

Chiacchierate sull'elettroacustica

2 - Meraviglie del suono

Eccoci alla prima vera "chiacchierata" sulle casse acustiche... sui woofer... sui tweeter...

E invece no! Stavolta tenterò un divertente esperimento: voglio vedere quanti di voi scapperanno, leggendo le prossime righe.

Prima di divertirci con le cose tecniche, dobbiamo affrontare un argomento teorico, di pura matematica (...qui mi sono perso metà dei lettori).

Tratteremo nientemeno che l'**Analisi di Fourier**, spesso definita come *Teorema di Fourier*.

(...e qui se n'è andata l'altra metà).

Per quelli più eroici, che stanno tentando di resistere, sparo la cannonata finale:

la micidiale formula matematica...

$$\sum_{k=0}^n \frac{4}{(2k+1)\pi} \sin(2k+1)x$$

Scherzi a parte, chi ha letto l'introduzione sa che queste sono chiacchierate da bar; siamo qui per divertirvi, non per enunciare teoremi, riportare formule o citare paroloni scientifici.

Questa volta lo stiamo facendo, ma è solo per farci due risate.

Vi racconto come il Teorema di Fourier venne spiegato a noi, dal mio vecchio professore; prendete un bel respiro e cercate di leggere fino alla fine, se potete:

Una qualsiasi funzione periodica, graficamente rappresentabile da una forma d'onda alternata, comunque complessa purché continua a tratti, è riconducibile alla somma di infinite onde sinusoidali dette "armoniche", di ampiezza opportuna, ma con frequenze che sono sempre multipli interi rispetto alla prima, che assume il nome di "fondamentale".

Dalla platea si levò una voce: *-Fategli un antidoping!...*

All'epoca mi sfuggì un particolare. Visto che si parlava di impianti audio, associai automaticamente quell'enunciato al funzionamento di amplificatori, altoparlanti e filtri.

In realtà, se proverete a rileggerlo anche 50 volte, non troverete nessun riferimento alla riproduzione sonora, semplicemente perché non c'è.

Questo genio qui a destra, **Jean Baptiste Fourier**, morì nel 1830; dovettero passare altri 96 anni prima dell'invenzione dell'altoparlante, pertanto la sua analisi non poteva riferirsi alle nostre amate casse.

Potremmo pensare che in quel periodo stesse studiando l'emissione di un violino, di un flauto o di un pianoforte...

Del resto, l'acustica veniva trattata scientificamente dai tempi di Leibnitz e di Newton, di cui il nostro eroe era grande ammiratore.

Anche questa, tuttavia, è un'ipotesi sbagliata; in quel periodo, pare che questo supercervello si dedicasse alla propagazione del calore.



La realtà è che il Teorema di Fourier non c'entrava nulla con il suono; almeno, così era per il suo autore. In origine, lui parlava di matematica pura, a livello squisitamente teorico.

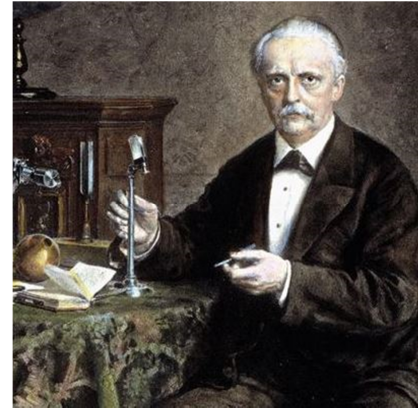
Oggi non è più così. Sappiamo che l'acustica degli strumenti musicali, tutta la riproduzione audio ed in particolare l'elettroacustica, sono discipline in cui quel principio è assolutamente basilare; ma questo non è dovuto alla genialità del leggendario scienziato francese.

Mentre Fourier, a Parigi, moriva di aneurisma cardiaco, un gracile bambino tedesco passava le sue giornate a leggere i libri di suo padre, pur non avendo ancora compiuto 9 anni.

Si chiamava **Hermann von Helmholtz**, proprio quello del famoso *risuonatore di Helmholtz*, considerato il padre del Bass-Reflex da noi elettroacustici.

Nemmeno lui riuscì a vedere un altoparlante in funzione, perché morì nel 1894. Tuttavia, era così affascinato dall'acustica che riuscì a studiarla con ciò che aveva: sfere cave di diverse dimensioni, con un'apertura in cui soffiare, producendo note diverse secondo il volume d'aria al loro interno.

Nel ritratto qui a destra, ne vediamo una sul tavolo.



Fu lui, per primo, ad associare il Teorema di Fourier all'interpretazione dei suoni; era il 1862.

Ma quindi, in buona sostanza, che diavolo dice 'sto teorema?

Perché è così importante per le nostre casse?

Per prima cosa, vediamo come si può descrivere un concetto matematico senza usare formule, ma solo chiacchierando amichevolmente.



Supponiamo di incollare una pallina colorata sul bordo di un disco, per poi farlo girare a velocità costante.

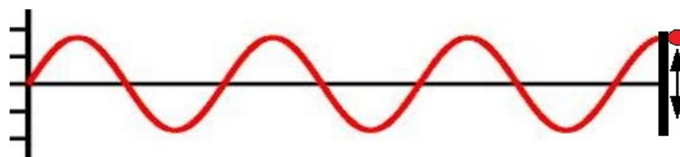
Guardando frontalmente, la pallina ci apparirà in movimento circolare.



Ora mettiamoci di lato, in modo da vedere il disco di profilo.

Da questa posizione, il moto della pallina ci sembrerà alternativo, ovvero si sposterà su e giù in modo continuo e regolare.

Se quella pallina potesse spruzzare un getto di vernice, su un nastro di carta che gli stesse scorrendo dietro, il risultato sarebbe...



...una splendida **sinusoide**, l'onda più famosa, più discussa, più studiata dai matematici fin dall'antichità. E l'abbiamo spiegata con un disco e una pallina, senza ricorrere alla solita trigonometria.

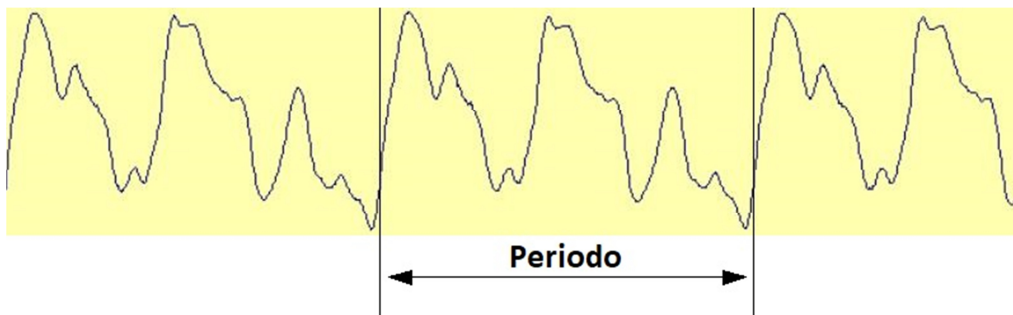
Talvolta si sente dire che l'onda sinusoidale non esiste, né tra i suoni naturali, né tra gli strumenti musicali, né in qualsiasi altro suono comunemente percepito dall'orecchio, nella vita quotidiana.

In realtà, io l'ascoltavo decine di volte al giorno, quando facevo il tecnico elettroacustico, ma è proprio questo il punto: sembra che la sinusoide venga prodotta soltanto artificialmente, con un apposito generatore da laboratorio... È davvero così?

Secondo Fourier (e secondo von Helmholtz), dovremmo dire esattamente il contrario: TUTTI i suoni sono sinusoidali, dal ruggito del leone al violino di Paganini, dal trapano a percussione alla sirena della Polizia, dal fischio della pentola a pressione alla voce di Luciano Pavarotti.

Chiunque abbia visto un'onda acustica, sul display di un oscilloscopio, starà probabilmente pensando che siamo impazziti tutti e tre: Fourier, Helmholtz ed io (un francese, un tedesco e un italiano, come nelle vecchie barzellette).

Per chi non avesse avuto tale opportunità, l'onda acustica gliela mostro io.
Si tratta di un violoncello, mentre suona un LA sulla seconda corda.



Il **periodo** è l'intervallo oltre il quale l'onda si ripete, ciclicamente.

Il numero di periodi in un secondo si definisce **frequenza**, in questo caso 220 hertz.

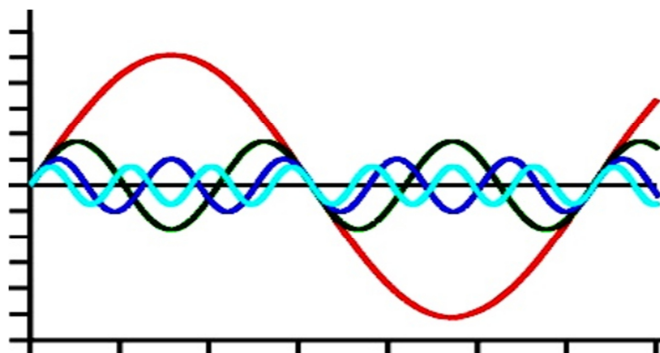
Ora la domanda, quella a cui tutti state pensando: "Quella roba, a te sembra una sinusoide?" Evidentemente no, ma l'oscilloscopio non ci mostra la vera emissione acustica del violoncello, perché non isola le innumerevoli onde sonore che produce; le somma tra di loro e ci presenta il risultato finale.

Nella realtà, lo strumento sta producendo una prima sinusoide di notevole ampiezza, che viene chiamata **armonica fondamentale**, con la stessa frequenza dell'onda che vediamo graficamente: 220 Hz.

In sovrapposizione ad essa, vengono emesse tante sinusoidi più piccole, le cui frequenze sono semplicemente moltiplicate per 2, per 3, per 4, ecc. ecc., quindi 440 Hz, 660, 880, e così via...

Tutti multipli interi della prima.

Vediamo un esempio schematico:



Non ha niente a che fare con il violoncello precedente; questo è solo un esempio per mostrare il contenuto armonico, usando colori differenti.

La fondamentale (in rosso) è sempre la più alta, mentre la seconda armonica, la terza, la quarta e tutte quelle successive (che qui non mostriamo) assumono "ampiezze opportune" come scritto nell'enunciato, per ottenere il risultato finale.

In buona sostanza, Fourier e il violoncello applicano lo stesso principio in modo opposto.

- Lo scienziato ha dimostrato con la matematica che tutto questo è possibile, ovvero che qualsiasi forma d'onda, anche molto complessa, si può scomporre in tante semplici sinusoidi.

- Lo strumento, invece, fa con la fisica il percorso contrario: produce innumerevoli sinusoidi per poi sommarle in una forma d'onda complessa, che prende il nome di **timbro**.

Talvolta, potrebbe capitarvi di sentir parlare di “**sub-armoniche**”. Si tratta di sinusoidi che hanno frequenze inferiori rispetto alla fondamentale. Sono poco percepibili, sia perché di minor ampiezza, sia perché stanno quasi sempre sotto i 50 Hz, dove l’orecchio è praticamente insensibile; sono frequenze che si sentono con la pelle, lo stomaco e le ossa, ma devono essere davvero potenti.

Le sub-armoniche sono quasi sempre effetti collaterali, vibrazioni non volute che alcuni strumenti producono spontaneamente, in seguito alla sollecitazione meccanica di materiali diversi.

Facciamo un paio di esempi...



Qui a destra abbiamo una tuba in SI bemolle, che scende fino alla frequenza di 58 Hz.

Ovviamente, parliamo della fondamentale. Abbiamo già capito come ci sia una miriade di armoniche sovrapposte, di frequenza doppia, tripla e così via.

Sulla tastiera di un pianoforte, il corrispondente SI *b* si ottiene con la pressione del secondo tasto da sinistra.

Ovviamente, anche questa nota produce una frequenza di 58 Hz; se così non fosse, uno dei due strumenti sarebbe scordato.



Tuttavia, secondo alcune fonti, il Si *b* del pianoforte corrisponderebbe a 29 Hz, ovvero la metà.

E’ quello che rilevarebbe un microfono, collegato ad un frequenzimetro... ma non il nostro orecchio.

Questo è un esempio evidente di sub-armonica.



A differenza della tuba, il pianoforte suona con due materiali diversi: colpisce una corda metallica, che poi trasmette la sollecitazione alla tavola armonica in legno. È proprio quest’ultima che produce il suono che sentiamo, perché la sola corda non si sentirebbe più a pochi metri di distanza, mentre un pianoforte “gran concerto”, lungo quasi tre metri, soddisfa le esigenze di un teatro da 2000 posti.

In parole povere, il legno introduce una frequenza spuria, che nella vibrazione della corda non c’era.

Comunque, non ha molta importanza; nessun orecchio umano percepisce quei 29 Hz, mentre per sentirli con il corpo ci vorrebbe una bomba, non un pianoforte.

Il problema delle sub-armoniche vi potrà capitare anche con altri strumenti.

Ad esempio, troverete fonti secondo cui il contrabbasso produce un MI a 41 Hz, perché così si legge sul frequenzimetro. In realtà quel MI viene percepito a 82 Hz.

Non dovete credermi sulla parola; se ne avete la possibilità, confrontate due note corrispondenti semplicemente a orecchio, tra il contrabbasso e la tuba; vi accorgete che non c’è quell’ottava di differenza, tra i due strumenti.

Ah... dimenticavo... un intervallo di ottava, sulle note musicali, indica un raddoppiamento di frequenza.

Pertanto, la 2^a armonica, la 4^a, l’8^a, la 16^a e così via, producono la stessa nota della fondamentale, solo su ottave diverse.

Chiuso il capitolo delle sub-armoniche, torniamo al nostro Fourier, chiamando in causa un personaggio che forse avrete già sentito.

Anche se l'oscilloscopio non ce le mostra, quelle sinusoidi sovrapposte ci sono sempre. I nostri amplificatori le riproducono tutte, così come i nostri diffusori ed i loro crossover.



Per questo motivo, **Amar Bose** era fissato con l'altoparlante unico, a larga banda: un driver che riuscisse a riprodurre tutto da solo, senza ricorrere a distinzioni tra woofer e tweeter.

Se fosse ancora vivo, sarebbe bello chiederlo a lui, cosa c'entra il Teorema di Fourier con le nostre casse...

Bose riteneva che il crossover fosse acusticamente una bestemmia, proprio perché creava una sorta di interruzione nello sviluppo armonico dei suoni.

Quest'uomo, secondo alcuni, è stato il più grande tecnico elettroacustico della storia.

La sua azienda, la Bose Corporation, detiene un numero impressionante di brevetti, che probabilmente non sarà mai eguagliato da nessuno.

Fino al 2013, anno della sua morte, aveva messo i suoi altoparlanti sulla Stazione Spaziale Internazionale, dentro la Cappella Sistina e nei carri armati dell'Esercito Americano.

Insomma, non è che gli mancassero le competenze per progettare un crossover, anzi, quando decise di farlo gli uscirono idee davvero geniali, anche se un po' complicate da calcolare.

Tuttavia, per oltre metà della sua vita, il suo principale problema fu proprio il Teorema di Fourier: come si può accettare che il contenuto armonico proveniente dallo stesso violino, flauto, sassofono o contrabbasso, venga suddiviso tra due o tre altoparlanti distinti, con caratteristiche completamente diverse?

Oltre a lui, parecchi grandi cervelli si impegnarono sull'argomento, ognuno con le proprie soluzioni.

Inoltre, non dovete pensare che Fourier si applichi solo ai filtri.

È importante nell'adozione di membrane in polipropilene, carbonio, kevlar, ecc., serve a spiegare il concetto di sub-woofer ed entra in gioco perfino sulla risposta ai transienti.

Per questo andava trattato subito, come tema iniziale. In sostanza, il 90% dell'elettroacustica dipende da quel teorema.

Ma questi saranno senz'altro ottimi argomenti, per le nostre future chiacchierate.

Alla prossima!

12 dicembre 2020


(Robert Romiti)