

Arte e scienza dei suoni nell'ottocento: ovvero interazioni tra la pratica musicale e le nuove conoscenze fisiche, in particolare in acustica, nell'ottocento.

Angelo Ricotta

angeloricotta@gmail.com

Nel 1813, anno di nascita di **Giuseppe Verdi** (Roncole di Busseto, 10 ottobre 1813–Milano, 27 gennaio 1901) e



Richard Wagner (Lipsia, 22 maggio 1813–Venezia, 13 febbraio 1883), tutta l'Europa era in armi contro la Francia.



I Francesi furono duramente sconfitti a Lipsia (16-18 ottobre 1813) nella cosiddetta battaglia delle nazioni. L'avventura di **Napoleone Bonaparte** (Ajaccio, 15 agosto 1769–Isola di Sant'Elena, 5 maggio 1821) stava volgendo al tramonto e si chiuse definitivamente nella battaglia di Waterloo (Belgio, 18 giugno 1815).



Nel **Congresso di Vienna** apertosi il 1° novembre 1814 e chiusosi il 9 giugno 1815 si tentò una restaurazione del vecchio ordine europeo infranto dalla prima



rivoluzione francese (1789-1799) e poi dalle campagne napoleoniche. Ma la restaurazione riuscì solo in parte e in modo differenziato nei vari stati in quanto troppi erano stati i mutamenti intervenuti nella società e nelle istituzioni in venticinque anni di guerre, per cui si risolse in un compromesso tra antico e nuovo. Questa instabile situazione sfociò, per tutto il secolo, in frequenti conflitti, rivoluzioni, guerre d'indipendenza, guerre coloniali, dalle quali, infine, emersero gli stati moderni e i nuovi ceti borghesi e proletari.

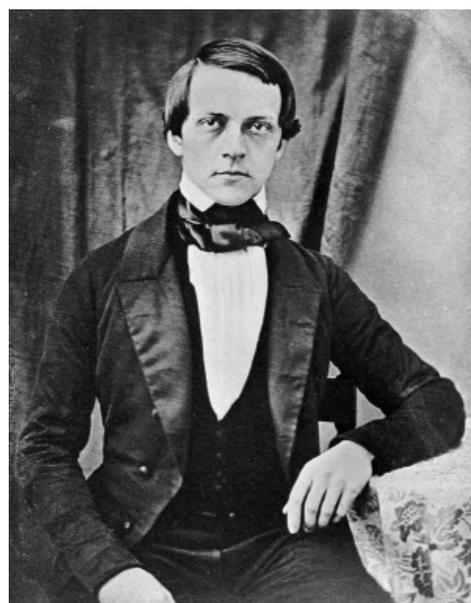
In questo secolo la letteratura, la filosofia e l'arte conobbero uno sviluppo quantitativo e qualitativo tumultuoso.

Ma soprattutto la scienza e la tecnologia subirono una forte accelerazione rispetto ai due secoli precedenti con un susseguirsi di invenzioni e teorie che rivoluzionarono l'immagine del mondo e la struttura stessa della società.

I contributi più importanti all'acustica, in questo secolo, furono dati principalmente da due studiosi: **Helmholtz** e **Rayleigh**. Qui illustreremo solo i contributi dovuti ad Helmholtz in quanto più direttamente attinenti all'arte musicale e all'argomento specifico che vogliamo trattare, laddove Rayleigh si è occupato di problemi più orientati alla fisica del suono.

Hermann Ludwig Ferdinand von Helmholtz (Potsdam, 31 agosto 1821– Berlino-Charlottenburg, 8 settembre 1894).

Fece importanti scoperte in campi diversi come la fisica e la fisiologia. Applicando la sua conoscenza della fisica alla ricerca medica, Helmholtz mostrò che gli esseri viventi rispettano le stesse leggi fisiche come gli altri oggetti. I fisiologi del suo tempo credevano ancora che i corpi viventi fossero speciali perché contenevano una presunta 'forza vitale'. Helmholtz confutò l'esistenza di questa forza. Egli fu anche importante per la ricerca medica



perché inventò molti strumenti nuovi per osservare e misurare il corpo, come l'oftalmoscopio. Egli usò questi strumenti per investigare come i sensi funzionano, una domanda che lo affascinò per tutta la sua carriera scientifica. La sua ricerca contribuì, ad esempio, alla comprensione di come noi percepiamo la profondità, il moto e il colore: "Manuale di Ottica Fisiologica" (*Handbuch der Physiologischen Optik*, 1856-66), e a come noi sentiamo la musica: "La teoria delle sensazioni tonali come base fisiologica della teoria musicale" (*Die Lehre von den Tonempfindungen als physiologische Grundlage für die Theorie der Musik*, 1863).

John William Strutt 3° barone di Rayleigh (Langford Grove, 12 novembre 1842 – Witham, 30 giugno 1919).



Scoprì il gas inerte Argon (Ar) nel 1895 che gli fruttò il Premio Nobel per la Fisica nel 1904. Il suo collega in questa ricerca, Sir William Ramsay vinse, a sua volta, il Premio Nobel per la Chimica nello stesso anno. Condusse la maggior parte delle sue ricerche in un laboratorio privato attrezzato nella residenza di famiglia. La sua Teoria dello Scattering (esposta in diversi lavori tra il 1871 e il 1899) fu la prima teoria scientifica a spiegare correttamente, tra l'altro, perché il cielo è blu, e i suoi due volumi de "La Teoria del Suono" (*The Theory of Sound*, 1877-78) chiarirono la meccanica delle vibrazioni e la propagazione delle onde acustiche.

Ricerche di Helmholtz in Acustica

Tra i problemi di acustica musicale uno dei più importanti è il fenomeno per cui ascoltando simultaneamente due suoni complessi (con armonici), ad esempio l'intervallo di quinta do-sol lo avvertiamo come consonante, mentre, ad esempio, l'intervallo di settima maggiore do-si produce una sensazione dissonante o di incompletezza.

Sull'argomento della consonanza-dissonanza molto lavoro era stato fatto fra il XVII e XVIII secolo culminato nella "teoria delle coincidenze" enunciata da **Pierre Estève** (1720-1779 ca.) nel suo trattato "*Nouvelle découverte du principe de l'harmonie*, 1751" nel quale avanzava l'idea che la vera causa della consonanza potesse risiedere nella concordanza degli armonici fra i vari costituenti fondamentali di una data sonorità.

La teoria di Estève del *combat des harmoniques* fu sviluppata da **Antoine Suremain de Missery** (1767-1852) nella sua *Théorie acoustico-musicale* (1793) che anticipò la teoria della consonanza di Helmholtz di circa settant'anni, sebbene né Estève né Missery **sospettassero nulla circa il fenomeno dei battimenti fra gli armonici superiori**. All'epoca però non esisteva una precisa teoria degli armonici e l'analisi non poté spingersi oltre.

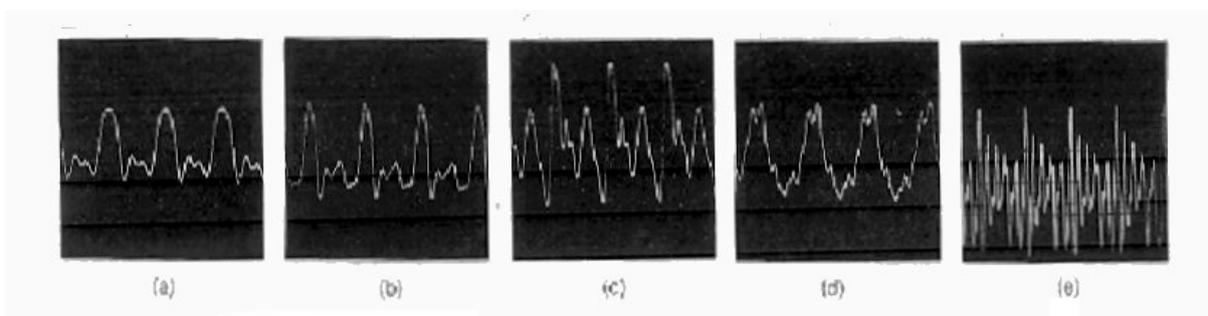
Alcuni decenni prima che Helmholtz si occupasse del problema **Joseph Fourier** aveva mostrato, in particolare, nell'opera "Teoria analitica del calore" (*Théorie analytique de la chaleur*, 1822), che una funzione periodica, com'è un



suono, poteva essere rappresentata come una somma (generalmente infinita) di seni e coseni con certe ampiezze e frequenze multiple di quella base dette armoniche o armonici (risultato parzialmente anticipato da **Daniel Bernoulli** nel 1747).



Ovvero suoni complessi come quelli mostrati in figura



flauto

tromba

sax soprano

violino

tuba

La4 (440 Hz), 8ms

La2 (110 Hz), 40 ms

potevano essere scomposti in somme di suoni semplici (seni e coseni) mediante una precisa relazione matematica detta serie di Fourier

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left[a_n \cos\left(\frac{2\pi nt}{T}\right) + b_n \sin\left(\frac{2\pi nt}{T}\right) \right]$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos\left(\frac{2\pi nt}{T}\right) dt$$

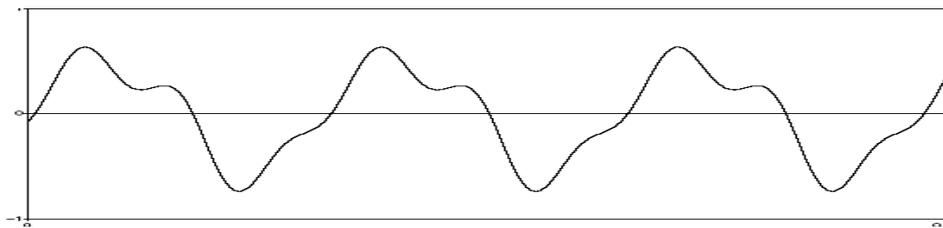
$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin\left(\frac{2\pi nt}{T}\right) dt$$

$$n = 0, 1, 2, 3, \dots$$

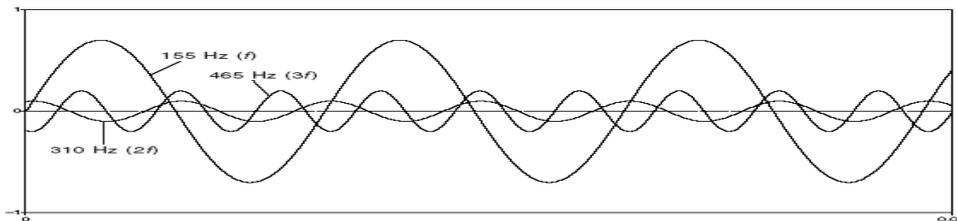
in cui T è il periodo base dell'onda, ossia l'inverso della sua frequenza

$$f = \frac{1}{T} . \text{ Ad esempio la forma d'onda seguente che ha un periodo } T = \frac{1}{155}$$

secondi, ossia $f = 155 \text{ Hz}$

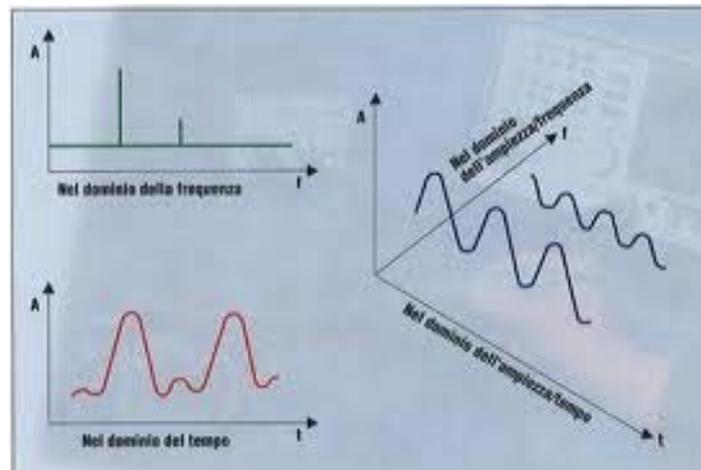


si può ottenere sommando solo tre armoniche rispettivamente di 155 Hz (1^a armonica o fondamentale), 310 Hz (2^a armonica), 465 Hz (3^a armonica)

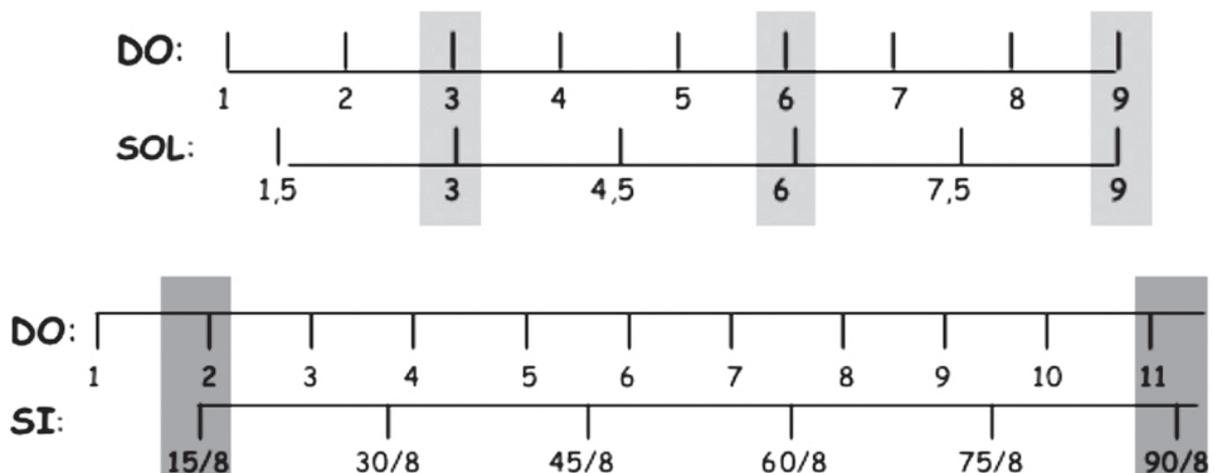


Esiste una generalizzazione della serie di Fourier detta *trasformata di Fourier* con la quale si possono trattare segnali aperiodici. In tal caso lo spettro di frequenze sarà continuo e non discreto come illustrato in precedenza. La serie può essere vista come un caso particolare della trasformata.

Comunque in una rappresentazione tridimensionale le forme d'onda di un particolare segnale periodico apparirebbero come in figura



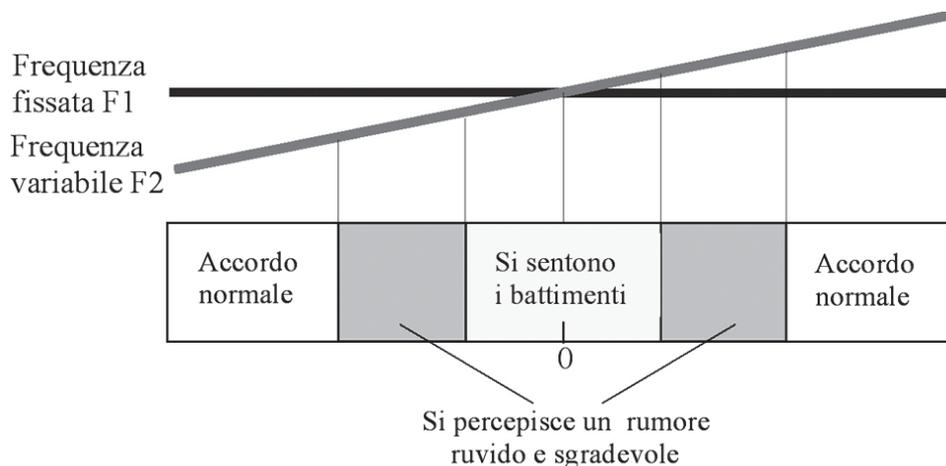
Su queste basi matematiche l'antico problema consonanza-dissonanza poteva essere impostato in modo più scientifico, ovvero quantitativo, e inoltre si poteva passare, all'occorrenza, dal dominio del tempo a quello delle frequenze nel quale ultimo certi fenomeni apparivano più comprensibili. Infatti analizzando i due bicordi già citati, l'uno **do-sol** ritenuto consonante e l'altro **do-si** considerato generalmente dissonante, si verifica la situazione illustrata in figura



nella quale appare chiaro che nel caso consonante vi sono diverse coppie di armonici coincidenti, mentre nel caso dissonante non vi sono armonici coincidenti ma solo due armonici vicini che producono un suono aspro o stridulo. Helmholtz eseguì molti esperimenti in merito con strumentazione da egli stesso inventata come illustrato in figura



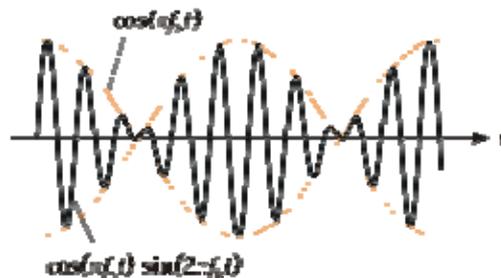
Egli inoltre era in grado di esprimere in formule matematiche i suoi risultati e aveva profonde conoscenze di fisiologia acustica per cui riuscì a concludere che nel nostro apparato uditivo esiste una **banda critica**: se due frequenze non coincidono ma sono ravvicinate esse vanno a cadere in tale zona e non si sentono come due suoni ben distinti ma come un suono intermedio accompagnato da un rumore percettivamente sgradevole. La situazione è la seguente



Se le frequenze sono davvero molto vicine si originano dei **battimenti**, ossia modulazioni *dell'intensità* del suono che se sono di 3-4 al secondo non risultano sgradevoli, anzi, ad esempio, nell'organo acustico il registro **voce umana** è formato da due tubi non perfettamente intonati, allo scopo di ottenere un **tremolo** che imita la voce dei cantanti. Matematicamente il fenomeno si può esprimere come

$$\sin(\omega_1 t) + \sin(\omega_2 t) = 2 \cos\left(\frac{\omega_1 - \omega_2}{2} t\right) \sin\left(\frac{\omega_1 + \omega_2}{2} t\right) = 2 \cos(\Omega t) \sin(\omega t)$$

in cui $\Omega = \frac{\omega_1 - \omega_2}{2}$ e $\omega = \frac{\omega_1 + \omega_2}{2}$, essendo $\omega = 2\pi f$. Che si traduce nella figura



Se però la frequenza dei battimenti aumenta, quando essa arriva a 20-30 cicli al secondo, il suono diviene confuso, stridulo, e pervaso da uno sgradevole rombo. Helmholtz determinò che il massimo effetto si aveva fra 30 e 40 cicli ma c'erano delle complicazioni: mantenendo fissa a 33 cicli la frequenza dei battimenti, l'asprezza sonora aumenta nelle ottave alte e ciò spiega perché è difficile in armonia utilizzare gli intervalli di semitono delle ottave alte. Un altro effetto di cui Helmholtz si accorse è quello dei **suoni di combinazione**. Mentre nel caso precedente l'orecchio non era in grado di percepire la differente altezza dei due suoni simultanei, in questo caso due suoni simultanei, percepiti differenti in altezza, davano luogo ad almeno un altro suono percepito con un'altezza uguale alla *differenza* in frequenza dei primi due. L'analisi matematica lo portò anche a prevedere l'esistenza di un altro suono, anche se inaudibile, la cui altezza doveva essere la *somma* delle frequenze dei primi due. Affinché il fenomeno fosse percettibile i suoni dovevano avere **un'intensità alta ed essere prolungati**.

Il suono *differenza* era stato già segnalato in passato e **Tartini** lo aveva discusso nel suo "Trattato di musica secondo la vera scienza dell'armonia" (Padova, 1754) definendolo *terzo suono*. Egli aveva scoperto che suonando un bicordo ad un intervallo di 5^a (rapporto di frequenze 3:2) si sentiva un'altra nota più bassa la cui frequenza corrispondeva a un numero di vibrazioni pari alla differenza fra quelle dei due suoni originari. Così, ad esempio, se un

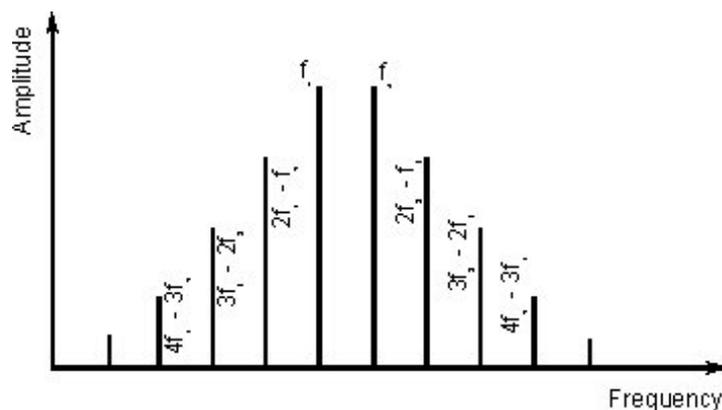


suono aveva 900 vibrazioni e l'altro 600, il suono ulteriore che si sentiva aveva 300 vibrazioni al secondo ed era, quindi, di un'ottava più grave.

Al tempo di Helmholtz molti pensavano che i suoni di combinazione non fossero reali ma si originassero solo dentro l'orecchio. Egli invece dimostrò che esistevano anche al di fuori ovvero erano un fenomeno fisico. Oggi sappiamo che i suoni di combinazione possono essere numerosi e anche matematicamente infiniti e nell'elettronica applicata alle telecomunicazioni vengono definiti **“prodotti di intermodulazione”**. Essi si originano **dall'interferenza di due suoni** che possono produrre altre frequenze secondo la formula

$$\sin(\omega_1 t)\sin(\omega_2 t) = \frac{1}{2}\{\sin[(\omega_1 + \omega_2)t] + \sin[(\omega_1 - \omega_2)t]\}$$

Ovvero prodursi nei **sistemi non-lineari**, ovvero **distorcanti**, che elaborano segnali sinusoidali. L'orecchio umano è un sistema di questo tipo. In quest'ultimo caso la distorsione produce anche armoniche le quali, a loro volta, possono interferire tra loro sempre secondo la formula sopra scritta e inoltre generare anche battimenti. Pertanto due onde sinusoidali di frequenza f_1 e f_2 oltre a produrre armoniche $2f_1, 3f_1, 4f_1, \dots$ e $2f_2, 3f_2, 4f_2, \dots$ produrranno altre frequenze del tipo $\pm nf_n \pm mf_m$, con $n = 1, 2, 3, 4, \dots$ e $m = 1, 2, 3, 4, \dots$ come illustrato in figura

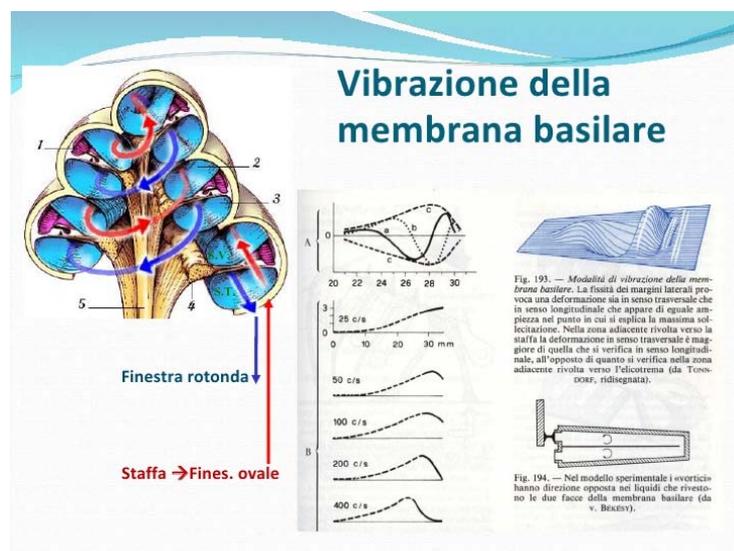
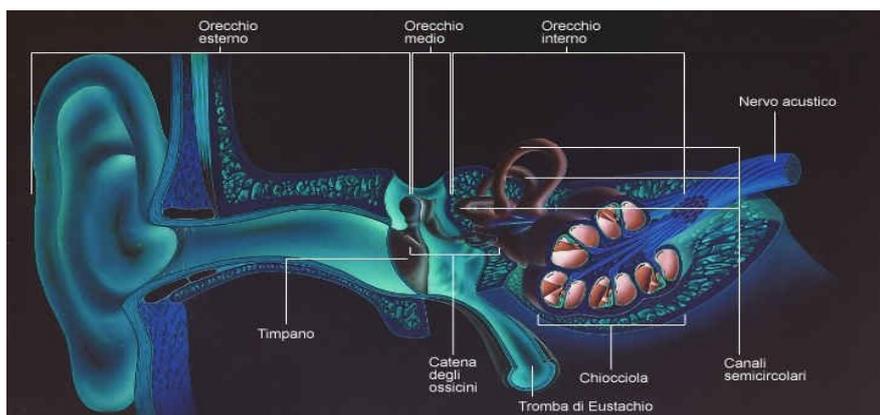


Si definiscono prodotti di intermodulazione del secondo ordine le frequenze $f_1 + f_2$ e $f_1 - f_2$, del terzo ordine le $2f_1 + f_2, 2f_1 - f_2, 2f_2 + f_1, 2f_2 - f_1$ e così via.

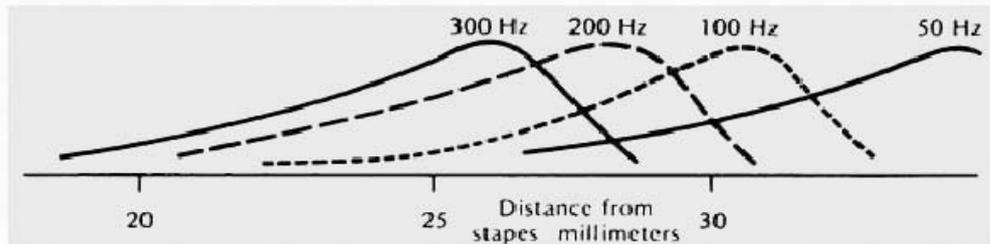
Alla luce di questi risultati il caso riportato da Tartini, nel quale il fenomeno risulta particolarmente evidente suonando due note ad un

intervallo di 5^a, accade perché i prodotti di intermodulazione del second'ordine $f_2 - f_1$ e del terz'ordine $2f_1 - f_2$, che sono normalmente disgiunti, coincidono esattamente sommandosi.

Helmholtz si rendeva conto che mentre la sua teoria spiegava bene la dissonanza non garantiva però automaticamente la consonanza, in quanto quest'ultima veniva implicitamente definita come tutto ciò che non è dissonante. Ma in realtà i musicisti sapevano che esistono diversi gradi di consonanza. Le conoscenze di fisiologia e anatomia dell'orecchio interno della sua epoca non erano sufficienti a spiegare esaurientemente questo fenomeno. Solo le ricerche successive sono state in grado di interpretare la zona critica in termini di insufficiente risoluzione della *membrana basilare*, ossia il filamento all'interno della coclea che, posto in vibrazione, trasmette segnali elettrici alla rete neurale grazie alle *cellule ciliate*, le terminazioni nervose che si trovano sull'Organo del Corti



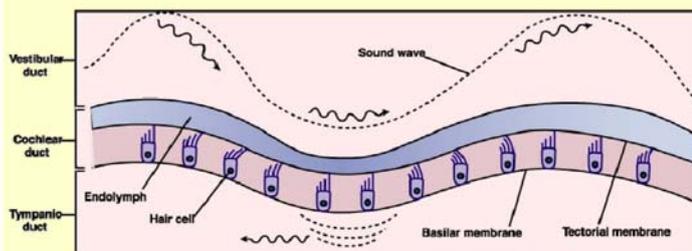
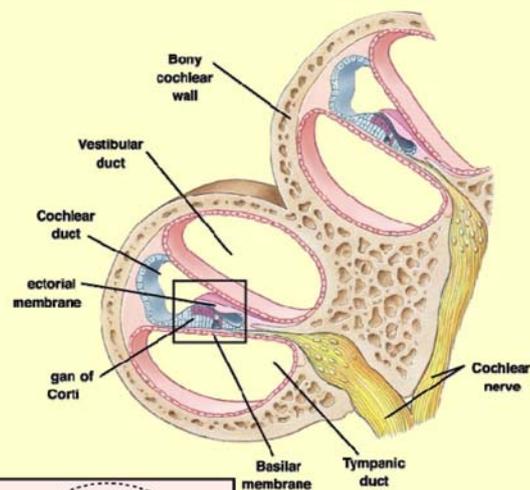
DEPIAZZAMENTO DELLA MEMBRANA BASILARE



Ampiezza di vibrazione in risposta a 4 differenti frequenze di stimoli in rapporto alla distanza dalla staffa

Il picco di massima ampiezza di depiazzamento varia in funzione della frequenza dello stimolo

L'oscillazione delle pareti della membrana basilare provoca la deformazione dell'organo del Corti, una complessa struttura in esso contenuta, che rappresenta la struttura cardine per la trasduzione del segnale.



LA TRASDUZIONE DEL SEGNALE SONORO

L'onda sonora muove la membrana basilare su e giù.

Le stereocilia delle OHCs in contatto con la membrana tectoria vengono spostate verso la stria, si aprono i canali ionici del K⁺ e le cellule si depolarizzano → contrazione

La contrazione delle OHCs amplifica il movimento dell'Organo di Corti e permette l'ancoraggio delle stereocilia delle IHCs alla membrana tectoria

Il depiattamento delle stereocilia delle IHCs le depolarizza e attiva il messaggio elettrico che viene inviato alla fibre nervosa afferente (tipo I)

Le diverse frequenze del suono eccitano punti diversi della *membrana basilare* e la corteccia uditiva le discrimina in base alle particolari fibre nervose che vanno ad attivare i corrispondenti neuroni. Però le *cellule ciliate sono poche migliaia* (circa 16000 nell'orecchio umano) per cui due frequenze troppo vicine vanno ad eccitare una stessa fibra nervosa creando ambiguità percettiva a livello neuronale. D'altronde frequenze molto diverse vanno ad attivare reti neurali spazialmente distanti rendendo difficoltosa l'elaborazione mentale della frase musicale.

Le conoscenze moderne nelle neuroscienze hanno perciò confermato e precisato le geniali intuizioni di Helmholtz. Ma cosa accadde nella sua epoca? Le reazioni alle teorie di Helmholtz, da parte dei musicisti e musicologi suoi contemporanei, furono in maggioranza negative in quanto egli sembrava proporre una base di innatismo per l'armonia tonale (classica) e quindi la sudditanza dell'estetica musicale all'acustica e alla fisiologia dell'apparato uditivo. Pare che **Brahms** abbia detto "In campo musicale Helmholtz è proprio un atroce diletteante".



Questa frase però è riportata da **M. Kalbeck** nella sua biografia di Brahms pubblicata nel 1904 e perciò non si può garantire sulla sua autenticità. Il filosofo hegeliano **Adolf Larsson** si espresse, nel 1888, con un giudizio stroncante “Né il suono, né le scale, i modi, le consonanze e le dissonanze, le forme artistiche sono date dalla natura o si possono spiegare sulla sua base; tutto ciò se l’è costruito l’uomo per i suoi scopi”. Altre critiche vennero anche da filosofi come **Hermann Lotze**, peraltro ben disposto a spiegazioni meccanicistiche, il quale scrisse “Con essa, ammesso che sia esatta, si potrebbero definire solo le condizioni di fatto su cui si basano i sentimenti di armonia e dissonanza, ma resta aperta la questione di sapere perché proprio un’



simmetria nell’eccitazione nervosa produca piacere e l’opposto una sensazione spiacevole”. Nello stesso modo si esprimeva il notissimo musicologo **Eduard Hanslick**, pur discreto sostenitore di Helmholtz, “E’ e resta inspiegato il fatto per noi più importante: il processo nervoso attraverso cui il suono diventa sentimento, stato d’animo”.

Helmholtz stesso, rendendosi conto della notevole plasticità del cervello umano, era disposto a concedere che “...il sistema delle scale, delle tonalità e del loro ordito armonico, non si fonda semplicemente su immutabili leggi della natura ma, al contrario, è in parte anche conseguenza di principi estetici che nello sviluppo progressivo dell’umanità sono stati soggetti a mutamento e lo saranno ancora”.

Ci fu però anche chi scrisse, come **Richard Wallaschek** nel 1904 “Ogni giudizio estetico (nell’accezione più ampia del termine) è legato in prima linea alla condizione naturale dei nostri organi di senso”.



Un’idea che era stata già espressa da **Leopardi** nello *Zibaldone*.

E nel 1898, dall’alto della sua autorevolezza, **Carl Stumpf** aveva ammesso “Gli uomini di scienza sono ancor oggi quasi tutti accomunati

dall'attaccamento a questa teoria, e tra i musicisti, che in un primo tempo avevano mostrato una certa freddezza, parecchi cominciano proprio ora, di fronte a una teoria fisiologica di così eccezionale longevità, a far cadere i loro dubbi”.

E in che rapporti erano Helmholtz e Wagner?

Essi si conoscevano e si frequentavano

occasionalmente. Nel 1858 Helmholtz fu nominato

Professore di Anatomia all'Università di Heidelberg, distante circa 240

Km da Bayreuth, nella quale rimase per tredici anni per poi passare a

Berlino. Nel 1876 Helmholtz fu tra gli invitati da Wagner alla prima

dell'Anello del Nibelungo a Bayreuth. A Berlino la famiglia Wagner era

ospite degli Helmholtz nel loro salotto serale di intellettuali. Helmholtz

era un ammiratore della musica di Wagner e anche se non si è a

conoscenza del giudizio di Wagner sul lavoro in acustica musicale di

Helmholtz, si è portati a ritenere che fosse favorevole visto il perdurare

della loro amicizia. Ovviamente il mondo dei medici e dei naturalisti fu

invece subito d'accordo con Helmholtz ed infatti il

chirurgo **Theodor Billroth**, ad esempio, si studiò di

risalire, con gli strumenti delle scienze naturali, ai

fondamenti della musicalità: ritmo (respirazione,

battito cardiaco), ma anche altezza, timbro, intensità

del suono sono in rapporto con la struttura e i moti

dell'organismo.

Come già accennato, i moderni metodi avanzati delle neuroscienze, che

sono in grado di analizzare il funzionamento dell'apparato uditivo e del

cervello con buone risoluzioni spazio-temporali, sembrano dar

fondamentalmente ragione ad Helmholtz, ovvero avallano la

convinzione che la teoria tonale dell'armonia sia basata sulla biologia del

nostro sistema fisico e neurale.

Una posizione questa avversata da tutte le avanguardie, non solo

musicali, del novecento, che rivendicano la completa libertà

dell'atto creativo umano. E' un dato di fatto però che gli stili musicali

che hanno rinunciato del tutto alla tonalità e spesso anche ad elementi

che concorrono a facilitare l'elaborazione dei segnali neuronali, come la

melodia, il ritmo e il metro, non sono molto popolari. Comunque il

dibattito è ancora aperto e questo è sempre un bene.



Bibliografia

Ian Johnston, *Measured Tones-The interplay of physics and music*, 2nd ed., IOP Pub. Ltd, 2003.

Andrea Frova, *Interazioni forti: Musica e Scienza, Il Nuovo Saggiatore* Vol. 23, n. 3-4, p. 85-97, 2007.

Dieter Ullmann - Myles W. Jackson, *L'Acustica*, cap.xxxiii, Vol VII-L'Ottocento, *Storia della Scienza*, Treccani, 2012.

David M. Howard - Jamie A. S. Angus, *Acoustics and Psychoacoustics*, 4th ed., Focal Press, Elsevier, 2009.

Juan G. Roederer, *The Physics and Psychophysics of Music*, 4th ed., Springer, 2008.

Isabelle Peretz - Robert J. Zatorre, ed.s, *The Cognitive Neuroscience of Music*, Oxford University Press, 2003.