

3. FONETICA ACUSTICA

Nel Secondo Dopo Guerra, soprattutto grazie a Jakobson, l'acustica fisica acquistò rilevanza per lo studio dei suoni linguistici e si avvertì la necessità di definire e classificare i suoni anche dal punto di vista acustico: nasce la **fonetica acustica**, scienza che descrive il tipo di oscillazioni acustiche che si generano in corrispondenza di ciascun fono, come si presentano i vari suoni linguistici dal punto di vista spettrografico. Di ogni proprietà delle oscillazioni sonore si analizza l'**aspetto fisico-sperimentale**, l'**aspetto matematico** (formule), l'**aspetto percettivo** (come l'essere umano percepisce e interpreta tale proprietà) e **linguistico**: l'analisi spettrale del suono è sia un'operazione fisico-sperimentale di "filtraggio" del suono, sia una procedura matematica (analisi di Fourier), sia una capacità fisiologica dell'apparato uditivo, sia un mezzo per distinguere i vari foni vocalici.

IL SUONO

Il suono è un concetto antropico è la nostra percezione, tramite l'udito, dell'oscillazione dell'aria, se questa ha una determinata frequenza.

Con **oscillazione** si intende il fenomeno per cui un corpo compie un **certo movimento** oppure **modifica** le proprie caratteristiche fisiche senza mai abbandonare definitivamente il proprio **punto di riposo**. Se tale movimento si ripete **ciclicamente** allora l'oscillazione è **periodica**, in caso contrario è **aperiodica**.

Sono **onde trasversali** quelle in cui la perturbazione avviene perpendicolarmente alla direzione di propagazione dell'onda, provocando una deformazione del corpo oscillante.

Il suono è una trasmissione dell'energia oscillatoria da parte delle molecole dell'aria a partire da una sorgente sonora, la quale imprime la spinta iniziale alle molecole dell'aria che la circondano. Queste si spostano, allontanandosi dalla sorgente, creandole intorno una zona di alta pressione, che poi viene scaricata sugli strati d'aria adiacenti, che a loro volta si comprimono, mentre diminuisce la pressione nella zona prima compressa. Queste zone di compressione e rarefazione si allontanano dalla sorgente in modo sferico in tutte le direzioni. Un'onda sonora è quindi una perturbazione della pressione che si propaga attraverso un mezzo. Il suono è un'onda longitudinale di pressione che si propaga attraverso l'aria.

(Si definiscono **onde longitudinali** quelle in cui la perturbazione avviene lungo la stessa direzione di propagazione dell'onda stessa e quindi non si modifica la forma bensì la pressione interna del corpo oscillante; [le particelle del mezzo oscillano nella direzione di propagazione dell'onda, come una molla compressa]. **Le onde non trasportano quantità di materia, ma solo energia**).

[Da un punto di vista puramente fisico il suono è una **perturbazione longitudinale** prodotta da un corpo che vibra con una certa **frequenza**: le particelle si allontanano dalla posizione di equilibrio in cui sono allineate.]

Il tempo che un corpo oscillante impiega per compiere un intero ciclo oscillatorio si chiama **periodo** T e si misura in secondi. **Il numero di cicli compiuti in un'unità di tempo** è la **frequenza** dell'oscillazione f e si misura in **Herz = 1cps ciclo per secondo**. La **frequenza è l'inverso del periodo**: $f = 1/T$.

Molte di queste oscillazioni vengono del tutto ignorate dall'apparato uditivo umano perché non rientrano nell'intervallo di frequenze che viene captato dall'orecchio, fra i 20 e i 20.000 Hz.

Si chiamano **infrasuoni** i suoni che hanno una **frequenza inferiore al range percepibile**. Sono invece chiamati **ultrasuoni** quelli che hanno una **frequenza superiore a tale range**.

La frequenza dell'oscillazione è percepita dall'apparato uditivo come altezza musicale: maggiore è la frequenza più acuto è il suono.

Il suono si propaga in molti mezzi diversi, ma il principale è l'aria.

Sorgente sonora

[Una sorgente sonora è un **sistema in vibrazione**. **È il punto da cui le molecole d'aria** (nel caso in cui il mezzo sia l'aria) **si allontanano ed è il sistema che genera la perturbazione.**]

Propagazione del suono

[**Le vibrazioni della sorgente sonora mettono in vibrazione anche le molecole d'aria circostanti, che comunicano il loro movimento a quelle vicine, le quali vibrano a loro volta: è così che il suono si propaga**

nell'aria. Durante la propagazione del suono c'è una **compressione e decompressione a livello di pressione dell'aria, che propagandosi crea le onde.**]

Velocità del suono

La propagazione delle onde sonore avviene con una certa velocità, detta **velocità del suono**. Quest'ultima dipende dalle **caratteristiche fisiche** del mezzo che trasporta le **onde oscillatorie** (densità, elasticità e temperatura). Generalmente **aumenta man mano che si passa dai gas ai liquidi ai solidi** (motivo per cui se si accosta l'orecchio ad una superficie solida si riescono ad udire suoni lontani prima: le particelle sono più vicine e trasmettono più velocemente le oscillazioni). La **velocità del suono nell'aria è 343,2 m/s.**, ma ai fini dell'acustica linguistica è trascurabile e considerata **istantanea**, perché il tempo in cui il suono percorre la distanza tra due parlanti è infinitesimale.

Oscillazione periodica semplice e sue proprietà

Le **onde periodiche** sono quelle che di solito percepiamo come **"suoni"**: sono **caratterizzate dal ripetersi nel tempo di uno stesso ciclo oscillatorio (periodo determinato e costante)**.

Le **onde aperiodiche** sono quelle che di solito percepiamo come **"rumore"** (vedi [Rumore]): **il periodo non è determinabile, è infinito**.

In realtà la distinzione tra le due non è netta, perché un suono può essere costituito di una componente periodica e una aperiodica **sommate tra loro**.

Durante l'oscillazione un corpo compie un percorso nello spazio, prima allontanandosi dal punto di riposo, poi tornandovi; per inerzia, il percorso continua in direzione opposta e ritorna di nuovo al punto di riposo (questa oscillazione durerebbe all'infinito se non intervenisse l'**attrito**; in situazioni reali, in assenza di un costante reintegro di energia, l'attrito smorzerebbe gradualmente l'ampiezza dell'oscillazione, fino alla sua cessazione completa, ma **il decrescere dell'ampiezza dell'oscillazione non ha alcun effetto sulla frequenza** emessa che rimane costante e dipende solo dalle caratteristiche fisiche del corpo di cui è propria e non dalla forza applicata). **La distanza tra il punto di maggior allontanamento del corpo e la posizione di riposo** viene chiamata **ampiezza** dell'oscillazione, percepita come forza del suono, **intensità o volume**.

Se si fissa una matita (a contatto con una striscia di carta in movimento) all'estremità di un pendolo in movimento, la matita lascerà una traccia a forma di **sinusoide**. Tale traccia corrisponde alla **forma d'onda** dell'oscillazione del pendolo. **La forma d'onda è il percorso che compie una particella nella sua oscillazione. Le oscillazioni che generano una forma d'onda a sinusoidale sono onde periodiche semplici o sinusoidali**. Queste sono più un'**astrazione matematica** che un fenomeno reale, perché quelle presenti in natura, oltre a non durare all'infinito, non sono mai perfettamente sinusoidali: si possono ottenere solo delle buone approssimazioni (suoni puri come l'oscillazione del diapason; il resto sono suoni "sporchi") perché per generare un'onda sinusoidale ci vorrebbe una sorgente sonora **puntiforme** (ma non esiste in natura).

La rappresentazione della forma d'onda viene detta **oscillogramma**, che **raffigura l'effettivo movimento del corpo oscillante, la relativa forma d'onda**. In **ascissa** è riportato il valore del **tempo**, in **ordinata** il **grado di escursione** raggiunto dal corpo oscillante in ogni dato momento del tempo.

Nel caso di **onde acustiche, onde longitudinali di pressione che si propagano nell'aria**, si può rappresentare l'oscillazione in funzione dello spazio (ascissa: distanza dalla sorgente dell'oscillazione; ordinata: pressione): **zone di alta pressione si alternano a zone di bassa pressione, la distanza tra due punti dello spazio in cui la pressione ha il valore massimo si chiama lunghezza d'onda**. Sia la lunghezza d'onda sia la frequenza descrivono le onde periodiche e sono misure equivalenti, anche se per le onde acustiche si preferisce la frequenza. **Ad una determinata onda periodica è associata una velocità di propagazione: $v = \lambda \cdot T$** Nel periodo di tempo T l'onda percorre una distanza pari a λ . La frequenza del suono equivale al rapporto tra la velocità e la lunghezza d'onda: $f = v / \lambda$. Maggiore è la frequenza, minore sarà la lunghezza d'onda, se la **velocità di propagazione all'interno del mezzo è costante**.

La diversità di velocità del suono in mezzi diversi è illustrata tramite **l'esperimento dell'elio**. La voce di chi inala elio avrà un timbro più acuto perché le molecole dell'elio, più leggere dell'aria, consentono al suono di

viaggiare più velocemente e modificare le risonanze della cavità orale, rendendola più sensibile ai suoni ad alta frequenza e meno reattiva ai bassi: cioè si modificano le armoniche, lo spettro e quindi il timbro.

La **fase** indica da che parte del ciclo un'onda inizia il proprio moto: è crescente se la curva parte da zero e sale, decrescente se da un valore già negativo va ancora più giù. L'apparato uditivo è quasi del tutto insensibile alla fase dell'oscillazione e percepirebbe due onde di fasi differenti come identiche per acutezza e intensità.

Valori per l'analisi delle periodiche semplici

Ai fini della fonetica acustica, un'onda periodica semplice o sinusoidale può essere descritta in modo soddisfacente solo dalla frequenza e dall'ampiezza.

Onde periodiche complesse

Le sorgenti sonore reali sono dei corpi **complessi** le cui parti possono oscillare autonomamente e rendere l'oscillazione totale complessa, con un andamento periodico, ma una forma d'onda "frastagliata". Un'onda periodica complessa è la sovrapposizione di due o più movimenti oscillatori semplici presi separatamente. Sono nel contempo un concetto matematico, un fenomeno fisico e l'oggetto della percezione uditiva:

- dal punto di vista fisico, le onde complesse risultano da un'effettiva sovrapposizione di più movimenti oscillatori semplici;
- dal punto di vista matematico per ottenere una curva complessa occorre prendere per ogni singolo valore dell'ascissa la somma algebrica dei rispettivi valori in ordinata delle sinusoidi che la compongono;
- l'orecchio umano percepisce somme diverse come suoni diversi (vedi spettro).

Fase, controfase, fuori fase

La sommatoria di due onde semplici aventi i medesimi valori di frequenza e di ampiezza può portare a tre situazioni possibili, a seconda se le due onde siano completamente in fase (le onde si rafforzano a vicenda e si ha un'oscillazione sinusoidale con ampiezza doppia), in controfase (somma algebrica zero, assenza di oscillazione) o parzialmente fuori fase (a seconda dei casi, a parità di frequenza, un'ampiezza che varia tra lo zero e il valore doppio rispetto alle ampiezze di partenza).

Analisi di Fourier e la composizione armonica

La situazione si complica se troviamo più onde con ampiezze e frequenze differenti.

All'inizio dell'Ottocento Fourier dimostrò che una qualsiasi curva periodica con frequenza f equivale alla sovrapposizione di una serie discreta di curve sinusoidali (serie di Fourier) con diverse frequenze, ampiezze e fasi. Tali curve sinusoidali sono le armoniche e le loro frequenze sono, per definizione, multipli interi della frequenza dell'onda complessa nella sua interezza. La prima armonica si chiama armonica fondamentale e ha la stessa frequenza (la minore della serie) dell'onda complessa risultante.

Può essere scomposta in una serie di onde sinusoidali un'onda di forma qualsiasi, purché sia periodica. In un'oscillazione periodica complessa c'è una componente che ne determina la frequenza generale e le altre che si sommano determinano la forma d'onda, più o meno increspata.

L'analisi di Fourier scompone un'onda complessa in armoniche semplici.

Oltre che matematicamente, la composizione spettrale di un segnale acustico può essere determinata anche sperimentalmente tramite un banco di filtri che individueranno le singole frequenze di cui è composto il segnale complesso

Spettro

L'elenco delle armoniche (con rispettive frequenze e ampiezze) di un'onda periodica complessa (quadrata, triangolare o a dente di sega, come quella della glottide) si chiama spettro dell'oscillazione (dal punto di vista percettivo, lo spettro corrisponde al timbro; dal punto di vista matematico, si tratta di curve che si sommano, dando altre curve; dal punto di vista fisico, con la risonanza analizziamo le componenti armoniche).

Viene di solito rappresentato in un grafico chiamato spettrogramma (grafico dell'elenco delle armoniche di

un'onda complessa; rappresentazione su un grafico di tutte le armoniche di un'oscillazione complessa in un dato istante), che indica in **ascissa** le **frequenze** delle armoniche e in **ordinata** le relative **ampiezze**. Le armoniche vengono rappresentate da **righe verticali** poste in corrispondenza del rispettivo valore di frequenza e aventi l'altezza correlata all'ampiezza delle medesime armoniche (**spettro a righe**). La **frequenza fondamentale del segnale** periodico complesso è determinabile in base all'**armonica più bassa** (o prima armonica) o dalla **distanza tra le righe verticali** dello spettro (perché multipli di essa).

Aggiungendo più componenti armoniche, si raggiunge sempre di più l'onda a dente di sega (simile alla voce umana) e aggiungendone un numero infinito tende alla forma di linea piatta.

Oscillogramma e spettrogramma sono del tutto equivalenti nel descrivere esaustivamente un'onda periodica complessa. Si ha un segnale acustico complesso e si cerca di scoprire, tramite appositi esperimenti, quali sono le sue componenti armoniche (banco di filtri).

Valori per l'analisi delle periodiche complesse

L'apparato uditivo percepisce un'oscillazione complessa come un suono unico, ma distingue spettri diversi come **timbri diversi**. Quindi, ai fini della fonetica acustica, **un segnale complesso è descritto in modo soddisfacente dalla frequenza fondamentale** (percepita come **altezza**), l'**ampiezza massima** (percepita come **intensità/forza**), la **composizione armonica ossia lo spettro** (**timbro del suono**).

Frequenza di risonanza di una corda tesa

Ogni corpo elastico può essere facilmente indotto a vibrare con la propria frequenza di risonanza, mentre è difficile far vibrare un corpo ad una frequenza diversa. La **frequenza di risonanza è quella che induce il corpo a vibrare senza essere toccato**.

L'**aria** riesce a convogliare qualunque suono fino al nostro orecchio (purché sia nel range di udibilità), perché **non possiede** una propria frequenza di risonanza, perché la massa d'aria che costituisce l'atmosfera terrestre è talmente **grande** rispetto alle dimensioni umane da poter essere assimilata ad un corpo di grandezza infinita, e un corpo infinito non possiede una frequenza di risonanza propria, ma può essere indotto a vibrare a qualsiasi frequenza.

Rispetto ad un corpo di dimensioni infinite, una **corda musicale** è contraddistinta da due delimitazioni precise, ossia i due punti di ancoraggio tra i quali viene tesa, chiamati **nodi**. Quando una corda viene indotta a vibrare, si creano delle **gobbe** (onde trasversali) che cominciano a propagarsi lungo di essa; il punto di massimo allontanamento della gobba dalla posizione di riposo si chiama **antinodo**. Se la lunghezza della "gobba" coincide con la lunghezza della corda si ottiene un'**onda stazionaria** di tipo **sinusoidale**, che, **pur oscillando, rimane ferma nella sua posizione, vibrando solo su e giù, coinvolgendo la corda intera**. La gobba è la metà di un ciclo sinusoidale, per cui la lunghezza d'onda di un'onda stazionaria sarà il doppio della lunghezza L della corda. La frequenza di risonanza di una corda è inversamente proporzionale alla sua lunghezza. Se $\lambda = 2L$, allora $f = v/2L$.

I modi

Una corda può essere indotta a vibrare in vari modi. **Le vibrazioni in cui la corda forma una successione di gobbe si chiamano modi normali**, e corrispondono alle varie **armoniche** della corda. A parità di lunghezza L della corda, più grande è il numero di gobbe, più piccola sarà la lunghezza d'onda (e quindi più alta la frequenza) dell'armonica, sempre multipla della frequenza fondamentale. Anche le ampiezze delle oscillazioni diminuiscono man mano che la frequenza aumenta.

Nelle situazioni reali le vibrazioni avranno una conformazione complessa, risultante dalla sovrapposizione delle varie armoniche.

La legge di Marsenne

La **frequenza di risonanza propria di una corda tesa dipende**, oltre che dalla sua lunghezza, anche dalla sua **tensione e dal suo peso**. Secondo la legge di Marsenne, il rapporto fra queste grandezze è il seguente:

$$f = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{T}{m}}$$

La frequenza di risonanza di una corda tesa è:

- **inversamente** proporzionale alla sua **lunghezza** (più corta la corda, più alta la frequenza);
- **inversamente** proporzionale alla radice quadrata della sua **massa** (più è sottile; più alta la frequenza)
- **direttamente** proporzionale alla radice quadrata della sua **tensione** (più è tesa, più è alta frequenza).

RISONATORI

La colonna d'aria e il tubo cilindro

La **colonna d'aria** contenuta in un tubo cilindrico ha oscillazioni **simili** a quelle di una corda che dipendono dalle proprietà fisiche della colonna medesima. Similmente ad una corda, un tubo cilindrico è assimilabile ad un oggetto **bidimensionale**. L'aria all'interno del tubo produce **un'onda stazionaria di pressione**.

Tale colonna d'aria può creare **armoniche** con valori di **frequenza** che saranno **multipli interi** della **frequenza fondamentale**. All'interno del tubo si creano **nodi** e **antinodi** corrispondenti ai punti di **massima compressione** e **massima rarefazione dell'aria**.

Se il tubo cilindrico è chiuso da un'estremità e aperto dall'altra, la lunghezza della sua onda di risonanza sarà inversamente proporzionale a $4L$ e le **frequenze delle sue armoniche multipli interi dispari della frequenza fondamentale**.

Le proprietà di risonanza di un tubo non vengono modificate nel caso in cui il tubo sia **incurvato** (strumenti a fiato; il percorso che si crea dalla sorgente, la glottide, alle labbra è un tubo un po' incurvato): l'unica caratteristica che interessa è la **lunghezza**. Le frequenze armoniche superiori alla **frequenza fondamentale** di una colonna d'aria si osservano con il fenomeno dell'**overblowing**: se si soffia in modo improprio dentro un flauto, questo fischia ad una frequenza molto più acuta.

Il risonatore di Helmholtz

Il **risonatore di Helmholtz** è una cavità **sferica** dotata di un **collo di bottiglia** stretto con un'**apertura alla sua estremità**. La **frequenza di risonanza** della massa d'aria contenuta in un risonatore di Helmholtz dipende da tre fattori ed è:

- **inversamente** proporzionale alla radice quadrata del **volume della cavità**;
- **inversamente** proporzionale alla radice quadrata della **lunghezza del collo di bottiglia**;
- **direttamente** proporzionale alla radice quadrata dell'**area del foro d'uscita** (**più largo il foro, più acuto il suono, più alta la frequenza**).

$$f = \frac{v}{2\pi} \sqrt{\frac{A}{VL}}$$

Importanza della labializzazione: la bocca è un risonatore di H., più o meno sferica, e le labbra modificano l'apertura finale; le labbra distese, ad esempio nella [i], **aumentano l'orifizio e dunque le frequenze**; le labbra arrotondate (nella [u]) **diminuiscono le frequenze**.

Oscillazione libera

Si parla di **oscillazione libera** quando un oggetto oscilla **senza stimoli** (ad esempio per **inerzia**). La **frequenza di questa oscillazione si chiama frequenza propria**. Questa oscillazione durerebbe all'infinito se non intervenisse l'**attrito**; in situazioni reali, in assenza di un costante reintegro di energia, l'attrito smorzerebbe gradualmente l'ampiezza dell'oscillazione, fino alla sua cessazione completa, ma **il decrescere dell'ampiezza dell'oscillazione non ha alcun effetto sulla frequenza** emessa (che rimane costante e dipende solo dalle caratteristiche fisiche del corpo di cui è propria e non dalla forza applicata).

Oscillazione forzata

Si parla di **oscillazione forzata** quando un corpo oscilla grazie a degli **stimoli esterni**. Questa **trasmissione di energia da un oggetto forzante ad uno risonante viene chiamata risonanza**. Affinché si verifichi risonanza, occorre che **la frequenza dell'oggetto forzante sia uguale a quella dell'oggetto risonante e devono inoltre essere collegati tra loro**: nel caso delle **oscillazioni acustiche**, il **tramite** di collegamento diventa l'**aria** stessa (bicchiere rotto con la voce acuta; clacson suonato vicino alle corde di un pianoforte, fa vibrare solo quelle che hanno la stessa frequenza di risonanza; i due diapason).

Frequenza propria di un risonatore

Un risonatore può avere **frequenza propria**. Le sue frequenze proprie corrispondono alle sue **armoniche**. Ognuna delle armoniche può attivare autonomamente il meccanismo della risonanza con risonatori esterni e funzionare da segnale forzante.

Funzione di trasferimento

Ogni risonatore ha una **funzione di trasferimento** che fa passare alcune frequenze (**rafforza**, ad esempio, le armoniche aventi la stessa frequenza del risonatore) e ne **blocca** altre (ad esempio le armoniche in **antirisonanza**), funzionando come un **filtro del suono**.

Negli strumenti musicali funzionano da filtri le rispettive **cavità o casse di risonanza**: casse di risonanza diverse producono suoni diversi. Nell'articolazione dei suoni linguistici, **le pliche vocaliche producono una certa oscillazione complessa**, ma poi intervengono le cavità sovraglottidali che filtrano il segnale glottico. Il timbro del suono risultante è il risultato dell'interazione della **funzione di trasferimento esercitata dai risonatori sovraglottidali sul segnale glottico**.

Banco di filtri

Per risalire alle armoniche di un suono complesso si può sfruttare il fenomeno della **risonanza**: si prende un **insieme di risonatori con diverse frequenze di risonanza**, detto **banco di filtri**, e vi si applica il segnale in esame. Se un certo risonatore entrerà in risonanza, significa che nello spettro del segnale in esame è presente la relativa **frequenza armonica**.

Di solito ogni singolo filtro è sensibile ad un range più o meno vasto di frequenze: **l'intervallo di frequenze a cui risponde un filtro si chiama larghezza di banda**, e può essere **stretta** (quando il range è piccolo) o **larga** (quando è più grande). I filtri a banda stretta sono molto più precisi, perché tendono a individuare valori di risonanza molto vicini alle armoniche cercate. Tracciando tali **armoniche** sullo spettrogramma, otterremo delle **righe in corrispondenza delle frequenze presenti nel segnale complesso: spettro a righe**. Più è larga la banda dei filtri, meno precisi saranno i valori delle armoniche individuate: con dei filtri a banda larga si ha un'idea generale dell'andamento dello spettro, ossia **l'inviluppo spettrale del segnale, linea che abbraccia le righe dello spettro, senza individuarle precisamente**. Lo spettrogramma di un'onda sinusoidale sarà rappresentato da un'unica riga verticale corrispondente all'unica sua frequenza, perché lo spettro di un'onda periodica semplice è fatto di un unico picco infinitamente stretto; più allarghiamo la larghezza del picco, aggiungendo componenti armoniche, più lo spettro diventa ricco e il segnale complesso, e **la sua forma d'onda si allontanerà gradualmente da quella sinusoidale**. I **suoni**, anche se **sembrano puri** cioè sinusoidali, in realtà sono segnali complessi che hanno un forte picco nello spettro, più alcune altre armoniche relativamente deboli (diapason).

RUMORE

Il termine **rumore** indica **l'onda sonora aperiodica**, corrispondente a un susseguirsi non periodico di zone di compressione e rarefazione delle molecole d'aria. Nel suo oscillogramma non si evidenzia nessun periodo: **il periodo è infinito per cui non si può parlare di frequenza** (perché $f=1/\text{infinito}=0$).

Spesso i suoni interpretati dal cervello come fastidiosi sono, effettivamente, delle onde aperiodiche.

Le **onde periodiche** hanno uno **spettro discreto**: le armoniche si presentano come una serie di righe verticali, la cui **frequenza** è un **multiplo** della frequenza fondamentale, che possono essere contate. La periodicità di un segnale equivale alla discretezza del suo spettro.

Se il suono è aperiodico, non è possibile individuare le singole armoniche: lo spettro è continuo, le singole linee spettrali sono assenti. Analizzando un rumore dal punto di vista sperimentale con un banco di filtri, si scoprirà che **mette in risonanza un risonatore di frequenza qualsiasi** entro un certo range, perché **ci sono tutte le armoniche possibili con la stessa intensità**. È impossibile individuare le singole armoniche, ma è comunque possibile tracciare **l'inviluppo spettrale**, che abbraccerà la zona dello spettro attivata dal rumore. In un **inviluppo spettrale** che ha forma **piatta**, la stessa intensità è presente a tutte le frequenze del range udibile e corrisponde al **rumore bianco** (come nella percezione visiva un segnale con spettro continuo è percepito come bianco).

Un involuppo spettrale che presenta zone a energia maggiore (**picchi**) e zone a energia minore (**avvallamenti**) corrisponde al **rumore colorato** o suono periodico disturbato (consonanti sorde, soprattutto le fricative; si distinguono tra loro perché sono rumori colorati in modo diverso, con un involuppo spettrale differente): nell'**oscillogramma** mentre l'**andamento** generale dell'onda è **irregolare** (disturbo molto fitto), **si intravede** una **componente** chiaramente **periodica**. Si tratta di **un'onda periodica "sporcata" da un rumore di fondo**. Il suo spettro sarà ancora continuo, tipico di un rumore, ma avrà un **picco ben pronunciato nel suo involuppo, in corrispondenza della frequenza della componente periodica**. Un segnale perfettamente periodico è un'astrazione matematica; tutti i segnali sonori presenti in natura sono variamente "sporcati" da una componente di rumore, i cui spettrogrammi si presentano come involuppi continui, con picchi più o meno fini: più è stretto il picco, più il suono si avvicina a un suono periodico; più i picchi sono "smussati", più la componente aperiodica, di rumore, prevarrà nel segnale. Il rumore bianco è un suono non musicale cioè non intonabile, non avendo frequenza determinata e quindi altezza musicale. Il rumore colorato è parzialmente musicale.

Sonogramma

Bisogna considerare anche il tempo, perché **le caratteristiche spettrali di un segnale acustico possono variare lungo la sua durata**. Il grafico che rappresenta la variazione dello spettro di un segnale lungo l'asse del tempo è il **sonogramma o fonospettrogramma**: sull'asse **orizzontale** è rappresentato il **tempo**; sull'asse **verticale** le **frequenze delle armoniche**; **l'intensità** è rappresentata attraverso il maggiore o minore annerimento del tracciato. Più il colore è scuro, più energia avrà la componente armonica in quel punto. I punti più scuri corrispondono ai picchi dello spettro, quelli bianchi all'assenza totale del segnale, le zone grigie agli avvallamenti. È preferibile il sonogramma a banda larga perché a banda stretta ci sono troppi particolari e non si vede l'andamento generale. La presenza dei **picchi, zone di annerimento orizzontali di spessore stretto**, significa che il **segnale è periodico**: alcune componenti armoniche sono esaltate, mentre il resto dell'involuppo è soppresso (segnale periodico complesso: le vocali). Un **rumore colorato** si presenta come un **annerimento grigio scuro** per larghi range di frequenze: l'**involuppo spettrale è continuo, senza picchi**. Una **zona chiara che termina con un annerimento verticale** è una consonante **occlusiva**, costituita da una **pausa, in cui il segnale è assente (in fase di tenuta), e una piccola esplosione, ossia un breve rumore (in fase di soluzione)**.

PRODUZIONE DEI SUONI

Segnale glottico o tono laringeo

L'onda sonora che sta alla base della voce è prodotta dalla **glottide** ed è chiamata **segnale glottico o tono laringeo**. Il meccanismo laringeo produce **un'onda complessa con una frequenza fondamentale che si aggira intorno ai 100Hz per gli uomini e i 200Hz per le donne**. La maggiore frequenza fondamentale delle donne è dovuta alla minore estensione della glottide femminile: la frequenza fondamentale di un corpo elastico è inversamente proporzionale alla sua lunghezza. La maggiore o minore tensione della muscolatura laringea è utilizzata per cambiare l'altezza della voce (direttamente proporzionale alla tensione). **Le capacità produttive della glottide vanno dai 65 ai 1500 Hz**: il livello più alto viene raggiunto dalle cantanti soprano, quello più grave dai bassi maschili.

Funzionamento

Ogni ciclo del meccanismo laringeo consiste nel **graduale aumento** della **pressione subglottidale**, seguito dalla **brusca apertura delle pliche** con il conseguente rapido rilascio dell'energia, fino alla chiusura successive delle pliche. **Nel grafico di un singolo ciclo di variazione di pressione il lato sinistro della gobba, corrispondente al graduale aumento della pressione, è molto più prolungato rispetto al lato destro, corrispondente al brusco calo della pressione**.

Un'onda periodica con cicli simili può essere approssimata ad un'**onda a dente di sega**, la quale si ottiene **sommando tra loro una serie infinita di armoniche la cui ampiezza è inversamente proporzionale al numero dell'armonica**: più aumenta la frequenza dell'armonica, più diminuisce l'ampiezza.

Lo spettro del tono laringeo

Lo **spettro del segnale glottico**, simile a quello di un'onda a dente di sega, è una serie infinita di armoniche con un involuppo spettrale che discende lungo una traiettoria pianeggiante in funzione di $1/x$ (ramo di iperbole equilatera). Le armoniche più rilevanti ai fini della percezione uditiva del segnale glottico arrivano a 4000Hz, mentre quelle superiori sono troppo deboli (l'ampiezza è troppo bassa) per influire in modo determinante sul timbro del segnale risultante. Essendo le frequenze delle armoniche un multiplo intero della **frequenza fondamentale**, più è alta la frequenza fondamentale, meno armoniche rientreranno nel range **udibile**: sia la voce maschile sia la femminile hanno lo stesso andamento dell'involuppo spettrale, ma nel secondo caso la densità delle armoniche sarà minore, perché la **frequenza fondamentale della prima armonica, cioè il tono della voce (altezza del parlato)**, è maggiore, più acuta.

Nella fonazione il **tono laringeo** non viene mai udito in quanto tale, ma solo dopo essere stato **modificato dalle cavità sovraglottidali**. La **sonorità**, benché presente in tutte le lingue del mondo, non è di per sé necessaria per l'intendimento del parlato (bisbiglio: onda aperiodica), ma consente ai suoni di propagarsi a maggiore distanza e li **rende più udibili**.

Risonatori sovraglottidali

Sono determinanti per il linguaggio le risonanze prodotte nelle **cavità sovraglottidali**.

I timbri dei foni linguistici sono determinati da **due cavità di risonanza**:

- la prima va **dalla glottide fino al luogo diaframmatico** del fono;
- la seconda va **dal luogo diaframmatico fino alle labbra** (punto di massima restrizione).

Queste corrispondono più o meno alle cavità faringale e orale, ma la loro forma, larghezza ed estensione **cambia** a seconda della **conformazione** assunta dagli **organi articolatori** e del **luogo diaframmatico**.

Le due cavità modificano lo spettro del segnale glottico, agendo come **filtri**, **sopprimendo le armoniche in antirisonanza ed esaltando quelle in risonanza**. Lo **spettro** del segnale trasmesso all'esterno non è più pianeggiante, come quello della sorgente, ma presenta dei **picchi** e degli **avvallamenti** in punti ben precisi: questo tipo di spettro si chiama **modello a sorgente e filtri** ed è il risultato dell'**interazione del tono laringeo con la funzione di trasferimento esercitata dai risonatori sovraglottidali**.

Le vocali

Le formanti vocaliche

I **picchi** creati dalle cavità sovraglottidali nello spettro del tono laringeo durante la produzione dei foni vocalici vengono chiamati **formanti vocaliche**.

Le più importanti sono **F1, F2 e F3** (meno importante e coinvolta nelle vocali nasali; nella [a],[i],[u] rimane costante), **di valore progressivamente crescente**, ma le prime due descrivono in modo soddisfacente il timbro della vocale: la differenza tra le vocali è riconducibile alle formanti perché **le armoniche più forti di un segnale complesso sono quelle che lo caratterizzano di più**, per cui le formanti determinano le vocali; **F0** indica la **frequenza fondamentale del tono laringeo**.

Rapporto tra conformazione delle cavità e formanti vocaliche

Nell'articolazione delle vocali gli organi articolatori si riposizionano in vari modi, modificando la forma del tratto vocalico. **L'effetto** che i filtri sovraglottidali **producono** sul tono laringeo dipende da **tre fattori**:

- la **localizzazione della costrizione** massima del tratto vocalico (**grado di avanzamento della vocale**);
- il **diametro della costrizione** (**grado di allontanamento della lingua dal palato, apertura della vocale**);
- la **posizione delle labbra** (distese o **ortocheile**, **procheile** o con arrotondamento).

Secondo le varie conformazioni possiamo rappresentare le **cavità** risultanti come **tubi** o come **risonatori di Helmholtz**.

- Nel caso della **vocale centrale [ə]**, pronunciata con gli organi articolatori in posizione di riposo, non vi sono **costrizioni**, quindi il risonatore equivale all'**intera lunghezza del tubo**. La sua frequenza di risonanza è correlata solo alla sua lunghezza, quindi sarà intorno ai **500Hz** (a seconda della lunghezza uomo/donna). I **picchi** saranno intorno ai multipli **dispari** della frequenza fondamentale (500, 1500, 2500...);

- Nel caso della **vocale bassa [a]** la costrizione è **minima** e il tratto vocale è diviso in due tubi. La frequenza del tubo dimezzato raddoppia rispetto a quello intero, quindi i picchi sono intorno ai 900/1100Hz;
- Quando la costrizione è **maggiore**, come **nelle vocali chiuse**, le due cavità tendono verso una forma che assomiglia al risonatore di **Helmholtz**: quindi il volume della cavità e la larghezza del foro d'uscita diventano determinanti per la frequenza. Nelle vocali **[i]** e **[u]** il tratto vocalico viene suddiviso in due cavità meno oblunghe e più tondeggianti. **Man mano che la cavità diventa più piccola, cioè la vocale è più avanzata, l'influenza dell'apertura labiale sul timbro della vocale cresce**: la differenza tra vocali procheile e ortocheile è più importante nelle vocali avanzate che in quelle arretrate (francese [y] e [i]), **perché la differenza dell'area del foro di uscita tra procheile e ortocheile influisce di più nelle cavità piccole.**

Si ricordi quindi che:

- il valore di **F1** è **direttamente** proporzionale al grado di **apertura** della vocale ossia il suo valore cresce man mano che la lingua si abbassa (**F1 ha il suo valore maggiore nella [a]**);
- il valore di **F2** è **direttamente** proporzionale al grado di **avanzamento** della vocale, il suo valore cresce man mano che il luogo diaframmatico si sposta avanti (**F2 ha il suo valore maggiore nella [i]**);
- la protrusione labiale (**procheilia**) **abbassa entrambe le formanti.**

Nella [i] le due formanti sono lontane, nella [a] sono vicine, al centro, nella [u] vicine in basso.

Nel **bisbiglio** è assente il tono laringeo, perché la glottide è chiusa e l'aria passa solo attraverso le aritenoidi aperte, generando solo un rumore bianco, filtrato dalle cavità di risonanza sovraglottidali, acquistando una certa "colorazione"; nel bisbiglio i risonatori sovraglottidali sono molto più importanti del segnale glottico e nell'articolazione della [i] si percepisce molto meglio il fatto che la sua F2 è molto più alta rispetto a quella della [u].

Spazio formantico (+triangolo acustico italiano)

Lo **spazio formantico o vocalico** è un **grafico** in cui sono rappresentate le **prime due formanti** delle vocali "cardinali" di una lingua. Sui due assi sono indicate le frequenze di F1 (ordinata) e F2 (ascissa). **I valori medi statistici di F1 e F2 delle vocali italiane disposti su un piano cartesiano formano il triangolo acustico delle vocali.** La forma dei due triangoli acustico e articolatorio è diversa per quanto riguarda le vocali arretrate: il **triangolo articolatorio** rappresenta solo il loro luogo diaframmatico, mentre il **triangolo acustico** registra anche il progressivo abbassamento di F2 dovuto alla procheilia e quindi appaiono spostate più a destra.

Per il **riconoscimento delle vocali** non sono tanto importanti i valori assoluti (nelle esecuzioni concrete c'è molta dispersione) quanto la **disposizione relativa delle formanti (i rapporti tra le formanti)**: questo perché i valori delle formanti dipendono dalle proprietà di risonanza delle cavità sovraglottidali (secondo la forma fisica, lunghezza, età, sesso) e possono oscillare da persona a persona: la F2 della [i] eseguita da un maschio adulto può avere la stessa frequenza della F1 della [i] eseguita da un bambino.

Nel canto quando si raggiungono altezze molto acute, la frequenza fondamentale del tono laringeo può superare il valore tipico di alcune formanti vocaliche e l'identificazione dei foni diventa problematica.

Normalizzazione del condotto vocale

La **normalizzazione del condotto vocale** è un **calcolo inconscio** che tiene conto della frequenza fondamentale del parlante e ci **permette** – **analizzando il rapporto reciproco tra formanti** e quello multilaterale tra coppie o triplette di formanti di ciascuna vocale con il resto del sistema vocalico– **di riconoscere le vocali.** In voci differenti i triangoli acustici non coincidono, però il cervello di chi ascolta ignora queste differenze, che non gli impediscono di riconoscere le vocali: **nel cervello non ci sono i dati numerici delle frequenze**, riesce a ignorare la dispersione dei valori numerici, **basta che si formi il triangolo, che l'ascoltatore percepisca l'intero sistema delle vocali.** Tutte le frequenze delle formanti del triangolo acustico femminile sono equamente traslate verso valori più alti rispetto a quelle del triangolo maschile (la [u] femminile è vicina alla [o] maschile): grazie al principio di normalizzazione del condotto vocale, l'orecchio valuta i rispettivi triangoli acustici nella loro interezza.

Area di dispersione

I valori delle formanti variano molto da individuo a individuo e nello stesso parlante. Se anziché segnare i valori medi indichiamo **sul piano cartesiano tutti i valori campionati delle formanti delle vocali**, troveremo le **aree di dispersione delle formanti** di ogni vocale, che, **mentre nel singolo parlante sono tendenzialmente separate, tra parlanti diversi possono sovrapporsi.**

Aspetti fonospettrografici

I foni vocalici sono segnali periodici complessi. La differenza di timbro vocalico è costituita dalla differenza nell'inviluppo spettrale tra i diversi segnali, generati dal meccanismo laringeo e poi filtrati dalle cavità di risonanza sovraglottidali. **Dal punto di vista spettrografico, le vocali si riconoscono per la presenza di strisce nere disposte orizzontalmente.** Gli annerimenti orizzontali più marcati corrispondono alle **formanti ossia picchi di energia nello spettro.** La distanza tra le formanti e la loro posizione all'interno dello spettro permettono il riconoscimento visivo di timbri vocalici sul fono spettrogramma.

La **[i]** ha un valore **molto basso** di **F1** (300 Hz) perché è chiusa, **massimo** di **F2** (2240) perché è la più avanzata, nel triangolo acustico va in alto a sinistra; nel fonospettragramma i **due annerimenti orizzontali sono ben distanziati tra loro.**

La **[a]** ha un valore **massimo** di **F1** (700) perché è la più aperta, **intermedio** di **F2** (1500) perché è centrale (F3 2500), nel triangolo al centro in basso; nel fonospettragramma le **due righe sono vicine tra loro attorno ai 1000 Hz.**

La **[u]** ha un valore **minimo** di **F1** (300) perché è chiusa, un valore **minimo** di **F2** (860) perché è la più arretrata, nel triangolo in alto a destra; le **due righe sono vicine nella parte bassa dello spettro.**

Se invece F1 è in ascissa e F2 in ordinata, la [i] è in alto a sinistra, la [u] in basso a sinistra, quasi in corrispondenza; la [a] al centro a destra.

La barra sonora

Nella parte bassa dello spettro, al di sotto della formante F1, si osserva un altro annerimento orizzontale: la barra sonora, che corrisponde alla frequenza fondamentale del tono laringeo F0, presente in tutti i foni sonori.

Tipi di vocali

Le vocali sono sempre sonore.

Fanno eccezione le **vocali mormorate** (*breathy vowels*) segnate nella trascrizione IPA con un apposito diacritico (due punti sotto il segno), piuttosto **esotiche**, ma presenti anche nelle lingue europee (nelle esclamazioni tipo *aha!*): il segnale periodico è disturbato da un rumore di fruscio generato dalla glottide, più aperta che nelle vocali normali; le formanti sono meno evidenti. Altre articolazioni vocaliche rare sono le **vocali nasali**, presenti in francese. La **nasalizzazione** comporta l'**indebolimento della F1**: il picco dello spettro viene smussato e si vedrà un annerimento meno scuro.

Foni vocalici. Acustica: oscillazione periodica. Spettragramma: annerimenti periodici di cui due formanti ben distinte; presenza della barra sonora.

Le consonanti

- le **consonanti occlusive sorde** sono caratterizzate da una fase di tenuta in cui l'aria è totalmente bloccata e quindi non c'è alcun segnale sonoro, che si presenta come uno **spazio bianco** sul fonospettragramma (totale assenza di traccia); la fase di soluzione è una **piccola esplosione (rumore bianco** uniforme su tutto lo spettro), che si presenta nel fonospettragramma come **annerimento verticale di breve durata che attraversa tutto lo spettro: spike**. Nelle **occlusive sonore** le trame dell'esplosione sono meno evidenti e si osserva la presenza della **barra sonora.**

Acustica: silenzio poi breve rumore.

Spettragramma: **spazio bianco** (silenzio in fase di tenuta); **spike** (breve annerimento a tutte le frequenze: strisce verticali); **VOT** (spazio bianco brevissimo); nelle **sonore:** presenza di **barra sonora.**

- le **consonanti fricative** sono acusticamente dei **rumori colorati**. Si presentano come delle **zone grigie** con il tracciato più intenso in determinate aree. La diversa colorazione dello spettro della fricativa dipende dal suo luogo diaframmatico: poiché solo la seconda cavità viene effettivamente sfruttata come risonatore, più è avanzata la fricativa, minore sarà il tubo risonante e più alta la zona dello spettro attivata (perché la frequenza è inversamente proporzionale alla lunghezza). Le **fricative sonore** si presentano come **rumore meno intenso** e spesso mostrano, oltre alla barra sonora, anche una **struttura formantica** ben definita, sebbene **debole**.
Ac.: rumore colorato (di frizione, su cui agiscono i risonatori) con picchi e avvallamenti.
Spet: **annerimento non periodico** in larghi range di frequenza; se sonore, barra sonora.
- le **consonanti affricate** sono simili alle **occlusive per la fase di tenuta** (assenza di traccia) e simili alle **fricative per la fase di soluzione** (fruscio ossia una zona grigia più o meno estesa).
Ac: silenzio seguito da un rumore.
Spet.: **spazio bianco, poi breve annerimento non periodico**; se sonore, barra sonora.
- le **consonanti nasali** hanno delle **formanti** simili a quelle **vocaliche** ma molto più **deboli**; si tratta cioè di picchi molto smussati nello spettro. Sul fonospettrogramma si osservano **annerimenti abbastanza marcati all'altezza di F1 (molto bassa, 250 Hz)** mentre le formanti superiori sono molto più deboli; **F2 varia secondo il luogo diaframmatico**. A metà strada tra rumore (consonanti) e onda periodica complessa (vocali); la differenza con le rispettive occlusive è solo l'apertura delle fosse nasali: l'aria passa e c'è sonorità.
Ac.: mormorio nasale (rumore con un po' di sonorità). **Spet.:** **formanti più deboli** rispetto alle vocali; F2 dipende dal luogo articolatorio; **F3 è ben marcata**. Centro di sillaba.
- le **consonanti laterali** sono dei **segnali praticamente periodici** con delle **formanti vere e proprie**, ma la loro intensità è più bassa rispetto alle vocali. Si presentano come **annerimenti orizzontali marcati** e ben distinguibili, **più deboli** che nelle vocali.
Ac.: suono continuo meno intenso rispetto alle vocali.
Spet.: formanti di intensità intermedia tra vocali e nasali. Centro di sillaba.
- le **consonanti vibranti** sono caratterizzate da un **rapido alternarsi di silenzio e rumore**: di conseguenza si presentano come una zona in cui **si alternano brevissime zone bianche** (assenza di traccia, silenzio) ad **annerimenti verticali** (lineette fitte fitte) simili allo **spike**. Centro di sillaba.
- le **approssimanti** sono **suoni di tipo vocalico, ma molto brevi**, hanno **formanti di intensità più bassa** rispetto alle vocali e **non stabili** (cioè orizzontali) perché presentano degli **annerimenti obliqui**. Compaiono **solo a contatto con una vocale**, quindi mostrano il fenomeno delle transizioni formantiche: **sono dei transienti**.

Sonorità nelle consonanti

Come nelle vocali, la sonorità delle consonanti è riconoscibile per la presenza della **barra sonora** nella parte delle frequenze basse dello spettro. Tuttavia, vi sono alcune differenze rispetto alle vocali dovute al fatto che i modi articolatori delle consonanti possono interferire con la possibilità che il meccanismo laringeo si attivi. **Nasali, laterali, vibranti e approssimanti** sono **sempre sonore** e sono chiamate **sonanti**. Altre possono essere sia sonore che sorde.

Sonorità nelle consonanti occlusive

Nelle occlusive la sonorità e l'articolazione della consonante interagiscono in modo ancora più complesso. Le occlusive sorde corrispondono ad un'assenza di segnale che nel fonospettrogramma si presenta come uno spazio bianco cui segue lo spike. Nelle occlusive sonore viene attivato il meccanismo laringeo, quindi è ben visibile la barra sonora.

VOT (Voice Onset Time) e l'aspirazione

Il **Voice Onset Time** (tempo di attivazione della voce) è l'**intervallo di tempo** che intercorre tra la fase di **esplosione delle occlusive e l'attivazione del meccanismo laringeo**.

I valori del VOT vanno normalmente da -50 a +150 ms.

- VOT=0: occlusive sorde**. Se si deve eseguire una consonante occlusiva sorda, l'eventuale **attivazione della sonorità** (dovuta ad esempio alla vocale subito dopo) avviene **non appena**

l'articolazione della consonante sia conclusa: lo spazio del VOT è davvero stretto, praticamente nullo, la consonante esplode e subito dopo inizia la vocale.

- **VOT=negativo: occlusive sonore (tenuta):** l'occlusione è più debole, hanno un rilascio più dolce perché per realizzare la sonorità un po' d'aria deve passare, **il meccanismo laringeo è attivato già durante la fine della fase di tenuta e continua a funzionare anche durante il rilascio e la successiva articolazione vocalica: il VOT è negativo.** Sul fonospettrogramma si vedrà la **barra sonora di intensità crescente;**
- **VOT=positivo: consonanti aspirate (soluzione).** Se **l'attivazione delle vibrazioni glottidali parte con leggero ritardo,** quando l'occlusione è già stata rilasciata, **le pliche vocaliche sono aperte, l'aria passa e la voce è ancora assente: si genera il fruscio tipico delle consonanti aspirate.** Le consonanti occlusive aspirate sono contraddistinte da un rumore aperiodico di breve durata, visibile tra lo *spike* e l'attacco della vocale.

I valori del VOT possono variare la lingua a lingua. **Tutte le lingue distinguono due o più valori di VOT, che possono stare su livelli diversi.** Arbitrarietà tra forma e sostanza del significante: nel continuum tra negativo, zero e positivo, ogni lingua ritaglia in punti diversi i confini tra i vari tipi di suoni. In inglese sia le sorde sia le sonore hanno un VOT più alto dei suoni analoghi in italiano: le occlusive sorde sono spesso aspirate, mentre le sonore lo sono meno che in italiano. L'etichetta sorda/sonora non rispecchia nessuna realtà, semplicemente le consonanti si dividono in due o tre gruppi.

Transizioni formantiche

Dato che tutte le occlusive si presentano come spazi bianchi indipendentemente dal luogo diaframmatico, **la distinzione dei luoghi diaframmatici è affidata alle proprietà delle vocali adiacenti alle consonanti.** A causa della **coarticolazione** ogni suono influenza quelli sintagmaticamente adiacenti. In particolare **le consonanti influiscono sulla realizzazione delle vocali che precedono o seguono.**

Le transizioni formantiche o transienti sono zone in cui gli annerimenti orizzontali delle formanti si inarcano per spostarsi da un livello ad un altro quando si passa da una vocale ad un'altra senza soluzione di continuità, senza che tali foni siano divisi da uno stacco glottidale.

I transienti della F1 si indicano con T1, quelli della F2 con T2. **Dato che F1 è correlata all'apertura e tutte le consonanti sono più chiuse delle vocali, nel passaggio da una vocale ad una consonante T1 volgerà verso il basso perché l'apparato articolatorio si prepara ad eseguire il suono più chiuso.** Nel passare da vocale a occlusiva sonora il T1 è molto ben visibile e ha un andamento declinante; da vocale a occlusiva sorda il T1 è inesistente, per cui l'andamento del T1 contribuisce al riconoscimento della consonante come sorda o sonora.

Invece la **F2 è correlata all'avanzamento** che per le consonanti equivale al **luogo diaframmatico.**

Nel passaggio da una vocale a consonante l'apparato articolatorio assume gradualmente la posizione necessaria per eseguire la consonante e questo si riflette sul fonospettrogramma sotto forma di un **T2 (F2)** che si indirizza **verso un punto ideale (che dipende dal luogo diaframmatico della consonante da pronunciare): locus consonanticus, punto ideale verso cui convergono le F2 delle vocali adiacenti, che dipende solo dalla consonante.** **F2 è l'unica che distingue una consonante.** Riusciamo a distinguere le consonanti tra loro in base a come vengono distorte le vocali adiacenti.

Consonanti velari: hanno il **locus a frequenze alte** (2500 Hz); **due** diversi loci: uno **molto alto**, se la velare è **seguita da vocali avanzate o dalla /a/;** uno **più basso** se è seguita da **vocali arretrate procheile** (si labializza per coarticolazione).

Consonanti alveolari: hanno il **locus a frequenze medie** (1800 Hz)

Consonanti labiali: hanno il **locus a frequenze basse** (700 Hz)

ANATOMIA

Apparato uditivo

Il sistema uditivo umano riceve come input le **vibrazioni fisiche dell'aria** e le conduce fino al cervello. La **trasduzione** dal segnale acustico esterno in segnale elettrico, trasmesso dai nervi al cervello, avviene attraverso diversi passaggi:

- L'**orecchio esterno** (padiglione auricolare) cattura le **onde sonore** e le convoglia attraverso il **condotto uditivo** fino al **timpano** (una sottile membrana tesa, indotta ad oscillare dalle onde di pressione dell'aria), nell'**orecchio medio**;
- Le oscillazioni del timpano vengono trasmesse ad una catena di **tre ossicini** (**martello, incudine e staffa**) che, a loro volta, la trasmettono ad un'altra membrana, **finestra ovale** (attaccata alla staffa);
- La finestra ovale trasmette la vibrazione al liquido (**endolinfa**) di cui è riempito l'**orecchio interno** (**cochlea: cavità spiraliforme lunga 30mm: il fatto che il tubo sia curvo non influisce sulle sue proprietà acustiche di risonanza**);
- L'endolinfa conduce il segnale, sotto forma di **onde di pressione**, alla **membrana basilare** che riveste la parete interna del condotto cocleare, più **stretta e rigida** alla base, più **larga e meno rigida** verso l'apice della cochlea: cambiano le caratteristiche fisiche e le **frequenze di risonanza** a cui è sensibile diminuiscono di conseguenza. L'oscillazione sonora con una certa frequenza f eccita la zona della membrana basilare che è sensibile alla medesima frequenza f ;
- Le **cellule ciliate** di cui è rivestita la membrana, che nel loro insieme formano l'organo del Corti, catturano l'oscillazione meccanica e la trasformano in **segnale elettrico**, trasmesso poi al **cervello** dal **nervo cocleare**, che innerva la membrana basilare in tutte le sue parti.

La **sensibilità dei diversi punti della cochlea a frequenze diverse si chiama tonotopicità**. Ogni **5mm** circa **raddoppia** la frequenza catturata. **Il 60% della lunghezza della cochlea percepisce le frequenze fino a 4000Hz, quelle che si distinguono meglio**: il parlato (F3 fino a 4000Hz) e la musica.

La banda critica

Se il segnale di input è un'oscillazione complessa, **zone diverse della membrana basilare reagiranno a componenti armoniche diverse dell'onda periodica complessa**. Di fatto **la cochlea svolge l'analisi spettrale del suono complesso tramite un banco di filtri a banda molto stretta**: si chiama **banda critica l'intervallo di frequenze entro il quale due toni puri simultanei non possono essere percepiti come distinti perché localizzati nella stessa zona della membrana basilare; soglia entro la quale un piccolo range di frequenze viene percepito come uno stesso suono**. La banda critica diventa più larga all'aumentare della frequenza, perché nella zona delle alte frequenze la densità delle frequenze per unità di lunghezza è maggiore, **raddoppia ogni 5mm** (scala \log_2 : le frequenze sono mappate sulla membrana basilare con una progressione logaritmica con base 2).

LE CARATTERISTICHE DEL SUONO

Caratteristiche oggettive relative

Il segnale che viene captato dall'orecchio è un'**oscillazione fisica con caratteristiche oggettive misurabili: frequenza, ampiezza e composizione armonica**. Tuttavia l'essere umano non percepisce tali caratteristiche oggettive in modo diretto. Le **caratteristiche fisiche dei suoni relativamente alla percezione umana (a livello di apparato acustico) sono caratteristiche oggettive relative**: intensità del suono. Quando il segnale sonoro viene trasdotto in **impulsi elettrici interpretati dal cervello** non si parla più di acustica, ma di **psicoacustica**, e quindi subentrano le **caratteristiche soggettive del suono** (acutezza, volume, timbro) e le qualità estetico-musicali (consonanza/dissonanza).

Percezione delle caratteristiche fisiche dell'onda

1. Ampiezza

L'**intensità assoluta o oggettiva** del suono o pressione sonora è il rapporto tra la potenza (cioè il flusso di energia) del suono che attraversa perpendicolarmente una superficie e l'area di tale superficie: $I = P/A$.

Si tratta di una **misura fisica oggettiva** e si misura in W/m^2 . La potenza sviluppata dall'onda è correlata all'ampiezza dell'oscillazione: **l'intensità del suono deriva dall'ampiezza dell'onda, maggiore è l'ampiezza, maggiore è l'intensità**.

Un'onda sonora che si propaga sfericamente nell'aria a partire da una sorgente puntiforme perde d'intensità man mano che si allontana dalla sorgente; più ci si allontana dalla sorgente, più è grande la sfera e quindi l'area ($4\pi r^2$): **l'intensità del suono è inversamente proporzionale al quadrato della distanza**.

Soglia d'udibilità e soglia del dolore

Se si prende come punto di riferimento l'essere umano, il suono, per essere percepito, deve essere compreso entro due **soglie di intensità**.

L'intensità minima percepibile viene detta **soglia di udibilità I_0** pari a $1 \cdot 10^{-12} \text{ W/m}^2$.

All'estremo opposto è la **soglia del dolore**, che, se superata, provoca dolore e danni permanenti all'apparato uditivo interno, pari a 1 W/m^2 (mille miliardi di volte maggiore).

Misurando l'intensità dei suoni percepita confrontandola con quella della soglia di udibilità, si ottiene il **livello d'intensità sonora β** (**oggettivo-relativo all'orecchio umano**), misurata in **decibel (dB)**:

$$\beta = 10 \log_{10} I/I_0 \text{ dB.}$$

Per evitare numeri troppo grandi dal rapporto I/I_0 (da 0 a mille miliardi), si adopera una **scala logaritmica** che va da 0 a 12 (il logaritmo in base 10 rappresenta l'"ordine di grandezza") con il **bel B** come unità di misura; moltiplicando per 10 si ottiene il decibel.

Il raddoppio dell'intensità porta un aumento di 3dB del livello di intensità: due parlanti che si parlano "sulla voce" generano un suono a 63 dB.

La soglia di **udibilità** equivale a **0dB**; quella del **dolore** a **120-130dB**.

Il livello di intensità percepito come confortevole dall'orecchio umano va da **20 a 60dB** (conversazione normale).

+70dB: fastidiosamente alti.

+120dB: dannosi per la salute.

+130dB: rottura della membrana timpanica.

+180dB: morte istantanea (si distruggono le pareti cellulari).

L'intensità del suono trasmesso dall'atmosfera terrestre non va oltre la soglia di **194dB**, perché oltre tale soglia l'energia sarebbe talmente forte da creare il vuoto pneumatico nelle zone di decompressione e spazzare via l'atmosfera.

Legge di Weber-Fechner

La scala logaritmica descrive molto realisticamente il modo in cui l'apparato uditivo umano percepisce le variazioni di intensità del suono. **Per ottenere un salto apprezzabile (una differenza di una unità) del livello di intensità di un suono (dB) bisogna moltiplicare per 10 la sua pressione sonora assoluta (W/m^2).**

Secondo la **legge di Weber-Fechner**, la scala logaritmica contraddistingue non solo la percezione acustica, ma anche la **percezione umana in generale** (anche la percezione della luce).

Campo uditivo

La particolarità della **sensazione di intensità dell'uomo**, detta impropriamente **volume**, consiste nel fatto che tale percezione non è uniforme a tutte le frequenze. **Il campo uditivo si ottiene creando un grafico cartesiano che in ascissa indica le frequenze percepibili e in ordinata il livello di intensità sopportabile dall'uomo.** Campo uditivo: insieme di tutte le frequenze e tutte le intensità che l'uomo percepisce. Unendo tutti i punti del campo uditivo aventi un identico livello di intensità soggettivamente percepita (fon), si ottengono le cosiddette **curve di isofonia (uniscono tutti i punti del campo uditivo in cui la percezione di intensità è identica)**, il cui andamento è fortemente deviato verso l'alto sia a frequenze molto basse sia a quelle molto alte. L'intensità soggettivamente percepita varia al variare della frequenza. Il fatto che le curve di isofonia si incurvino verso l'alto significa che in quei punti del campo uditivo (a quelle frequenze) l'orecchio ha **bisogno** di più **pressione sonora** per mantenere la stessa sensazione sonora. **Per misurare questa sensazione soggettiva di intensità si usa il fon** (misura psicologica). **A una frequenza di 1000-2000 Hz i valori misurati in fon combaciano quasi con i dB, perché l'orecchio umano è specializzato nel percepire la gamma di frequenze del parlato; attorno ai 5000 Hz per ottenere lo stesso valore di fon, i dB vanno diminuiti: il segnale acustico è filtrato dal canale uditivo esterno, tubo con frequenza di risonanza attorno a 5000 Hz per cui questa banda di frequenze viene esaltata di più.**

2. Frequenza e Spettro

I limiti del range delle frequenze udibili sono imposti dalle **proprietà di risonanza della membrana basilare**, che reagisce a frequenze che vanno da 20 a 20000Hz. In altri animali le caratteristiche

dell'apparato uditivo possono essere diverse e permettere quindi la percezione di suoni che, per l'essere umano, sono impercettibili (ultrasuoni e infrasuoni, non dannosi per l'uomo).

Altezza del suono

L'essere umano percepisce la frequenza delle oscillazioni semplici come acutezza o **altezza musicale** (*pitch*). L'unità di misura della frequenza oggettiva è l'**hertz**. Invece, la sensazione soggettiva di acutezza può essere misurata con varie scale ad hoc.

A causa della peculiare mappatura delle frequenze sulla membrana basilare, l'**acutezza** è correlata a $\log_2 f$, cioè **procede secondo una scala logaritmica** in cui ogni passo successivo equivale ad una **moltiplicazione per due**.

Nel campo della **psicoacustica** si è **suddiviso il range delle frequenze udibili in 24 bande**, in modo che la differenza di altezza tra le due bande successive sia soggettivamente sempre la stessa. Questa è la **scala di bark**, che ha lo 0 in corrispondenza di 20Hz.

Il timbro

Un'onda periodica semplice è percepita come un suono **puro**, mentre un'onda periodica complessa viene percepita come un suono unico avente però un certo **timbro**.

La caratteristica oggettiva responsabile della **sensazione soggettiva di timbro** è la **composizione armonica dell'onda**, ossia il suo **spettro**. A spettri diversi corrispondono timbri diversi:

- Uno **spettro a righe** è percepito come un **suono musicale**;
- uno **spettro continuo** è percepito come un **rumore**.

Via via che lo spettro diventa continuo, il timbro che gli attribuiamo perde musicalità.

Più alta è la frequenza fondamentale di un segnale, meno armoniche rientreranno nel **range udibile**: i suoni molto acuti presentano un timbro sempre più povero, fino a diventare timbricamente indistinguibili.

La **capacità del cervello di discriminare due suoni separati all'interno di un segnale unico** si basa sul **differenziale Δ di frequenze tra di essi**. **Due suoni puri con frequenza identica** vengono percepiti come un **unico segnale** (unisono). Se le **frequenze** vengono fatte **allontanare l'una dall'altra** e non sono più identiche, il cervello percepisce le due frequenze separatamente solo se il loro differenziale supera la **banda critica**, ossia la **sensibilità della coclea**.

Il cervello conferisce al segnale composto **qualità psicoacustiche**:

- Se il **differenziale** si trova **sotto** la soglia dei **15Hz** il cervello percepisce i **battimenti**: il suono è ancora unico, ma contraddistinto da una specie di pulsazione a bassa frequenza pari a Δ (l'effetto è un rafforzamento seguito da un indebolimento del suono, a seconda che le frequenze siano in concordanza o discordanza di fase);
- Se il **differenziale** è **superiore ai 15Hz** si entra nella zona della **dissonanza**: tali combinazioni sono interpretate dal cervello come aspre e **sgradevoli**;
- **superando la banda critica** si arriva alle **consonanze**, interpretate come **gradevoli**.

Se si prendono **due suoni complessi**, la loro **consonanza** percepita dipenderà non solo dalla frequenza fondamentale, ma anche dalle armoniche: **più coincidono le armoniche, più musicalmente gradevole** è la loro combinazione.

Il **cervello riconosce la voce umana**, generata dalla glottide, dai suoni di origine non umana, basandosi sulla **forma spettrale del segnale**: più lo spettro si avvicina a quello della voce più apparirà umano.

Intensità oggettiva assoluta in W/m^2

Intensità oggettiva relativa in dB

Intensità soggettivamente percepita in fon

Timbro del suono

Il **timbro** è la proprietà per cui un suono è percepito di diversa qualità a seconda della fonte sonora che lo emette e dal modo in cui è messo in vibrazione il corpo vibrante. Dipende dalla **forma** delle vibrazioni ed è influenzato dalla **forma** e dal **materiale** di cui è costituito il corpo vibrante e dal **modo** in cui esso viene sollecitato. **Particolare qualità del suono che permette di distinguere due suoni di uguale frequenza e altezza**.

Altezza del suono (vedi [L'altezza])

L'**altezza** è la proprietà per cui un suono può essere più o meno **grave** o **acuto**. Dal punto di vista fisico corrisponde alla **frequenza dell'oscillazione** (il la centrale di un pianoforte corrisponde a 440Hz)

Intensità del suono

L'**intensità** è la proprietà per cui un suono è più o meno **forte**. Dipende dall'**ampiezza** delle vibrazioni.

Risonanza acustica

La **risonanza acustica** è il fenomeno dell'**amplificazione** delle onde sonore che caratterizza i risonatori, tanto **maggiore** quanto la **frequenza** dello stimolo è **vicina** alla **frequenza di risonanza** naturale del risonatore. Su questo principio si basa il funzionamento di quasi tutti gli strumenti musicali.

Tensione

Vi è una relazione tra le **caratteristiche fisiche** della corda e la **nota** da esse generate. Una corda ha una sua propria **lunghezza**, un **peso**, una **tensione**. Per accordare uno strumento a corde si può solo agire sulla tensione della corda: da qui si può capire che la tensione stessa è rilevante per la creazione di un suono.

Diapason

Il **diapason** è uno strumento a forma di **forcella metallica** capace di emettere, se opportunamente sollecitato **una sola nota musicale**. È un ottimo **risonatore**: accostandolo ad una sorgente sonora che sta emettendo più note contemporaneamente, il diapason si metterà a vibrare **solo** se nel segnale sonoro è compresa la sua nota specifica – che risuona ad una frequenza che coincide con la sua frequenza di risonanza.

La voce umana

Anche la voce umana ha una frequenza, un'intensità e un timbro specifico. Il condotto vocalico funziona da cassa di risonanza per la voce generata dalla sorgente, ossia il meccanismo laringeo.

Caratteristiche dell'onda

Le onde sono delle **perturbazioni** che si propagano trasportando **energia** ma non materia.

Le onde più semplici sono quelle **sinusoidali**, formate da creste e da ventri.

- La **distanza tra due creste successive** è detta **lunghezza d'onda**;
- La **distanza tra il punto di maggiore allontanamento dal corpo e la posizione di riposo** viene chiamata **ampiezza d'oscillazione**;
- L'**intervallo di tempo che intercorre fra il passaggio di due creste per lo stesso punto** è detto **periodo**. È indicato con T e si misura in secondi;
- La **fase** indica il ritardo o l'anticipo con cui si presenta lo **zero dell'onda rispetto all'origine del sistema cartesiano** di riferimento. L'apparato uditivo umano è quasi del tutto insensibile alla fase dell'oscillazione, quindi percepirebbe due onde con fasi diverse come identiche, se ascoltate in successione;
- il **numero di volte in cui un punto oscilla in un'unità di tempo specifica** (di solito un secondo) è detto **frequenza**. Questa è l'**inverso del periodo**, è indicata con f e misurata in hertz (Hz). $f=1/T$

Sia lunghezza d'onda che frequenza si usano per descrivere le onde periodiche: le due misure sono equivalenti. La prima si usa di solito per onde elettromagnetiche, mentre la seconda per onde acustiche (nonostante anche la lunghezza abbia la sua importanza, soprattutto per descrivere le caratteristiche acustiche di un risonatore e per calcolare la velocità di propagazione del suono).