



INFORMATICA MUSICALE

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI CATANIA
DIPARTIMENTO DI MATEMATICA E INFORMATICA
LAUREA TRIENNALE IN INFORMATICA
A.A. 2019/20
Prof. Filippo L.M. Milotta

ID PROGETTO: 23

TITOLO PROGETTO: Effetto Doppler e le sue molteplici applicazioni

AUTORE: Furnari Salvatore Stefano

Indice

1. Obiettivi del progetto	2
1.1 COS'È L'EFFETTO DOPPLER?	2
1.1.1 MOTO DELLA SORGENTE	2
1.1.2 MOTO DEL RICEVITORE	2
1.1.3 MOTO DEL RICEVITORE E DELLA SORGENTE	3
1.1.4 CASI PARTICOLARI	3
1.2 COME OSSERVARLO?	3
1.3 APPLICAZIONI IN CONTESTI SCIENTIFICI E TECNOLOGICI	4
1.3.1 ASTRONOMIA	4
1.3.2 MEDICINA	5
1.3.3 METEOROLOGIA	6
1.3.4 SICUREZZA	6
1.4 E IN MUSICA?	7
1.4.1 AMPLIFICATORI LESLIE	7
1.4.2 CHORUS	8
1.4.3 STRUMENTI MUSICALI	8
2. Riferimenti Bibliografici	9
3. Argomenti Teorici Trattati	9
3.1 EFFETTO DOPPLER	9
3.2 ONDA SONORA	10
3.3 PERCEZIONE SONORA	11
3.3.1 ALTEZZA	11
3.3.3 VOLUME	12

1. Obiettivi del progetto

1.1 COS'È L'EFFETTO DOPPLER?

L'effetto Doppler è un fenomeno fisico che consiste nel cambiamento apparente, rispetto al valore originario, della frequenza o della lunghezza d'onda percepita da un osservatore raggiunto da un'onda emessa da una sorgente che si trovi in movimento rispetto all'osservatore stesso. Se la sorgente e l'osservatore si muovono entrambi rispetto al mezzo di propagazione delle onde, l'effetto Doppler totale è derivato dalla combinazione dei due movimenti; perciò ognuno di essi è analizzato separatamente.

1.1.1 MOTO DELLA SORGENTE

Consideriamo una sorgente in movimento che emette un suono di frequenza f , indichiamo con v la velocità del suono nell'aria (che ricordiamo essere di circa 340 m/s a temperatura ambiente), con v_s la velocità della sorgente e poniamo F' la frequenza percepita dal ricevitore.

L'effetto che si ottiene è un accorciamento della lunghezza d'onda. Ciò accade perché i fronti d'onda emessi dalla sorgente si avvicinano sempre di più fra loro diminuendo di volta in volta la lunghezza d'onda con un conseguente aumento di frequenza. Quindi la lunghezza d'onda non è più $\lambda = v/f$ ma $\lambda' = v/f - v_s/f$: di conseguenza anche la frequenza percepita dall'ascoltatore è aumentata; viceversa se la sorgente si allontana dall'osservatore la lunghezza d'onda aumenta ($\lambda' = v/f + v_s/f$), cosicché l'ascoltatore percepisce una frequenza più bassa.

La relazione generale, che vale quindi quando l'ascoltatore è fermo e la sorgente in movimento è

$$F' = f \left(\frac{v}{v \pm v_s} \right)$$

Dove il segno negativo vale quando la sorgente si avvicina all'ascoltatore mentre il segno positivo quando si allontana.

1.1.2 MOTO DEL RICEVITORE

Se il corpo O è fermo, riceverebbe in un dato tempo " t " un numero di onde vt/λ , dove v è la velocità del suono nel mezzo e λ è la lunghezza d'onda. Ma poiché il corpo O si muove verso la sorgente, egli riceve in uno stesso tempo " t " un numero aggiuntivo di onde pari a $v_o t/\lambda$, dove v_o è la velocità di movimento del corpo O. La frequenza del suono udito dal corpo è ricavabile dal rapporto fra il numero di onde e il tempo di ascolto:

$$F' = \frac{\frac{vt}{\lambda} + \frac{v_o t}{\lambda}}{t} = \frac{v + v_o}{\frac{v}{f}}$$

Cioè:
$$F' = f \frac{v + v_o}{v} = f \left(1 + \frac{v_o}{v} \right)$$

Quando invece l'ascoltatore si allontana dalla sorgente del suono, c'è una diminuzione di frequenza corrispondente al numero di onde che non riescono a raggiungere il corpo O.

La relazione generale valida sia se il corpo O si allontana sia se si avvicina è la seguente:

$$F' = f \left(\frac{v \pm v_o}{v} \right)$$

Il segno positivo viene usato se i due corpi, sorgente e ascoltatore, si avvicinano, il segno negativo se si allontanano. Si può quindi notare che la variazione di frequenza è dovuta al fatto che l'ascoltatore intercetta più o meno onde al secondo in conseguenza del proprio movimento.

1.1.3 MOTO DEL RICEVITORE E DELLA SORGENTE

Se entrambi, ascoltatore e sorgente, si muovono, la frequenza percepita dall'ascoltatore è

$$F' = f \left(\frac{v \pm v_o}{v \pm v_s} \right)$$

In questo modo il numeratore rappresenta il movimento dell'ascoltatore (+ quando si avvicina alla sorgente, - quando si allontana) mentre il denominatore indica i moti della sorgente in modo inverso.

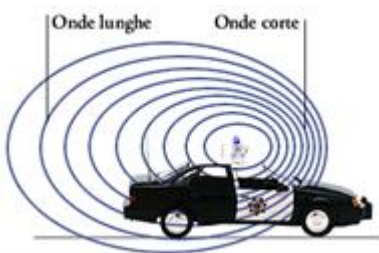
1.1.4 CASI PARTICOLARI

Cosa succede se il denominatore si annulla, cioè se $v_s = v$? I fronti d'onda si ammasserebbero l'uno sull'altro poiché arriverebbero tutti nello stesso istante. In questo modo il suono viene percepito tutto in una volta. Pensiamo ad esempio a un aereo che viaggia alla velocità del suono che con il suo movimento attraverso l'aria produce un forte rumore. Un possibile ascoltatore sentirebbe quindi le onde sonore nel medesimo istante, che si traduce con un forte "bang".

Cosa accade invece se si supera la velocità del suono, quindi se $v_s > v$? Per rispondere a questo quesito proviamo a immaginare un uomo A che si muove a velocità superiore a quella del suono (340 m/s) verso B. Se A gridasse una qualunque parola, B percepirebbe prima le ultime lettere pronunciate: la parola arriverebbe a B al contrario.

1.2 COME OSSERVARLO?

L'Effetto Doppler può essere osservato facilmente nella vita di tutti i giorni, ad esempio quando passa accanto a noi una macchina della polizia: la sirena di una volante inizierà ad essere percepita più alta del tono che ha da ferma, si abbasserà mentre passa accanto all'osservatore, e continuerà più bassa del suo tono da ferma mentre si allontana dall'osservatore.



Lo stesso effetto può essere visibile anche ad occhio nudo: se siamo fermi sulla spiaggia, vediamo arrivare le onde supponiamo ogni cinque secondi, quindi ad una determinata frequenza; se ora entriamo in acqua e navighiamo verso il mare aperto, andiamo incontro alle onde, quindi le incontriamo più frequentemente (la frequenza aumenta), mentre se navighiamo verso riva, nella stessa direzione delle onde, la frequenza con cui le incontriamo diminuisce.

È importante notare che la frequenza del suono emesso dalla sorgente non cambia *nel sistema di riferimento solidale alla sorgente*: Un osservatore che si trova sulla banchina di una stazione attraversata da un treno di passaggio percepisce un cambiamento nel suono associato alla sirena del treno mentre questo dapprima si avvicina, passa e successivamente si allontana. Oltre all'ovvio cambiamento nell'intensità del suono, che aumenta quando il treno è in avvicinamento e diminuisce quando il treno si allontana, vi è anche una

variazione della frequenza percepita. Il suono infatti ha un tono più alto mentre il treno si avvicina e più basso nel caso opposto. Al contrario, un viaggiatore posto sul treno non percepisce alcun cambiamento. Ciò che cambia è quindi la frequenza *nel sistema di riferimento del rilevatore*; come conseguenza, l'altezza del suono percepito cambia.

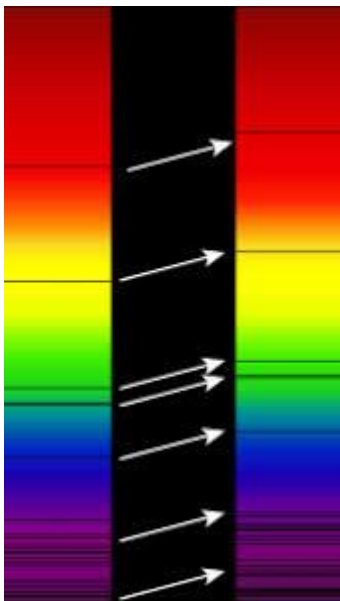
1.3 APPLICAZIONI IN CONTESTI SCIENTIFICI E TECNOLOGICI

1.3.1 ASTRONOMIA

L'effetto Doppler non vale solo per le onde sonore, bensì per tutti i fenomeni che coinvolgono le onde: applicato alle onde luminose, è fondamentale nella astronomia radar. Interpretandolo come dovuto ad un effettivo moto della sorgente, è stato usato per misurare la velocità con cui stelle e galassie si stanno avvicinando o allontanando da noi, e anche per misurare la velocità di rotazione di stelle e galassie.

L'uso dell'effetto Doppler in astronomia si basa sul fatto che lo spettro elettromagnetico emesso dagli oggetti celesti non è continuo, ma mostra delle linee spettrali a frequenze ben definite, correlate con le energie necessarie ad eccitare gli elettroni di vari elementi chimici. L'effetto Doppler è riconoscibile quando le linee spettrali non si trovano alle frequenze ottenute in laboratorio, utilizzando una sorgente stazionaria. La differenza in frequenza può essere tradotta direttamente in velocità utilizzando apposite formule.

Poiché i colori posti ai due estremi dello spettro visibile sono il blu (per lunghezze d'onda più corte) e il rosso (per lunghezze d'onda più lunghe), l'effetto Doppler è spesso chiamato in astronomia spostamento verso il rosso se diminuisce la frequenza della luce, e spostamento verso il blu se l'aumenta.



L'effetto Doppler ha condotto allo sviluppo delle teorie sulla nascita ed evoluzione dell'Universo come il Big Bang, basandosi sul sistematico spostamento verso il rosso mostrato da quasi tutte le galassie esterne. Tale effetto è stato codificato nella legge di Hubble, che esprime una proporzionalità diretta tra la distanza di un corpo celeste e il suo spostamento verso il rosso.

L'effetto Doppler è una prova inoltre della continua espansione dell'universo. Consideriamo infatti una stella: controllando la sua lunghezza d'onda noteremo che si sposta sempre di più verso il rosso. Ciò significa che la sua lunghezza d'onda è aumentata e conseguentemente la stella è sempre più lontana da noi. Questo indica che l'universo è in continua espansione e ogni elemento tende ad allontanarsi da tutto, allungando sempre di più la sua lunghezza d'onda.

1.3.2 MEDICINA

L'effetto Doppler è anche usato in medicina per la rilevazione della velocità del flusso sanguigno. Tale principio infatti è sfruttato dai Flussimetri Eco-Doppler (ADV, ovvero Acoustic Doppler Velocimeter), nei quali una sorgente di onde sonore, generalmente ultrasuoni, viene orientata opportunamente. Queste onde acustiche vengono poi riflesse con una nuova frequenza, a seconda della velocità vettoriale delle particelle sanguigne. Gli apparecchi doppler funzionano paragonando tra loro le frequenze emessa e riflessa e misurandone la differenza; da questa misurazione è possibile risalire alla velocità del sangue ed al verso di percorrenza dello stesso. Nel sangue, i globuli rossi rappresentano le interfacce sulle quali si generano gli echi la cui frequenza sembrerà aumentare, nel caso di flussi in avvicinamento alla sonda, o sembrerà ridursi, nel caso opposto rispetto alla frequenza degli ultrasuoni emessi dalla sonda.

La variazione (shift) della frequenza nell'effetto Doppler dipende dalla velocità del flusso (maggiore è la velocità, maggiore lo shift) secondo la formula:

$$f_D = 2 \cdot f_0 \cdot V \cdot \cos\theta / c$$

dove

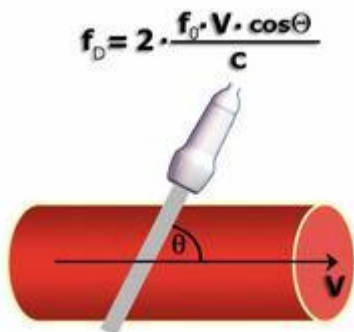
f_D = frequenza con Doppler shift;

f_0 = frequenza emessa dalla sonda;

V = velocità degli eritrociti;

$\cos\theta$ = coseno dell'angolo tra direzione del flusso e direzione degli ultrasuoni;

c = velocità di propagazione degli ultrasuoni nel sangue (1560/ms).



Dalla formula è intuitivo rilevare che se l'angolo θ è pari a 0° (se cioè la direzione degli ultrasuoni è parallelo al flusso) il coseno sarà 1 e, quindi, la velocità calcolata sarà fedele alla reale. Man mano che l'angolo aumenta, si riduce la stima della velocità: ad esempio, con un angolo pari a 60° la velocità stimata è pari al 50% del reale; al di sopra di 60° la riduzione della stima è tale che non può essere compensata da correzioni matematiche e, perciò, sarà impossibile fare una stima esatta della velocità del flusso ematico. La peculiarità di questa tipologia di ecografia è che le frequenze dello shift Doppler rientrano nell'ambito dello spettro dell'udibile (tra 20 e 20000 Hz) e, quindi, possono essere ascoltate e valutate anche con l'udito oltre che con la visione sul monitor.

Esiste anche un'altra modalità di visualizzazione, tramite la tecnica del **Color Doppler**: in modo del tutto analogo a quanto accade per i corpi celesti, il flusso sanguigno viene visualizzato come una mappa di colore. Il colore è codificato, di solito, in maniera tale che il Rosso è assegnato al flusso diretto verso la sonda, mentre il Blu è assegnato a quello che se ne allontana.

Il principale vantaggio di questa modalità di visualizzazione dell'effetto Doppler risiede nella sua semplicità ed intuitività di interpretazione. Tuttavia, questa modalità non è in grado di dare informazioni quantitative ma solo qualitative sul flusso: un rosso molto intenso o un blu molto intenso significherebbero flussi molto

veloci in avvicinamento o in allontanamento; la presenza di un mosaico di colori in un vaso, testimonieranno un flusso di tipo turbolento.

La tradizionale ecografia Doppler consente di valutare la velocità di flusso intravascolare nel distretto macrocircolatorio, ma non fornisce alcuna informazione sul microcircolo: per questo tipo di misure si utilizza il **laser Doppler**. Il principio del laser Doppler consiste nella valutazione dell'effetto Doppler manifestato dalla luce laser quando i fotoni colpiscono i globuli rossi in movimento, valutando la variazione di lunghezza d'onda o di frequenza dei fotoni che hanno "colpito" i corpuscoli. L'indubbio vantaggio di questa tecnica è la possibilità di misurare la velocità senza alcun contatto con il materiale.

1.3.3 METEOROLOGIA

Poiché l'atmosfera è un sistema caotico la cui dinamica è influenzata da moltissimi fattori, risulta fondamentale correggere le simulazioni dei centri di calcolo con i dati reali in prossimità dell'evento. Inoltre essi costituiranno i nuovi dati in ingresso per i successivi "runs" del modello previsionale.



Il Radar Doppler Meteorologico può consentire di valutare la componente radiale della velocità del vento. Essa è calcolata in base alla variazione in frequenza tra l'impulso emesso dal radar e l'eco corrispondente; da ciò si può desumere la velocità delle idrometeore (pioggia, neve o grandine) che generano l'eco e conseguentemente la velocità del vento, fornendo quindi informazioni utili sulla dinamica delle nubi e sull'eventuale formazione di tornado. Questi tipi di dati possono essere analizzati per determinare la struttura dei temporali e la loro capacità di creare tempo fortemente perturbato o addirittura pericolo per la navigazione aerea.

Il Radar Doppler è quindi molto più versatile rispetto ad un radar tradizionale che consente solamente di rilevare l'intensità delle precipitazioni, ma che nulla ci può dire sulla futura evoluzione del sistema perturbato. Questa tecnologia radar costituisce quindi il principale strumento per il **nowcasting**, ossia per la previsione a brevissimo termine (1÷3 ore), mediante l'osservazione e l'estrapolazione nel tempo del moto e delle caratteristiche di sistemi precipitanti, specie quelli convettivi.

1.3.4 SICUREZZA

Il Telelasar, a volte chiamato in gergo "*pistola laser*", è un rilevatore di velocità istantanea utilizzato dalle Forze dell'Ordine per controllare la velocità dei veicoli in strada. A differenza dell'Autovelox classico, che

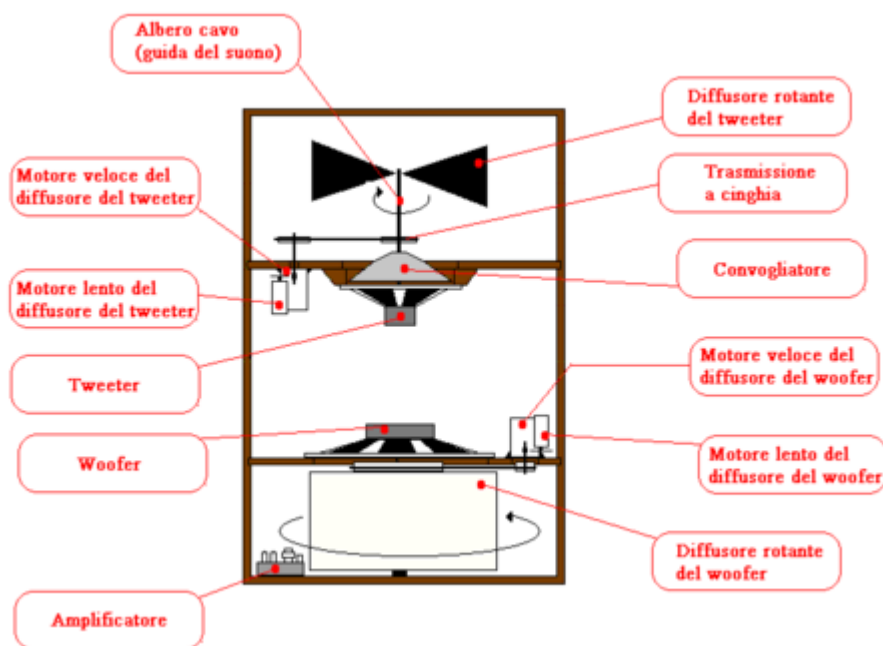
tipicamente dispone di una postazione fissa, il **Telelaser può esser trasportato e utilizzato praticamente in tutti i tratti di strada**. L'apparecchio viene **puntato** dagli agenti di Polizia Stradale su un veicolo ed emette un fascio laser che lo colpisce. Subito dopo viene riflesso verso il Telelaser. Durante questa operazione la frequenza del laser subisce una variazione in funzione della velocità del veicolo che può quindi esser subito calcolata. In generale questi strumenti, se ben utilizzati, hanno un errore di misurazione molto basso, secondo alcuni inferiore allo 0.35%, ben al di sotto quindi della tolleranza del 5% ammesso dal Codice della strada.

1.4 E IN MUSICA?

Ovviamente, non potevano mancare le applicazioni in ambito musicale, dall'effettistica alla realizzazione di strumenti musicali basati su questo fenomeno fisico.

1.4.1 AMPLIFICATORI LESLIE

Il dispositivo fu inventato da Donald Leslie, ai tempi operaio di Hammond, e poi utilizzato nei celeberrimi organi dell'azienda. Lo strumento era stato proposto dal suo inventore come sostituto dell'organo liturgico, ma il risultato complessivo lasciava molto a desiderare per la staticità e innaturalità del suono, nonché per il persistere di onde stazionarie, amplificate ed evidenziate nell'acustica delle chiese. Si pensò allora di migliorarne la qualità, facendo ruotare gli altoparlanti dell'amplificatore in modo da creare un piccolo effetto Doppler e da fornire al suono una certa spazialità, producendo un'onda periodicamente in opposizione di fase tale da interferire con la stazionaria. Questa percezione tridimensionale è il frutto della somma dell'effetto Doppler, dovuto allo spostamento relativo delle fonti sonore rispetto all'ascoltatore, e delle riflessioni del suono conseguenti alla rotazione. Presto i diffusori Leslie divennero lo standard di ogni installazione Hammond se si desiderava produrre il caratteristico suono quasi "brontolante".



Il suono viene suddiviso in due gamme (acuta e grave) per mezzo di un filtro Crossover:

- La gamma grave viene riprodotta da un grande altoparlante a cono, posto con il magnete in alto e la membrana orientata verso il basso; sotto all'altoparlante c'è un riflettore acustico in legno, dalla forma a parabola concava, con pianta circolare che ruota sul proprio asse, azionato da un motorino elettrico mediante una cinghia
- la gamma acuta viene riprodotta da un altoparlante a compressione, che sfoga all'interno di un doppio diffusore a tromba, montato su un asse e posto in rotazione da un altro motorino elettrico

dotato di cinghia; un diffusore piazzato davanti ad ogni tromba scinde, colora e diffonde ulteriormente il suono, donandogli una caratteristica timbrica.

I due rotori sono tra loro svincolati; quello dei bassi gira ad una velocità simile ma non uguale rispetto a quello degli alti, generalmente più veloce ed il più delle volte ulteriormente regolabile cambiando sull'albero motore la gola; inoltre i sensi di rotazione dei due rotori sono opposti, creando così una modulazione del suono che cambia in continuazione, evitando l'insorgere di onde stazionarie.

L'effetto prodotto dal Leslie è molteplice; la rotazione del riflettore acustico provoca una modulazione di ampiezza, di frequenza, di fase e di spettro, a seconda della direzione dei riflettori acustici, della velocità di rotazione degli stessi e della posizione dell'ascoltatore, con un fronte sonoro molto ampio e continuamente variabile. In particolare, la modulazione periodica della frequenza genera il caratteristico **Vibrato** degli organi Hammond: l'ascolto di note lunghe, spesso di alta intonazione, risulta maggiormente gradevole, rendendole più morbide.

1.4.2 CHORUS

Il chorus è un effetto elettronico per strumenti musicali elettrificati o elettronici, ma può essere utilizzato anche per la voce, il cui scopo è di simulare la compresenza di più sorgenti sonore dello stesso tipo, come avviene per un duo (o più) di strumenti musicali uguali che eseguono la medesima partitura. La caratteristica principale di un coro è proprio dovuta allo sfasamento tra le componenti che lo compongono. Questo porta ad avere un suono di insieme (detto anche *“ensemble”*) che si differenzia da una voce singola, proprio per la sua ricchezza timbrica, data dalle piccole differenze tra i vari elementi.

La struttura dell'effetto consiste in un mixer che raggruppa, oltre al segnale di ingresso inalterato, una o più voci supplementari da esso ricavate mediante l'utilizzo di linee di ritardo. Il mixer riunirà pertanto più segnali audio, con fase e altezza leggermente differenti, generando così la sensazione di più sorgenti simultanee. Il tempo di ritardo viene generalmente modulato con un oscillatore a bassissima frequenza (LFO), in modo da applicare un effetto Doppler al suono, così da alzarne e abbassarne gradatamente il pitch e provocare piccole differenze di fase.

1.4.3 STRUMENTI MUSICALI

Esistono strumenti musicali che sfruttano l'effetto Doppler per rendere particolari effetti onomatopeici, come ad esempio il tamburo a frizione rotante che in Romagna è chiamato *“Raganella”*. Per questo tipo di strumenti a Fabio Lombardi si devono le osservazioni sull'accentuazione della resa sonora per l'effetto Doppler: quando il piccolo tamburo rotea, l'ascoltatore percepisce due picchi di frequenza modulati progressivamente ed alternativamente verso l'alto e verso il basso, per l'effetto sopra citato, e questo porta ad un suono simile al gracidiare di rana da cui il nome dello strumento giocattolo.



Anche nell'ambito della **Campanologia** si sono sfruttate le implicazioni dell'Effetto Doppler: infatti i sistemi di montaggio a campane fisse e a campane oscillanti presentano differenze sostanziali nella resa del suono. Le campane fisse, percosse tramite il movimento del solo battaglio o con l'ausilio di martelli esterni, producono un suono più limitato, in termini di intensità e coloritura, rispetto a quelle oscillanti.

Le campane oscillanti, oltre ad essere caratterizzate da una maggiore energia di percussione da parte del battaglio appeso al loro interno, **risultano beneficiate dall'Effetto Doppler**. Il suono della campana, durante l'oscillazione, risulta notevolmente vivacizzato dal continuo avvicinarsi e sovrapporsi di frequenze alternativamente crescenti e calanti, arricchendosi di sfumature variabili ed articolate. I sistemi di montaggio a campane oscillanti, nella loro grande varietà, condizionano in modo diversificato la resa acustica, resa che risulta avvantaggiata dai sistemi a battaglio volante (slancio tradizionale e derivati) e penalizzata dai sistemi a battaglio cadente (sistema ambrosiano, sistema veronese, ecc...). Nei sistemi a battaglio volante, i ceppi di sostegno sono leggeri e la campana è normalmente esterna ad essi, di conseguenza l'asse di rotazione è localizzato sopra la corona (o comunque sopra la calotta); tali caratteristiche consentono un'oscillazione ampia e veloce, con accentuazione dell'Effetto Doppler ed elevati benefici sulla resa e vivacità del suono. Al contrario, nei sistemi a battaglio cadente, il ceppo di sostegno è più pesante, la campana è parzialmente inserita nel ceppo con conseguente abbassamento dell'asse di rotazione; la velocità ed ampiezza di oscillazione sono ridotte e i benefici del suono dinamico risultano più modesti. Nell'ambito dei sistemi a battaglio cadente, si possono osservare alcune sostanziali differenze tra il sistema ambrosiano ed il sistema veronese. Nel sistema ambrosiano l'oscillazione – estremamente lenta – limita al minimo l'Effetto Doppler dovuto allo spostamento della sorgente sonora. Nel sistema veronese invece, l'oscillazione più veloce aumenta l'Effetto Doppler e la battuta risulta più sostenuta.

2. Riferimenti Bibliografici

https://it.wikipedia.org/wiki/Effetto_Doppler

<http://www.phy6.org/stargaze/lsun4Adop2.htm> per le applicazioni in Astronomia

<https://www.my-personaltrainer.it/salute/eco-doppler.html> applicazioni in campo Medico

<http://www.centrosancamillo.it/2017/10/24/ecografia-ed-ecodoppler/>

http://meteorema.aquila.infn.it/radarweb/home/radar_intro/spiegazione2.html applicazioni in campo Meteorologico

<https://www.wroar.net/pages/telelaser.html> funzionamento del TeleLaser

[https://it.wikipedia.org/wiki/Leslie_\(musica\)](https://it.wikipedia.org/wiki/Leslie_(musica))

<https://www.produzionemusica.com/vibrato/>

<https://www.produzionemusica.com/il-chorus/>

[https://it.wikipedia.org/wiki/Raganella_\(strumento_musicale\)](https://it.wikipedia.org/wiki/Raganella_(strumento_musicale))

<https://www.campanologia.org/teoria/1-acustica-della-campana-e-analisi-tonale> per documentarmi sulla resa acustica delle campane e la loro relazione con l'Effetto Doppler

3. Argomenti Teorici Trattati

3.1 EFFETTO DOPPLER

Il fenomeno fisico che consiste nel cambiamento della frequenza o della lunghezza d'onda rispetto al valore originario, percepita da un osservatore raggiunto da un'onda emessa da una sorgente che si trovi in movimento rispetto all'osservatore stesso, prende il nome dal matematico e fisico **Christian Andreas**

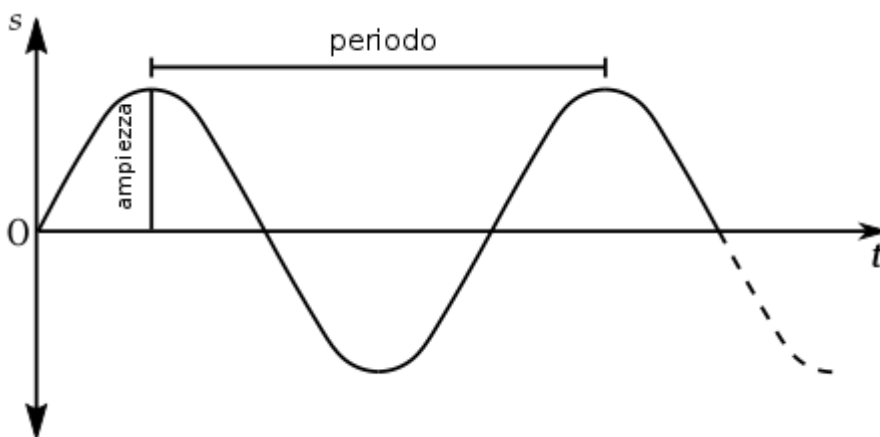
Doppler (Salisburgo, 29 Novembre 1803 – Venezia, 17 Marzo 1853). Egli scoprì l'effetto e lo analizzò per primo studiando i segnali sonori: nel 1845 ascoltando una banda che suonava su un treno in movimento, e confrontandola con i suoni di un'altra banda ferma vicino ai binari, notò che l'intensità sonora delle note variava dapprima con l'avvicinarsi del treno ad esso, per poi cambiare nuovamente durante l'allontanamento.

L'effetto Doppler si applica a tutti i fenomeni ondulatori, e dunque alla propagazione dei fenomeni sonori e luminosi.

3.2 ONDA SONORA

Per la fisica, il suono è un'oscillazione (un movimento nello spazio) compiuta dalle particelle (atomi e molecole) in un mezzo fisico di propagazione. Nel caso del suono che si propaga in un mezzo fluido (tipicamente in aria) le oscillazioni sono spostamenti delle particelle, intorno alla posizione di riposo e lungo la direzione di propagazione dell'onda, provocati da movimenti vibratori, provenienti da un determinato oggetto, chiamato sorgente del suono, il quale trasmette il proprio movimento alle particelle adiacenti, grazie alle proprietà meccaniche del mezzo; le particelle a loro volta, iniziando ad oscillare, trasmettono il movimento alle altre particelle vicine e queste a loro volta ad altre ancora, provocando una variazione locale della pressione; in questo modo, un semplice movimento vibratorio si propaga meccanicamente originando un'onda sonora (od onda acustica), che è pertanto onda longitudinale.

Esaminiamo adesso il grafico cartesiano di un'onda sinusoidale: onda dal tracciato regolare, i cui picchi sono speculari alle valli ed assume la caratteristica forma di senoide.



Il grafico riporta il tempo (t) sull'asse delle ascisse, e gli spostamenti delle particelle (s) su quello delle ordinate. Il tracciato esemplifica gli spostamenti delle particelle: alla fine, la particella si sposta dal suo punto di riposo (asse delle ascisse) fino al culmine del movimento oscillatorio, rappresentato dal ramo crescente di parabola che giunge al punto di massimo parabolico. Poi la particella inizia un nuovo spostamento in direzione opposta, passando per il punto di riposo e continuando per inerzia fino ad un nuovo culmine simmetrico al precedente, questo movimento è rappresentato dal ramo decrescente che, intersecando l'asse delle ascisse, prosegue in fase negativa fino al minimo parabolico. Infine, la particella ritorna indietro e ripete nuovamente la sequenza di spostamenti, così come fa il tracciato del grafico.

Il **periodo** (graficamente il segmento tra due creste) è il tempo impiegato dalla particella per tornare nello stesso punto dopo aver cominciato lo spostamento (indica cioè la durata di una oscillazione completa). La distanza dalla cresta all'asse delle ascisse indica, invece, l'**ampiezza** del movimento, in altre parole la distanza massima percorsa dalla particella dalla sua posizione di riposo durante l'oscillazione. Tuttavia, nonostante il periodo e l'ampiezza siano due grandezze che da sole sarebbero sufficienti per descrivere le caratteristiche di un'onda, non sono frequentemente utilizzate, perlomeno non in forma pura: in Acustica si

preferisce, infatti, usare altre grandezze da queste derivate. Il numero di periodi compiuti in un secondo esprime la **frequenza** in hertz (Hz). Dall'ampiezza dell'onda, invece, si calcola la **pressione sonora**, definita come la variazione di pressione rispetto alla condizione di quiete, e l'**intensità acustica**, definita come il rapporto tra la potenza dell'onda e la superficie da essa attraversata; l'intensità delle onde sonore viene comunemente misurata in decibel (dB).

Esistono altri 2 tipi di onde sonore:

- **onde periodiche non sinusoidali**, dal tracciato regolare, in quanto i picchi sono speculari alle valli, ma la loro forma risulta più complessa della precedente, perché presenta diverse anomalie nelle curve. Le caratteristiche sono: la periodicità e il grafico non sinusoidale. Il teorema di Fourier garantisce che siano sempre esprimibili come somma di componenti discrete sinusoidali di opportune ampiezza, frequenza - multipla della fondamentale - e fase.
- **onde aperiodiche**: sono onde non regolari: il tracciato ha forma caotica e zigzagante. Sono caratterizzate dall'assoluta irregolarità del grafico e dall'aperiodicità; sono tracciati caratteristici dei **rumori**.

3.3 PERCEZIONE SONORA

Una volta appurato che il suono si manifesta sotto forma di Onda, risulta naturale chiedersi come le grandezze fisiche che caratterizzano le onde (frequenza, ampiezza o l'intero spettro), influiscono sulla percezione del suono.

- **FREQUENZA**: determina l'Altezza del suono (acuto o grave)
- **AMPIEZZA**: determina il Volume del suono
- **SPETTRO**: determina il Timbro del suono

Bisogna tenere conto però che in realtà ciascuna di queste componenti influenza, seppur di poco, la percezione legata alle altre grandezze.

3.3.1 ALTEZZA

L'altezza è la frequenza fondamentale di una nota musicale o suono che viene percepita, ed è una delle caratteristiche principali di un suono. L'altezza è la qualità che permette di distinguere se un suono è acuto o grave e dipende dalla frequenza dell'onda sonora che lo ha generato. In particolare: più la frequenza di un'onda sonora è elevata e più il suono ci sembrerà acuto, mentre più è bassa la frequenza e più il suono ci apparirà grave. I limiti dell'orecchio umano vanno da un minimo di 16 Hz ad un massimo di 20 000 Hz. La pratica musicale tuttavia si serve di suoni la cui frequenza è compresa in limiti più ristretti e precisamente tra 64 e 8 000 vibrazioni semplici al secondo.

L'altezza è influenzata anche dall'Ampiezza del suono, specialmente alle basse frequenze: per esempio, una nota grave e forte sembrerà ancora più grave se suonata più piano.

Allo scopo di uniformare l'altezza dei suoni in tutti i paesi dal 1859 in poi sono stati convocati a più riprese dei congressi internazionali con il compito di stabilire la frequenza di un suono base detto diapason, che è il La3 (nel secondo spazio in chiave di violino, La4 secondo la notazione scientifica dell'altezza) alla quale tutti si attengano. Il più recente è stato il congresso di Londra (1951) che ha fissato la frequenza del La3 in 880 vibrazioni semplici al secondo (pari a 440 Hz).

Note	ottave									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Do	16,35	32,70	65,41	130,8	261,6	523,3	1047	2093	4186	8372
Do#-Reb	17,32	34,65	69,30	138,6	277,2	554,4	1109	2217	4435	8870
Re	18,35	36,71	73,42	146,8	293,7	587,3	1175	2349	4699	9397
Re#-Mib	19,45	38,89	77,78	155,6	311,1	622,3	1245	2489	4978	9956
Mi	20,60	41,20	82,41	164,8	329,6	659,3	1319	2637	5274	10548
Fe	21,83	43,65	87,31	174,6	349,2	698,5	1397	2794	5588	11175
Fa#-Solb	23,12	46,25	92,50	185,0	370,0	740,0	1480	2960	5920	11840
Sol	24,50	49,00	98,00	196,0	392,0	784,0	1568	3136	6272	12544
Sol#-Lab	25,96	51,91	103,8	207,7	415,3	830,6	1661	3322	6645	13290
La	27,50	55,00	110,0	220,0	440,0	880,0	1760	3520	7040	14080
La#-Sib	29,14	58,27	116,5	233,1	466,2	932,3	1865	3729	7459	14917
Si	30,87	61,74	123,5	246,9	493,9	987,8	1976	3951	7902	15804

Nel sistema musicale occidentale i suoni delle note sono suddivisi in Ottave, costituite da 12 Semitoni. Questi semitoni di solito sono equi-spaziati nel metodo noto come **Temperamento Equabile**: moltiplicare la frequenza di una nota per $2^{(1/12)}$ corrisponde a salire di un semitono nella scala temperata, mentre salendo di un'ottava si raddoppia la frequenza.

3.3.3 VOLUME

Sebbene il Volume sia un'entità soggettiva non direttamente correlabile a grandezze fisiche, essa è sicuramente influenzata dall'Ampiezza dell'onda sonora, che può essere misurata in termini di Intensità Sonora.

Per questa grandezza fisica vale la **Legge dell'Inverso del Quadrato**, ovvero "La potenza del suono per unità di area (intensità sonora) diminuisce proporzionalmente al quadrato del raggio". Questo perché le Onde si propagano in forma sferica dalla Sorgente, e poiché la Superficie della sfera equivale a $4\pi r^2$, sussiste una proporzionalità inversa quadratica. In altre parole, la stessa potenza sonora passa attraverso ogni area delle sfere concentriche, ma le aree aumentano proporzionalmente al quadrato del raggio, comportando così una diminuzione della potenza.

