

## Suono

Un'esplosione o una martellata su un pezzo di ferro creano una perturbazione istantanea, un impulso sonoro. La sorgente dell'impulso perturba l'aria intorno a se' variandone la pressione e immediatamente questa variazione di pressione comincia a propagarsi nel mezzo. Non vi è spostamento di materia: semplicemente la densità dell'aria in una certa regione dello spazio intorno alla sorgente è diversa dalla densità media. Vi è una zona (il fronte della perturbazione) in cui la pressione è maggiore della media, seguita da una zona in cui la pressione è minore della media, in modo tale che globalmente la pressione media resti costante. La perturbazione si espande idealmente in tutte le direzioni e il suo fronte è un'onda sferica la cui energia si attenua con il quadrato della distanza. I fenomeni di questo tipo, impulsivi sono molto comuni, ma difficili da analizzare.

Piú facilmente si descrivono e analizzano i fenomeni *periodici*, che si ripetono ad intervalli di tempo regolari.

Se la perturbazione si ripete uguale a se' stessa a intervalli regolari di tempo, cioè diventa periodica, anche la perturbazione del mezzo acquista carattere periodico.

Ad esempio, l'ancia di uno strumento a fiato, interrompendo periodicamente il flusso dell'aria emesso dal musicista, genera onde di pressione periodiche nel tubo sonoro dello strumento. Dall'onda di pressione prodotta dall'ancia l'elemento risonante, cioè la colonna d'aria nel tubo, estrae una nota pura, determinata solo dalla lunghezza del tubo. In questo caso si parla allora di suono e onda sonora.

L'onda sonora è costituita dalla successione di zone con pressione minore della pressione media alternate a zone di compressione del mezzo in cui si propaga la perturbazione (aria, acqua). Il suono è quindi in effetti trasportato dai moti molecolari, mentre nei solidi intervengono le forze elastiche<sup>(1)</sup> che accoppiano tra loro gli atomi. La direzione di propagazione è allineata con le zone compresse/rarefatte nel fluido e si parla in tal caso di onde longitudinali. Per le onde elettromagnetiche (onde radio, luce) la

---

<sup>(1)</sup> Dovute alle interazioni tra le cariche di atomi vicini, cioè di natura elettrostatica secondo il modello accettato per i solidi.

variazione del campo elettromagnetico avviene su piani perpendicolari alla direzione di propagazione e si parla allora di onde trasversali.

Grandezze caratteristiche di un'onda<sup>(2)</sup> sono il *periodo*  $T$ , cioè il tempo che intercorre tra due perturbazioni consecutive e la *frequenza*  $f$ , ovvero il numero perturbazioni in un secondo. Per definizione è quindi

$$fT = 1 \quad T [s], \quad f [\text{Hz}, \text{s}^{-1}]$$

La frequenza si può anche definire in base al numero di zone compresse/rarefatte presenti nello spazio che l'onda percorre in un secondo, ma lo spazio percorso in un secondo non è altro che la *velocità di propagazione*  $v$  della perturbazione nel mezzo. Mettendo insieme le due affermazioni si ricava che la distanza tra due perturbazioni consecutive, detta *lunghezza d'onda*  $\lambda$ , vale

$$\lambda f = v = \frac{\lambda}{T} \quad \text{cioè} \quad \lambda = \frac{v}{f} = vT$$

dove  $\lambda$  [m],  $T$  [s],  $f$  [Hz, s<sup>-1</sup>],  $v$  [m/s].

La velocità di propagazione dipende a sua volta da proprietà caratteristiche del mezzo e quindi si parla di *velocità del suono* in aria, acqua, acciaio, ...

Nella formula per la velocità nei solidi e fluidi

$$v = \sqrt{\frac{K}{\rho}}$$

intervengono la compressibilità  $K$ , che misura l'elasticità del materiale, e la densità  $\rho$ , che ne misura l'inerzia.

Sostanza	$K$ [N/m <sup>2</sup> ]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$v$ [m/s]
Acciaio	$200 \times 10^9$	$7.8 \times 10^3$	$5.0 \times 10^3$
Acqua	$2 \times 10^9$	$1.0 \times 10^3$	$1.5 \times 10^3$

<sup>(2)</sup> Le grandezze caratteristiche variano in quantità se si parla rispettivamente di luce, suono o onde radio. Restano invece fissate le relazioni tra esse. Ecco perché si parla genericamente di onde, senza riferimento ad un particolare fenomeno fisico.

Solidi e liquidi sono poco comprimibili, mentre i gas come l'aria sono molto comprimibili; in un gas pressione, volume e temperatura sono legati dalla legge dei gas perfetti. In questo caso si può dimostrare che la velocità del suono si ricava come

$$v = \sqrt{\frac{\gamma RT}{p_m}}$$

dove  $R$  è la costante universale dei gas  $R = 8.31 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ ,  $\gamma$  è il rapporto tra i calori specifici a pressione/volume costante (per l'aria  $\gamma = 1.4$ ),  $T$  è la temperatura assoluta in  $\text{K}$ ,  $p_m$  è il peso molecolare (per l'aria  $p_m = 29 \times 10^{-3} \text{ kg/mol}$ ).

Ad esempio, nell'aria a  $293 \text{ K}$  ( $20^\circ \text{C}$ ) è  $v = 343 \text{ m/s}$  e quindi un'onda sonora a frequenza di  $100 \text{ Hz}$  ha una lunghezza d'onda  $\lambda = 343/100 \approx 3.4 \text{ m}$ ; a  $10\,000 \text{ Hz}$  è  $\lambda = 343/10^4 \approx 3.4 \text{ cm}$ . Alla frequenza degli ultrasuoni emessi dai pipistrelli ( $f \approx 120\,000 \text{ Hz}$ ) la lunghezza d'onda è  $\lambda = 343/1.2 \times 10^5 \approx 2.8 \text{ mm}$ , quanto basta per rilevare la presenza delle falene, zanzare, ecc. di cui i pipistrelli sono ghiotti.

Per l'acqua  $v \approx 1\,500 \text{ m/s}$ ; per la lunghezza d'onda  $\lambda$  a varie frequenze si ha

frequenza	100 Hz	1 kHz	10 kHz	100 kHz
$\lambda$	15 m	1.5 m	15 cm	1.5 cm

Lunghezza d'onda e frequenza sono modellizzazioni che vengono comunemente usate per descrivere i fenomeni periodici. Utilizzare una o l'altra è in un certo senso indifferente, visto che sono quantità legate da una relazione semplice. Ma spesso conviene, perchè più intuitivo o più evidente sperimentalmente, adottare preferibilmente uno o l'altro punto di vista. Ad esempio, un fenomeno periodico viene analizzato come somma di una frequenza fondamentale e dei suoi multipli interi (armoniche), mentre parlando della diffrazione si ragiona in termini di lunghezza d'onda.

### Sonar

Il sonar<sup>(3)</sup> fu inventato durante la seconda guerra mondiale per localizzare i sommergibili e in questi anni è diventato uno strumento di dotazione comune delle imbarcazioni da diporto e da pesca per misurare la profondità dell'acqua o per scoprire i banchi di pesce.

<sup>(3)</sup> In Italia è chiamato anche ecoscandaglio.

Fa uso di uno o piú sorgenti di onde sonore ultrasoniche che, sfruttando l'effetto piezoelettrico o magnetostrittivo<sup>(4)</sup>, emettono nell'acqua degli impulsi sonori. L'onda riflessa, il cosiddetto eco rimandato dal fondo, da un sommergibile o da un banco di pesci viene raccolta da microfoni (idrofon). La metà del tempo di ritardo moltiplicato per la velocità del suono in acqua da' la distanza della sorgente dell'eco rispetto all'imbarcazione dotata di sonar. Piú sorgenti disposte a distanza nota forniscono tempi diversi da cui si può ricavare la posizione della sorgente dell'eco rispetto all'imbarcazione.

La frequenza elevata della sorgente<sup>(5)</sup> permette teoricamente una misura molto accurata della distanza. Il sonar attivo è in grado di stabilire la direzione e la distanza, in pratica la posizione della sorgente dell'eco. Le principali fonti di errore sono dovute alla non omogeneità del mezzo, l'acqua di mare, in cui si propagano le onde sonore. Le variazioni di temperatura degli strati d'acqua, si traducono in variazioni della velocità di propagazione e infine della distanza stimata. Inoltre il rumore prodotto dalle onde, dall'imbarcazione su cui è posizionato e dalle altre imbarcazioni crea seri problemi nella classificazione della sorgente dell'eco.

Le applicazioni scientifiche del sonar comprendono la stima della biomassa, cioè il rilevamento di banchi di pesci, della loro densità, la topografia del fondo, la classificazione della composizione dei sedimenti del fondo, la stratigrafia del fondo, la misura dell'altezza e del periodo della onde marine, la misura della velocità delle correnti marine.

### **Radar**

Un dispositivo inventato e ampiamente utilizzato durante la seconda guerra mondiale per scoprire aerei nemici e determinarne la posizione. Un radar funziona sostanzialmente come un sonar, solo che le onde non sono acustiche, ma elettromagnetiche (onde

---

<sup>(4)</sup> La piezoelettricità consiste nella proprietà di certe sostanze, quarzo e ceramiche sintetiche, di trasformare in una deformazione la presenza di cariche elettriche sulla loro superficie, mentre la magnetostrizione consiste nella variazione delle dimensioni fisiche di un metallo ferromagnetico come il nichel quando è immerso in un campo magnetico.

<sup>(5)</sup> Dell'ordine dei MHz, a cui in acqua corrispondono lunghezze d'onda dell'ordine dei millimetri.

radio). La lunghezza d'onda deve essere almeno 10 – 100 volte piú piccola delle dimensioni dell'oggetto da rilevare e quindi siamo nel campo delle microonde<sup>(6)</sup>. Un'antenna parabolica concentra l'energia in un fascio. Un breve ma potente impulso di microonde viene periodicamente emesso dalla sorgente (trasmettitore) mentre l'antenna ruota, scandagliando lo spazio circostante. Ogni oggetto in grado di riflettere le onde elettromagnetiche che venga colpito dal pacchetto di onde emesso dall'antenna rimanda indietro una parte sia pur minima dell'energia emessa dall'antenna. Questi echi vengono ricevuti e dalla misura dell'intervallo temporale si risale alla distanza del bersaglio. Le onde si propagano a velocità prossima alla velocità della luce  $c \approx 3 \times 10^8$  m/s. Ad esempio, il segnale impiega  $2 \times 10^4 / 3 \times 10^8 \approx 67 \times 10^{-6}$  s per arrivare su un bersaglio a 10 km di distanza e tornare all'antenna.

Per il radar, le tecniche inizialmente nate a scopo militare, sono state quasi subito trasferite all'uso civile e scientifico. Negli ultimi anni si è avuta a una sofisticazione delle tecniche che attualmente consentono di indirizzare un fascio ragionevolmente stretto e di potenza variabile in qualsiasi direzione, variando all'occorrenza la frequenza della sorgente, senza parti in movimento, con pesi limitati, elevata efficienza e diretto interfacciamento con i sistemi di calcolo.

La lunghezza d'onda a cui opera il radar lo rende insensibile a fenomeni come pioggia e nebbia e in generale agli effetti dovuti al vapor acqueo nell'atmosfera, trovando quindi un impiego nelle rilevazioni da satellite.

## Interferenza

L'interferenza è un fenomeno dovuto alla somma, in una certa posizione dello spazio, dell'ampiezza di due o piú onde di stessa frequenza. Originalmente il fenomeno è stato scoperto e studiato per la luce, in seguito per il suono e le onde elettromagnetiche (onde radio). Un'onda viene schematizzata come un fenomeno in cui una grandezza caratteristica (per la luce e le onde elettromagnetiche è l'ampiezza del vettore campo elettrico), varia, riferendosi

---

<sup>(6)</sup> Una lunghezza d'onda di 3 cm è un valore tipico e corrisponde ad una frequenza di 10 GHz.

ad uno stesso punto dello spazio in cui si propaga l'onda, con andamento sinusoidale, cioè l'ampiezza dell'onda (sonora, luminosa, elettromagnetica) è scritta come

$$A(t) = A_0 \sin \omega t$$

dove  $\omega = 2\pi f$  è la pulsazione.

Se in uno stesso punto sono presenti due onde con la stessa frequenza  $f$  e ampiezze  $A_1, A_2$ , l'ampiezza risultante

$$A(t) = A_1 \sin \omega t + A_2 \sin(\omega t + \phi)$$

dipende dall'angolo di fase  $\phi$  o sfasamento tra le due onde. Se le onde hanno la stessa ampiezza,  $A_1 = A_2$  e  $\phi = 0$  è

$$A(t) = (A_1 + A_2) \sin \omega t$$

e l'onda risultante ha ampiezza pari alla somma delle ampiezze delle singole onde, mentre se  $\phi = \pi$  ( $180^\circ$ ) l'ampiezza risultante è

$$A(t) = (A_1 - A_2) \sin \omega t$$

poiché, dalla trigonometria,  $\sin \alpha + \pi = -\sin \alpha$ . In questo caso si parla di in opposizione di fase. È evidente che, se  $A_1 = A_2$ , in un caso l'ampiezza risultante è doppia, nell'altro l'ampiezza risultante è nulla e si parla figuratamente di interferenza costruttiva o rispettivamente distruttiva.

La differenza di fase deriva dalle differenze di percorso. Per due sorgenti,  $S_1, S_2$ , separate di una distanza  $d$ , alla stessa frequenza (monocromatiche), fase (coerenti) e intensità, si avrà interferenza costruttiva in ogni punto sull'asse del segmento che le separa. Le cose si complicano quando si considerano, per esempio, i punti di uno piano posto a una certa distanza dalle due sorgenti.

Per un'onda di lunghezza d'onda  $\lambda$  la differenza di percorso  $\Delta l$  produce una variazione di fase

$$\Delta\phi = 2\pi \left( \frac{\Delta l}{\lambda} - \left[ \frac{\Delta l}{\lambda} \right] \right)$$

dove  $[a]$  è la parte intera di  $a$ . Ad esempio  $[3.999] = 3$ , mentre  $[4.0] = 4$ . Questo perchè la differenza di fase  $\Delta\phi = 2k\pi$  corrisponde a  $\Delta\phi = 0$ . Quindi  $\Delta\phi$  è la parte decimale di  $\Delta l/\Delta\lambda$ . Quindi sul piano posto a una certa distanza si succedono punti

con vari gradi di interferenza, dalla elisione alla somma completa delle intensità delle sorgenti. Si misurano massimi e minimi in successione, separati tra loro e dovuti a percorsi che differiscono per mezza lunghezza d'onda.

Per questa ragione, poichè l'interferenza dipende da differenze di percorso di mezza lunghezza d'onda, il fenomeno viene usato per misurare distanze piccolissime, appunto dell'ordine della lunghezza d'onda della luce visibile, un metodo ampiamente usato nelle misure meccaniche di precisione.

L'interferenza costruttiva viene utilizzata modernamente nei radar a schiera in cui molte<sup>(7)</sup> sorgenti di microonde vengono sfasate dell'opportuno angolo in modo da ottenere una interferenza costruttiva particolarmente intensa. Se le sorgenti sono  $n$ , l'interferenza costruttiva centrale ha ampiezza pari alla somma delle ampiezze delle  $n$  sorgenti. Se a ciascuna delle sorgenti viene imposto un angolo di fase opportuno, è possibile creare una interferenza costruttiva con orientazione a piacere, in pratica un fascio sottile orientabile nello spazio.

### Dualismo onda corpuscolo

Il modello fisico di un fenomeno rende possibile trattare il fenomeno con gli adatti procedimenti matematici, lo rende "calcolabile". Le cosiddette "leggi" non sono altro che l'espressione matematica delle relazioni che intercorrono tra le grandezze che caratterizzano il fenomeno. Le relazioni matematiche sono, in un certo senso, il fenomeno, nel senso che permettono di simulare e prevedere il fenomeno.

Ma, diversamente dalla matematica, fondata su assiomi<sup>(8)</sup>, in fisica la validità del modello è verificata dall'esperimento: quando vi è contraddizione si può tentare di modificare il modello, ma in certi casi lo si rigetta completamente.

Storicamente la modellizzazione della luce in una teoria coerente ha mostrato un'alternanza di punti di vista: per i Greci particelle di luce partivano dall'occhio e illuminavano l'oggetto, per Newton particelle di luce si staccavano dall'oggetto e colpivano

---

<sup>(7)</sup> Dell'ordine delle migliaia.

<sup>(8)</sup> Affermazioni indimostrabili che possono venir accettate o meno, come nel caso dell'assioma delle rette parallele che sottostà alla geometria euclidea.

l'occhio, per Huygens e Fresnel la luce è un fenomeno invece ondulatorio, legato alla propagazione di un'onda, per Plank e Einstein la luce è nuovamente un insieme di particelle dotate di quantità di energia discrete, i fotoni.

I due modelli, ondulatorio e corpuscolare, sono apparentemente inconciliabili: l'onda riempie lo spazio, la particella concentra l'energia in un punto; si parla infatti di *dualismo onda-corpuscolo*. In effetti è piú corretto parlare di *modelli complementari*. Alcuni fenomeni, come l'interferenza e la diffrazione, sono ben interpretati con un modello ondulatorio, altri, come l'emissione della luce e l'effetto fotoelettrico sono ben interpretati con un modello corpuscolare.

### **Sorgenti di onde elettromagnetiche**

Se si parla della luce, le sorgenti sono solitamente a livello microscopico: sostanzialmente sono gli elettroni negli atomi e in particolare le variazioni del loro livello energetico che producono l'emissione di fotoni.

Il fenomeno si chiama *ionizzazione*: in una fiamma, in una scarica nel gas, come nei tubi al neon, elettroni degli strati piú esterni di un atomo vengono portati ad un livello di energia maggiore dello stato fondamentale dell'atomo neutro, in uno stato *eccitato* da cui decadono emettendo un fotone. La lunghezza d'onda della luce emessa dipende dal salto energetico. Questo non può avere un valore qualsiasi: deve essere un multiplo intero di una quantità (piccola) di energia.

Lo stesso fenomeno avviene in LED, pannelli luminescenti, ecc. Qui il salto energetico è determinato da una barriera di potenziale che gli elettroni devono superare per ricombinarsi, emettendo luce, con le buche (atomi privi di un elettrone). Variando la barriera di potenziale, varia il colore della luce emessa.

Il fenomeno di diseccitazione dell'elettrone avviene in tempi dell'ordine di 10 ns, e questo spiega l'incoerenza dell'emissione delle sorgenti termiche e in generale di LED. Per aver coerenza (angolo di fase nullo) occorre usare un altro fenomeno, l'emissione stimolata.

Per quanto riguarda invece le onde elettromagnetiche (onde radio) le sorgenti sono dispositivi della piú varia natura, che negli ultimi anni sono praticamente solo dispositivi a stato solido, semiconduttori. Tuttavia nel diffuso forno a microonde è una valvola che genera le microonde. Molti e sofisticati fenomeni fisici vengono

utilizzati per produrre onde elettromagnetiche, assicurare la stabilità e contemporaneamente la variabilità della frequenza della sorgente, generare elevati livelli di potenza, ecc.

Queste tecniche si sono evolute verso la digitalizzazione, che permette il diretto interfacciamento (scambio di dati) con i calcolatori.

## Laser

Caratteristica del laser è la coerenza della luce emessa: tutta la luce emessa è in fase, cosicché il fronte d'onda è anch'esso in fase. Il sistema è un'unica sorgente coerente che emette luce praticamente monocromatica concentrata in un fascio sottile. Il fenomeno può venir prodotto in un gas, in un liquido colorante, in un solido come un monocristallo di rubino artificiale<sup>(9)</sup> o infine prodotto nella barriera di potenziale di una giunzione in un semiconduttore (laser a stato solido).

In tutti questi diversi sistemi fisici, gas, liquido, solido, semiconduttore, il principio di funzionamento è il medesimo: gli atomi di una certa sostanza, in grado di emettere luce alla lunghezza d'onda voluta, vengono diseccitati in fase gli uni rispetto agli altri, pur occupando posizioni spaziali diverse. È l'onda di fotoni che diseccita gli atomi mentre si propaga nel mezzo che costituisce la sorgente laser. Un atomo della sostanza emette un fotone in fase con il fotone che lo diseccita: questo fenomeno si ripete per ogni atomo ed ecco che tutta la luce emessa è in fase. L'effetto viene incrementato se si racchiude la sorgente tra due specchi posti a una distanza pari a un numero intero di lunghezze d'onda, dando così origine ad una cavità risonante in cui si forma un'onda stazionaria di fotoni. Quando l'energia supera un certo limite, un fascio di luce emerge da uno degli specchi.

Esaminando un po' più a fondo il funzionamento del laser, apparentemente il fenomeno viola le leggi della termodinamica: normalmente gli atomi sono nello stato fondamentale, e quindi lo stato in cui la maggior parte degli atomi si trova nello stato adatto ad emettere luce coerente è molto improbabile.

La spiegazione di questa apparente violazione delle leggi della termodinamica sta nel fenomeno detto *pompaggio ottico*: una sostanza ausiliaria (nel laser elio-neon è l'elio che svolge questo

---

<sup>(9)</sup> Chimicamente si tratta di ossido di alluminio con impurità di cromo che danno il colore rosso caratteristico del rubino.

ruolo) viene anch'essa portata in uno stato eccitato, ma cede rapidamente la propria energia alla sostanza emettitrice, portandola in uno stato metastabile, in cui essa resta un tempo relativamente lungo<sup>(10)</sup> e da cui decade emettendo un fotone in fase (coerente) solo se stimolata da un fotone con stessa energia (monocromatico). Il fenomeno prende il nome di *emissione stimolata* ed è stato scoperto relativamente di recente: i primi laser risalgono agli anni '60.

Il laser vien comunemente usato per misure topografiche: i moderni scanner sono in grado di ricavare una descrizione tridimensionale dell'ambiente con precisione elevata in tempi ridotti. La scansione fa uso di specchi in movimento per deviare il fascio laser nella direzione voluta, un meccanismo comune nelle applicazioni del laser, dal lettore di codice a barre della cassa del supermercato al LIDAR, l'equivalente ottico del radar usato in meteorologia per la sua capacità, operando in una gamma di lunghezze d'onda dall'infrarosso all'ultravioletto, di rivelare i più piccoli componenti dell'aria come aerosol, polveri sottili, ecc.

Riassumendo, la lunghezza d'onda molto piccola, l'ampio intervallo di lunghezze d'onda ottenibili, il fascio molto stretto, la totale orientabilità, l'elevata sensibilità dei rivelatori, la portabilità e la relativa economicità ne fanno uno strumento non solo molto più preciso del radar, ma in grado di fornire risultati impensabili sino a pochi anni fa.

### **Effetto fotoelettrico**

Un fotone colpendo un atomo può venir assorbito, e al suo posto venir emesso un elettrone con una certa energia cinetica, libero di muoversi. Nei fotomoltiplicatori i fotoni vengono fatti incidere su un metallo con bassa energia di estrazione, cioè con elettroni dello strato esterno debolmente legati, come il cesio. Una opportuna differenza di potenziale accelera i pochi elettroni estratti dal metallo (al limite uno solo) che vengono fatti cadere su un altro elettrodo da cui vengono estratti elettroni in numero maggiore che vengono a loro volta accelerati, fatti cadere su un altro elettrodo, ecc. Il numero di elettroni cresce in progressione geometrica e alla fine la corrente così ottenuta può venir rivelata e misurata.

---

<sup>(10)</sup> Sulla scala dei fenomeni nell'atomo si tratta di decine di nanosecondi.

---

Nei dispositivi a stato solido il fotone incidente, interagendo con gli atomi della giunzione, genera una coppia buca-elettrone che il campo elettrico della giunzione separa, dando origine a una corrente (fotodiodo). I dispositivi usati per le immagini funzionano nello stesso modo, ma il problema è trasferire all'esterno della matrice di fotodiodi (pixel) la carica accumulata sotto ogni fotodiodo. I dispositivi ad accoppiamento di carica (Nobel 2009) (*Charge Coupled Device, CCD*) applicando una opportuna sequenza di opportune ddp agli elettrodi posti su fotodiodi adiacenti, trasferiscono la carica da un fotodiodo all'altro, fino al termine della superficie sensibile, dove sta la parte di circuito che converte questi accumuli di carica in differenze di potenziale.

La sensibilità è uno dei punti di forza dei CCD: in teoria e in pratica è possibile rivelare anche un solo fotone. Gli astronomi per primi hanno fatto buon uso di questa eccezionale sensibilità, ma praticamente tutte le telecamere per uso scientifico e non, da quelle poste sui satelliti a quelle casalinghe, fanno uso di CCD.