

# Onda

Sostantivo femminile, dal latino **unda**. Increspatura di una superficie liquida per l'azione del vento o di altre cause, detto specialmente del mare, di un lago e simili.

## In Fisica

L' **onda** è una perturbazione di una grandezza fisica che si propaga in un dato mezzo o nello spazio, in senso stretto si parla di *onda* quando la perturbazione che si diffonde ha carattere oscillante.

### Alcune utili definizioni :

**Onda longitudinale.** Onda in cui la direzione di propagazione è parallela alla direzione dell'oscillazione da cui si propaga.

**Onda monocromatica o sinusoidale di frequenza  $\omega$ .** Onda in cui l'oscillazione che si propaga è un moto armonico di frequenza  $\omega$ .

**Onda persistente.** Onda la cui ampiezza si mantiene costante nel tempo.

**Onda piana.** Onda in cui le superfici d'onda formano un fascio composto di piani paralleli.

**Onda progressiva e regressiva.** Concetti di Fisica.

**Onda sferica,** ovvero onda in cui le superfici d'onda sono sfere concentriche.

**Onda smorzata,** treno d'onda in cui l'intensità decresce nel tempo, in particolare si assume che l'ampiezza d'onda decresca con legge esponenziale.

**Onda stazionaria,** moto ondoso prodotto dall'interferenza di onde di frequenza uguale a una frequenza di risonanza di una cavità o di un corpo elastico. Esso è caratterizzato da una ampiezza d'onda costante nel tempo in ogni punto, variabile da punto a punto **e nulla nei nodi di vibrazione.**

**Onda trasversale,** onda la cui direzione di propagazione è perpendicolare alla direzione dell'oscillazione che si propaga.

**Ampiezza d'onda,** per un'onda alternata sinusoidale, l' ampiezza dell'onda è la elongazione massima del moto armonico che si propaga. Si può definire anche per *onde* non sinusoidali come il valore massimo raggiunto in un punto dalla grandezza che si propaga.

**Equazione d'onda,** equazione differenziale che descrive la propagazione di un'onda:

***L'equazione del grande studioso d'Alembert è l'equazione d'onda delle onde elastiche ed elettromagnetiche.***



Jean Le Rond d'Alembert grande matematico e filosofo francese.

**Fronte o superficie d'onda,** per un'onda in cui la grandezza che si propaga ha un carattere oscillante regolare, esso è il luogo dei punti in cui la grandezza è simultaneamente nella stessa fase. Si può definire un *fronte d'onda* anche per onde non oscillanti.

**Funzione d'onda,** funzione che soddisfa un'equazione d'onda.

**Lunghezza d'onda,** simbolo  $\lambda$  (lettera elle), spazio percorso da un'onda sinusoidale durante un periodo di oscillazione

**$T = \lambda/v$ .** (Vale  $\lambda = cT$  dove  $c$  è la velocità di propagazione dell'onda.)

Si può definire una *lunghezza d'onda* anche per onde generate da un'oscillazione regolare ma non armonica come la distanza tra due successive superfici d'onda in fase.

**Onde di probabilità,** onde introdotte dalla meccanica quantistica per descrivere il moto delle particelle subatomiche.

**Onde di pressione**, onde elastiche in un fluido.

**Onde di compressione o di espansione**, onde elastiche longitudinali.

**Onde d'urto**, onde prodotte da una sorgente che si muove in un mezzo con velocità superiore alla velocità di propagazione delle onde in quel mezzo. Si tratta di un fenomeno caratteristico delle **onde soniche** nei fluidi ma si osserva anche un fenomeno analogo per le **onde luminose, noto come effetto Cerenkov**.

**Onde elastiche**, onde di compressione o di distorsione che si propagano in un mezzo elastico.

**Onde elettromagnetiche o hertziane**, onde trasversali determinate dalla propagazione nel vuoto o in un dielettrico del campo elettromagnetico, **i raggi G (gamma) e i raggi X, la luce e le radioonde sono onde elettromagnetiche**.

**Onde gravitazionali**, onde trasversali previste dalla relatività generale, consistenti nella propagazione del campo gravitazionale prodotto da masse accelerate. La propagazione dovrebbe avvenire tramite un quanto detto **gravitone**.

**Onde luminose**, onde elettromagnetiche di lunghezza compresa nello spettro visibile.

**Onde solitarie o solitoni**, onde che conservano indefinitamente la propria energia e la propria forma.

**Onde soniche o sonore**, onde di compressione che si propagano in un fluido e in particolare nell'aria, dette anche onde acustiche o **onde di Mach**. Per *onda sonora* si intende un'onda di compressione di frequenza compresa nel campo di udibilità dell'orecchio umano.

**Onde superficiali**, onde che si propagano nella superficie di separazione di due fluidi.

**Onde radio o radioonde**, onde elettromagnetiche di lunghezza compresa tra il millimetro (**le microonde**) e qualche chilometro (**onde lunghe**), utilizzate per le telecomunicazioni. A differenza delle radiazioni di lunghezza d'onda inferiore alla luce queste onde possono essere riflesse dalla ionosfera, questo fatto rende possibili le comunicazioni a grandissima distanza.

**Onde termiche**, propagazione di energia termica che, in particolari condizioni di temperatura assai prossima a 0 K (zero gradi Kelvin) assume carattere ondulatorio. Sono dette anche *secondo suono*, in contrapposizione all'onda sonora chiamata *primo suono*.

**Onda pilota**, onda radio (telecomunicazioni) emessa per servire come frequenza di riferimento.

## **Analogie e fenomeni simili tra geografia e fisica delle onde.**

Le **onde** sono dovute generalmente all'azione del vento, che colpendo la superficie del mare o di un lago vi determina una pressione e un attrito, o al fenomeno delle maree. In alcuni casi, sono generate da un maremoto provocato da un terremoto o da un'eruzione vulcanica sottomarina, con effetti molto ridotti, le onde sono dovute alla caduta di un corpo in acqua e al movimento di un corpo parzialmente immerso, come una nave.

Per quanto riguarda la terminologia riferita alle onde, si dice **cresta** la parte più elevata dell'onda, mentre le diciture **cavo, gola, solco, valle, ombra e ventre**, la parte più bassa, **altezza dell'onda** è il dislivello tra una cresta e la gola successiva.

La **lunghezza dell'onda** è la distanza fra due creste o due gole successive (che, in marina, è per lo più trenta volte circa l'altezza), il **profilo dell'onda** è la sezione dell'onda su un piano verticale orientato secondo la direzione di propagazione, **periodo dell'onda** è l'intervallo di tempo (delta T) fra il passaggio di due creste successive nello stesso punto, mentre la **velocità dell'onda**, lo spazio percorso apparentemente da una cresta o da una gola nell'unità di tempo.

Sebbene a un osservatore le onde sembrino muoversi sulla superficie dell'acqua, **in effetti ciò che si propaga è solo l'oscillazione "il moto oscillatorio"** senza che avvenga trasporto di materia. Infatti le particelle d'acqua si muovono intorno a un centro d'oscillazione fisso posizionato lungo una traiettoria chiusa circolare o ellittica (come le onde trocoidali di **Gerstner** e le onde sinusoidali di **Airy**).

Quando le onde interessano uno spessore limitato della massa d'acqua, come avviene in alto mare, si parla di **onde di acqua alta**, che avvengono come oscillazioni libere con traiettorie circolari, il cui diametro diminuisce, fino ad annullarsi, verso il basso. Quando interessano tutto lo spessore della massa d'acqua, come avviene presso le coste, si parla di **onde di acqua bassa**, nelle quali le traiettorie delle particelle da circolari diventano, verso il fondo, ellittiche, poiché il ventre dell'onda viene frenato dall'attrito sul fondo. In mare aperto le oscillazioni si propagano nella direzione del vento, ma possono verificarsi interferenze fra vari sistemi di onde, le une generate dal vento che sta spirando e dette **onde vive**, le altre generate precedentemente da un vento ormai caduto e dette **onde morte**. Presso la costa le onde assumono una direzione di propagazione perpendicolare a essa adattandosi al suo contorno. Quando l'onda incontra un ostacolo netto, come una costa alta, si generano **onde riflesse**, che interferiscono con quelle incidenti dando luogo a **onde d'interferenza** che raggiungono grandi altezze, accompagnate da onde secondarie di **risacca**, o a **onde stazionarie** (o **clapotis**), nelle quali le particelle d'acqua oscillano lungo una linea verticale, senza che si produca la risacca.

Quando l'oscillazione incontra un fondale basso o una costa in pendio diminuisce la lunghezza dell'onda e aumenta l'altezza, il ventre dell'onda viene frenato dall'attrito sul fondo, finché si rompe l'equilibrio e la cresta cade in avanti dando origine a un'onda di traslazione con trasporto di materia. Si forma un flutto, un frangente che si spinge verso la spiaggia e che ritorna indietro dando origine alla risacca, che favorisce il frangersi delle onde successive.

**La valutazione dell'altezza, della lunghezza e degli altri elementi dell'onda è difficile**. Un metodo di misura è basato su rilievi aerofotogrammetrici; per determinare l'altezza delle onde è stato messo a punto nel 1956 dall'Istituto oceanografico di Wormley, Surrey, uno strumento (detto Shipborne wave recorder), utilizzabile a bordo di una nave, che registra costantemente l'altezza dell'acqua al di sopra di una superficie di riferimento calcolata indipendentemente dalla posizione della nave.

Tale strumento ha registrato, con un'approssimazione del 10%, onde di quasi 18 metri di altezza. Per quanto riguarda le misure di altri elementi dell'onda, sembra che onde del tutto eccezionali possono raggiungere una lunghezza di 900 metri con una altezza di 20 metri e un periodo di 24 secondi.

Presso i litorali viene misurata la pressione esercitata dalle onde, la cui conoscenza è necessaria nella progettazione di opere portuali o di difesa della costa. Infatti la pressione esercitata dalle onde, che può raggiungere alcune decine di tonnellate per metro quadrato, può determinare una notevole azione distruttiva su ogni manufatto. L'abrasione, cioè l'azione meccanica esercitata dal mare, soprattutto dal suo moto ondoso, comporta fenomeni di demolizione, di trasporto e di deposito. Le onde hanno un'azione demolitrice specie lungo le coste alte, accompagnata però anche da un'azione di deposito, alla base di queste, dei materiali asportati alla parete rocciosa. Sulle coste basse si ha una notevole azione di trasporto da parte dei flutti incidenti e della risacca e una azione di deposito lungo quelle linee, dette neutre, in cui si annullano, per compensazione, i movimenti del flutto incidente e della risacca, per cui si formano cordoni e lidi.

## Propagazione delle onde in FISICA

### Pacchetto d'onde

Si osserva che la perturbazione di una data grandezza fisica in una certa regione dello spazio si trasmette alle regioni circostanti, **questo comportamento comune a molti fenomeni fisici di natura del tutto diversa** è noto come propagazione delle onde. La propagazione del suono, della luce, delle vibrazioni in un mezzo elastico (come in una corda), delle perturbazioni della superficie libera dell'acqua sono gli esempi più comuni di questo comportamento.

La superficie che separa nello spazio la zona perturbata da quella ancora in quiete è detta **fronte d'onda** o semplicemente **onda**. Uno degli elementi caratterizzanti delle onde è la loro **velocità di propagazione** che è la velocità di avanzamento del fronte d'onda rispetto al mezzo che attraversa o, nel caso della propagazione nel vuoto, rispetto a un qualsiasi sistema di riferimento inerziale. La propagazione per onde di qualsiasi natura è sempre accompagnata dalla propagazione di una forma di energia e di un impulso. I tipi più semplici di propagazione ondosa, come le onde elettromagnetiche e le onde elastiche, si possono descrivere mediante **l'equazione di d'Alembert**:

$$\Delta\varphi - \frac{1}{u^2} \frac{\partial^2\varphi}{\partial t^2} = 0$$

dove  $\Delta$  è il laplaciano,  $j$  è la grandezza fisica che si propaga e  $u$  è la velocità di propagazione.

Nei problemi mono e unidimensionali nei quali la perturbazione si può propagare solo lungo una direzione ben definita, fissata a un certo istante iniziale  $t_0$  la forma della perturbazione  $j$  si osserva negli istanti successivi  $t$  che la perturbazione si sdoppia e si sposta con velocità costante  $u$  nei due sensi (**onde progressive e onde regressive**) senza mutare la sua forma iniziale. Per le onde in due o tre dimensioni la soluzione generale dell'equazione di d'Alembert è un po' meno semplice perché in questi casi la propagazione è di solito accompagnata dalla modificazione e dallo sparpagliamento della perturbazione iniziale da cui segue una progressiva attenuazione dell'entità della perturbazione.

Una semplice soluzione particolare dell'equazione è  $j = A \cos 2\pi n (t z/u)$  che rappresenta un'onda piana monocromatica di frequenza  $n$  e ampiezza  $A$  che si propaga nella direzione dell'asse  $z$ . Ogni altra soluzione e quindi ogni altra forma d'onda può esser generata da una sovrapposizione di onde piane di direzione e frequenza opportune. Sono particolarmente importanti quelle onde in cui la perturbazione che si propaga ha carattere oscillante; in questo caso la decomposizione spettrale in onde monocromatiche piane è particolarmente semplice: nel caso di propagazione unidimensionale lo spettro di un'onda oscillante è formato da una frequenza fondamentale uguale alla frequenza dell'oscillazione e da armoniche superiori le cui frequenze sono multipli interi di quella fondamentale.

Quando la perturbazione che si propaga è contenuta in una regione limitata dello spazio (**gruppo, treno o pacchetto d'onde**) lo spettro di frequenze è continuo ed è tanto più ampio quanto più piccolo è il pacchetto d'onde. Quando la velocità di propagazione non dipende dalla frequenza come nelle onde descritte dall'equazione di d'Alembert, la velocità del pacchetto d'onde è uguale a quella delle onde monocromatiche componenti.

In molti casi si osserva invece una dipendenza più o meno marcata della velocità di propagazione dalla frequenza, esempi tipici di questo comportamento sono la propagazione delle onde elettromagnetiche in un mezzo dispersivo, in cui l'indice di rifrazione varia con la frequenza, e le onde superficiali in un liquido. In questi casi si osserva che la velocità di propagazione del pacchetto d'onde, detta **velocità di gruppo**, è minore della velocità delle singole onde monocromatiche componenti, detta **velocità di fase**. In particolare la velocità di gruppo di un treno d'onde formato dalla sovrapposizione delle onde monocromatiche contenute in una stretta banda di frequenze risulta uguale alla formula  $dn/dk$  dove  $k$  è il numero d'onda. Tutti i tipi di propagazione ondosa possono generare in condizioni opportune i fenomeni della riflessione, della rifrazione, della diffrazione e della interferenza.

## Onde elastiche

Le deformazioni di un qualsiasi mezzo elastico si possono descrivere con un campo vettoriale ***S*** che dà in ogni punto ***P*** il valore ***S(P)*** dello spostamento dalla posizione di equilibrio.

***La deformazione prodotta in un certo istante si propaga nel mezzo elastico e le onde che ne risultano sono dette appunto onde elastiche.***

***Il campo vettoriale *S* si può decomporre nella somma di un campo  $S_1$  irrotazionale ( $\text{rot } S_1 = 0$ ) e un campo solenoidale  $S_2$  ( $\text{div } S_2 = 0$ ).***

Entrambi questi campi soddisfano l'equazione di d'Alembert e quindi generano una propagazione ondosa che però ha nei due casi una struttura differente. Il campo irrotazionale dà origine a onde longitudinali dette ***onde irrotazionali di compressione o di dilatazione con una velocità di propagazione *u**** pari a valori ben descritti nelle formule relative: dove ***l*** e ***m*** sono le costanti di Lamé (Elasticità) e ***r*** è la densità del mezzo. Le onde di propagazione del campo solenoidale, dette ***onde rotazionali o di distorsione***, sono onde trasversali di velocità minore della velocità delle onde di compressione. In ogni corpo solido ogni perturbazione si propaga come una sovrapposizione di onde longitudinali e trasversali (come *le onde sismiche*), le onde di distorsione possono propagarsi solo nei mezzi incompressibili in quanto solo in questo caso esistono delle deformazioni solenoidali. Nei gas si propagano solo onde longitudinali (***onde soniche o sonore***), la velocità di propagazione ***u<sub>s</sub>*** vale secondo la propria formula dove ***p*** è la pressione ed ***r*** la densità. In particolare per un gas perfetto la velocità dipende dalla temperatura assoluta ***T*** e dal peso molecolare ***M***:  $u_s^2 = gRT/M$  (dove ***g*** è il rapporto tra i calori specifici a pressione e a volume costante e ***R*** la costante dei gas perfetti). Quando le deformazioni elastiche o le compressioni sono molto grandi la propagazione delle onde non soddisfa esattamente l'equazione di d'Alembert, ma compaiono degli effetti non lineari per cui ad la velocità di propagazione non dipende solo dalle proprietà del mezzo ma anche dalle caratteristiche dell'onda che si propaga. Per esemplificare quando l'intensità del suono è molto elevata la velocità cresce con l'ampiezza dell'onda, infatti le compressioni adiabatiche che si propagano in un gas sono associate ad un aumento di temperatura tanto maggiore quanto più elevata è la compressione, d'altra parte l'aumento di temperatura determina l'aumento delle velocità di propagazione delle onde e delle onde sonore.

## Onda gravitazionale

Sorgenti di onde gravitazionali sono in genere associate a oggetti compatti, massicci e in rapido movimento. Sono stati compiuti studi teorici sulla emissione di radiazione gravitazionale da parte di sistemi binari molto stretti con componenti compatte (nane bianche, stelle di neutroni, pulsar binari), di collassi asimmetrici di supernovae e di materia in caduta verso buchi neri massicci. Se il flusso di onde gravitazionali fosse dovuto a conversione di massa in energia, nel nucleo galattico, è stato calcolato che la diminuzione della massa dovrebbe comportare una espansione della Galassia. Risultati osservati sembrano escludere che ciò avvenga con la velocità richiesta. Una ulteriore controindicazione a questo meccanismo deriva dal fatto che la massa iniziale del nucleo galattico avrebbe dovuto essere nel passato così grande da determinare la disgregazione, per effetto mareale degli ammassi globulari che invece sono osservati in gran numero nell'alone galattico. Anche il passaggio della Supernova Grande Nube di Magellano non ha fornito prove indiscutibili a suffragio della **teoria di Weber**.

## Onde solitarie o solitone

Sono conosciute da tempo nella fisica classica soluzioni delle equazioni della idrodinamica che danno luogo a ***onde solitarie***. Sembra che esse siano state osservate sulla superficie dell'acqua. Verso la fine degli anni Settanta queste soluzioni hanno costituito materia d'interesse per la fisica delle particelle elementari poiché ***i solitoni hanno molte proprietà in comune con il comportamento ondulatorio delle particelle secondo la meccanica quantistica*** (un solitone e un antisolitone interferiscono annichilandosi esattamente come una particella e con una antiparticella).

## Onde superficiali

Fra le onde elastiche superficiali hanno assunto importanza le ***onde di Rayleigh***, caratterizzate dal fatto che il moto della particella è ellittico anziché trasversale o longitudinale, su tali onde si basano dispositivi chiamati a onda superficiale nei quali l'onda si propaga alla superficie di quarzi mediante l'applicazione di un segnale elettrico a un trasduttore di entrata e il rilievo di un corrispondente segnale elettrico a un secondo trasduttore di uscita. Il dispositivo si comporta come un filtro acustico (o una linea di ritardo acustica) la cui curva di risposta è prevedibile a priori, essendo legata in modo noto ai dati geometrici del dispositivo.

## Onde termiche

Nelle condizioni usuali, a temperatura ordinaria un fluido isoterma è un sistema termodinamico costituito da molecole in moto disordinato, quando se ne riscalda una parte la propagazione del calore è una propagazione di energia cinetica disordinata per effetto del disordine iniziale e valgono le leggi della fisica classica.

Analogamente un solido ha una struttura cristallina generalmente ricca di difetti anche se l'energia cinetica delle molecole è minore la presenza dei difetti rende disordinata la propagazione del calore. Ma quando il sistema è un liquido superfluido, a temperatura di pochi gradi Kelvin, ad esempio il gas Elio, l'energia cinetica iniziale è quasi nulla. Le condizioni fisiche del sistema (densità, entropia) sono tali che la propagazione del calore ha carattere ondulatorio, fenomeno sperimentalmente verificato per l'elio liquido attorno a 4 K dove è rilevato il carattere ondulatorio della propagazione del calore anche per l'elio solido con temperatura minore di 1 K e per il fluoruro di sodio. Ciò si spiega con il fatto che a temperature prossime a 0 K oltre che essere minima l'energia cinetica molecolare sono anche minime le cause di resistenza meccanica alla propagazione, mentre è massima la purezza dei cristalli. Per una analisi precisa di tali fenomeni, che hanno carattere quantistico, occorre far riferimento alla **nozione di fonone**.

## Onde nei fluidi

Nei fluidi oltre alle semplici onde longitudinali di compressione si possono propagare in prossimità della superficie di separazione tra un fluido e l'altro (ad esempio aria e acqua) delle onde di struttura molto complicata dette **onde superficiali**. La propagazione di queste onde sul pelo libero dei liquidi e in particolare dell'acqua è imputabile a due meccanismi differenti: a ogni deformazione della superficie di equilibrio si oppone innanzi tutto la forza di gravità che è proporzionale alla massa di liquido spostato, la presenza di questa forza di richiamo provoca la propagazione di **onde di gravità**, come ad esempio le **onde marine**. Nelle acque molto profonde la traiettoria di una particella liquida investita da un'onda di gravità è approssimativamente una circonferenza contenuta in un piano perpendicolare alla superficie e parallelo alla direzione di propagazione, il diametro della circonferenza diminuisce con le profondità, il profilo dell'onda è approssimativamente una trocoide (**onda trocoide di Gerstner**) e la velocità di propagazione **u** è direttamente proporzionale alla radice quadrata della lunghezza d'onda **l**: dove **g** è l'accelerazione di gravità.

Quando la profondità non è sufficientemente grande le traiettorie diventano delle ellissi con l'asse maggiore parallelo alla superficie libera (**onda di Airy**). Una analisi più dettagliata di questo fenomeno, dovuta a Levi Civita, mostra che le traiettorie delle particelle liquide non sono chiuse ma vi è un leggero spostamento della massa d'acqua in direzione della propagazione, inoltre la velocità di propagazione dipende anche dall'ampiezza dell'onda in esame.

Quando la lunghezza d'onda è molto piccola, inferiore a 1,72 centimetri, la forza di richiamo dovuta alla gravità è trascurabile mentre entra in gioco la forza dovuta alla tensione superficiale, questo nuovo meccanismo determina una diversa legge di propagazione: le onde che ne risultano sono dette **onde capillari**. La velocità di propagazione è in questo caso inversamente proporzionale alla radice quadrata della lunghezza d'onda: dove **t** è la tensione superficiale e **r** la densità. Per onde con **lunghezza d'onda "l"** di qualche centimetro la velocità di propagazione dipende sia dalle forze di gravità sia dalle tensioni superficiali e precisamente si ottiene con la sua formula.

## Onde d'urto

La comparsa dell'onda d'urto è dovuta alla manifestazione della compressibilità dell'aria alle grandi velocità. Una onda d'urto si genera per l'accumularsi delle onde di pressione, ovvero di onde sonore, che ogni mobile in movimento genera intorno a sé, quando la sua velocità uguaglia o supera la velocità del suono. L'aria subisce allora una brusca variazione di pressione e di temperatura su di una superficie che si sposta insieme al corpo in movimento: si tratta dell'onda d'urto, avente la forma di un cono di rivoluzione che ha per vertice la posizione attuale del mobile, quando questo è di dimensioni sufficientemente ridotte. L'inclinazione dell'onda in rapporto alla direzione del moto è funzione della velocità. Il semiangolo **a** all'estremità del cono è tale che si ha

$$\sin \alpha = \frac{a}{V} = \frac{1}{M}$$

dove **M = V/a** è il **numero di Mach**, cioè il rapporto tra la velocità **V** del corpo e la velocità locale **a** del suono.

Si generano onde d'urto anche quando un gas si espande in un condotto convergente-divergente (**ugello di Laval**) come nelle gallerie aerodinamiche supersoniche e quando si ha un'esplosione in aria o nell'acqua. Le basi per la teoria delle onde d'urto sono state poste da B. Riemann (1860) e da H. Hugoniot (1885) che hanno descritto l'onda d'urto come una discontinuità di pressione. Per questa ipotesi un'onda d'urto produce al suo passaggio l'immediato aumento della pressione e della temperatura. Il fluido viene trascinato dall'onda a **una velocità u inferiore a V**.

### ESEMPIO DI ONDA D'URTO

Per un'onda d'urto che si muova nell'aria a una velocità **V = 1.500 m/s** la teoria di Hugoniot dà, per l'aumento di pressione

**P<sub>2</sub> P<sub>1</sub> = 22,2 kg/cm<sup>2</sup>** e per l'aumento di temperatura **T<sub>2</sub> T<sub>1</sub> = 1.075 °C**.

In realtà non si verifica una discontinuità notevole ma esiste una zona di transizione di spessore ridottissimo, nell'ordine di 1 millesimo di millimetro. È su questa distanza che si producono gli sbalzi di pressione e di temperatura ed è questo che spiega gli effetti distruttivi delle onde d'urto molto intense, come quelle prodotte dalla detonazione degli esplosivi, cui si riferisce l'esempio precedente.

Le onde d'urto possono essere osservate con metodi ottici basati sulle variazioni dell'indice di rifrazione del fluido al passaggio dell'onda.

Nel caso di un aereo le onde d'urto appaiono parecchio prima che questo abbia raggiunto la velocità del suono. In effetti alcune superfici, come l'extradosso dell'ala, sono sedi di supervelocità locali. Dal momento in cui l'aereo entra nella zona delle velocità transoniche (cioè tra 800 e 900 km/h), appaiono localmente delle onde d'urto, che assumono la forma di un lambda ( $\lambda$ ), la zona di flusso supersonico si trova tra le due gambe del lambda.

Le onde d'urto provocano un'ulteriore resistenza all'avanzamento e sono la causa della detonazione (bang sonico) provocata dagli aerei supersonici.

### Onde e Telecomunicazioni

Per la filodiffusione si impiegano lunghezze d'onda situate nella gamma delle *onde lunghe*, oltre i 1.000 metri, nelle trasmissioni radiofoniche si usa la gamma delle *onde medie*, fra 200 e 600 metri, e delle *onde corte* fra 10 e 100 metri.

In modulazione di frequenza si impiegano onde metriche. In televisione le emissioni vengono effettuate su lunghezze d'onda di poco superiori o inferiori al metro. Alcuni radar emettono e ricevono nella gamma delle onde millimetriche, mentre i ponti-radio telefonici utilizzano le onde centimetriche. I sistemi di telecomunicazione basati su microonde (telecomunicazioni via satellite, telefoni cellulari) arrivano alle decine di GHz (miliardi di cicli al secondo) e con le fibre ottiche alle centinaia e oltre.

### Nodo di vibrazione o nodo d'oscillazione, o semplicemente nodo.

Punto di un'onda stazionaria in cui l'ampiezza di oscillazione è nulla. La comparsa dei *nodi di vibrazione* è un fenomeno del tutto generale che caratterizza le onde stazionarie sia elastiche sia elettromagnetiche. Nei sistemi unidimensionali come le corde vibranti i nodi o punti nodali sono disposti regolarmente a distanza costante l'uno dall'altro: così per es. in una corda fissata tra due punti A e C, se a un quarto della sua lunghezza si pone un cuneo B e si fa vibrare il segmento AB, anche la parte BC entra in vibrazione; i nodi la dividono in parti di lunghezza uguale ad AB.

Nelle onde stazionarie bidimensionali, come nel caso delle vibrazioni proprie di una piastra o della superficie libera di un liquido, si osservano delle linee di vibrazione nulla o linee nodali. Le onde stazionarie tridimensionali che determinano le vibrazioni proprie di un qualsiasi corpo elastico e i modi fondamentali (RISONANZA) di vibrazione di una cavità risonante, sono caratterizzate da superfici di vibrazione nulla o superfici nodali. La struttura geometrica dei punti, delle linee e delle superfici nodali dipende dalle proprietà geometriche e fisiche del corpo o della cavità e dal particolare modo di vibrazione che viene eccitato, a sua volta dipendente dalla frequenza.

### Risonanza (dal latino *resonantia*).

Fenomeno che si manifesta in un sistema fisico (meccanico, acustico, elettrico, elettromagnetico, ultrasonico, ipersonico e supersonico) sottoposto a delle sollecitazioni esterne periodiche di natura opportuna (azioni meccaniche o elettriche, onde sonore o elettromagnetiche) consistente nel prodursi, per particolari valori della frequenza delle sollecitazioni (**frequenze di risonanza**), di oscillazioni di ampiezza molto grande e di un corrispondente forte assorbimento di energia dall'esterno.

**Risonanza atomica**, fenomeno di interazione tra un atomo o una molecola e le onde elettromagnetiche consistente nell'assorbimento, associato a una transizione del sistema da un livello energetico a un altro, di radiazioni di frequenza determinata da parte dell'atomo o della molecola.

**Risonanza elettromagnetica**, fenomeno che si manifesta in uno spazio sede di onde elettromagnetiche (ad es. una guida d'onda), consistente nel fatto che l'intensità del campo elettrico o magnetico assume valori massimi a determinate frequenze.

**Risonanza hertziana**, risonanza elettromagnetica che si osserva a frequenze comprese nello spettro delle onde hertziane (onde radio, onde radar).

**Risonanza magnetica o paramagnetica**, risonanza atomica che si produce tra due **sottolivelli di Zeeman**.

Questi sottolivelli hanno energie differenti solo in presenza di un campo magnetico perciò solo in queste condizioni si osserva la *risonanza*, la frequenza di risonanza dipende dall'intensità del campo magnetico.

Con i campi magnetici prodotti in laboratorio le frequenze di risonanza sono sempre comprese nel campo delle onde hertziane.

**Risonanza ottica**, risonanza atomica che si osserva a frequenze comprese nello spettro infrarosso, visibile e ultravioletto.

**Risonanza nucleare**, fenomeno analogo alla risonanza atomica che si osserva nelle reazioni nucleari, rivelabile dall'aumento della probabilità di verificarsi di una data reazione per determinati valori dell'energia delle particelle iniziali.

**Energia di risonanza**, energia di un fotone di frequenza corrispondente a una frequenza di risonanza.

Nelle risonanze nucleari, energia della particella proiettile corrispondente a un picco di risonanza.

Frequenza di risonanza, frequenza delle oscillazioni che si manifestano in un sistema in condizioni di risonanza.

**Curva di risonanza**, diagramma dell'ampiezza dell'oscillazione, o dell'energia corrispondente, d'un sistema che dà luogo a risonanza, in funzione della frequenza.

### La risonanza in Fisica

Ogni sistema capace di vibrare con una determinata frequenza oscilla con un'ampiezza che può diventare molto grande quando esso è sottoposto a impulsi periodici, di frequenza prossima a quella libera o propria del sistema che è la frequenza di oscillazione libera o naturale: tale fenomeno ha il nome di **risonanza**. Il più semplice esempio di *risonanza meccanica* è quello del pendolo, le cui oscillazioni diventano di grande ampiezza solo se è sottoposto a impulsi accordati sulla sua frequenza propria. Secondo questo stesso principio si mettono in moto anche le campane. L'esperienza più caratteristica di *risonanza acustica* è quella dei diapason risonanti: due diapason uguali, e quindi dotati della stessa frequenza propria, siano posti vicini, si

ecciti uno dei diapason e dopo pochi secondi lo si arresti bruscamente: si sente allora il suono proveniente dal secondo diapason che è stato posto in vibrazione dall'onda sonora emessa dal primo (**risonanza per simpatia**). Un sistema costituito da una massa puntiforme  $m$  soggetta a una forza di tipo elastico esercitata da una molla di costante  $k$  alla resistenza del mezzo e a una forza eccitatrice  $F(t) = F_0 \sin \omega t$ , funzione sinusoidale del tempo si muove di moto armonico con ampiezza

calcolata dalla sua formula, dove  $r$  è il coefficiente di resistenza del mezzo (Vibrazione), si può dimostrare che tale ampiezza diventa massima quando la forza eccitatrice ha frequenza come nella sua appropriata formula. L'energia del sistema elastico è invece massima quando la frequenza di  $F(t)$  è formulata con calcoli appositi. Nel caso ideale in cui la resistenza del mezzo sia nulla, tali frequenze e la frequenza delle oscillazioni libere coincidono e l'ampiezza di vibrazione tende all'infinito.

Considerazioni identiche si possono fare nel caso di un circuito elettrico costituito da una resistenza  $R$ , un'induttanza  $L$  e una capacità  $C$  in serie, sottoposto a una tensione  $V(t) = V_0 \sin \omega t$ , sostituendo  $F(t)$  con  $V(t)$ ,  $m$  con  $L$ ,  $r$  con  $R$  e  $k$  con  $1/C$  e  $A$  con

la massima carica  $Q$  sulle armature del condensatore. La corrente che percorre il circuito è massima quando  $V(t)$  ha frequenza valutata (con le sue formule specifiche) e in tali condizioni (**condizioni di risonanza**) è in fase con la tensione applicata, certe parti del circuito possono così essere sottoposte a degli eccessi di tensione che rischiano di portare alla rottura degli isolanti.

La **risonanza magnetica** si osserva in presenza di un intenso **campo magnetico  $H$**  negli atomi e nelle molecole dotate di un momento angolare (e quindi un momento magnetico) non nullo. La frequenza di risonanza  $n$  associata ad un determinato livello  $A$  è data dalla relazione  $n = g/2\pi H$  dove  $g$ , detto **rapporto giromagnetico**, è il rapporto tra il momento magnetico e il momento angolare del livello  $A$ . Di solito il momento magnetico di un atomo è dovuto essenzialmente allo *spine* al momento angolare orbitale dei suoi elettroni, come nelle sostanze paramagnetiche e nei centri paramagnetici di sostanze diamagnetiche; in questo caso si parla di **risonanza paramagnetica elettronica (R.P.E.)**. In alcuni casi il momento magnetico risultante di tutti gli elettroni di un atomo è nullo (atomi di sostanze diamagnetiche): inoltre nella maggior parte delle molecole gli elettroni dei singoli atomi che le compongono si dispongono in maniera tale da annullare il momento magnetico totale, in queste due circostanze si possono osservare risonanze magnetiche dovute al momento magnetico dei nuclei o **risonanze magnetiche nucleari (R.M.N.)**.

Il rapporto giromagnetico del nucleo è generalmente molto più piccolo (circa 1000 volte) di quello dell'atomo perciò gli spettri R.M.N. sono più difficili da osservare, tuttavia godono del vantaggio, rispetto alle R.P.E., di non essere facilmente disturbati dalle perturbazioni esterne, essendo i nuclei schermati dagli elettroni che li circondano. In chimica si va sempre più estendendo il metodo delle R.M.N. per conoscere il campo magnetico in cui è immerso il nucleo di un atomo, questo campo differisce da quello esterno prodotto da un elettromagnete per la presenza di un debole campo locale prodotto dalla molecola in prossimità

### Risonanze nelle telecomunicazioni

Nelle apparecchiature radio il **fenomeno della risonanza viene utilizzato nei circuiti oscillanti** costituiti da una induttanza e da una capacità collegati sia in serie sia in parallelo. In tali circuiti il valore della corrente o rispettivamente della tensione raggiungono valori massimi quando la frequenza applicata è di un determinato valore (formule serie e parallelo), dove  $f_r$  è la

**frequenza di risonanza**,  $L$  l'induttanza,  $C$  la capacità e  $R$ ,  $R_C$ ,  $R_L$  le resistenze.

Se  $R_L = R_C$  le due frequenze di risonanza coincidono. In condizioni di risonanza in serie, la reattanza induttiva e quella capacitiva assumono il medesimo valore e si elidono reciprocamente, così che l'impedenza assume il valore minimo corrispondente alla sola resistenza ohmica, in condizioni di risonanza in parallelo si elidono le due suscettanze e l'impedenza assume il valore massimo.

Fra tutti i segnali che possono essere captati dall'antenna di un radiorecettore il fenomeno della risonanza consente di selezionarne uno solo: quello la cui frequenza corrisponde alla risonanza del circuito oscillante impiegato. Modificando l'induttanza o la capacità del circuito si può accordare il ricevitore sulle diverse emittenti.

L'attitudine di un circuito a garantire tale selettività è rappresentata graficamente dalla sua **curva di risonanza**, in particolare dal coefficiente di risonanza  $Q$ . Se  $Q$  è elevato (**risonanza acuta**), il circuito è assai selettivo, le perdite sono basse, ma lo smorzamento è pure basso; se  $Q$  è basso (**risonanza piatta**), il circuito è poco selettivo ma lo smorzamento è assai rapido.

Nei circuiti elettrotecnici più complessi, comprendenti induttori e condensatori variamente disposti in serie e in parallelo, esistono più frequenze di risonanza che si susseguono alternate a **frequenze di antirisonanza**.