

EFFETTO DOPPLER

Descrizione del fenomeno

Si tratta di un fenomeno che prende il nome dal fisico C. J. Doppler (Salisburgo 1803 - Venezia 1854); tale fenomeno, che ci è familiare dalla fisica del suono, è valido anche per le onde luminose e trova applicazioni in numerosi campi (medicina, astronomia, navigazione, ecc.).

Le onde sonore si propagano nello spazio tridimensionale in tutte le direzioni, come un pallone che si dilata o un sasso lanciato nell'acqua.

L'effetto Doppler si manifesta quando le onde sonore sono generate da una sorgente in movimento, per esempio dalla sirena di un'ambulanza in corsa.

Quando l'ambulanza viene verso di noi, le onde sonore prodotte dalla sua sirena vengono comprese nella nostra direzione. Ciò accade in quanto l'intervallo di tempo fra due onde successive diminuisce e quindi il numero di onde che riceviamo ogni secondo (cioè la frequenza) aumenta. Tutto questo produce un suono più acuto.

Poiché l'ambulanza (sorgente) si muove, man mano che si avvicina alla persona (osservatore) la distanza tra due fronti d'onda successivi è più breve davanti all'ambulanza. I fronti d'onda raggiungono l'osservatore con una frequenza maggiore rispetto alla sorgente (cfr. fig. 2).

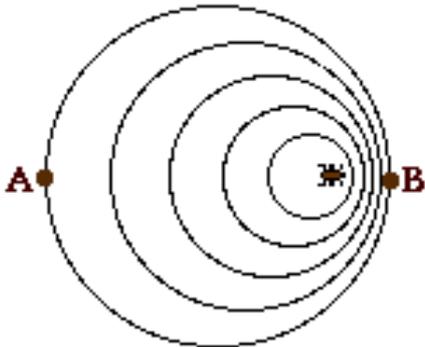


Fig. 2 Effetto Doppler: la zona di compressione (a destra) e di stiramento (a sinistra).

Riassumendo, le creste sferiche davanti alla sorgente in moto sono più ravvicinate di quelle dietro. Pertanto l'osservatore, posto nella direzione del moto, riceve nell'unità di tempo un numero di fronti d'onda superiore a quelli che riceverebbe se la sorgente fosse ferma. Si ha come conseguenza un'onda di frequenza superiore e quindi un suono più acuto (cfr. fig. 3).

Tale effetto funziona altrettanto bene per la luce, la quale, a differenza del suono, è un'onda che viaggia perfettamente anche nel vuoto. Quando una sorgente di luce è in movimento, osserviamo che il suo spettro si sposta verso il blu (a frequenze più alte) se è in avvicinamento, e verso colori a frequenza minore, cioè verso il rosso, se è in allontanamento (cfr. fig. 4).

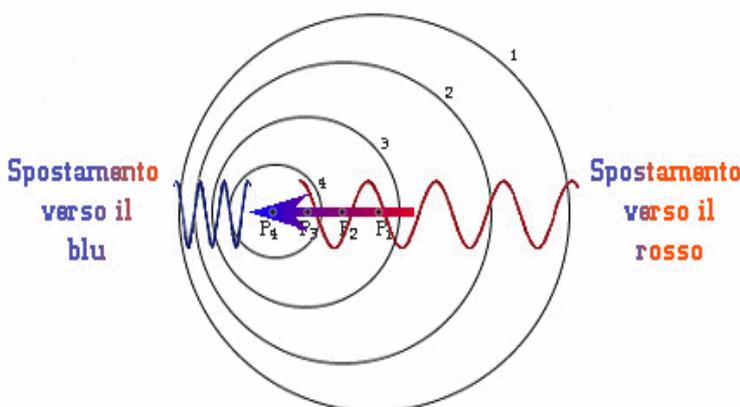


Fig. 4 L'effetto Doppler nell'onda e.m.

periodo: $f = 1/T = c/\lambda$).

Il suono si propaga alla velocità di circa 320 metri al secondo, con dipendenze dalla temperatura, dall'umidità ovvero subisce variazioni in funzione della densità dell'aria. Se l'ambulanza viaggia, per esempio, a 120 chilometri all'ora, si muove a 33,3 metri al secondo, circa 1/10 della velocità di propagazione del suono. Dalla formula di Doppler, possiamo calcolare che la

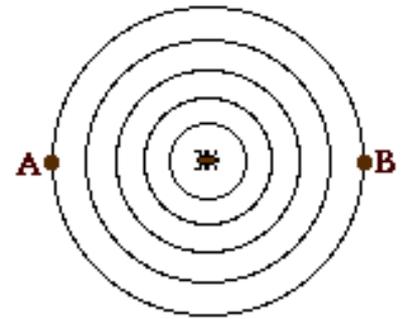


Fig. 1 Effetto provocato da un'onda stazionaria.

Naturalmente, per l'autista al volante dell'ambulanza in corsa il suono udito sarà sempre uguale, perché egli è fermo rispetto alla sorgente del suono (cfr. fig. 1).

Quando l'ambulanza ci ha superato e si allontana, le onde sonore ci arrivano stirate, in quanto la loro frequenza diminuisce rispetto al nostro punto di ascolto, e il suono della sirena diventerà più debole (cfr. fig. 2).

I fronti d'onda raggiungono infatti la persona in intervalli di tempo più lunghi e quindi con una frequenza minore rispetto a quella della sorgente.

In conclusione, un ricevitore fermo sentirà più acuto il suono della sorgente in avvicinamento e più basso quello della sorgente che si allontana.

L'effetto si verifica sia quando è la sorgente che si muove e il ricevitore è fermo, sia quando avviene il contrario. Se la sorgente e l'osservatore sono in moto l'una rispetto all'altro, la frequenza del suono varia in funzione della velocità relativa.

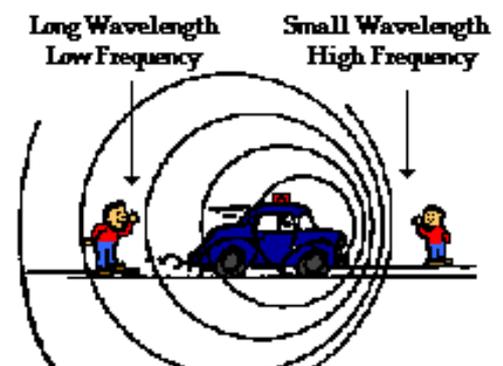


Fig. 3 L'effetto Doppler

Potendo misurare il cambiamento di tonalità in un determinato tempo, è anche possibile stimare la velocità dell'ambulanza.

L'entità dello spostamento è determinata infatti dalla variazione di lunghezza d'onda:

$$\Delta\lambda/\lambda = (\lambda_1 - \lambda_2)/\lambda_1 = v/c$$

oppure della frequenza:

$$\Delta f/f = (f_1 - f_2)/f_1 = v/c$$

dove v è la velocità di avvicinamento o di allontanamento dall'osservatore e c è la velocità alla quale si propagano le onde; $\lambda_1, \lambda_2, f_1$ ed f_2 , rappresentano rispettivamente la lunghezza d'onda e la frequenza trasmessa e quella ricevuta (si ricordi il legame esistente tra frequenza, lunghezza d'onda e

EFFETTO DOPPLER

frequenza del suono della sirena del treno in avvicinamento subirà uno spostamento verso i toni acuti del 10%. Dopo il passaggio dell'ambulanza, presumendo una velocità costante della stessa, udiremo un abbassamento della tonalità di pari percentuale, della frequenza del suono della sirena.

Studio Analitico

Stabilito che l'effetto Doppler definisce una variazione della frequenza di un'onda sonora emessa a causa del regime di moto relativo tra sorgente (S) ed osservatore (O), si tratta di trovare la relazione analitica che definisca il fenomeno.

Definiamo con V la velocità della sorgente, con v quella dell'osservatore, con c la velocità di propagazione del suono emesso dalla sorgente, con T l'intervallo di tempo che intercorre tra l'emissione di due onde successive (periodo) e con T' l'intervallo di tempo tra l'arrivo di due onde successive all'osservatore (periodo apparente), secondo lo schema di figura 5.

Se la sorgente emette un suono all'istante $t = 0$, quest'ultima giunge all'osservatore situato alla distanza D dalla sorgente dopo un tempo pari a:

$$\Delta t = D/c$$

L'onda successiva, emessa dopo un intervallo T (pari cioè ad un periodo) corrisponde anche ad uno spostamento sia dell'osservatore (di una quantità pari a vT') che della sorgente (di una quantità pari a VT). Lo spazio percorso dalla seconda onda risulta pertanto essere pari a:

$$D - VT - vT'$$

mentre il tempo impiegato a percorrerlo è pari a:

$$(D - VT + vT')/c$$

Tale onda arriva perciò all'osservatore all'istante:

$$t' = T + [(D - VT + vT')/c]$$

Ecco che l'intervallo tra due successivi arrivi di onde all'osservatore risulterà essere pari a:

$$T' = t' - t$$

Da cui si ricava che:

$$T' = T + [(D - VT + vT')/c] - D/c$$

$$T' = T - VT/c + vT'/c$$

Dividendo quest'ultima relazione per T si ha:

$$T'/T = 1 - (V/c) + (v/c)(T'/T)$$

$$T'/T(1-v/c) = (1-V/c)$$

$$T'/T = (1-V/c)/(1-v/c)$$

Dovrebbe essere noto, a questo punto, che esiste una relazione che lega il periodo alla frequenza ($f=1/T$). A partire da questa considerazione si ha che:

$$f/f' = (1-v/c)/(1-V/c)$$

e, in definitiva, risulta che:

$$f' = f [(1-v/c)/(1-V/c)]$$

Da cui si ricava (attraverso uno sviluppo in serie: $(1-V/c)^{-1} \approx (1+V/c - \dots)$) che:

$$f' = f(1-v/c)(1 + V/c)$$

$$f' = f - f(v/c) + f(V/c) - f(vV/c^2)$$

Essendo che $c^2 \gg vV$, tale termine si può trascurare e si ottiene che:

$$f' = f [1 + (V - v)/c]$$

e, infine che:

$$f' - f = \Delta f = f [(V - v)/c]$$

Se a questo punto identifico nel termine $(V - v) = V_R$, cioè la velocità relativa tra sorgente ed osservatore, si ha in definitiva:

$$\Delta f = f V_R/c$$

Appare evidente che Δf risulterà positiva in avvicinamento (aumento della frequenza rispetto a quella realmente trasmessa) e negativa in allontanamento (diminuzione della frequenza rispetto a quella realmente trasmessa).

Da osservare infine che se v e V non appartengono a direzioni parallele, come nel caso ora analizzato, occorre considerare le componenti agenti lungo la congiungente sorgente-osservatore e, di conseguenza introdurre componenti angolari e funzioni trigonometriche. Si viene alla fine ad identificare una relazione del tipo:

$$\Delta f = \pm f (V \cos \alpha - v \cos \beta)/c$$

che, come si vede, non è poi tanto diversa da quella ricavata.

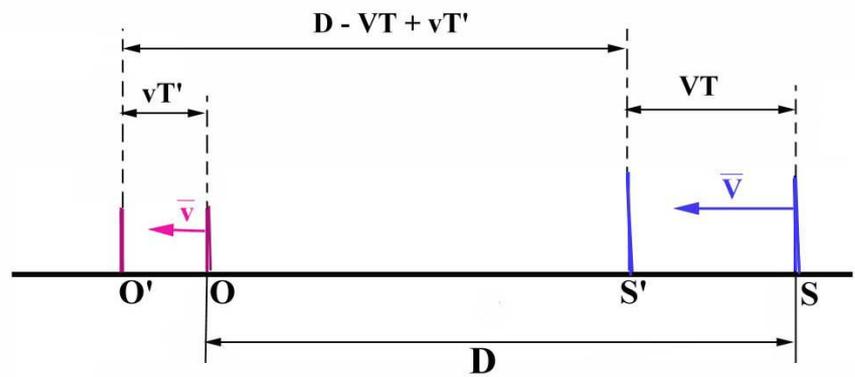


Fig. 5 Studio analitico dell'effetto Doppler.

EFFETTO DOPPLER

Applicazione al caso della nave

Nelle nostre applicazioni non ci troviamo nel caso generico, bensì in un caso più semplice: la nave si muove con una certa velocità ed emette un'onda ultrasonora di frequenza non udibile, ma nota, dell'ordine dei 200kHz. La stessa viene emessa verso il basso con direzione formante un certo angolo rispetto al piano di galleggiamento. Evidentemente, c'è movimento da parte di una sola componente, cioè la sorgente, che costituisce anche l'osservatore, come schematizzato in figura 6.

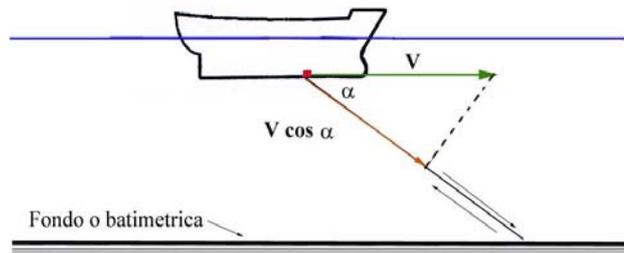


Fig. 6 Applicazione al solcometro dell'effetto Doppler.

Applicazione alla navigazione satellitare

L'effetto Doppler si manifesta anche nelle trasmissioni dei satelliti.

Quando un satellite è in avvicinamento, la frequenza ricevuta è maggiore di quella trasmessa; in caso contrario, con satellite in allontanamento, la frequenza è in diminuzione. La variazione è nulla quando il satellite passa alla minima distanza dall'osservatore a cui corrisponde la massima altezza.

Osservando la figura 7 si vede che il satellite è in avvicinamento fra l'istante del sorgere (punto S_1) e l'istante di massima altezza (punto S_m), mentre è in allontanamento fra il predetto punto S_m e il punto del tramonto S_2 .

Rappresentando in un grafico la variazione di frequenza in funzione del tempo, si ottiene una curva come quella raffigurata in figura 8, che è strettamente legata alla posizione del ricevitore. Pertanto, se al passaggio di un satellite, si effettuano delle misure dell'effetto Doppler si è in grado di calcolare la posizione del ricevitore. Tale tecnica era utilizzata nel sistema di navigazione satellitare TRANSIT.

Nel caso più generale delle comunicazioni con i satelliti, la variazione Δf può essere di alcuni KHz per cui i dispositivi ricevuti, per mantenersi sintonizzati sulla frequenza portante, devono tenerne conto.

Riferimenti Bibliografici

- Capasso Fede "Navigazione" Vol. I Ed. Hoepli
- Halliday Resnick Krane "Fondamenti di Fisica" Ed. Ambrosiana
- Nicoli "Navigazione Tradizionale" Ed. Quaderni Marinari

Internet

- http://a.die.supsi.ch/c3/C3_98/Jermini/project.html
- http://home.a-city.de/walter.fendt/phi/dopplereff_i.htm
- http://www.hyperborea.com/cassiopea/glossario/d/doppler_effetto.html
- <http://www.mclink.it/mclink/astro/ids/lib/doppler.htm>
- <http://www.racine.ra.it/isaballardini/fischietti/doppler.htm>
- http://ww2.unime.it/dipart/i_fismed/wbt/ita/doppler/doppler_ita.htm
- <http://www.omnia.it/itnrizzo/satellite/page15.html>
- <http://csep10.phys.utk.edu/astr162/lect/light/doppler.html>
- <http://www.glenbrook.k12.il.us/gbssci/phys/Class/waves/u1013d.html>
- <http://www.kettering.edu/~drussell/Demos/doppler/doppler.html>
- <http://www.ncsa.uiuc.edu/Cyberia/Bima/doppler.html>
- <http://www.scifun.chem.wisc.edu/WOP/Doppler.html>

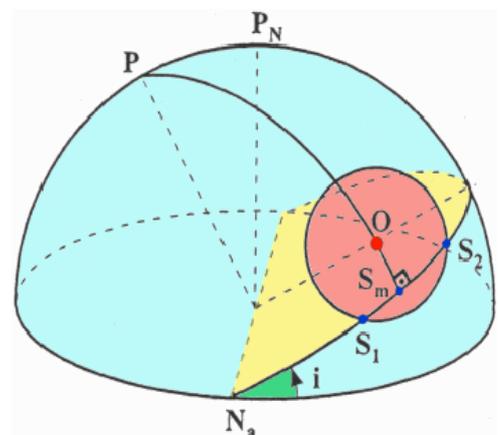


Fig. 7 Effetto Doppler nelle trasmissioni satellitari.

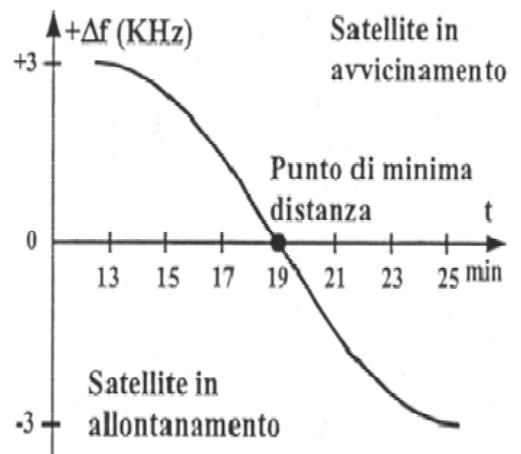


Fig. 8 Shift in frequenza.