone altre. Ad esempio, nella figura 7 è riportata la successione temporale delle onde della voce umana (la vocale "a" e la consonante "k") registrate con un personal computer.

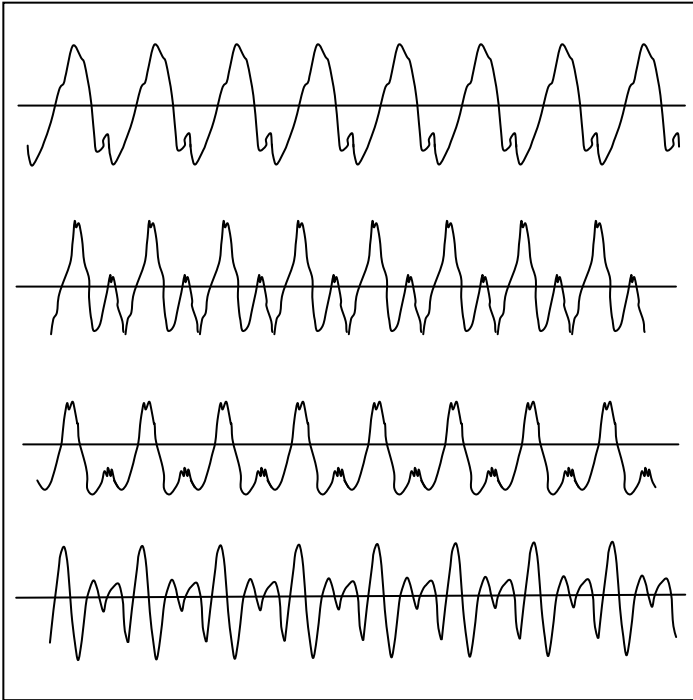
La vocale pronunciata per un istante (prima curva) è poco regolare, ma contiene una certa periodicità. La consonante "k", invece, mostra una scarsa periodicità ed ha una forma irregolare dovuta alla somma di tante frequenze che la fanno percepire come rumore.

Il suono prodotto da un cantante, o ancora meglio da uno strumento musicale, ha una forma molto più regolare dovuta al fatto che produce una vibrazione periodica dell'aria. Ad esempio, nella figura 8 sono riportate dall'alto in basso le curve che si ottengono cantando le vocali "a", "e" ed "i", rispettivamente, ad una frequenza di circa 140 Hz, e la nota "La" emessa da un oboe.

Come si può notare, il suono dovuto al canto è molto regolare, periodico e costituito da poche frequenze. Il suono emesso da uno strumento musicale, oltre ad avere un'elevata periodicità, appare



**Figura 7.** Onde sonore della voce umana registrata al computer: vocale "a" (in alto) e consonante "k" (in basso) entrambe pronunciate per un breve istante.



**Figura 8.** Registrazione al computer di onde sonore del canto di (dall'alto in basso): "a", "e", "i", e la nota "La" emessa da un oboe.

anche più "regolare" della voce umana, ovvero ha un minor numero di frequenze oscillanti, per cui l'ascolto della musica risulta particolarmente gradevole.

A quale velocità si muove il suono? Dipende dalla densità e dalla compressibilità del mezzo (gassoso, liquido, solido) dove il suono si propaga. E' intuitivo che, per la stessa vibrazione, la velocità sarà minore in un mezzo a più alta densità (massa diviso volume) perché più le molecole sono dense, maggiore è la forza necessaria a muoverle. Ed è facile capire che, per la stessa vibrazione e la stessa densità, la velocità è minore in un mezzo con maggiore compressibilità (capacità delle molecole di avvicinarsi, riducendo il volume occupato), perché la spinta ricevuta dalla sorgente vibrante viene in parte utilizzata per avvicinare le

molecole, rallentando il processo di spostamento dell'onda sonora.

Ovviamente, le sostanze solide e liquide si possono comprimere poco, perché le loro molecole e atomi sono già molto vicini, e quando una forza cerca di comprimerli intervengono forze repulsive che si oppongono all'avvicinamento. Al contrario, i gas sono caratterizzati da una grande distanza tra particelle, e possono essere compressi più facilmente. Ad esempio, l'acqua ha una densità 770 volte maggiore dell'aria e una compressibilità 15.000 volte minore di quella dell'aria. Di conseguenza, la compressibilità compensa e supera l'effetto della densità, e la velocità del suono nell'acqua è di 1.460 metri al secondo, più di quattro volte superiore ai 331 metri al secondo della velocità del suono nell'aria. I solidi sono più densi ma molto meno comprimibili dei liquidi, sicché la velocità del suono in un solido è più elevata che nei liquidi e nei gas. Ad esempio, nel rame la velocità del suono è circa di 4.500 metri al secondo.

Rimane un'ultima curiosità: cosa accade al suono quando non c'è aria o altro mezzo dove propagarsi? In questa situazione si trovano gli astronauti che fanno una "passeggiata spaziale" fuori dalla navicella. Nel vuoto interplanetario, senza atomi e molecole, le vibrazioni dell'astronave non possono "spingere" nulla, quindi non c'è onda di pressione, e nessun suono si propaga fino a far vibrare il timpano dell'astronauta. Nello spazio regna il silenzio.

E allora, diffidate dei film di fantascienza dove l'inquadratura di una astronave nello spazio è accompagnata dal roboante rumore dei motori...





## LUCE E VISIONE, UN BINOMIO (QUASI) PERFETTO [16]

*Nulla è più facile che illudersi, perché ciò che ogni uomo desidera, crede anche che sia vero (Demostene)*

Tutte le forme di vita sulla Terra hanno sviluppato diversi metodi per utilizzare la luce visibile, nel corso del processo di evoluzione. Piante, batteri, occhi, tutto funziona in modo da trasformare la luce in qualcos'altro. Nel caso di piante e batteri, la luce fornisce l'energia necessaria a realizzare importanti reazioni chimiche attraverso il processo di fotosintesi (per inciso, la fotosintesi agisce anche nell'uomo, quando la luce solare trasforma un composto prodotto dal nostro fegato, il deidrocolesterolo, in vitamina D). Negli organismi superiori, gli occhi trasformano la luce in reazioni chimiche che generano impulsi nervosi inviati al cervello, in modo da rivelare rapidamente i cambiamenti che avvengono nei dintorni: un pericolo, una preda, un riparo. Informazioni essenziali per sopravvivere. Si capisce, quindi, come la selezione naturale abbia perfezionato, in milioni di anni, i sistemi di rivelazione e uso della luce.

Due esempi di questa "evoluzione verso la perfezione" sono la visione binoculare (da due occhi) e la densità di fotorecettori sulla retina, che ora andiamo a commentare.

Gli occhi di molti animali, uomo compreso, sono posti ad una distanza più di dieci volte maggiore della dimensione della pupilla (cioè del diametro di ingresso della luce nell'occhio). A causa di questa distanza, ciascun occhio vede un'immagine un poco diversa da quella dell'altro occhio, vedi figura 9: il cervello fonde le due immagini, e utilizza le lievi differenze per ricrearne lo spessore, la profondità. Il risultato di questa prodigiosa ricostruzione è la visione tridimensionale, che fornisce informazioni sulla distanza degli oggetti osservati.



**Figura 9.** Immagini stereoscopiche percepite dall'occhio sinistro (immagine a sinistra) e dall'occhio destro (immagine a destra). Per accorgerci che si tratta di due immagini diverse, bisogna notare alcuni dettagli, ad esempio la posizione della scritta "Bar" rispetto al cappello del ballerino, oppure la posizione delle persone sullo sfondo rispetto a quelle in primo piano. Il cervello riceve queste due immagini bidimensionali distinte e le fonde in una unica immagine, mentre utilizza le lievi differenze per ottenere informazioni sulla profondità della scena, ovvero per creare la terza dimensione. Tratto da [www.stereoscopy.com/gallery/](http://www.stereoscopy.com/gallery/)

La visione binoculare è quindi essenziale per valutare la distanza di un predatore e quindi l'imminenza di un pericolo, o la distanza di una preda e quindi l'opportunità di procurarsi cibo: in altre parole, la visione binoculare è importante per la sopravvivenza. Il mitico ciclope Polifemo,

anche se non fosse stato accecato, avrebbe trovato difficoltà a catturare Ulisse e i suoi compagni con il solo occhio.

Ancora più sorprendente è l'esempio della densità dei recettori di luce sulla retina. Con una formula ben conosciuta nei libri di ottica, si può dimostrare che la minima distanza media per la quale si possono distinguere due segnali luminosi sulla retina è di circa 2,44 millesimi di millimetro. Di conseguenza, la massima densità media di punti distinguibili sulla retina è pari a 16,8 milioni di punti per centimetro quadrato. Ebbene, la densità di recettori sensibili alla luce al centro della retina è pari a 16 milioni per centimetro quadrato! Di fronte a un simile risultato, possiamo pensare ad una coincidenza, a un caso fortuito, oppure dobbiamo ammettere che Madre Natura ha fatto le cose alla perfezione, mettendo il numero di recettori giusto: un numero maggiore sarebbe stato inutile (non avrebbe migliorato l'acutezza della visione) mentre un numero inferiore avrebbe portato ad una visione insufficiente, comunque migliorabile.

Cerchiamo di capire meglio come funziona il meccanismo della visione. La parte fotosensibile dell'occhio è la retina, una membrana formata da diversi strati. Dall'esterno verso l'interno troviamo uno strato pigmentato (melanina, che impedisce alla luce di essere riflessa indietro), uno strato di recettori sensibili alla luce (chiamati, a causa della loro forma, "coni" per la visione diurna posti al centro, e "bastoncelli" per la visione notturna posti in periferia) connessi con diversi strati di neuroni. Infine, le cellule neuronali confluiscono nelle fibre del nervo ottico, e da qui al cervello. Quando un raggio di luce giunge sulla retina è assorbito da due proteine che circondano i recettori, la rodopsina (sui bastoncelli) e la iodopsina (sui coni). La luce assorbita provoca una serie di reazioni chimiche che modificano la struttura delle due proteine: il risultato finale è che si chiudono i canali usati dallo ione sodio per entrare all'interno del cono o del bastoncello. Ne segue un accumulo di ioni all'esterno del recettore, che produce una polarizzazione elettrica positiva che si propaga fino al neurone dove genera un impulso nervoso che si propaga alle fibre del nervo ottico.

In altre parole, un raggio di luce che entra nell'occhio provoca una serie di reazioni chimiche nella retina che producono un eccesso di carica elettrica, rapidamente trasmessa al cervello attraverso il nervo ottico.

Nella zona centrale della retina ad ogni cono o coppia di coni corrisponde un neurone, mentre nelle zone periferiche diversi bastoncelli sono connessi allo stesso neurone che quindi trasmette la somma dei tanti segnali nervosi ricevuti. Il fatto che la carica elettrica di tanti bastoncelli si somma in un solo neurone spiega perché la visione notturna (con pupilla aperta, che interessa anche la zona della retina periferica dove si trovano i bastoncelli) è più sensibile: la somma di tanti segnali permette di vedere meglio gli oggetti scarsamente illuminati. Allo stesso tempo, la visione notturna è meno dettagliata e precisa di quella diurna nel riconoscere forme e contorni: infatti, i segnali provengono da un gruppo di bastoncelli, cioè da un'area della retina invece che da un punto preciso. Tornando al viaggio del nostro raggio di luce, eravamo rimasti all'impulso elettrico trasmesso dalle fibre del nervo ottico. Le fibre del nervo di ciascun occhio si dividono a metà per raggiungere due zone del cervello (corpi genicolati laterali), dove si combinano con la metà delle fibre dell'altro occhio: in questo modo si possono elaborare gli impulsi binoculari per ottenere la tridimensionalità e quindi informazioni sulla distanza dell'oggetto osservato. Di seguito, gli impulsi percorrono le fibre che si dirigono alla corteccia visiva, dove si dispongono con una collocazione precisa: i segnali di ciascuna zona della retina sono inviati in un determinato luogo della corteccia, dove avviene l'interpretazione. Peraltro, la corteccia esegue un'analisi in parallelo delle varie proprietà dell'immagine: esistono aree della corteccia dedicate all'analisi delle dimensioni e dell'orientamento, altre al colore, altre al movimento. Nell'uomo e nella scimmia esiste perfino una zona corticale

specializzata nel riconoscimento del solo volto! E immaginate cosa può accadere in caso di una lesione in questa zona della corteccia visiva: ne parla Oliver Sacks in un saggio dall'eloquente titolo *L'uomo che scambiò sua moglie per un cappello* [17]. In ogni caso, analizzare le immagini in parallelo consente di ridurre il tempo di elaborazione, e il fattore tempo è importante per prendere decisioni rapide e in definitiva per sopravvivere in caso di pericolo.

Il processo di riconoscimento delle immagini è ancora in parte sconosciuto: alcuni studiosi per esempio ipotizzano una similarità con il riconoscimento dei suoni nella coclea dell'orecchio, per cui la corteccia visiva opererebbe una operazione matematica chiamata *Trasformata di Fourier* [18] dei segnali nervosi per ottenere informazioni sui contorni dell'immagine.

Di sicuro, il nostro cervello ha una straordinaria capacità di riconoscere in breve tempo linee e simboli complessi, come le parole aventi differente orientamento e stile: provate a leggere le due righe seguenti:

<b>SINISTRA</b>	<b>Destra</b>	<b>sottosopra</b>	<b>ondulato</b>
Courier	Times New Roman	<i>Scrittura a mano</i>	Comic sans

Facile, vero? Eppure, leggere le due righe sopra non è un compito semplice: si tratta di parole scritte con caratteri diversi, orientati in verticale con direzione verso l'alto e verso il basso, o invertendo la parte sotto e quella sopra. Quanto sia difficile la lettura di queste righe lo dimostra il fatto che non si è ancora riusciti a riprodurre una simile capacità di identificazione nei programmi di "riconoscimento testo" usati nei computer.

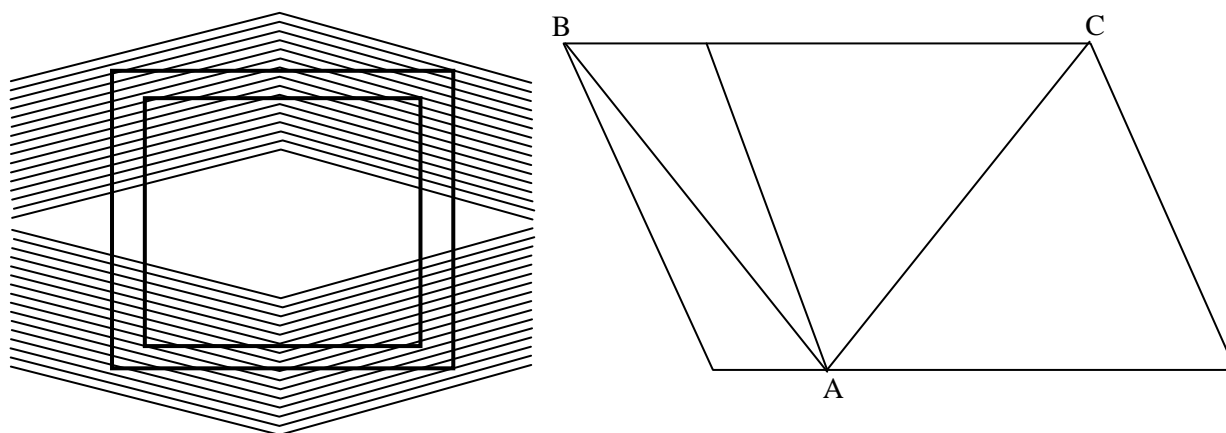
Ma c'è di più. Il nostro cervello ha una straordinaria capacità di ricostruire parti di immagini o di testo mancanti, per fornirci la figura o la scritta più probabile. D'accordo con lo psicologo Gaetano Kanizsa [19] "*Certe combinazioni di figure incomplete danno luogo a contorni chiaramente visibili anche quando non esistono fisicamente. Tali contorni sono quindi una creazione del nostro sistema visivo*".

Ad esempio, provate a leggere le righe seguenti:

QU3570 M3554GG10 PR0V4 CH3 L4 N057R4 M3N73 PU0' L3GG3R3 UN4 L3773R4  
 53NZ4 P4R0L3 .  
 1MPR35510N4N73 !  
 4LL'1N1Z10 3R4 D1FF1C1L3, M4 G14' 1N QU3574 R1G4 L4 7U4 M3N73 574  
 L3GG3ND0 4U70M471C4M3N73 53NZ4 P3N54RC1 5U .  
 C0NGR47UL4Z10N1 !

Nonostante si tratti di un messaggio in cui molte lettere sono sostituite da numeri, la maggior parte dei lettori non ha difficoltà a capire cosa è scritto. Il nostro cervello "adatta" la forma del numero alla lettera graficamente più simile, e se il significato della parola ha un senso, procede oltre senza indugio. In altre parole, il cervello integra le informazioni mancanti, basandosi sulla similarità tra numero e forma della lettera che abbiamo in memoria e sul significato della parola risultante, che deve "avere senso compiuto" rispetto alla frase. Questo complesso processo di ricostruzione viene eseguito automaticamente e in tempi rapidissimi.

Tuttavia, la nostra grande capacità di interpretare e riconoscere tratti e lineamenti può essere messa in crisi da alcuni disegni particolari, come gli esempi nella figura 10, che mostrano due famose illusioni ottiche di tipo geometrico.



**Figura 10.** Due celebri illusioni ottiche geometriche. A sinistra: illusione di Hering delle rette parallele (1861). A destra: illusione del parallelogramma di Sander (1926).

Nel disegno a sinistra (variante dell'illusione di Hering delle rette parallele [20]) percepiamo un'apparente curvatura della parte alta e bassa della cornice, mentre in realtà la cornice è rettangolare e i segmenti in alto e in basso sono paralleli: per verificarlo, si può usare un righello. Nel disegno a destra (illusione del parallelogramma di Sander [21]) il segmento AB sembra più corto di AC, e invece sono uguali: se non ci credete, provate a misurare i due segmenti con un righello graduato.

Le illusioni ottiche non sono soggettive, perché inducono in errore tutte le persone, o quasi. Ad esempio, provate a dare un'occhiata alle sorprendenti illusioni nel sito web [22]. Per quale motivo il nostro sistema visivo/percettivo è tratto in inganno da questi disegni?

I risultati di molti esperimenti suggeriscono che le immagini viste dagli occhi vengono rielaborate e interpretate dal nostro cervello sulla base di situazioni già vissute. In pratica, il cervello confronta le immagini appena viste con immagini simili memorizzate in precedenza, e utilizza questo confronto in modo da dare un senso e un contesto appropriato (o più probabile) ad un oggetto o ad un insieme di oggetti. Si tratta della differenza tra visione e percezione: noi vediamo quello che ci aspettiamo di vedere in base alla nostra esperienza. Ad esempio, i componenti di alcune tribù africane, che non hanno occasione di vedere spesso oggetti disposti parallelamente o ad angoli retti (rotaie, scatole appoggiate alle pareti, angoli di strade e palazzi) non subiscono l'illusione di Hering nella figura 10! Lo studio delle differenze tra visione e percezione propone un affascinante intreccio di fisica, prospettiva geometrica, fisiologia e psicologia: in questo articolo non possiamo entrare in maggiori dettagli, ma il lettore può trovare interessanti approfondimenti nelle referenze [23, 24, 25, 26, 27].

In conclusione, bisogna ammettere che il nostro sistema di percezione delle immagini non è perfetto, in quanto condizionato dalle forme e dai colori a noi familiari. Tuttavia, è anche vero che nessuno degli errori generati dalle illusioni ottiche mette in pericolo la sopravvivenza dell'individuo nei termini discussi all'inizio dell'articolo: di questi "giochi di illusione" la selezione naturale si disinteressa...

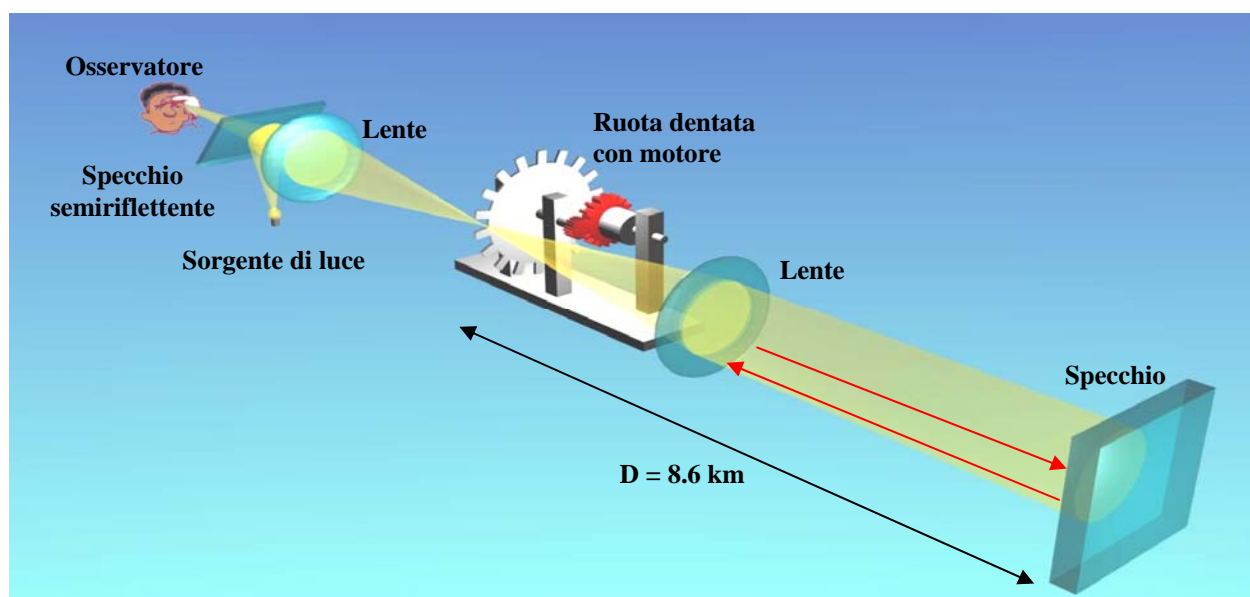
## *La Fisica curiosa e precisa: aldilà della nostra percezione*

### **PIU' VELOCE DELLA LUCE? [28]**

*Più veloce della luce!* Gli appassionati dei fumetti conoscono bene questa frase: è il motto di Superman (o Nembo Kid, per i meno giovani) quando parte in volo per difendere la Giustizia. Ma noi sappiamo che non è possibile viaggiare più velocemente della luce: solo le particelle di luce, i fotoni, possiedono una massa nulla e possono quindi raggiungere la incredibile velocità della luce, di poco inferiore ai 300.000 chilometri al secondo, che corrisponde, per noi che siamo abituati a misurare la velocità in chilometri orari, a circa 1.079.251.000 (un miliardo settantanovemilioni duecentocinquantunomila) km/h. Una velocità talmente elevata che è difficile da immaginare. Non a caso, nell'antichità e fino al 1600 si pensava che la luce si trasmettesse istantaneamente, ovvero che la sua velocità fosse infinita, e perciò non misurabile. Certamente i nostri sensi percepiscono la luce come qualcosa che si propaga ad una velocità infinita. Ma allora, chi è stato il primo a misurare la velocità della luce, e come ha fatto?

Verso la fine del 1600, alcuni astronomi avevano notato che l'eclisse del satellite più interno di Giove si osservava in anticipo o in ritardo (di circa venti minuti) rispetto ai calcoli astronomici, a seconda della posizione della Terra nella sua orbita, e quindi a seconda di quanto era distante la Terra da Giove durante l'osservazione dell'eclisse. Questo risultato poteva essere spiegato dal differente tempo impiegato dalla luce riflessa dal satellite di Giove a percorrere diversi tratti dell'orbita terrestre, ma bisognava ammettere che la velocità della luce non era infinita.

La prima misura diretta della velocità della luce venne effettuata quasi due secoli dopo, nel 1849, dal fisico francese Armand Fizeau, che riprese, perfezionandola, un'idea già formulata nel 1638 da Galileo Galilei. Fizeau pose in cima a un colle una sorgente di luce indirizzata verso un altro colle distante 8.6 km, sul quale era sistemato uno specchio che rifletteva la luce indietro nella esatta direzione di provenienza. Davanti alla sorgente di luce Fizeau pose una ruota dentata, in modo che la luce passava nella scanalatura tra un dente e l'altro della ruota, sia all'andata che al ritorno, vedi figura 11.



**Figura 11.** Schema dell'apparato usato da Fizeau nel 1849 per la prima misura della velocità della luce.

A ruota ferma, la luce arriva allo specchio, viene riflessa e torna indietro ripassando per la stessa scanalatura del percorso di andata. Mettendo in moto la ruota, e aumentando la velocità di rotazione, ad un certo punto l'osservatore posto accanto alla sorgente e dietro la ruota (vedi figura 11) non vede più la luce riflessa. Questo accade quando i raggi di luce che passano tra due denti della ruota e vengono riflessi dallo specchio, tornando indietro trovano un dente della ruota che li ferma, essendosi spostato nel frattempo.

L'esperimento ebbe successo, e conoscendo la distanza  $D = 8,6$  km tra ruota e specchio, il numero  $G = 12,6$  di giri al secondo della ruota per il quale non si vedeva più la luce riflessa, e il numero  $N = 720$  di denti, sapendo che il tempo impiegato dalla luce per andare e tornare era  $T_1 = 2 \times D/V$  secondi e che il tempo per un dente di spostarsi era di  $T_2 = 1/(2 \times N \times G)$  secondi, Fizeau poté calcolare la velocità  $V$  della luce ponendo  $T_1 = T_2$  che risulta nella formula:  $V = 4 \times D \times N \times G$ .

Ovviamente, sia la distanza tra ruota e specchio, sia la velocità di rotazione della ruota devono essere misurate e quindi il loro valore è conosciuto con un certo margine di errore. Questo errore fa sentire il suo effetto anche nella formula per calcolare la velocità  $V$ . Di conseguenza, il valore di velocità ottenuto da Fizeau, pari a 312.077 chilometri al secondo, non era esatto, ma abbastanza preciso considerando che si trattava della prima misura diretta della velocità più elevata che si può osservare in natura!

Appena tredici anni dopo, nel 1862, Leon Foucault (un allievo di Fizeau) propose e realizzò un metodo ancora più astuto [29], basato su uno specchio rotante che riflette la luce di una lampada verso uno specchio fisso, riceve il raggio di ritorno riflettendolo di nuovo verso la sorgente, ma spostato di una certa distanza che dipende dalla velocità di rotazione dello specchio (conosciuta), dalla distanza totale percorsa (conosciuta) dalla distanza tra lo specchio rotante e la lampada (conosciuta) e dalla velocità della luce (incognita). Questo metodo permise di effettuare la misura della velocità della luce con un errore inferiore all' 1% rispetto al valore misurato oggi con strumenti molto sofisticati: un risultato straordinariamente preciso per l'epoca.

Oggi giorno complesse strumentazioni permettono di conoscere la velocità della luce con una precisione di 1 parte su 250 milioni: il suo valore è  $V = 299.792$  km/secondo. Più veloci di così... proprio non si può andare!

### ***RINGRAZIAMENTI***

Un detto popolare afferma “*hai veramente capito una cosa solo quando sei in grado di spiegarla a tua nonna*”. In effetti, la capacità di trovare una spiegazione ad un fenomeno e poi di descriverla in termini comprensibili si forma poco a poco, prima ponendosi delle domande, poi parlandone con i Colleghi, infine provando a spiegarlo agli studenti e alle persone comuni, raffinando di volta in volta le argomentazioni fino a trovare il “modo giusto” per soddisfare le menti curiose. Con un vantaggio reciproco, perché d'accordo con Seneca “*homines dum docent discunt*” (gli uomini, mentre insegnano, imparano).

Questa premessa spiega perché dobbiamo ringraziare un grande numero di Colleghi (ENEA, ma non solo), di studenti (specialmente i più piccoli, che fanno domande semplici, dirette, ma di difficile risposta come “ma perché la Terra gira?”) di parenti e amici... senza il cui feedback questo Rapporto non sarebbe mai stato scritto.

### **REFERENZE E BIBLIOGRAFIA**

- [1] P. Di Lazzaro: *Controluce*, marzo 2003, p. 19.
- [2] P. Di Lazzaro, D. Murra, S. Bollanti, L. Giannessi: *Controluce*, novembre 2003, p. 14.
- [3] Vedi ad esempio [http://www.treccani.it/enciclopedia/forze-di-van-der-waals\\_\(Enciclopedia-della-Scienza-e-della-Tecnica\)/](http://www.treccani.it/enciclopedia/forze-di-van-der-waals_(Enciclopedia-della-Scienza-e-della-Tecnica)/)
- [4] P. Di Lazzaro: *Controluce*, aprile 2003, p. 16.
- [5] P. Di Lazzaro: *Controluce*, giugno 2003, p. 19.
- [6] P. Di Lazzaro, D. Murra, S. Bollanti, L. Giannessi: *Controluce*, febbraio 2004, p. 7.
- [7] Vedi ad esempio [http://it.wikipedia.org/wiki/Gabbia\\_di\\_Faraday](http://it.wikipedia.org/wiki/Gabbia_di_Faraday)
- [8] P. Di Lazzaro: *Controluce*, dicembre 2003, p. 15.
- [9] V.F. Weisskopf: *L'interazione della luce con la materia* Le Scienze n. 9 (1969) pp. 48-57.
- [10] Una presentazione semplificata della diffusione Rayleigh si può trovare, ad esempio, in [http://it.wikipedia.org/wiki/Scattering\\_Rayleigh](http://it.wikipedia.org/wiki/Scattering_Rayleigh)
- [11] P. Di Lazzaro: *Controluce*, aprile 2005, p. 22.
- [12] P. Høeg: *Il senso di Smilla per la neve* (Mondadori, 1994).
- [13] P. Di Lazzaro, D. Murra: *Controluce*, settembre 2005, p. 22.
- [14] S. Bollanti, D. De Meis, P. Di Lazzaro, A. Fastelli, F. Flora, G.P. Gallerano, L. Mezi, D. Murra, A. Torre, D. Vicca: *Calcolo analitico della posizione del sole per l'allineamento di impianti solari ed altre applicazioni* Rapporto Tecnico ENEA RT/2012/24/ (2012). Disponibile alla pagina web [http://opac.bologna.enea.it:8991/RT/2012/2012\\_24\\_ENEA.pdf](http://opac.bologna.enea.it:8991/RT/2012/2012_24_ENEA.pdf)
- [15] P. Di Lazzaro, D. Murra: *Controluce*, marzo 2007, p. 21.
- [16] P. Di Lazzaro: *Controluce*, novembre 2006, p. 16.
- [17] O. Sacks: *L'uomo che scambiò sua moglie per un cappello* (Adelphi, Milano, 2008). Una descrizione di questo interessante saggio può essere trovata alla pagina web [http://it.wikipedia.org/wiki/L'uomo\\_che\\_s cambi%C3%B2\\_sua\\_moglie\\_per\\_un\\_cappello](http://it.wikipedia.org/wiki/L'uomo_che_s cambi%C3%B2_sua_moglie_per_un_cappello)
- [18] Una descrizione informale e semplificata della trasformata di Fourier e delle sue applicazioni si trova alla pagina <http://www.blogzero.it/2010/12/10/la-trasformata-di-fourier-e-una-figata/>
- [19] G. Kanizsa: *Contorni soggettivi* Le Scienze n. 96 (1976) pp. 31-36.
- [20] Il fisiologo tedesco Eward Hering ha descritto questa illusione geometrica in un libro pubblicato nel 1861: *Beiträge zur Physiologie vol. I. Zur Lehre vom Ortssinne der Netzhaut.* (Leipzig Engelmann). Altre informazioni su [http://en.wikipedia.org/wiki/Hering\\_illusion](http://en.wikipedia.org/wiki/Hering_illusion)
- [21] Lo psicologo tedesco Friedrich Sander ha descritto l'illusione detta "del parallelogramma" nel 1926. Vedi ad esempio [http://it.wikipedia.org/wiki/Illusione\\_di\\_Sander](http://it.wikipedia.org/wiki/Illusione_di_Sander)
- [22] Vedi ad esempio [www.illusionosciences.com](http://www.illusionosciences.com)

- [23] P. Di Lazzaro: *Luce, visione, percezione: un sorprendente viaggio tra i colori e le illusioni dell'arte figurative*. Lezione al liceo scientifico Tauschek di Grottaferrata (dicembre 2013). Il contenuto della lezione, in formato pdf, è disponibile alla pagina web [www.academia.edu/5372694/Luce\\_visione\\_percezione\\_un\\_sorprendente\\_viaggio\\_tra\\_i\\_colori\\_e\\_le\\_illusioni\\_dellarte\\_figurativa](http://www.academia.edu/5372694/Luce_visione_percezione_un_sorprendente_viaggio_tra_i_colori_e_le_illusioni_dellarte_figurativa)
- [24] J. Beck: *La percezione del colore delle superfici* Le Scienze n. 88 (1975) pp. 58-70.
- [25] P. Di Lazzaro, D. Murra: *L'anamorfose tra arte, percezione visiva e prospettive bizzarre* Rapporto Tecnico ENEA RT/2013/5 (2013). Questo articolo è stato selezionato tra i finalisti del Primo Premio Nazionale di Divulgazione Scientifica (2013). Disponibile alla pagina web <http://openarchive.enea.it/bitstream/handle/10840/4479/RT-2013-5-ENEA.pdf?sequence=1>
- [26] Due trasmissioni di Geo-Scienza su RAI 3 in cui gli autori presentano alcune illusioni ottiche e commentano i meccanismi di psicofisiologia della percezione visiva possono essere visti in <http://www.rai.tv/dl/RaiTV/programmi/media/ContentItem-75d28411-7121-4af8-a302-39d71ca63eef.html#p=> e in <http://www.rai.tv/dl/RaiTV/programmi/media/ContentItem-9013d9a5-7baa-4499-a34f-b9277709a6cd.html#p=>
- [27] D. Murra, P. Di Lazzaro: *Sight and brain, an introduction to the visually misleading images* Atti dell'International Workshop on the Scientific approach to the Acheiropoietos Images, a cura di P. Di Lazzaro, edito da ENEA (2010) pp. 31-34. Disponibile alla pagina web [www.acheiropoietos.info/proceedings/MurraWeb.pdf](http://www.acheiropoietos.info/proceedings/MurraWeb.pdf)
- [28] P. Di Lazzaro: *Controluce*, luglio 2006, p. 17.
- [29] Lo schema dell'esperimento di Foucault per misurare la velocità della luce è descritto, ad esempio, in [http://it.wikipedia.org/wiki/Jean\\_Bernard\\_L%C3%A9on\\_Foucault](http://it.wikipedia.org/wiki/Jean_Bernard_L%C3%A9on_Foucault)



Edito dall' **ENEA**  
Servizio Comunicazione

Lungotevere Thaon di Revel, 76 - 00196 Roma

*[www.enea.it](http://www.enea.it)*

Stampa: Tecnografico ENEA - CR Frascati  
Pervenuto il 12.03.2014

Finito di stampare nel mese di marzo 2014