

**Disclaimer:** il seguente documento contiene degli appunti rielaborati, pertanto questo non sostituisce né il testo consigliato dal docente né tantomeno il materiale didattico fornito.

## **INTRODUZIONE**

Ogni nota musicale ha la sua frequenza; salendo da un'ottava all'altra (le note sono 8, quindi un'ottava è una nota), la frequenza della successiva è doppia rispetto la sua precedente. In elettronica l'ottava è un'unità di misura logaritmica per i rapporti fra frequenze.

## **ACUSTICA**

Parte del corso che tratta le leggi fisiche riguardanti i fenomeni sonori.

Si definisce suono un insieme di onde meccaniche longitudinali; la sorgente produce il suono in seguito ad una vibrazione, il suono per propagarsi nel mezzo che sta attraversando, fa vibrare le particelle di questo.

L'audio è un segnale elettromagnetico che trasporta informazione sonora.

Il suono necessita di un mezzo per potersi propagare mentre l'audio non ne ha bisogno, infatti essendo l'audio un'onda elettromagnetica è libero di propagarsi anche nel vuoto.

La sorgente emette il suono; un ricevitore capta il suono e lo trasforma in segnale fisico (un impulso elettrico, un'onda radio...), in questa maniera nasce l'audio; l'audio viaggia nei mezzi di trasmissione e arrivato a destinazione viene riconvertito nel suono di origine.

L'audio, essendo un'onda elettromagnetica, per definizione si muove alla velocità della luce, mentre l'onda sonora alla velocità del suono.

Il più primitivo esempio di programmazione musicale è il carillon.

Verso metà del 1800 fu sviluppato il fonautografo, questo macchinario era in grado di incidere tracce sonore grazie ad un materiale chiamato nerofumo. Quando il fonautografo riceveva dei suoni in input, incideva di conseguenza il nerofumo (similmente a come si fa con il vinile), tuttavia questo strumento non era capace di riprodurre i suoni che registrava. Più avanti, grazie alle diverse scoperte di Thomas Edison, si riuscì a riprodurre i suoni impressi sul nerofumo dato che essi riportano la lunghezza d'onda delle onde sonore incise.

T. Edison, nel tardo 1800, inventò il fonografo, questa è appunto l'invenzione discussa prima che consentiva di riprodurre le tracce incise sul nerofumo; questo dispositivo era costituito da un cilindro sul quale veniva fatto passare il nerofumo che, ruotando sul cilindro, veniva decifrato. Edison scelse come struttura del dispositivo un cilindro invece di un disco per questioni di spazio (infatti se c'erano grandi strisce di nerofumo, la struttura a disco diveniva di difficile impiego).

Si definisce onda uno spostamento di energia al quale non è associato uno spostamento di materia. Attenzione alle differenze: le onde possono fare oscillare la materia, ma non la spostano, muovono solo le particelle del mezzo materiale che attraversano; dopo il passaggio dell'onda la materia attraversata torna allo stato precedente al suo passaggio.

Le onde non si possono propagare nel vuoto, necessitano di un mezzo fisico (eccezion fatta per quelle elettromagnetiche).

Le onde, a seconda della loro natura fisica, si possono differenziare in meccaniche ed elettromagnetiche:

-**meccanica**: l'onda viaggia attraverso un mezzo fisico facendone oscillare le particelle (il mezzo può essere o solido o liquido o gassoso)

-**elettromagnetica**: nasce dalla variazione di campi elettromagnetici; questo tipo di perturbazione si può propagare anche nel vuoto, quindi non necessita di fare vibrare le particelle di materia per propagarsi

Un'altra distinzione che si può fare fra le onde è fra longitudinale o trasversale:

-**longitudinale**: le particelle del mezzo fisico attraversato dall'onda oscillano lungo la stessa direzione di propagazione di essa.

-**trasversale**: le particelle del mezzo fisico attraversato dall'onda oscillano perpendicolarmente alla direzione di propagazione di essa.

Le onde sinusoidali sono descritte da funzioni matematiche goniometriche seno nella variabile temporale.

Prendendo un grafico cartesiano, mettendo il tempo sull'asse x e l'ampiezza sull'asse y, si ottiene la **forma d'onda**, questa è appunto il grafico della funzione matematica che descrive l'onda. Esistono altri tipi di onde, ma in questo corso ci si interessa solo a quelle sinusoidali poiché esse sono le componenti elementari sfruttate dallo sviluppo di Fourier.

Un'altra classificazione di opere è in periodiche e aperiodiche:

-**periodica**: se la legge matematica dell'onda si ripete uguale a se stessa passato un intervallo di tempo ricorrente (detto periodo) l'onda è periodica.

-**aperiodica**: tutte le onde che non sono periodiche sono aperiodiche.

Corpo vibrante, suono e rivelatore formano la condizione necessaria alla ricezione del suono; questa trinità è anche chiamata "triangolo del fuoco della ricezione sonora".

Il corpo vibrante produce un suono; il suono si propaga nel mezzo; il rivelatore capta il suono (esso può dunque studiarlo/sfruttarlo/...).

Ampiezza, frequenza e fase sono le tre grandezze che descrivono la natura di un'onda.

-**Ampiezza**: misura la potenza dell'onda, è una grandezza proporzionale alla quantità di energia che l'onda trasporta.

-**Frequenza**: indica quanto è acuto il suono; più questo è acuto, maggiore è la frequenza dell'onda studiata.

-**Fase**: la fase descrive l'istante di partenza dell'onda, questo elemento trasla la forma d'onda (il grafico della funzione matematica dell'onda) o verso destra o verso sinistra; se la fase è 0 la forma d'onda parte dall'origine degli assi (o da qualsiasi sia il suo istante iniziale).

Quando avviene che più onde si incontrano in una stessa regione dello spazio, si sovrappongono e a livello matematico la nuova onda ottenuta ha legge matematica data dalla somma algebrica di tutte le leggi di tutte le onde che si sono collise. -> questa legge è chiamata principio di sovrapposizione delle onde.

Il principio della sovrapposizione delle onde è utile qualora si volesse amplificare, abbassare o annullare l'ampiezza di una stessa onda.

esempio: si ipotizzi di avere un'onda nello spazio, se ivi la si facesse collidere con un'onda identica ad essa stessa, il risultato sarebbe una nuova onda uguale a quella di partenza, ma di ampiezza doppia rispetto l'originale; se invece si decidesse di fare collidere l'onda con un'altra identica ad essa, ma di ampiezza di **segno opposto**, in quel punto dello spazio l'onda di origine verrebbe eliminata dato che la collisione fra queste 2 onde dà vita ad un'onda di ampiezza 0.

-> Audacity: è un software per simulare l'interazione fra onde.

Le onde sinusoidali possono variare in un intervallo di ampiezza che va da -1 a 1 (infatti a livello grafico l'ampiezza si trova lungo l'asse y), quando si prova a sommare 2 onde sinusoidali che superano la soglia data, nei software di composizione avviene il clipping, questa operazione approssima il valore fuori soglia al valore più vicino di ampiezza dell'intervallo di partenza.

esempio: se ho una senoide di ampiezza da -0.7 a 0.7 e un'altra di ampiezza da -0.8 a 0.8, l'onda risultante viene di ampiezza da -1.5 a 1.5 -> tuttavia [-1.5, 1.5] è fuori dall'intervallo [-1, 1] quindi avviene il clipping che approssima l'ampiezza della nuova onda a 1 ad 1.5 e a -1 da -1.5, questo perché 1 e -1 sono i valori dell'intervallo più prossimo a [-1.5, 1.5].

**Battimento**: fenomeno che si verifica quando si sommano 2 onde uguali caratterizzate da una differenza di frequenza molto piccola (3 Hz è già una piccola differenza). In questa situazione avviene che in alcuni istanti di tempo le onde coincidono perfettamente, ivi l'ampiezza dell'onda risultante è doppia a quella originale; allo stesso modo ci saranno istanti di tempo in cui lo sfasamento è più pesante, qui l'ampiezza dell'onda risultante può raggiungere lo 0 (o comunque valori infinitesimi). Quando avviene che ad un picco di ampiezza massima segue un istante in cui l'ampiezza vale 0 (ossia ad un suono di forte intensità segue un silenzio) il fenomeno che si osserva è il battimento.

battimenti al secondo = | frequenza prima onda - frequenza seconda onda |

Alcune relazioni matematiche riguardanti le onde:

Un'onda periodica ha una legge matematica del tipo:  $f(t) = f(t+T)$  -> T indica il periodo.

La frequenza indica il numero di oscillazioni complete che l'onda esegue in un secondo, questa grandezza si misura in Hz ed è pari all'inverso del periodo ( $1/T$ ).

Il periodo indica il tempo necessario ad un'onda periodica per compiere un'oscillazione completa, questo si misura in secondi ed è pari all'inverso della frequenza ( $1/f$ ).

L'ampiezza di un'onda descrive il massimo range di oscillazione, l'unità di misura di questa misurazione dipende dalla natura fisica dell'onda alla quale si riferisce.

Osservato un generico istante di tempo, spostandosi lungo l'asse dei tempi di un intervallo dell'ampiezza del periodo si osserva una grandezza detta fase.

Il periodo trascorso dall'istante iniziale fino ad un intervallo dell'ampiezza del periodo è detto fase iniziale.

Preso un tempo di  $2\pi$ , si definisce pulsazione il numero di oscillazioni che avvengono nel tempo preso, infatti l'equazione della pulsazione è:  $\omega = 2\pi / T$

Fase, fase iniziale e oscillazione sono 3 grandezze necessarie a descrivere l'onda, ma variano a seconda del tipo di onda alla quale esse si riferiscono.

-Velocità d'onda ( $v$ ): spazio percorso dall'onda nel tempo, si misura in metri al secondo.

-Lunghezza d'onda ( $\lambda$ ): è la distanza fra 2 punti di massimo dell'onda opp. fra 2 punti di minimo dell'onda; matematicamente questa si misura come:  $\lambda = vT = v/f$

La legge matematica di un'onda ha dominio nel tempo e codominio nell'insieme delle ampiezze. Per esempio le onde sinusoidali sono descritte da una legge seno che prende elementi dal dominio del tempo (da 0 a +infinito) e ne restituisce nell'intervallo delle sue ampiezze (cioè da -1 ad 1).

La legge matematica di una onda sinusoidale è:

$$y(t) = A \sin(2\pi f t + \phi)$$

Dove: A (ampiezza), f (frequenza),  $\phi$  (fase)

L'ampiezza (anche nota come intensità) di un'onda determina il volume alla quale questa viene percepita, ampiezza e volume sono grandezze direttamente proporzionali. In termini fisici l'ampiezza determina la quantità di energia che l'onda trasporta, maggiore è l'ampiezza d'onda maggiore è l'energia trasportata.

Per misurare la potenza associata ad un'onda sonora si osserva la **variazione di pressione** nel mezzo in cui essa si propaga, infatti maggiore è la pressione alla quale il mezzo è soggetto, maggiore è la forza alla quale le sue particelle sono soggette; un altro motivo per il quale il volume del suono è studiato mediante la pressione è che il timpano percepisce i suoni successivamente alle variazioni di pressione che esso recepisce. Per registrare le variazioni di pressione si usa come base del riferimento la pressione atmosferica, se il mezzo è soggetto ad una pressione diversa da quella atmosfera si può constatare che esso è stato attraversato da un suono.

Decibel SPL (sound pressure level) -> categoria di decibel utilizzata per misurare i volumi dei suoni in base alla variazione di pressione che generano

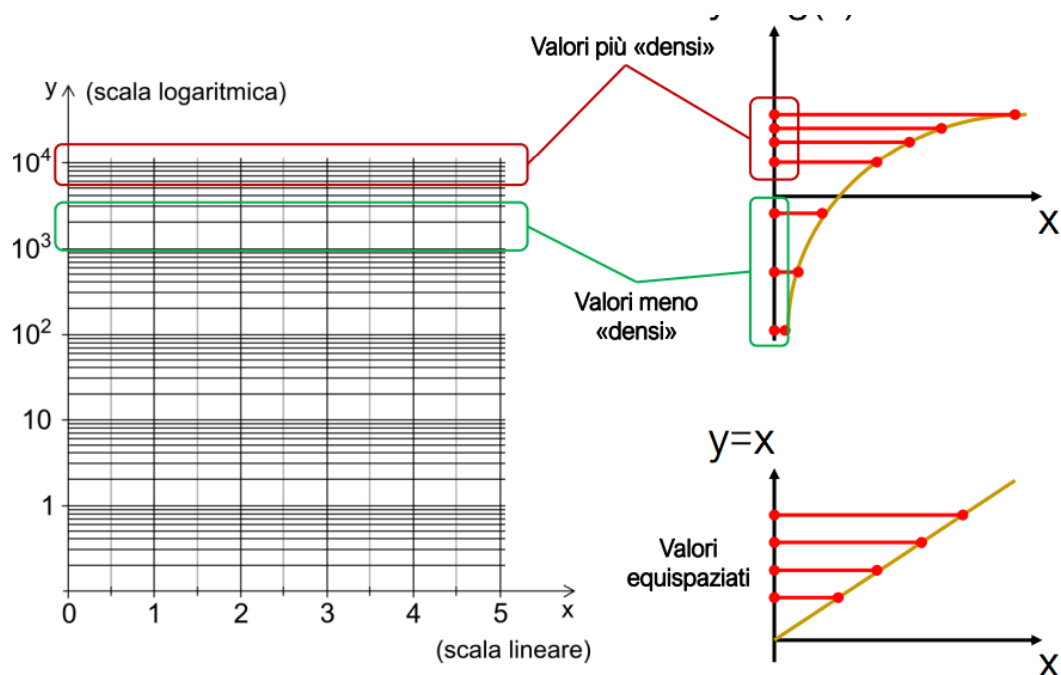
Decibel SIL (sound intensity level) -> categoria di decibel utilizzata per misurare i volumi dei suoni in base alla quantità di energia trasportata

Dalla fisica è noto che la pressione è data da forza diviso superficie soggetta alla forza.

Nota la relazione fisica legata alla pressione si osservi il seguente esempio: si osservi una donna (peso medio 50kg) su dei tacchi a spillo, questa produce una pressione di gran lunga superiore a quella di un elefante (peso medio 1000kg) perché pur pesando la donna meno dell'elefante, la sua forza peso è applicata su una superficie minore il che (con dei numeri verosimili) confermerebbe che la donna produce un rumore di intensità maggiore rispetto l'animale.

Le pressioni verranno appunto calcolate come  $N/m^2$ .

Ci si pone il problema di determinare, date due onde, quale fra le due è più potente:



Si considerino due onde sinusoidali (s1 e s2) sia noto dai loro grafici che l'ampiezza di s1 è minore di quella di s2. Si considerino i valori assoluti delle 2 onde, così facendo si ottengono i loro grafici ribaltati sull'asse delle x, in questa maniera la differenza fra esse si fa più palese. Ottenuti questi grafici ribaltati, si esegue l'operazione di valore medio su di essi.

Il motivo di ciò è che: data una sinusoide, il suo valore medio è pari alla retta costante parallela all'asse x che la seziona simmetricamente.

s1 e s2 sono entrambe simmetriche rispetto l'asse x, quindi per entrambe il loro valore medio è proprio l'asse x, ovvero 0 -> ecco perché lavorare con i grafici originali non era affidabile perché saltava fuori che 2 onde diverse avevano valore medio identico.

Ribaltando le onde vengono invece dei valori medi (sempre rette costanti parallele ad x) che rispecchiano la differenza fra le 2 onde, infatti la retta simboleggiante il valore medio di s1 (sia questo valore m1) sarà più bassa rispetto a quella di s2 (sia m2 il valore medio di s2). Da ciò che si è osservato graficamente si evince che  $m_2 > m_1$ , perciò il suono associato ad s1 è più basso di quello associato ad s2.

La strategia per ottenere il valore medio più affidabile in assoluto che meglio consente di distinguere le onde è quella di elevare le funzioni al quadrato (questa operazione ribalta i grafici come fosse un'operazione di valore assoluto) e subito dopo farne la radice quadrata e prenderne la soluzione positiva -> calcolando il valore medio di quanto appena ottenuto si ottiene il valore medio più affidabile possibile

L'RMS è un indice che misura quanto appena detto fino ad ora però tenendo conto delle pressioni invece che delle ampiezze.

RMS: Root Mean Square -> indice statistico che consente di calcolare la pressione quadratica media di un'onda.

Siano dati "n" valori campionati di ampiezza, siano questi valori " $x_i$ " ( $i = 1, 2, \dots, n$ ), allora l'RMS di questi valori viene:

$$RMS = \sqrt{(\sum_1^n x_i^2)/n}$$

Un'onda che ha un RMS maggiore di un'altra ha un volume maggiore rispetto l'altra.

Si affronti adesso la questione riguardo la soglia di udibilità.

Degli studi hanno constatato che: la minima soglia sonora udibile dall'uomo è di  $25 \times 10^{-6} \text{ N/m}^2$  mentre la massima è  $30 \text{ N/m}^2$

I suoni più sono acuti meno componenti armoniche presentano nella loro scomposizione in serie di Fourier.

Dato che soglia minima e massima udibile si distanziano di un un fattore di  $10^6$ , è stato deciso di costruire una scala logaritmica per studiare il suono, ossia il Decibel (dB); il motivo di questa scelta è legato alla semplificazione nei calcoli.

Per lo studio dei suoni si utilizzano grafici particolari che riportano una scala logaritmica sull'asse delle y e la scala lineare su quella delle x; la scala logaritmi è solo una rappresentazione alternativa dei suoni, non fornisce l'informazione circa la natura sonora dell'onda studiata.

La rappresentazione della scala logaritmica è dovuta al fatto che presa la funzione  $y(x) = \text{Log}(x)$ , le rette parallele all'asse x diventano sempre più vicine al crescere della variabile x.

Il Decibel (dB) è un'unità di misura relativa che si serve della scala logaritmica per comprimere il range fra minima e massima ampiezza udibile (da un range di  $10^6$  ad un range di 6;  $\text{dB} = 1/10 \text{ B}$ ). Date  $x_1$  e  $x_2$ , due misurazioni fisiche QUALSIASI (metri, secondi, joule...) la loro differenza in Decibel si misura come:

$$R_{dB} = 10 \text{Log}(x_1/x_2)$$

Dove  $x_1$  è la **grandezza che si vuole confrontare** e  $x_2$  è invece la **grandezza di confronto** (quindi il testo di un esercizio potrebbe essere: data una grandezza  $x_1$ , indicare qual è la sua differenza in dB con la grandezza  $x_2$ ).

R è la differenza in dB fra la grandezza  $x_1$  e  $x_2$ ; R si può calcolare anche in Bel (B) dividendo per 10 la R in db o rispetto Nepero ( $R_{Np} = \ln(x_1/x_2)$ ). -> La differenza in dB è una generica scala di misura fra grandezze fisiche dello stesso tipo.

Il dB è una grandezza adimensionale, infatti essendo essa calcolata mediante il rapporto di due grandezze avente stessa dimensione, le unità di misura si semplificano.

Il logaritmo trasforma gli aumenti moltiplicativi in aumenti additivi, infatti dalle proprietà dei logaritmi è noto che:  $\text{Log}(ab) = \text{Log}(a) + \text{Log}(b)$  -> le addizioni riducono sensibilmente la grandezza dei numeri che entrano in gioco nella scala di valori.

Aumentare l'intensità di una grandezza di 10dB, corrisponde ad aumentare di un fattore 10 la grandezza misurata in scala dei dB di un fattore moltiplicativo 10 nell'unità di misura antecedente la conversione.

Il raddoppio di una grandezza in un'unità di misura, corrisponde all'aumento di circa 3 dB nella scala logaritmica.

Incrementi lineari nella scala logaritmica corrispondono ad incrementi esponenziali nella scala decimale, infatti si useranno sempre unità di misura di dB molto piccole.

Il dB in verità è una unità di misura che si può globalmente applicare a qualsiasi altra unità di misura per ottenerne una scala in base logaritmica.

esempio: se voglio una scala logaritmica della potenza, posso utilizzare il dB applicato ad una scala dell'unità di misura del Watt

Piccola notazione: quando si utilizza il dB è buona norma specificare l'unità di misura della scala che si sta scrivendo in notazione logaritmica; nell'esempio appena fatto il risultato si misurava quindi in  $dB_W$

$\text{dB}=0$  significa che l'argomento il valore di R è pari a 0; R è uguale a 0 quando il logaritmo del rapporto fra  $x_1$  e  $x_2$  è 1.

Il valore 0 è preso come punto di partenza per la definizione della scala logaritmica.

Prese p (una generica pressione, misurata perciò in  $\text{N/m}^2$ ) e  $p_0$  (la pressione minima ottenibile, ossia  $25 \times 10^{-6} \text{ N/m}^2$ ) il livello di pressione sonora si misura come:

$$SPL = 20 \log(p/p_0)$$

Si osservino alcuni valori sonori in dB SPL:

-10 dB SPL -> camera anecoica

25/30 dB SPL -> ampie aree al chiuso (chiese e teatri per esempio)

100 dB SPL -> urlo umano

130 dB SPL -> dolore fisico

210 dB SPL -> rumore più potente che l'uomo abbia mai riprodotto in laboratorio

300 dB SPL -> suono più potente mai udito nella storia dell'umanità (eruzione del vulcano Krakatoa)

Prese  $I$  (una generica intensità sonora, misurata perciò in  $W/m^2$ ) e  $I_0$  (la minima soglia sonora udibile pari a  $10^{-6} W/m^2$ ), il livello di intensità sonora si misura come:

$$SIL = 10 \log(I/I_0)$$

SIL e SPL sono del tutto EQUIVALENTI!! -> 1 SPL = 1 SIL

Intensità sonora si misura in dB o  $W/m^2$ .

30-100 dB, intervallo di dB entro il quale suonare la musica.

È stato detto che l'onda sonora trasporta con se energia, questa è maggiore nei punti dello spazio prossimi alla sorgente sonora e minore in quelli lontani da questa, un suono infatti si sente meglio più si è vicini alla sorgente che lo emette. Il fatto che l'energia sonora sia più o meno densa in una certa ragione dello spazio (il volume dei suoni è tanto alto quanto è alta la densità d'energia nella regione dello spazio in cui il suono viene percepito) è data da una legge quadratica detta "**legge dell'inverso del quadrato**".

Il suono si propaga dalla sorgente individuando una superficie sferica.

L'onda sonora si propaga allo stesso modo verso ogni direzione fuori da questa sfera immaginaria e la sua energia sonora si distribuisce uniformemente su tutta questa superficie; maggiore è la distanza dalla sorgente, più è grande la sfera individuata (infatti questa distanza individua il raggio della sfera), quindi minore è la potenza del suono percepita per i punti appartenenti ad una sfera di dimensioni sempre maggiori dato che si ha una maggiore superficie sulla quale si deve distribuire uniformemente sempre la stessa quantità di energia (esempio: una sorgente emette un suono di  $10 W/m^2$  -> a 3m dalla sorgente la sfera1 ha superficie  $18\pi$ ; a 10m dalla sorgente la sfera ha superficie  $200\pi$ . Non ci vuole molto per capire che distribuendo uniformemente i  $10 W/m^2$  prima sulla sfera1 e poi sulla sfera2, si osserverà che la sfera1 avrà aree dove la densità d'energia è maggiore rispetto quelle della sfera2). Le aree individuate dall'onda sonora crescono in maniera proporzionale al quadrato del raggio della sfera considerata (del resto, assumendo la sorgente come centro della sfera, la superficie di questo oggetto geometrico è  $4\pi r^2$ ; dove "r" è la distanza fra sorgente e punto dello spazio in cui è posto l'ascoltatore).

L'energia sonora **non cambia** in base alla distanza, questa rimane sempre la stessa, dall'origine ad un qualsiasi punto dello spazio; tuttavia più si è lontani dalla sorgente più è basso il suono che percepito perché la sfera sulla quale l'energia si distribuisce cresce in superficie, quindi in diversi punti dello spazio si ha la stessa energia però distribuita su aree sempre minori, quindi l'energia sonora su un punto di una sfera più grande è minore di quella su una sfera più piccola (sempre tenendo a mente che: sfera più grande = distanza maggiore dalla sorgente).

Il decadimento energetico è quadratico poiché avendo visto che l'energia in un punto decresce al crescere dell'area della sfera, ed avendo la sfera area  $4\pi r^2$ , l'intensità dell'energia decresce al crescere del raggio al quadrato (visto che il raggio è la distanza dall'origine).

Infatti l'intensità sonora è inversamente proporzionale al quadrato delle distanze: data  $i$ , l'intensità sonora di un suono misurata a distanza  $r$  dalla sorgente che lo ha emesso, si osservi come varia l'intensità al crescere moltiplicativo di  $r$ :

a  $2r$  l'intensità misurata è  $i/4$

a  $3r$  l'intensità misurata è  $i/9$

a  $4r$  l'intensità misurata è  $i/16$

...

Le sorgenti sonore sono riassumibili nel modello del monopolo acustico, questo modello assume sorgente come fosse puntiforme e che a partire da quel punto si propaghino verso ogni direzione dello spazio circostante le onde sonore distribuendosi su delle sfere; l'energia è tanto elevata quanto si è in prossimità della sorgente sonora.

(20.000 Hz, massima frequenza udibile)

Sia  $W$  la potenza sonora e  $A$  l'area della sfera sulla quale essa si distribuisce (quindi  $4\pi r^2$ ), l'intensità sonora ( $i$ ) è data da:

$$i = W / A$$

La legge dell'inverso del quadrato si applica solo a sistemi puntiformi e a sistemi che non presentano ostacoli o pareti/oggetti fatti di materiali assorbenti (questi materiali tendono appunto a dissipare l'energia sonora, perciò se le onde sonore incontrano materiali di questo tipo, la superficie della sfera risulterebbe forata in prossimità di essi).

Anche l'aria stessa è un materiale assorbente (per esempio in essa i suoni la cui frequenza è inferiore a 1000Hz percorrono distanze maggiori rispetto quelli la cui frequenza supera quella soglia), la legge dell'inverso del quadrato è quindi una legge ideale che osserva come puntiforme la sorgente sonora e che essa emetta le sue onde senza dissipazione (l'onda sonora non si propaga nel vuoto, quindi è errato assumere che la legge dell'inverso del quadrato possa essere confermata in questo mezzo particolare). Il fenomeno dell'assorbimento dipende dalla frequenza dell'onda! Un'onda a frequenza maggiore resiste meglio all'assorbimento.

Grazie alla legge dell'inverso del quadrato, se è nota l'intensità sonora in un punto allora si può conoscere l'intensità sonora in ogni punto dello spazio circostante, infatti l'intensità sonora diminuisce in rapporti di Potenza/Superficie costanti.

Nota una certa  $I_0$  misurata ad una certa  $r_0$ , per misurare  $I$  ad una certa  $r$ :

1) fai  $r/r_0 = R$

2) fai  $R^2$

3)  $I = I_0/R^2$

A seconda della pressione e temperatura alla quale si trova il mezzo di propagazione dell'onda sonora, la velocità con la quale l'onda viaggia attraverso esso varia; al livello del mare e alla temperatura di 20°C il suono viaggia alla velocità di 343,85 m/s (sia questa velocità standard del suono nell'aria  $\rightarrow v_0$ ).

Più in generale la velocità del suono in un mezzo, ad una certa temperatura e a pressione 1 atm, si calcola:

$$v_T = v_0 + \alpha(T)$$

$v_T$   $\rightarrow$  velocità nel mezzo a temperatura  $T$

$v_0$   $\rightarrow$  velocità nel mezzo a temperatura 0°C

$\alpha(T)$   $\rightarrow$  funzione che dipende dal mezzo, essa varia al variare della temperatura alla quale il mezzo si trova (per esempio nell'aria essa vale "0,62T")

Per l'aria:  $v_0 = 331,45$  m/s

Temperatura del mezzo di propagazione e velocità dell'onda sonora in esso sono linearmente proporzionali (direttamente proporzionali = proporzionalità che dipende da un fattore moltiplicativo; linearmente proporzionali = proporzionalità che dipende da un addendo additivo).

**comprimibilità:** rapidità con la quale il mezzo varia il proprio volume in seguito a sollecitazioni causate da una forza di pressione; un mezzo è tanto più comprimibile quanto è elevata la massima forza di pressione che si può applicare su esso (arriva appunto un punto in cui il volume del corpo pressato non è ulteriormente comprimibile).

Meno un mezzo è comprimibile più esso sarà rapido nel trasferire l'energia sonora da uno strato di materia (di cui è composto) all'altro, infatti il suono viaggia a velocità maggiori nei mezzi la cui comprimibilità è BASSA; inoltre nei mezzi in cui la comprimibilità è bassa, l'onda sonora dissipa meno energia rispetto a quelli la cui comprimibilità è maggiore.

Maggiore è la pressione alle quali il mezzo è sottoposto, maggiore è la velocità alla quale il suono viaggia. Infatti quando un materiale è sottoposto a grandi pressioni, le particelle del mezzo fisico sono più vicine fra loro, quindi impiegano molto meno tempo a passarsi l'un l'altra l'energia trasportata dal suono.

La velocità del suono nell'acqua varia fra 1460 m/s e 1560 m/s; la variazione è data da: temperatura della massa acqua considerata ( $T$ ); profondità della massa d'acqua considerata ( $h$ ); salinità (concentrazione di sali) della massa d'acqua considerata ( $S$ ).

La formula per misurare la velocità del suono in una certa massa d'acqua è:

$$v(\text{H}_2\text{O}) = 1450 + 4,61T + 0,045T^2 + 0,0182h + 1,3(S - 34)$$

Sullo strato superficiale del mare, alla temperatura di 20°C, e con concentrazione salina dello 0.032% -> la velocità del suono è di 1505 m/s

Determinata la velocità del suono in un certo mezzo, la lunghezza d'onda di esso si calcola secondo la relazione:

$$\lambda = v / f$$

Dove  $v$  è la velocità del suono nel mezzo e  $f$  la frequenza dell'onda sonora considerata.

In condizioni standard, il range delle frequenze dei suoni emessi nell'aria, udibili dall'uomo, va da 20Hz a 20.000Hz; applicando la formula appena discussa al range delle frequenze, si scopre che il range di lunghezza d'onda dei suoni udibili nell'aria va da 17mm a 17m (ovviamente non tenendo conto di eventuali mezzi che deflettono/assorbono l'onda sonora).

Nota sugli ostacoli: se un suono ha lunghezza d'onda di 11m e incontra un ostacolo lungo 10m, l'onda sarà udibile per il metro restante superato l'ostacolo, ovviamente ivi l'intensità sonora dipenderà dalla distanza dalla sorgente (oltre alla percezione dell'energia data dalla legge dell'inverso del quadrato, parte di questa viene dissipata durante l'attraversamento dell'ostacolo).

Rifrazione, riflessione e diffrazione sono i 3 possibili fenomeni nei quali può incappare una generica onda che colpisce un ostacolo.

Di seguito si analizzeranno questi fenomeni per le onde sonore.

### Rifrazione

Fenomeno fisico che devia l'onda sonora dalla sua traiettoria rettilinea a causa di una variazione di velocità. Il fenomeno di rifrazione avviene o perché l'onda da che stava viaggiando in un mezzo entra in un secondo in cui la velocità di propagazione è diversa rispetto quella del primo o perché la temperatura del mezzo che l'onda stava attraversando cambia.

Il fenomeno di rifrazione è utilizzato in acustica per variare la velocità di un'onda sonora, variando la temperatura del mezzo nel quale il suono si sta propagando. Un suono che è soggetto al fenomeno di rifrazione non si propaga lungo una direzione rettilinea bensì ne segue una curvilinea; la curva va dal basso verso l'alto se la temperatura del mezzo sullo strato superficiale è minore di quella sul fondo e viceversa va dall'alto verso il basso se la temperatura sul fondo è minore di quella verso la superficie. Le onde, se pur curvilinee, devono uscire perpendicolarmente da una superficie sferica!!! Il suono, curvando in seguito al fenomeno di rifrazione, raggiunge meglio delle zone che prima non erano raggiunte dalla propagazione in rettilineo.

In verità è già stato osservato il fenomeno di rifrazione quando si è osservato il suono che viaggiava verso il fondale marino, la diversa profondità dell'oceano varia la velocità di propagazione dell'onda sonora di fatto rifrangendola.

Più si va in profondità, maggiore è la velocità del suono, maggiore è la rifrazione del suono.



### Riflessione

Fenomeno fisico che consiste nella deviazione di un'onda direzionandola verso la sua sorgente. La rifrazione avviene quando un'onda, che si sta propagando in un mezzo, ne incontra un secondo che però non riesce ad attraversare, come risultato l'onda viene rispedita al mittente. La rifrazione avviene solo se sono rispettate alcune condizioni fisiche:

1. Il materiale sul quale il suono rimbalza non deve essere assorbente
2. Un suono, per essere riflesso, deve avere una lunghezza d'onda **minore** delle dimensioni dell'ostacolo col quale si scontra

Anche se il materiale non è assorbente, parte dell'energia trasportata dall'onda viene persa a causa dell'urto (una parte veramente esigua). Per evitare il fenomeno di riflessione si ricorre ai materiali assorbenti (detti fonoassorbenti) che dissipano l'energia dell'onda che si scontra con essi; i materiali **molto** comprimibili sono un esempio di materiale fonoassorbente.

In seguito al fenomeno di riflessione, il tempo che l'onda sonora spiega per andare e tornare alla sorgente è:

$$\Delta t = 2d / v$$

$\Delta t$  = due volte distanza fra sorgente e punto di riflessione ( $2d$ ) / velocità di propagazione dell'onda nel mezzo ( $v$ ).

Anche per le onde elettromagnetiche si può misurare questo tempo di andata-ritorno, esso è il round trip time (RTT) e si misura sostituendo " $c = 3.000.000 \text{ m/s}$ " alla  $v$  (dato che le onde elettromagnetiche si propagano alla velocità della luce).

Il sonar e il 3D laser scanner sono tecnologie che sfruttano il fenomeno della riflessione.

L'eco è un fenomeno dovuto alla riflessione, il suono originale e il suono riflesso possono essere considerati come 2 suoni distinti.

Gli esseri umani distinguono due suoni distinti solo se questi vengono uditi l'uno ad almeno 0,1s di distanza dall'altro; quindi se l'onda riflessa arriva all'orecchio umano PRIMA di 0,1s rispetto al suono originale, l'uomo non percepisce l'eco.

Preso 0,1s come  $\Delta t$ , si può calcolare la minima distanza necessaria a percepire il fenomeno dell'eco nell'aria in condizioni standard (20°C; 1atm) è:

$$d_{eco} = \Delta t \cdot v / 2 = 0,1 \times 343 / 2 = 17\text{m}$$

Al di sotto di 17m, suono originale e riflesso si sovrapporranno annullandosi a vicenda; come risultato si udirà o un suono distorto o un suono intensificato -> questo fenomeno è chiamato riverbero; grazie al riverbero si è in grado di progettare le sale dei teatri.

In acqua, a condizioni standard, la distanza minima affinché si verifichi l'eco è maggiore (75m) rispetto quella misurata per l'aria dato che la velocità del suono nell'acqua è maggiore rispetto quella del suono nell'aria, quindi la frazione appena usata per calcolare la distanza minima avrà un numeratore maggiore.

### Diffrazione

Avviene quando un'onda incontra un ostacolo e nel tentativo forzato di superarlo si frammenta in più direzioni. Il fenomeno della diffrazione si verifica **solo** se sono rispettate diverse condizioni fisiche. L'onda sonora si diffratta quando la sua lunghezza d'onda è **di molto** superiore alla dimensione dell'ostacolo/fenditura che deve attraversare; sotto queste condizioni l'ostacolo/fenditura diffratta l'onda.

Frequenze più basse corrispondono a suoni la cui lunghezza d'onda è maggiore, infatti i suoni gravi sono quelli maggiormente soggetti a questo fenomeno fisico. I suoni di lunghezza d'onda molto piccola che si scontrano contro ostacoli molto grandi non si diffratano, questo fenomeno è detto ombra sonora; per questa ragione gli esseri umani sono meno in grado di individuare la provenienza dei suoni gravi rispetto quelli acuti, dato che i suoni di piccola lunghezza d'onda si scontrano contro la testa umana diffrattandosi e aggirando le orecchie.

La bocca umana migliora la diffusione del suono poiché essendo essa una fenditura dà luogo al fenomeno della diffrazione.

È già stato osservato che:  $\lambda = v/f$   
Perciò:  $f = v/\lambda$

Quindi variazioni della velocità di propagazione del suono o della lunghezza d'onda causano anche variazioni della frequenza dell'onda sonora.

La dinamica insegna che se un osservatore in movimento osserva un altro corpo in movimento, la velocità del corpo osservato è relativa alla velocità del sistema dell'osservatore (es: se il corpo va a 100 km/h e l'osservatore va a 40km/h, egli osserverà che il corpo va a 60km/h rispetto il suo sistema di riferimento). In acustica capita infatti che se una persona che sta ascoltando un suono (ascoltatore) è in movimento, questa percepirà una velocità del suono minore rispetto quella originale a causa del fatto che il sistema di riferimento dell'ascoltatore è in moto -> visto che frequenza e velocità sono direttamente proporzionali, l'ascoltatore percepirà un suono di frequenza diversa rispetto quella originale. Quanto appena descritto è detto **effetto Doppler**. Ovviamente può anche capitare il caso di ascoltatore in moto e sorgente del suono in moto, il che incasina ancora di più le cose.

Esiste una relazione tale da fornire i valori di frequenza dell'onda percepita in seguito ad un effetto Doppler:

Siano:  $f_0$  la frequenza originale del suono;  $f$  la frequenza percepita a causa dell'effetto Doppler;  $v$  la velocità del suono nel mezzo considerato;  $v_s$  la velocità della sorgente che sta emettendo il suono;  $v_r$  la velocità di chi sta ricevendo il suono.

$$f = [ (v - v_r) * f_0 ] / (v - v_s)$$

Ovviamente alle velocità si dà segno opportuno a seconda del verso che esse seguono.

ESCE NEI TEST: Un ascoltatore fermo ( $v_r=0$ ) percepirà il suono di una sorgente che avanza verso di lui con frequenza **MAGGIORE** rispetto quella del suono effettivo; facendo le opportune sostituzioni alla relazione della frequenza appena trovata, ci si rende conto di questo fatto.

Se il denominatore, della relazione sulla frequenza, si annulla si verifica un nuovo fenomeno detto bang supersonico; se invece  $v_s$  supera  $v$  le oscillazioni che la sorgente emette arrivano all'ascoltatore in ordine inverso.

Il cono di Mach è un fenomeno fisico che avviene quando si verifica il bang supersonico; quando la sorgente sonora è più veloce della velocità del suono avviene una rottura del muro del suono che libera un'immensa quantità di energia nell'aria. Ad alte quote (dove l'aria è ricca d'acqua) visivamente si osserva che la sorgente, al momento della rottura della barriera del suono, attraversa una sorta di cono bianco, questo cono non è la barriera del suono sfondata bensì un cono di vapore acqueo che si genera in seguito all'evaporazione istantanea delle particelle d'acqua presenti nell'aria circostante la sorgente in seguito all'assorbimento dell'energia liberata dal bang supersonico.

Il cono di Mach avviene OGNI qual volta si raggiunge una velocità multipla di quella del suono (343 m/s, 686 m/s, 1029 m/s, ...); portando in km/h le velocità fra parentesi si ottengono i "mach".

Gradiente di velocità e gradiente di temperatura è la rappresentazione grafica di un suono che viaggia in un mezzo e delle frecce/vettori mostrano come varia nel mezzo la velocità dell'onda/ la temperatura dell'onda.



**ESEMPIO DI GRADIENTE DI VELOCITÀ**

La trasformata di Fourier è uno strumento che dal dominio del tempo consente di osservare i suoni nel dominio delle frequenze (e viceversa).

L'orecchio umano riesce a sentire i suoni la cui frequenza è fra 20 e 20.000 Hz -> si danno le definizioni di ULTRASUONI (al di sopra dei 20.000Hz) e INFRASUONI (al di sotto dei 20Hz).

Suoni puri -> hanno un'unica frequenza

Suoni complessi -> hanno più frequenze

Suoni periodici -> si ripetono uguali a loro stessi ogni volta che passa un certo tempo (T)

Suoni aperiodici -> non seguono una legge periodica

**I SUONI PURI SONO SEMPRE PERIODICI!!!**

I suoni complessi possono o meno essere periodici.

Un'armonica, cioè o una sinusoidale o una cosinusoidale, ha sempre UNA SOLA frequenza.

Esistono suoni che pur avendo una frequenza udibile dall'essere umano, possiedono un'energia che conferisce al suono un'intensità tale da non fare recepire il suono all'uomo.

Si ipotizzi di avere un sistema che emette un'onda sonora così come la si è descritta sopra; si ipotizzi che questo sistema supera la massima intensità sonora che consente all'uomo di udire questo suono, se da questo sistema si leva energia sufficiente a fare scendere l'intensità sono al di sotto di quel valore massimo, il suono sarà udibile dato che per ipotesi esso aveva una frequenza udibile. -> se il suono appena considerato aveva però una frequenza al di fuori del range di frequenze udibili, anche se si levava energia questo suono non era comunque udibile.

Grandezze che caratterizzano i suoni e come lo caratterizzano:

frequenza -> suono acuto o grave

intensità -> suono dal volume alto o basso

spettro -> timbro o armonia del suono

Nell'ambito dell'acustica si suddividono le frequenze in fascia bassa, media e alta.

Bassa -> 20-500 Hz

Media -> 500-8.000 Hz

Alta -> 8.000-20.000 Hz

Ad una frequenza **alta** corrisponde un suono **acuto**; ad una frequenza **bassa** corrisponde un suono **grave**.

La frequenza influenza anche la percezione del volume sonoro, infatti si vedrà più avanti che i suoni di frequenza minore necessitano di maggiore energia (quindi di intensità maggiore) per essere uditi.

La decisione di creare questa ulteriore divisione all'interno del range di frequenze udibili è legata al fatto che l'uomo è più sensibile (quindi sente meglio) le frequenze della fascia media dato che in essa rientra la frequenza della voce umana (infatti l'evoluzione ha fatto sì che l'uomo fosse più sensibile al suono della voce).

I suoni vengono studiati mediante leggi matematiche o nel dominio del tempo o in quello delle frequenze.

La forma d'onda (ossia il grafico della legge associata all'onda sonora che si sta studiando) è tanto più alta quanto è elevata la potenza dell'onda in corrispondenza dell'istante di tempo in cui si individua un punto del grafico.

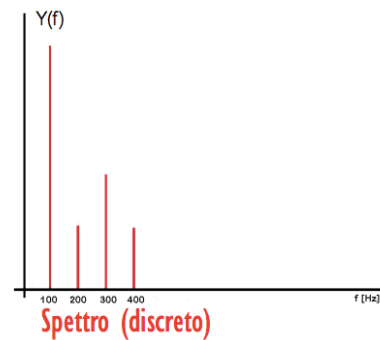
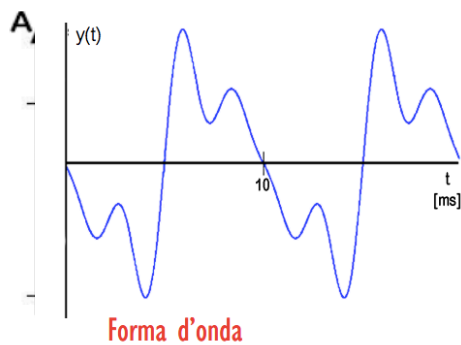
L'analisi armonica di Fourier consente di descrivere le onde complesse (quelle che presentano più frequenze) come somma di onde semplici sinusoidali o cosinusoidali, in questa maniera si studiano più onde ciascuna però con la propria frequenza.

Lo spettro d'onda di un suono puro è discreto (cioè solo in alcuni istanti di tempo presenta dei valori) ed è individuato da un solo impulso.

Il diapason è uno strumento musicale capace di emettere un suono puro (cioè che hanno un'unica frequenza).

Lo spettro di un suono complesso periodico è discreto individuato da più impulsi, ogni impulso avrà la sua intensità.

Quasi tutti i suoni in natura, cioè non prodotti artificialmente, sono complessi.



Un suono complesso (è stato detto più volte) ha più di una frequenza, la frequenza per la quale si registra l'impulso più alto (di ascissa maggiore) nello spettro è detta frequenza fondamentale (nel disegno rosso la frequenza fondamentale è 100Hz dato che in essa si registra l'impulso più alto di tutto lo spettro).

Si osservi ora lo spettro di un suono complesso aperiodico, lo spettro di questo suono è una funzione continua. Preso lo spettro della frequenza di un suono complesso aperiodico, l'ordinata (la  $x$ ) in corrispondenza del punto di massimo della funzione dello spettro è detta **frequenza di Nyquist** (infatti sulle ordinate del grafico dello spettro si trovano i valori della frequenza). La fase non impatta sullo spettro del segnale, se un segnale ha un certo spettro, anche se il segnale viene sfasato nel dominio del tempo, nel dominio delle frequenze non si registra alcun cambiamento.

#### Teorema di Fourier

Qualunque funzione periodica di periodo  $T$  e frequenza fondamentale  $f$  (dove  $f = 1/T$ ), sotto determinate condizioni, può essere rappresentata mediante somma di funzioni sinusoidali/cosinusoidali le cui frequenze sono multiple di quella dell'onda originale e le ampiezze sono opportunamente scelte.

Le condizioni richieste dal teorema di Fourier sono:

1. La funzione alla quale si sta applicando il teorema di Fourier deve essere assolutamente integrabile in ogni intervallo di ampiezza il periodo
  2. La funzione alla quale si sta applicando il teorema di Fourier deve essere definita in un intervallo limitato
  3. La funzione alla quale si sta applicando il teorema di Fourier deve essere continua o se ha discontinuità del primo tipo queste sono accettabili purché in un numero finito di punti
- Rispettate queste 3 condizioni il teorema di Fourier assume di validità, queste sono le condizioni di Dirichlet.

La serie di Fourier è un caso specifico della trasformata di Fourier, un suono periodico si scompone in serie di Fourier mentre tutti i suoni aperiodici mediante trasformata di Fourier. Quando si applica la serie di Fourier, le frequenze delle onde che partecipano alla sommatoria prendono le loro frequenze da uno specifico insieme continuo, perciò i valori di frequenza delle armoniche della serie di Fourier non sono multipli della frequenza fondamentale dell'onda di provenienza.

Prese le frequenze di ognuna delle funzioni goniometriche partecipanti alla sommatoria con la relativa ampiezza, si costruisce lo spettro della funzione complessa alla quale la serie converge. Il grafico dello spettro mette in fatti in relazione le frequenze e le ampiezze.

Per esempio, data una sola onda sinusoidale di ampiezza  $A$  e frequenza  $F$ , il suo spettro sarà di un impulso di altezza  $A$  tracciato in  $F$ .

Esempi: l'onda triangolare (anche nota come onda a dente di sega) viene sintetizzata attraverso la somma di infinite armoniche, a livello digitale vengono sommate solo alcune delle onde armoniche delle quali essa è composta perché è impossibile fisicamente sommare infiniti termini; le onde scelte per realizzare la sintetizzazione dell'onda triangolare sono sufficienti a formare un buona approssimazione di essa.

$$y(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(n \frac{2\pi}{T} t) + b_n \sin(n \frac{2\pi}{T} t)$$

Dove:

- $n$  è un numero naturale e  $\frac{2\pi}{T} = 2\pi f = \omega$ ;
- l'espressione  $a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t)$  si chiama  **$n$ -esima armonica**;
- I termini  $a_n$  e  $b_n$  sono i **coefficienti** dell'  $n$ -esima armonica;
- L'armonica ottenuta per  $n = 1$  si chiama **armonica fondamentale** ed ha frequenza pari a quella dell'onda

### SERIE DI FOURIER

Ogni armonica è multipla della frequenza fondamentale dell'onda originale: la prima armonica ha frequenza pari a quella fondamentale dell'onda che si sta scomponendo, la seconda ha frequenza fondamentale doppia, la terza ha frequenza fondamentale tripla, la quarta ha frequenza fondamentale quadrupla...

Le funzioni seno e coseno possono essere riscritte come somme di funzioni seno e coseno.

Infatti:  $A \sin(\omega t + \phi_0) = a \cos(\omega t) + b \sin(\omega t)$

Questa proprietà è alla base del funzionamento della trasformata di Fourier.

L'onda quadra è una funzione fondamentale per la digitalizzazione e sincronizzazione sonora.

Onde sonore pure pari, se sommate, restituiscono un'onda nulla, infatti nella scomposizione in armoniche delle onde sonore, queste non vengono mai utilizzate.

I sintetizzatori lavorano con un numero finito di armoniche, quindi se un suono è composto da infinite armoniche, bisogna individuare un numero finito di quelle più significative che in buona approssimazione restituiscono un suono fedele a quello reale.

Quando nella pratica si calcolano gli spettri delle frequenze si usano delle VARIANTI della trasformata di Fourier; le più celebri sono: la trasformata di Fourier veloce (Fast Fourier Transform - FFT) e la trasformata di Fourier discreta (Discrete Fourier Transform - DFT).

La DFT è quella che maggiormente viene impiegata nel processo di sintetizzazione dei suoni aperiodici complessi.

È stato visto che i suoni complessi aperiodici hanno uno spettro delle fasi continuo, il che li rende difficili da digitalizzare.

Si ipotizzi di avere per le mani una canzone (suono complesso aperiodico), si osservi come opera la DFT per digitalizzarla:

1. Sceglie una finestra; come ampiezza della finestra si intende la quantità di campioni che vengono prelevati al secondo
2. Sceglie un numero di campioni minimi che se prelevati consentono di ricostruire lo spettro continuo a partire da essi
3. Ritaglia un intervallo di tempo dal dominio temporale in cui è definita la canzone (ossia la sua durata temporale), questo intervallo viene scelto sufficientemente grande affinché la finestra gli consenta di prelevare tanti campioni quanti richiesti
4. Viene fatto lo spettro delle frequenze della canzone (che è una funzione continua) nell'intervallo di tempo selezionato e da questo pezzetto di spettro viene prelevato un numero di campione equivalente a quello deciso nel punto 2 (si ottiene in questo modo quel pezzetto di spettro campionato)
5. Ottenuto questo pezzetto di spettro campionato, i punti dall'1 al 4 vengono ripetuti fino a quando non si ottengono tutti i pezzetti di spettro discretizzati che messi assieme restituiscono lo spettro della canzone, però CAMPIONATO.

In parole povere: dopo avere applicato la DFT, da uno spettro continuo se ne ottiene uno a righe! A partire dallo spettro a righe ottenuto da questo procedimento si può risalire a quello continuo originale e riportandolo al dominio del tempo restituirà la canzone sottoposta al processo.

**windowing:** operazione di estrazione delle finestre temporali per eseguire le operazioni di campionamento

es:

Sia data una canzone di 3 minuti

1. si sceglie una finestra di 1000 Hz al secondo
  2. si sceglie un campionamento di 10.000 campioni
  3. visto che la finestra è ampia 1000, si devono prendere 10 sec per ottenere 10.000 campioni
  4. si fa lo spettro delle frequenze in questi 10 sec e si prelevano da questo i 10.000 campioni
  5. si ripetono i 4 punti appena elencati fino a quando non si ottiene l'intero spettro discretizzato
- La FFT una volta individuata la finestra temporale sulla quale agire, la divide in 2 parti (una finale e una iniziale) ad ognuna delle quali applica la DFT o una trasformata discreta del coseno, da questo procedimento si ottiene una discretizzazione dello spettro, parte finale e iniziale vengono nuovamente fuse e si va avanti ciclicamente come già detto.

Il suono è UN'INSIEME di onde meccaniche longitudinali -> questa definizione è più corretta dato che i suoni complessi (che costituiscono la maggioranza dei suoni esistenti in natura) sono scomponibili come somma di più onde armoniche; quindi un solo suono complesso si può vedere come sovrapposizione di più onde sonore armoniche/pure.

Breve ripasso di fine argomento:

- Analisi armonica: scoperta da Fourier, è l'analisi compiuta su un suono complesso al fine di individuare delle onde più semplici che lo compongono
- Trasformata di Fourier: strumento che consente di studiare nel dominio delle frequenze un suono
- Serie di Fourier: caso particolare della trasformata di Fourier, questa può essere applicata solo ai suoni puri o i suoni complessi PERIODICI
- Spettro di Fourier: insieme delle componenti di un suono con propria ampiezza e fase
- Sintesi di Fourier: sintesi di un suono a partire da funzioni goniometriche semplici (seni e coseni)

Il sonogramma/ spettrogramma è un grafico che ha sull'asse delle ordinate il tempo, sull'asse delle ascisse la frequenza e sull'asse z (che non sempre c'è) l'intensità sonora. Per osservare in 2D il grafico si impiegano delle tonalità di colore più o meno scure. Le aree contrassegnate da un colore più scuro indicano i valori di tempo e frequenza per i quali il suono, al quale in sonogramma si riferisce, ha intensità maggiori; viceversa in quelle chiare l'intensità sonora sarà minore.

Il sonogramma mostra come evolve nel tempo lo spettro delle frequenze, questa informazione fornisce gli indizi necessari ad individuare la natura del suono (una voce, una canzone...). L'utilità principale dello spettrogramma è quella di legare variazione dello spettro delle frequenze a come varia nel tempo.

Lo spettrogramma viene utilizzato dai musicisti per individuare gli accordi delle tracce musicali. Dato uno spettro continuo: ai picchi della funzione dello spettro si associano aree scure di spettrogramma; alle conche della funzione dello spettro si associano invece aree chiare dello spettrogramma.

### La frequenza delle note

Ogni nota musicale è individuata da un preciso valore di frequenza (frequenza fondamentale della nota). Le note possono avere dei timbri diversi, il timbro è dato dalla composizione armonica dello spettro della nota in questione (esempio: il sol ha una sua frequenza, ma se viene cambiato il suo spettro armonico si ottengono dei sol più o meno marcati -> basta pensare alle note di un pianoforte!!).

Si definisce nota musicale ciascuno dei simboli utilizzati in musica per descrivere un suono. Le note musicali fondamentali (do re mi fa sol la si) sono organizzate secondo una scala diatonica chiamata **modo maggiore**.

Le scale diatoniche prevedono l'ordinamento dei suoni secondo una separazione fra toni ( T ) e semi-toni ( sT ); una scala è diatonica se incontrato un sT, prima di incontrarne un altro vi sono o 2 o 3 T che li separano -> infatti *mi* e *si* sono semitoni!

esempio//  
do re mi fa sol la si  
T T sT T T T sT  
//fine esempio

Oltre alla scala diatonica esistono anche quella temperata e cromatica.

Le note vengono organizzate in **ottave**, l'ottava è individuata da una sequenza di note che inizia e finisce con la stessa nota (es: *do re mi fa sol la si do*). La nota che chiude l'ottava ha frequenza **doppia** rispetto la nota che la apre (es: il *do* che chiude l'ottava dell'esempio ha frequenza doppia rispetto quello che la apre). L'ottava successiva a quella appena individuata inizia con la stessa nota che chiude l'ottava precedente.

Nella scala diatonica le ottave contengono solo le note della scala stessa (ossia 7 note + 1 che chiude l'ottava).

Nella scala temperata si considerano anche i semitoni fra una nota e l'altra (do diesis, sol diesis...) arrivando ad un totale di 12 note per ottava (*do do\_diesis re re\_diesis mi fa fa\_diesis sol sol\_diesis la la\_diesis si*) + 1 nota di chiusura (il *do*).

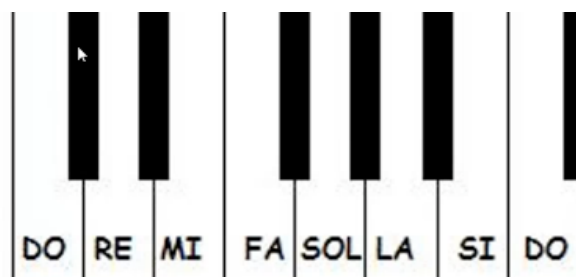
Semitono: è una nota, delle 12, di un'ottava della scala temperata

Tono: 2 semitoni, assieme, formano un tono

Scala diatonica: *do re mi fa sol la si do*

Scala temperata: [*do do#*] [*re re#*] [*mi fa fa#*] [*sol sol#*] [*la la#*] [*si do do#*]

Le note fra parentesi quadre sono le coppie di semi-toni che uniti individuano un tono, in questo modo dalla scala temperata si passa alla scala diatonica.



I TASTI NERI VENGONO CONSIDERATI SOLO NELLA  
SCALA TEMPERATA, NELLA STALLA DIATONICA  
VENGONO SCARTATI

# = "diesis"

Nella scala temperata ci sono SOLO semi-toni.

Avanzando lungo la scala temperata, le note crescono di frequenza secondo un fattore  $2^{n/12}$  dove "n" varia da 0 a 12.

Note	Notazione Anglossassone	Frequenza (Hz)
la $\flat$	A	$440.0 = 440 \times 2^{0/12}$
la#	A#	$466.2 = 440 \times 2^{1/12}$
si	B	$493.8 = 440 \times 2^{2/12}$
do	C	$523.2 = 440 \times 2^{3/12}$
do#	C#	$554.4 = 440 \times 2^{4/12}$
re	D	$587.3 = 440 \times 2^{5/12}$
re#	D#	$622.2 = 440 \times 2^{6/12}$
mi	E	$659.2 = 440 \times 2^{7/12}$
fa	F	$698.4 = 440 \times 2^{8/12}$
fa#	F#	$740.0 = 440 \times 2^{9/12}$
sol	G	$784.0 = 440 \times 2^{10/12}$
sol#	G#	$830.6 = 440 \times 2^{11/12}$
la	A	$880.0 = 440 \times 2^{12/12}$

Attenzione! Un'ottava è tale se si apre e si chiude con la stessa nota, quindi anche quella della tabella nell'esempio è un'ottava dato che si apre e si chiude con un *la*.  
Un pianoforte standard (88 tasti) ha tasti sufficienti a coprire 7 ottave temperate; l'ottava centrale è la quarta, essa è chiamata ottava principale del pianoforte.

La frequenza del *la* dell'ottava principale, ossia 440Hz, è la frequenza adottata come convenzione per accordare gli strumenti musicali; infatti 440Hz nel mondo della musica è nota come frequenza fondamentale. A partire dalla frequenza fondamentale o di riferimento ( $f_{ref}$ ) si è sviluppata una formula che consente di ricavare la frequenza di qualsiasi altra nota. Data  $f_n$ , ossia la frequenza di una nota che dista  $n$  semi-toni dal *la* dell'ottava fondamentale, essa è data dalla formula:  
 $f_n = f_{ref} * 2^{n/12}$  -> se la nota di frequenza  $f_n$  si trova più a destra del *la* della quarta ottava  
 $f_n = f_{ref} / 2^{n/12}$  -> se la nota di frequenza  $f_n$  si trova più a sinistra del *la* della quarta ottava

Le frequenze di due stesse note appartenenti ad un'ottava diversa, sono legate da un fattore moltiplicativo  $2^n$  e da un fattore divisorio  $2^n$ , dove  $n$  indica quante ottave separano le due note considerate (esempio: il *re* della quinta ottava e il *re* della seconda ottava, stanno in un rapporto di frequenza di 1 a  $2^3$ ).

Esiste un atlante che racchiude tutte le note esistenti, questo racchiude note da 16Hz a quasi 16.000Hz. Il pianoforte impiega note che vanno da una frequenza minima di 27.5Hz a 4186Hz.

### Ampiezza ed inviluppo

L'energia sonora decade in maniera quadratica dal momento della sua emissione fino al momento in cui essa si estingue.

L'inviluppo è come varia l'ampiezza del suono dal momento in cui viene emesso fino al momento in cui si estingue.

L'inviluppo è un grafico che ha sull'asse delle ordinate il tempo e su quello delle ascisse l'ampiezza dell'onda sonora alla quale si riferisce.

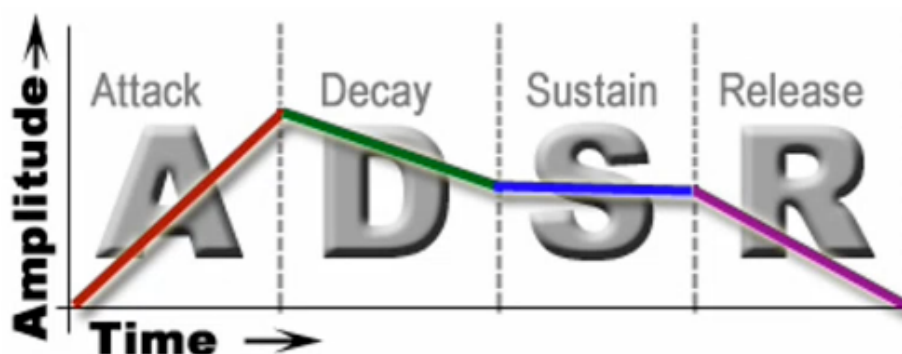
Esistono diversi tipi di inviluppo nel mondo della musica, questi vengono studiati affinché si ottengano suoni sempre più particolari. Uno dei più celebri inviluppi che caratterizza le note musicali suonate dagli strumenti è l'inviluppo ADSR (Attack, Decay, Sustain, Release). Questo inviluppo si divide in 4 step detti TRANSITORI, ogni transitore avviene in una area del grafico di inviluppo, questo viene appunto diviso in 4 settori (ognuno per transitore).

-Attack: fase in cui l'ampiezza da 0 raggiunge il picco massimo, questa situazione si ha lungo tutto il tempo necessario alla sorgente per mettere la nota

-Decay: il suono più si allontana dalla sorgente più perde di potenza e quindi di ampiezza

-Sustain: quando arriva un certo valore di ampiezza che è interessante per ottenere una certa melodia, si fornisce dall'esterno alla nota energia a sufficienza per mantenere costante per un certo intervallo di tempo l'ampiezza raggiunta alla fine della fase precedente

-Release: l'energia cessa di essere fornita e il suono segue il corso naturale degli eventi estinguendosi





Ogni strumento musicale ha il suo personale inviluppo ADSR; infatti i tempi di attack, decay, sustain e release variano da strumento a strumento.

### I rumori colorati

Ad un certo colore si attribuisce una certa frequenza sonora, il principio è lo stesso che viene utilizzato alle frequenze dello spettro del visibile della luce.

Il rumore è una componente sonora **ineliminabile**, ogni volta che viene captato un suono sarà sempre presente in esso una componente di disturbo, essa lieve o forte che sia esiste sempre! Il rumore è nei fatti un segnale che si somma al segnale di interesse in maniera del tutto casuale, è proprio il fatto che sia causale a renderlo ineliminabile, infatti le variabili casuali non sono studiate mediante la matematica bensì mediante la teoria delle probabilità.

I rumori in acustica vengono differenziati in: intenzionale e non-intenzionale.

Quello intenzionale è inserito volutamente da chi sta manipolando il suono (esempio: si possono aggiungere all'audio di un video dei rumori naturali per rendere la riproduzione il più realistica possibile) quello non-intenzionale è invece un fastidio che si sovrappone al suono ascoltato.

Come già detto, le frequenze che compongono un rumore si presentano in maniera casuale (il rumore è appunto un suono complesso aperiodico), diventa quindi interessante studiare la probabilità con la quale si presentino le diverse frequenze di precisi rumori, al fine di potere eliminare le frequenze dei rumori in quantità tale da avere un suono più pulito.

I rumori si studiano mediante le funzioni di distribuzione di probabilità (pdf), la pdf mostra graficamente come è distribuita la probabilità che in certi istanti di tempo il rumore alla quale essa si riferisce assuma un certo valore di frequenza. Ad uno specifico tipo di rumore è associata la sua specifica pdf che consente di prevederne i comportamenti.

I rumori oggetto di questo corso saranno: bianco, rosa, marrone, blu, viola, grigio.

-bianco: è un rumore teorico (quindi non reale) caratterizzato da valori di ampiezza casuali nel dominio del tempo e **costanti in quello delle frequenze**. Per questa sua caratteristica di essere costante nel dominio delle frequenze, si dice che i valori di ampiezza del rumore bianco seguono una legge di probabilità uniforme (detto in parole povere, il grafico della pdf è una retta costante). Il rumore che più si avvicina al rumore bianco nella realtà è quello che si sente quando la televisione non capta il canale e si ha quella schermata di pallini grigi, bianchi e neri. Il rumore bianco viene utilizzato come input per i sistemi acustici al fine di ottenere la loro risposta in frequenza.

-rosa: questo rumore decresce di 3dB ogni volta che si sposta da un'ottava alla successiva, infatti la pdf di esso è rappresentabile da una rampa discendente. Ma quando si è parlato di dB è stato detto che 3dB equivalevano a un fattore 2 nella scala degli Hz, infatti nel passaggio da un'ottava alla sua successiva le probabili frequenze, assumibili dal rumore rosa, si **dimezzano** rispetto le probabili frequenze dell'ottava precedente. Il rumore rosa è quello prodotto dalle cascate che si infrangono sul pelo dell'acqua/al suolo.

-marrone: identico al rosa, solo che il decremento fra un'ottava e le successive è di 6dB (fattore moltiplicativo 4 negli Hz) di ottava in ottava. Il rumore marrone è uguale a quello di una cascata che infrange il pelo dell'acqua/ il suolo però più attenuato.

-blu: speculare del rosa (il passaggio da un'ottava alla sua successiva vede le frequenze incrementarsi di 3dB; la pdf è una rampa ascendente). Il rumore blu viene utilizzato in acustica per svolgere il Dithering. Il rumore blu è quello prodotto dalla pioggia che picchia il suolo. Dithering: è un processo che riduce la distorsione sonora quando il suono, oggetto di studio, viene riquantizzato (riquantizzazione: passaggio dai valori discreti ai valori continui).

-viola: speculare del marrone. Il rumore viola viene utilizzato in acustica per curare gli acufeni. Il rumore viola è quello prodotto dalla pioggia che picchia il suolo in maniera più attenuata.

Acufeni: malattia che fa percepire a chi ne è affetto dei fischi irreali.

Il cervello umano rimuove i suoni che percepisce in maniera ricorrente, producendo quindi dei fischi sfruttando il rumore viola e facendoli udire con costanza a chi è affetto da acufeni, si è in grado di fare fronte a questa malattia.

-grigio: lo spettro delle frequenze di questo rumore segue una curva isofonica; una curva isofonica individua un valore di ampiezza più alto (una  $y$ ) quanto è più bassa la frequenza (una  $x$ ), poi a partire da un certo valore di frequenza questa curva ricomincia a salire (di poco però, le altezze iniziali non verranno mai più raggiunte) per poi arrestarsi. Le curve isofoniche descrivono come sente i suoni l'orecchio umano. Il rumore grigio è un rumore che consente di udire ogni frequenza di cui si compone ALLA STESSA INTENSITÀ! La sua pdf è una curva che forma una specie di smile. A livello di percezione uditiva, il rumore grigio ricorda quello bianco solo più attenuato.