

FISICA ACUSTICA

DEGLI OTTONI

In questo documento intendo sintetizzare tutte le informazioni che ho reperito su Internet riguardo a questo argomento.

Non è tutta farina del mio sacco, anche se è grazie alla esperienza di trombonista e alla mia laurea in Chimica Industriale che ho potuto comprendere l'argomento almeno in parte e riassumerlo.

Non è quindi un trattato ineccepibile dal punto di vista scientifico, né vuole essere completo; diciamo che sono appunti personali.

Sono graditi suggerimenti, correzioni e critiche.

Giugno 2000

Paolo Carboni

e-mail: lem8839@iperbole.bologna.it

Fisica della colonna d'aria in un tubo aperto

Per comprendere il funzionamento di strumenti musicali come tromba e trombone bisogna prima conoscere come gli impulsi sonori si muovono.

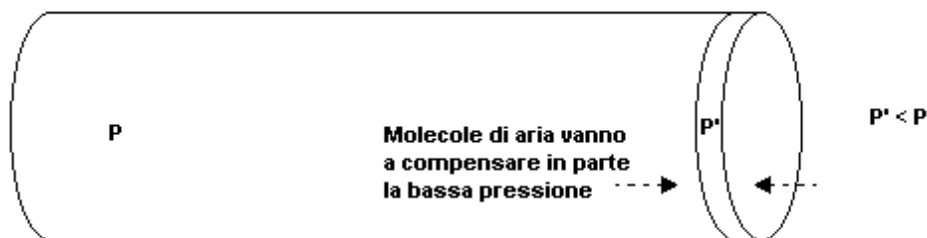
Consideriamo quindi l'esempio più facile possibile: un tubo cilindrico aperto da entrambi i lati. La trattazione che segue non ha le pretese di essere corretta dal punto di vista "accademico", ma ha il solo scopo di rendere chiari alcuni concetti importanti.

Immaginiamo di tenere il tubo con la mano sinistra lasciando l'apertura sinistra aperta, e teniamo ben chiusa l'altra estremità con la mano destra.

Abbiamo quindi un sistema che possiamo considerare chiuso (il tubo) ed un sistema aperto (l'ambiente) entrambi alla pressione d'equilibrio P .

Se noi allontaniamo velocemente la mano spostandola verso destra andremo a creare una piccola sezione di bassa pressione (P') all'estremità destra del tubo.

Per ristabilire l'equilibrio ci sarà uno spostamento di molecole d'aria verso la zona di bassa pressione:

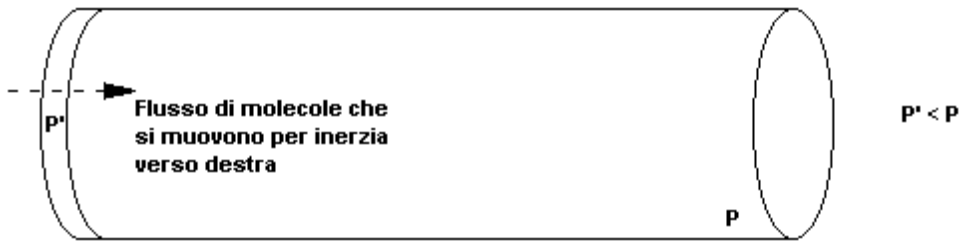


Questo spostamento d'aria, che viene a destra dall'ambiente e a sinistra dal tubo sarà compensato a sua volta da un flusso d'aria che si sposta da sinistra verso destra nel tubo. Essendo infatti l'ambiente un sistema aperto, l'aria spostata da destra verso l'imboccatura del tubo sarà immediatamente compensata e l'energia cinetica corrispondente sarà dissipata.

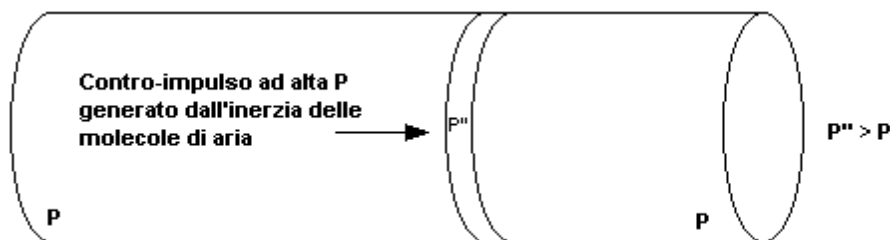
In questo modo si genera un impulso di bassa pressione P' che si muove verso sinistra per ristabilire la pressione iniziale P :



Quando l'impulso di bassa pressione P' raggiunge l'estremità di sinistra cosa succede? Il flusso di molecole che si muovono da sinistra verso destra andrà a colmare il "vuoto" di bassa pressione, ma per inerzia le molecole di aria continueranno a muoversi ancora verso destra:



In questo modo la pressione aumenterà da P' a P (equilibrio) fino ad una pressione P'' superiore a P . Quest'area di alta pressione comincerà a spostarsi verso destra!



In pratica è successo che un impulso di bassa pressione arrivando da destra ha colpito l'apertura sinistra che, per mantenere la pressione originaria P , ha risposto con un contro-impulso di alta pressione P'' che si muove verso destra.

In fisica acustica si dice che c'è stata una riflessione con *inversione*, perché la pressione è cambiata da bassa ad alta (rispetto a P).

In generale possiamo affermare che *ogni volta che un impulso sonoro incontra un punto di discontinuità si ha una riflessione*: l'impulso P' è giunto, da un sistema chiuso come il tubo, ad un sistema aperto come l'ambiente, ed è la discontinuità all'interfaccia fra i due sistemi che ha causato la riflessione e generato l'impulso P'' . Quando il contro-impulso raggiunge l'estremità destra si ha di nuovo una riflessione che genera un impulso a bassa pressione. Ovviamente non si andrà avanti all'infinito, ma l'energia sarà dissipata (dagli attriti e dal fatto che ad ogni riflessione c'è uno scambio con l'ambiente).

Ma se noi, in sincronia con ogni riflessione, ripetiamo il movimento iniziale della mano, diamo energia al sistema (è come se dessimo delle spinte ad un dondolo), abbiamo risonanza, e la frequenza con cui questo avviene non è altro che l'armonico fondamentale, ovvero la nota più bassa che il tubo può produrre.

Deve essere ben chiaro che *per avere risonanza* (e quindi un suono chiaro e definito) è *condizione assolutamente necessaria che ci sia una riflessione*.

I fori di un flauto dolce, le chiavi di un sassofono o la campana di una tromba sono punti di discontinuità che generano una riflessione ed una risonanza.

Ma per avere una buona risonanza è necessario che ad ogni riflessione si perda poca energia.

Un buono strumento musicale quindi deve essere fatto in modo da trattenere il più possibile il suono al suo interno. Quindi per esempio un trombone o una tromba sono fatti in modo che avvenga una buona riflessione nell'area della campana, ma questa non è fatta per irradiare e disperdere il suono, sennò non avremmo risonanza e quindi un suono chiaro e definito.

Se suonate il trombone potete provare un piccolo esperimento; smontate la campana e provate a suonare: noterete che il suono esce tutto dalla estremità cui sarebbe attaccata la campana, ma non c'è risonanza e non c'è una nota definita che "risuona"

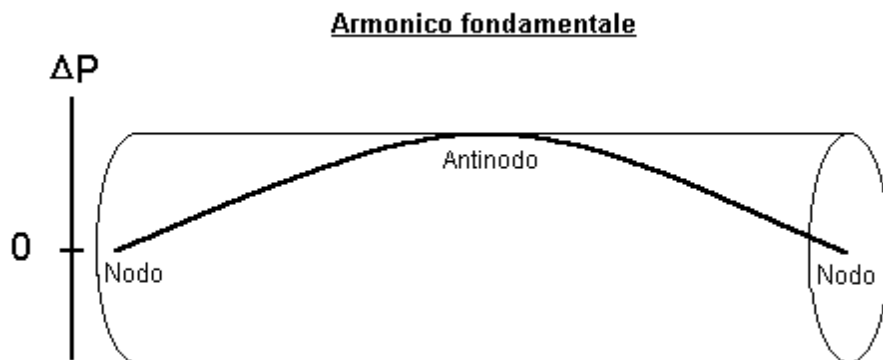
con lo strumento. Noterete anche che fate più fatica a suonare una nota definita, e che rimanete più facilmente senza fiato, in quanto non c'è il "feedback" energetico con lo strumento: tutta l'energia del vostro fiato esce senza "rimbalzare" e risuonare. E' come se spingessimo un dondolo a casaccio, nella direzione sbagliata e senza aspettare il momento giusto: una gran fatica e nessun risultato!

Torniamo a parlare ora dell'armonico di base.

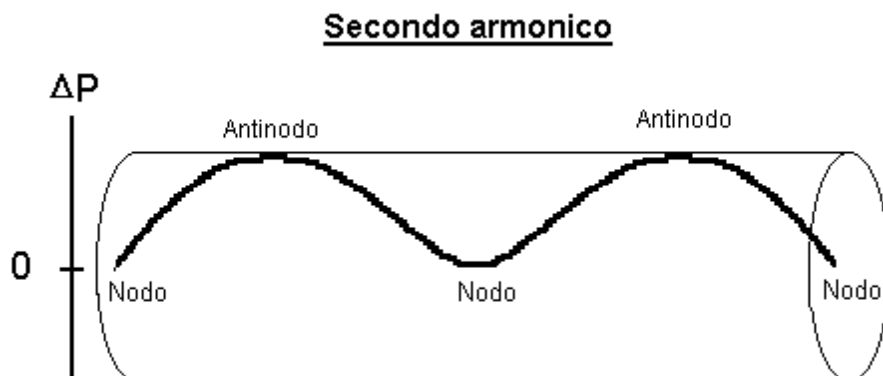
Abbiamo questo tubo aperto da entrambe le parti, ed abbiamo visto che la pressione nei punti di discontinuità (cioè alle due aperture) tende a rimanere costante: questi due punti si chiamano *nodi* in quanto la pressione è costante.

Al centro del tubo ci sarà un *antinodo* dato che la pressione ha la massima variazione (da P' a P'') che avviene con la frequenza dell'armonico di base.

Questa frequenza varia con la lunghezza del tubo (più il tubo è lungo e più il suono sarà basso).



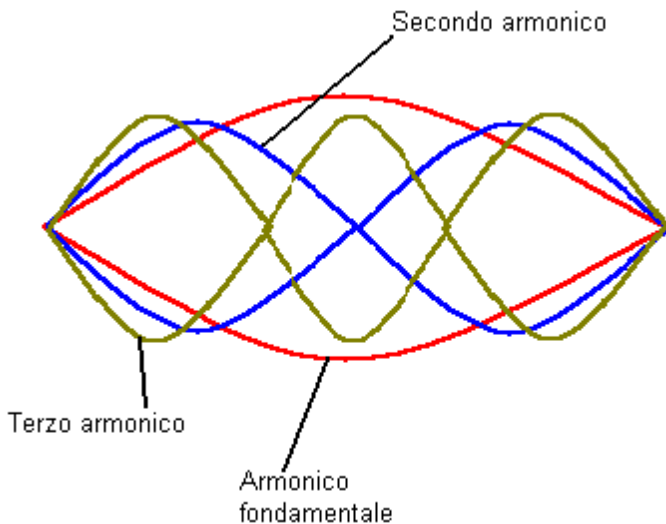
Le condizioni per avere risonanza (in fisica le chiameremo *condizioni al contorno*) sono che alle due estremità la pressione rimanga costante; ma questo può avvenire anche se noi raddoppiamo la frequenza di risonanza: in questo caso avremo due antinodi nel tubo:



Ragionando in questo modo, usando *multipli interi (3, 4, 5 eccetera) della frequenza dell'armonico fondamentale*, possiamo sempre soddisfare le condizioni al contorno.

Gli armonici e la percezione dei suoni musicali

Ogni suono che viene prodotto da uno strumento musicale, ma anche dalla voce umana o da qualunque oggetto, contiene in sé l'armonico fondamentale più gli armonici superiori, generati a seconda della geometria e del materiale dell'oggetto. Quando noi pizzichiamo per esempio il MI cantino di una chitarra il nostro orecchio percepirà chiaramente la nota MI, ma in realtà il suono sarà composto anche da multipli interi della frequenza del MI di base, generati dai diversi modi di vibrazione (cioè dalle diverse possibilità fisiche di oscillazione della corda):



L'armonico fondamentale avrà l'intensità maggiore e salendo via via con gli armonici l'intensità diminuirà. In realtà la corda vibra in tutti questi modi contemporaneamente, quindi il suo comportamento oscillatorio, come lo spettro della sua onda sonora, sarà dato da una loro combinazione.

Se suonate la chitarra conoscete bene il modo di creare un armonico bene udibile. Si tocca la corda con il dito all'altezza del 12° tasto (si "forza" un nodo a metà della corda) e la si pizzica in modo da "imporre" un diverso modo di vibrazione, un'ottava sopra, ovvero con frequenza doppia rispetto al MI (il secondo armonico).

Il fatto che ogni suono sia composto dalla frequenza di base più tutti gli armonici del caso, è proprio la ragione per cui ogni strumento ha il suo timbro ed ogni voce umana è unica e riconoscibile.

Ovviamente c'è una ben nota relazione tra gli intervalli musicali e i rapporti tra le varie frequenze (le trattazioni più antiche riguardo a questo argomento risalgono a Pitagora): per esempio, come ho già sottinteso varie volte, raddoppiando la frequenza di un suono abbiamo una nota che è percepita come 'uguale' ma più alta, cioè un'ottava sopra. Per esempio il LA di riferimento è a 440 Hz, ma anche un suono a 880 Hz è un LA (più alto) e 220 Hz sono sempre un LA una ottava più bassa. Ma quando andiamo a considerare intervalli inferiori le cose si complicano. In realtà il sistema musicale occidentale è un sistema corretto e semplificato in modo da avere solo dodici note in una ottava, separate fra loro da un semitono (il sistema temperato).

La percezione del suono è un fenomeno che avviene nel nostro orecchio e nel nostro cervello.

Considerate per esempio un suono composto dall'armonico di base di 100 Hz, più gli armonici 200 Hz, 300 Hz e 400 Hz. Il nostro orecchio udirà e identificherà chiaramente il suono come una nota da 100 Hz. Se noi ora produciamo gli armonici, ma non l'armonico fondamentale, cioè 200, 300 e 400 Hz, il nostro orecchio identificherà il suono sempre come una nota da 100 Hz, che è l'intervallo che separa gli armonici, anche se questa nota in realtà non è fisicamente presente!

Un altro esperimento interessante è il seguente: se noi suoniamo due note molto vicine fra loro, per esempio una a 440 Hz (un LA) ed una a 442 Hz (un LA leggermente crescente), si crea il fenomeno dei battimenti, ovvero una interferenza delle due onde nello spazio sonoro, che è ciclicamente costruttiva e distruttiva (cioè aumenta e smorza l'intensità del suono), e che genera un effetto udibile e ben noto ai musicisti (che lo usano - consciamente o inconsciamente - per intonare i loro strumenti).

Se si utilizza una cuffia stereofonica e si ascolta da un lato il LA a 440 Hz e dall'altro quello a 442 Hz si sentono i battimenti comunque, anche se le due onde non interferiscono fisicamente nello spazio: è il nostro cervello che percepisce la differenza di frequenza sotto forma di battimenti!

Quindi *la percezione sonora è un fenomeno sia fisico che neurologico!*

Torniamo adesso alla fisica acustica dei tubi, per avvicinarci alla comprensione del funzionamento degli ottoni.

Fisica della colonna d'aria in un tubo chiuso

Abbiamo trattato il comportamento di un cilindro aperto.

Che succede se il tubo è chiuso da entrambe le parti? Ipoteticamente si comporta come un tubo aperto, ma questa è solo teoria.

Cosa succede invece se il tubo è chiuso da una parte sola?

Quando l'impulso raggiunge la parte del tubo chiusa c'è una riflessione, ma dato che non c'è scambio con l'esterno l'energia "rimbalza" e non c'è inversione di pressione: quindi un impulso ad alta pressione, colpendo l'estremità chiusa, genererà sempre un impulso ad alta pressione e viceversa.

Allora per avere risonanza dobbiamo rinnovare l'impulso non quando questo colpisce la parte chiusa del tubo, ma quando questo torna indietro: solo allora la pressione si inverte. Di conseguenza la risonanza, a parità di lunghezza del tubo, avviene con una frequenza dimezzata, e l'armonico fondamentale è una ottava sotto rispetto a quello di un tubo aperto.

In questo modo la riflessione si inverte solo dopo un numero dispari di impulsi.

Quindi, se la frequenza dell'armonico fondamentale è F , la serie armonica di un tubo aperto è:

i. $1F, 2F, 3F, \dots nF$

E la serie armonica del medesimo tubo, ma chiuso, è:

ii. $1F', 3F', 5F', \dots nF'$ dove n è un numero dispari e $F' = F/2$

Un piccolo esperimento: prendete un tubo di cartone o di un altro materiale lungo per esempio 50 cm e di 5 cm di diametro.

Se lo colpite con un colpo secco da un lato e togliete subito la mano dovrete udire un suono (F). Se ora invece date un colpo secco e lasciate la mano appoggiata al tubo chiudendolo dovrete udire un suono più basso di una ottava (F'). Nel primo caso avete un tubo aperto, nel secondo il cilindro è chiuso ed il suo armonico fondamentale è più basso.

Gli ottoni, come un trombone o una tromba sono "tubi" aperti o chiusi?

Beh, chi suona uno di questi strumenti sa bene che la serie armonica è più o meno quella di un tubo aperto (serie i con F=Sib), ma in realtà sono "tubi" chiusi, in quanto delimitati da una parte con le labbra appoggiate al bocchino.

Allora dov'è il trucco?

Gli ottoni

Adesso conosciamo il comportamento acustico di tubi cilindrici aperti e chiusi, e sappiamo che, nonostante gli ottoni siano tubi chiusi si comportano pressappoco come tubi aperti, ad esempio gli armonici di un trombone in prima posizione sono:

Sib2	Sib3	Fa3	Sib4	Re4	Fa4	Lab4	Sib5	Do5	Re5
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Allora com'è che pur essendo chiuso gli armonici di un ottone sono quelli di un tubo aperto?

Il fatto è che nessun ottone è cilindrico: per iniziare il bocchino ha una elevatissima conicità, la campana pure, e tutti i caneggi, dove possibile, hanno una graduale conicità.

In realtà gli ottoni sono più sofisticati di quanto non si possa immaginare: vi siete mai chiesti perché un clarinetto o un oboe hanno una infinità di chiavi mentre una tromba ha solo tre pistoni? Il fatto è che un clarinetto ha una conicità molto limitata ed i suoi armonici sono molto più simili a quelli di un tubo chiuso che di uno aperto, e necessita quindi di molti differenti punti di *riflessione* (chiavi) per far *risuonare* tutte le note necessarie.

La trattazione che segue è molto approssimata e sicuramente ha numerosi punti deboli, ma renderà l'idea di come sono progettati un trombone o una tromba.

Proviamo a considerare un ipotetico trombone completamente cilindrico, e quindi con la serie armonica di un cilindro chiuso come la seguente:

Do2	Sol3	Mi3	Sib4	Mib4	Solb4	La4	Do5	Re5	Mi5
1	3	5	7	9	11	13	15	17	19

Se aggiungiamo il bocchino, con la sua conicità e la sua relativa aggiunta di lunghezza dello strumento, questo andrà a modificare l'intonazione degli armonici più alti, abbassandola leggermente.

Do2	Sol3	Mi3	Sib4	Mib4	Solb4	La4	Do5	Re5	Mi5
				↓	↓	↓	↓	↓	↓
1	3	5	7	Re4	Fa4	Lab4	Sib5	Do5	Re5

Se adesso aumentiamo la conicità dei canneggi e aggiungiamo la campana, andremo a crescere l'intonazione dei primi armonici:

Do2	Sol3	Mi3	Sib4	Mib4	Solb4	La4	Do5	Re5	Mi5
↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
<i>Sib2</i>	<i>Sib3</i>	<i>Fa3</i>	<i>Sib4</i>	<i>Re4</i>	<i>Fa4</i>	<i>Lab4</i>	<i>Sib5</i>	<i>Do5</i>	<i>Re5</i>

L'armonico fondamentale (Sib2) è in realtà un 'falso fondamentale'

Si vede anche che l'unica nota che non è variata è il Sib4; possiamo quindi considerare questo armonico una sorta di "baricentro" armonico dello strumento. Ecco perché si consiglia sempre di intonare trombe e tromboni basandosi su questa nota.

Gli ottoni allora sono quasi tutti basati su serie armoniche corrette e adattate con artifici costruttivi.

Un'altra considerazione da fare è poi il fatto che la riflessione del suono non avviene in un punto definito, ma avviene nella campana in una posizione che varia a seconda dell'altezza della nota: le note basse vengono riflesse prima, all'interno; le note alte vengono riflesse più avanti. Le note altissime (i cosiddetti sovracuti) vengono riflessi addirittura fuori dalla campana dello strumento, che in tal modo si comporta praticamente come un megafono. In questo modo la lunghezza dello strumento può essere considerata - entro certi limiti - variabile. E' per questo che alcuni strumenti, anche se accordati perfettamente nel registro basso possono avere alcuni armonici alti calanti.

Riassumendo possiamo descrivere così il funzionamento di una tromba o di un trombone, partendo dalla bocca del suonatore fino alla campana:

1. Abbiamo le labbra dello strumentista che inizialmente sono chiuse. Soffiando, all'interno della bocca si crea un aumento di pressione che raggiunto un certo limite fa aprire le labbra liberando un impulso di alta pressione. Dopodiché nella bocca c'è un brusco calo di pressione che causa la chiusura delle labbra. Questo fenomeno si ripete ciclicamente con una frequenza che dipende dalla nota che sta *risuonando* nello strumento.
2. Gli impulsi passano dal bocchino, che quindi è un antinodo (la pressione ha la massima variazione).
3. L'onda sonora così generata passa attraverso lo strumento fino ad arrivare in un punto indefinito della campana dove c'è un nodo (in cui la pressione è costante) e lì si riflette.
4. In questo modo lo strumentista può, modificando l'intensità e la frequenza di vibrazione delle labbra, far risuonare lo strumento nei vari armonici della serie "corretta".
5. Per completare la gamma delle note della scala cromatica si allunga il percorso dell'onda sonora, abbassando in proporzione la frequenza dell'armonico di base: per esempio la tromba ha tre pistoni che può usare nelle sette combinazioni possibili (più una piccola coulisse sul terzo tasto usata per correggere alcuni armonici). Il trombone ha una coulisse che si può allungare in maniera continua (ci sono comunque, come per la tromba, sette posizioni teoriche). I cornisti, oltre ai quattro tasti a disposizione, utilizzano una mano inserita all'interno della campana per modificare il punto in cui si ha riflessione e quindi variare la frequenza dell'armonico di base.

Per avere una immagine completa bisogna considerare anche che non solo l'aria vibra all'interno dello strumento, ma lo strumento stesso è messo in risonanza ed emette armonici che dipendono dalla sua forma e dal materiale di costruzione. Quindi la forma e il materiale dello strumento influiscono sul timbro e sulla facilità di emissione del suono: in generale possiamo dire che strumenti rigidi e pesanti risuonano meglio e più a lungo.