

CdL Professioni Sanitarie
A.A. 2012/2013

Unità 6: Onde e Radiazione Elettromagnetica

- Onde e radiazione elettromagnetica
 - Natura delle onde
 - Ampiezza, lunghezza d'onda, frequenza e periodo
 - Onde sonore
 - Natura, velocità e spettro della radiazione elettromagnetica
 - Effetto Doppler

CdL Professioni Sanitarie
A.A. 2012/2013

Onde: natura delle onde

In Fisica **un'onda (meccanica o elastica) è una perturbazione (prodotta da una sorgente) che si propaga in un mezzo**. Nel caso, ad esempio, delle onde sul mare, il *mezzo perturbato* è l'acqua e la *grandezza fisica perturbata* è la posizione (di un punto) dell'acqua. La *sorgente* è il vento.

Ogni onda si propaga con una velocità (**velocità di propagazione dell'onda v**) che dipende dalle proprietà fisiche del mezzo perturbato (un'onda marina ed un'onda su una corda hanno diversa v).

In un'onda longitudinale, la perturbazione è parallela alla direzione di propagazione, mentre in un'onda trasversale la perturbazione è perpendicolare ad essa.

Figura: http://scienzapertutti.Inf.infn.it/P7/slide0014_image005.png

Monaco-Sacchi-Solano, Elementi di Fisica: figura 7.1

L'interazione tra due onde può produrre fenomeni particolari. Ad esempio, se due onde si propagano contemporaneamente in un mezzo, lo spostamento di un punto è la somma degli spostamenti che esso subirebbe se ciascuna onda agisse separatamente (*principio di sovrapposizione*). Ciò può causare, ad esempio, il fenomeno dell'*interferenza* distruttiva (o costruttiva), a seconda che agiscano due onde che producono (separatamente) spostamenti uguali ed opposti (o uguali e dello stesso segno). Dopo la sovrapposizione, le due onde proseguono indisturbate. Le onde si possono 'compenetrare'. Il principio di sovrapposizione si applica anche alle velocità dei punti, non solo ai loro spostamenti.

Figura: http://http://en.wikipedia.org/wiki/Superposition_principle

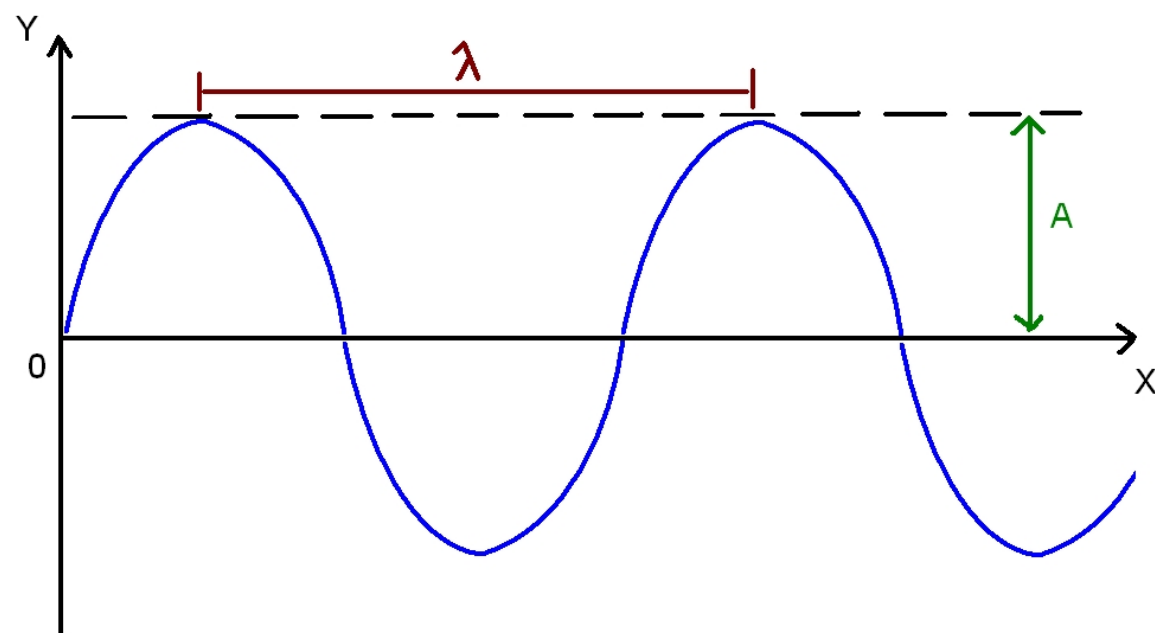
Monaco-Sacchi-Solano, Elementi di Fisica: figura 7.3

CdL Professioni Sanitarie
A.A. 2012/2013

Onde periodiche: ampiezza, lunghezza d'onda, frequenza e periodo

Una perturbazione che si ripete ciclicamente dopo un certo intervallo di tempo o regolarmente dopo una certa lunghezza viene definita *periodica*. Le **onde sinusoidali** sono onde periodiche che hanno una forma particolare. In un'onda sinusoidale la *grandezza fisica perturbata*, indicata con y , varia in funzione della posizione x nel mezzo e del tempo t secondo l'espressione:

$$y = A \sin[2\pi(t/T - x/\lambda) + \phi_0]$$



Onda sinusoidale in funzione di x ad un tempo t fissato ($\phi_0 = 0$).
Monaco-Sacchi-Solano, Elementi di Fisica: figura 7.2

- v è la velocità dell'onda $\rightarrow$ velocità con cui la perturbazione si propaga: $[v] = m/s$.
- **A è la (semi)ampiezza dell'onda** $\rightarrow$ massimo valore assunto dalla grandezza perturbata ($y = A$ quando il seno vale 1). Le sue dimensioni fisiche sono quelle della grandezza perturbata y : $[A] = [y]$.
- **λ è la lunghezza d'onda** $\rightarrow$ distanza tra due massimi (creste) successivi: $[\lambda] = m$.
- **T è il periodo dell'onda** $\rightarrow$ tempo necessario perchè la grandezza perturbata y compia un'oscillazione completa: $[T] = s$. In un tempo pari ad un periodo T , l'onda si propaga con velocità v percorrendo una lunghezza d'onda λ . Quindi: $v = \lambda/T$, $\lambda = v \cdot T$ oppure $T = \lambda/v$.
- **$f = 1/T = v/\lambda$ è la frequenza dell'onda** $\rightarrow$ numero di oscillazioni compiute dalla grandezza perturbata in un secondo. È una grandezza derivata e la sua **unità di misura nel SI** è: $[f] = 1/[T] = 1/s = s^{-1} = \text{Hertz (Hz)}$.

- ϕ_0 è la *fase iniziale* dell'onda. L'argomento della funzione seno ad un generico istante t viene detto semplicemente *fase* dell'onda. Tutti i punti dello spazio che, a un dato istante t , hanno la stessa fase, costituiscono un **fronte d'onda** (punti che oscillano concordemente).

Le medesime grandezze si possono definire anche per una generica onda periodica. Qualsiasi onda periodica può essere *univocamente* espressa come somma di onde sinusoidali di lunghezza d'onda e ampiezza definite (*teorema di Fourier*).

Esercizio (es. 14, pag. 279, Cromer): scrivere l'equazione di un'onda sinusoidale al tempo $t = 0$. L'onda ha ampiezza 12 cm e lunghezza d'onda 30 cm.

$$A = 12 \text{ cm} = 0.12 \text{ m}, \lambda = 30 \text{ cm} = 0.3 \text{ m}$$

$$y = A \sin[2\pi(t/T - x/\lambda)]$$

$$y = (0.12 \text{ m}) \sin[2\pi x / (0.3 \text{ m})] = (0.12 \text{ m}) \sin[6.6\pi \text{ m}^{-1}x]$$

Esercizio (es. 17, pag. 280, Cromer): qual è la velocità di un'onda sinusoidale la cui frequenza e lunghezza d'onda sono rispettivamente $f = 500 \text{ Hz}$ e $\lambda = 0.5 \text{ m}$.

$$f = v/\lambda \rightarrow v = f \cdot \lambda = (5 \times 10^2 \text{ Hz}) \cdot (5 \times 10^{-1} \text{ m}) = 250 \text{ m/s}$$

Energia trasportata da un'onda

Le onde meccaniche trasferiscono energia senza trasferimento di materia. L'energia viene trasferita a causa degli urti/interazioni tra molecole contigue del mezzo perturbato.

Cromer, Fisica per Medicina, Farmacia e Biologia: figura 13.4

L'energia trasportata da un'onda è proporzionale al quadrato della sua ampiezza A : $E \propto A^2$. Un'onda che attraversa una superficie S (perpendicolare alla direzione di propagazione) nel tempo Δt , ha una **intensità** (Monaco-Sacchi-Solano, Elementi di Fisica: figura 7.5A):

$$I = E/(\Delta t \cdot S) = P/S,$$

dove $P = E/\Delta t$ è la potenza trasportata dall'onda (e, in ultima analisi, emessa dalla sorgente). L'intensità è una grandezza derivata e la sua unità di misura nel SI è: $[I] = J/s/m^2 = W/m^2$.

Se il fronte d'onda è sferico (**onda sferica**) e la sorgente si trova al centro, l'intensità di energia che attraversa una superficie sferica di raggio r è:

$$I = P/(4\pi r^2).$$

L'intensità di un'onda sferica è inversamente proporzionale al quadrato della distanza dalla sorgente (Monaco-Sacchi-Solano, Elementi di Fisica: figura 7.5B). Quindi: $I_2/I_1 = (r_1/r_2)^2$.

Esercizio: l'intensità di un'onda sferica a due diverse distanze dalla sorgente è 400 W/m^2 e 25 W/m^2 . Calcolare il rapporto tra le due distanze.

$$I_1 = 400 \text{ W/m}^2, I_2 = 25 \text{ W/m}^2$$

$$r_1/r_2 = \sqrt{I_2/I_1} = \sqrt{(25 \text{ W/m}^2)/(400 \text{ W/m}^2)} = \sqrt{1/16} = 0.25$$

Onde stazionarie

[Questo argomento non fa parte del programma dei Corsi di Laurea in Fisioterapia e Tecniche di Radiologia]

Una tipo particolare di onda si ottiene sovrapponendo due onde sinusoidali di uguale ampiezza e lunghezza d'onda, che però viaggiano in direzioni opposte.

Cromer, Fisica per Medicina, Farmacia e Biologia: figura 13.20

Monaco-Sacchi-Solano, Elementi di Fisica: figura 7.4A

La sovrapposizione è un'onda sinusoidale con punti a spostamento variabile e punti fissi (**nodi**).

Cromer, Fisica per Medicina, Farmacia e Biologia: figura 13.21

Questo tipo di onda viene detta **stazionaria** perché non si sposta, anche se la sua forma varia nel tempo. I punti di mezzo tra due nodi (**antinodi o ventri**) oscillano con ampiezza $2A$. Il periodo dell'onda è uguale a quello delle due onde sinusoidali sovrapposte.

Onde stazionarie in un mezzo con gli estremi fissi

[Questo argomento non fa parte del programma dei Corsi di Laurea in Fisioterapia e Tecniche di Radiologia]

Una generica onda sinusoidale di lunghezza d'onda λ non può esistere su di un mezzo con gli estremi fissi (per esempio una corda vincolata), perché richiederebbe che gli estremi oscillassero. Può però esistere un'onda stazionaria se gli estremi del mezzo coincidono con i nodi dell'onda. L'intervallo minimo tra due nodi è $\lambda/2$, mentre i nodi successivi si trovano alle distanze $n\lambda/2$ (n intero positivo). Quindi le lunghezze d'onda λ e le frequenze possibili sono legate alla lunghezza L del mezzo dalle relazioni $\lambda = 2L$, $\lambda = L$, $\lambda = 2/3 L$, ..., ossia:

$$\begin{aligned}\lambda_n &= 2L/n & n &= 1, 2, 3, \dots \\ f_n &= v/\lambda_n = nv/(2L)\end{aligned}$$

La più bassa frequenza, detta *fondamentale*, è $f_1 = v/(2L)$ e corrisponde a $\lambda_1 = 2L$. Le possibili frequenze formano una sequenza armonica.

Cromer, Fisica per Medicina, Farmacia e Biologia: figura 13.22

Monaco-Sacchi-Solano, Elementi di Fisica: figura 7.4B

Quando viene pizzicata una corda di chitarra, l'oscillazione risultante è una sovrapposizione di molte onde stazionarie differenti (con la fondamentale che domina). Le armoniche contribuiscono a formare il timbro del suono in strumenti a corda diversi.

Esercizio (es. 28, pag. 280, Cromer): una corda lunga 55 cm viene tenuta fissa ad entrambi gli estremi. La sua frequenza fondamentale di oscillazione è 40 Hz. (a) Qual è la lunghezza d'onda della fondamentale? (b) Qual è la velocità di un'onda su questa corda? (c) Qual è la lunghezza d'onda della quarta armonica?

$$L = 55 \text{ cm}, f_1 = 40 \text{ Hz}$$

$$(a) \lambda_1 = 2L = 2 \cdot 0.55 \text{ m} = 1.1 \text{ m}$$

$$(b) v = \lambda_1 f_1 = (1.1 \text{ m}) \cdot (40 \text{ Hz}) = 44 \text{ m/s}$$

$$(c) \lambda_4 = 2L/4 = L/2 = (0.55 \text{ m})/2 = 0.275 \text{ m}$$

CdL Professioni Sanitarie
A.A. 2012/2013

Onde sonore

[Questo argomento non fa parte del programma dei Corsi di Laurea in Fisioterapia e Tecniche di Radiologia]

Le onde sonore sono **perturbazioni (meccaniche) longitudinali periodiche che si propagano in un fluido o in un solido** (ad esempio in aria, acqua o lungo una trave di legno). La grandezza perturbata è la pressione (**onda di pressione**). In aria $v_{suono} \simeq 330 - 340$ m/s.

L'orecchio è un raffinato trasduttore meccanico-acustico che trasforma le onde sonore in impulsi elettrici elaborati dal cervello. Si suddivide in tre parti principali. L'orecchio *esterno*, *medio* ed *interno*.

- Orecchio esterno — L'onda sonora (di pressione) che entra nel condotto uditivo viene in parte riflessa dal timpano. L'onda riflessa si sovrappone con quella incidente dando luogo a un'onda

stazionaria con un nodo all'estremità aperta (dove la pressione è fissa al valore della pressione atmosferica) e un ventre al timpano (dove la pressione è minima e l'aria ha spostamento nullo). Le lunghezze d'onda possibili sono quelle per le quali la lunghezza d'onda è pari a $4L$, $4/3 L$, $4/5 L$, ... (L lunghezza del condotto uditivo) ossia:

$$\begin{aligned}\lambda_n &= 4L/(2n + 1) & n &= 0, 1, 2, 3, \dots \\ f_n &= (2n + 1)v/(4L)\end{aligned}$$

L'orecchio tende a risuonare alla frequenze f_n . La frequenza fondamentale corrisponde a $n = 0$. L'orecchio è particolarmente sensibile a suoni con tale frequenza. Per un condotto uditivo di un adulto $L \simeq 2.5 \text{ cm}$ e quindi $\lambda_0 = 4L = 10 \text{ cm} = 0.1 \text{ m}$ e $f_0 = v/(4L) = v/\lambda_0 \simeq (340 \text{ m/s})/(0.1 \text{ m}) = 3400 \text{ Hz}$. I bambini, che hanno L più piccola, sono sensibili a frequenze più elevate.

- Orecchio medio — Si comporta come amplificatore. La catena dei tre *ossicini* (staffa, incudine e martello) rappresenta una combinazione di leve meccaniche con un guadagno complessivo di circa 60.

- Orecchio interno — La vibrazione meccanica viene scomposta nelle sue frequenze costitutive e viene tradotta in impulso elettrico dalle cellule sensoriali presenti nella *coclea*.

Figura: <http://www.audiologia.unina.it/>

Esercizio: Qual è il rapporto della frequenze fondamentali di risonanza tra due persone adulte i cui condotti uditivi sono lunghi $L_1 = 2.0$ cm e $L_2 = 2.5$ cm.

$$f_1/f_2 = L_2/L_1 = (2.0 \text{ cm})/(2.5 \text{ cm}) = 0.8$$

Esercizio (es. 1, pag. 296, Cromer): i pipistrelli emettono ultrasuoni con frequenza $f = 10^3$ Hz. Quali sono il periodo e la lunghezza d'onda in aria di tale onda ($v = 340$ m/s)?

$$T = 1/f = 1/(10^3 \text{ Hz}) = 10^{-3} \text{ Hz}^{-1} = 10^{-3} \text{ s} = 1 \text{ ms}$$

$$f = v/\lambda \rightarrow \lambda = v/f = (3.4 \times 10^2 \text{ m/s})/(10^3 \text{ Hz}) = 0.34 \text{ m}$$

La frequenza di un'onda sonora è molto importante dal punto di vista psicofisiologico, perchè da essa dipende l'altezza di un suono. Ad

esempio, la nota musicale *la* è un'onda sonora con una frequenza di 440 Hz. L'intervallo di frequenza all'interno del quale un'onda sonora è udibile dall'orecchio umano è tra circa 20 e 20000 Hz.

Dall'ampiezza invece dipende l'intensità (energia) del suono. L'orecchio è in grado di percepire suoni con intensità da circa 10^{-12} W/m^2 a qualche decina di W/m^2 . L'intensità viene usualmente misurata con una scala logaritmica utilizzando la seguente relazione (**intensity level** o **sensazione sonora**):

$$IL = 10 \log_{10}(I/I_0),$$

dove $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$. L'intensità così misurata si dice espressa in **decibel (dB)**. L'intensità minima udibile è circa I_0 , cui corrisponde $IL = 0$. Tale *soglia di udibilità* varia in realtà con la frequenza del segnale. Viceversa, se il suono diventa troppo intenso, l'orecchio può subire un danno. La soglia limite di intensità oltre la quale si può verificare un danno viene detta *soglia del dolore* e corrisponde a circa 1-10 W/m^2 o 120-130 dB.

Figura: <http://oltremusica.blogspot.com/2008/01/equalizzazione-parte-1.html>

Esercizio: calcolare la sensazione sonora in decibel di due segnali aventi intensità pari a 10^{-5} W/m^2 e $2 \times 10^{-5} \text{ W/m}^2$.

$$I_1 = 10^{-5} \text{ W/m}^2, I_2 = 2 \times 10^{-5} \text{ W/m}^2$$

$$IL_1 = 10 \log_{10}(I/I_0) = 10 \log_{10}(10^{-5}/10^{-12}) = 70 \text{ dB}$$

$$IL_2 = 10 \log_{10}(2 \times 10^{-5}/10^{-12}) = 73 \text{ dB}$$

Un incremento di un fattore 2 di I corrisponde sempre ad un incremento di 3 dB.

CdL Professioni Sanitarie
A.A. 2012/2013

Onde e luce:
natura, velocità e spettro della radiazione elettromagnetica

La luce visibile, come il suono, è un'onda. Tuttavia, a differenza del suono, la luce non è una perturbazione di un mezzo materiale perchè può propagarsi anche attraverso lo spazio vuoto (noi vediamo infatti la luce del sole e delle stelle, che sono separate da noi da enormi spazi vuoti). **L'onda, la perturbazione, coinvolge una grandezza fisica detta campo delle forze elettriche e magnetiche.**

Per capire le forze elettriche ed i campi da esse generati, è necessario studiare le particelle cariche che le producono (denominate *protoni* ed *elettroni*). Sono queste cariche che generano le forze elettriche e magnetiche e che, muovendosi, producono onde elettromagnetiche.

La luce è un'onda elettromagnetica, ossia l'insieme di un campo elettrico e magnetico oscillanti che si propagano nello spazio con una velocità

finita. Si tratta di onde trasversali (la quantità che oscilla, il campo elettromagnetico, è perpendicolare alla direzione di propagazione). Nel vuoto, la velocità di propagazione è:

$$c = 3 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$$

In un fluido (ad esempio acqua) o in un solido (ad esempio vetro) la velocità della luce è sempre inferiore a quella nel vuoto. Si definisce indice di rifrazione n il rapporto tra la velocità v di propagazione della luce in un mezzo e quella nel vuoto c :

$$n = c/v,$$

che risulta sempre maggiore di 1. Nel passaggio da un mezzo ad un altro (ma anche dal vuoto in un mezzo o viceversa), la frequenza della radiazione non cambia ma, variando v , varia la sua lunghezza d'onda.

Cromer, Fisica per Medicina, Farmacia e Biologia: figura 19.23

La frequenza f (o la lunghezza d'onda λ) delle onde elettromagnetiche determina il tipo di radiazione. La luce, le microonde, i

raggi X, le trasmissioni TV e radiofoniche sono tutti esempi di onde elettromagnetiche. I nomi diversi si riferiscono al fatto che hanno diversa frequenza (o lunghezza d'onda). Al crescere della frequenza f (decrescere della lunghezza d'onda λ), si hanno:

- le onde radio
- le microonde
- i raggi infrarossi
- la luce visibile (con λ tra 4×10^{-7} m e 7×10^{-7} m)
- i raggi ultravioletti
- i raggi X
- i raggi gamma (γ)

L'energia dell'onda aumenta al crescere della frequenza f della radiazione elettromagnetica. Quindi, i raggi X e gamma sono radiazione di

alta energia. Al contrario, le onde radio e le microonde sono radiazione di bassa energia (inferiore a quella della luce visibile).

L'insieme di tutti i tipi di onde elettromagnetiche costituisce lo spettro elettromagnetico.

Figura: <http://marine.rutgers.edu/mrs/education/class/josh/images/EMSpec.gif>

Esercizio: un'onda elettromagnetica ha periodo $T = 10^{-9}$ s. Calcolarne frequenza f e lunghezza d'onda λ nel vuoto. Si ricordi che la velocità dell'onda nel vuoto è $c = 3 \times 10^8$ m/s.

$$f = 1/T = 1/(10^{-9} \text{ s}) = 10^9 \text{ Hz}$$
$$\lambda = c/f = (3 \times 10^8 \text{ m/s})/(10^9 \text{ Hz}) = 0.3 \text{ m}$$

Esercizio (es. 2, pag. 326, Cromer): qual è la frequenza di un'onda elettromagnetica che ha la stessa lunghezza d'onda di un ultrasuono di frequenza 10^5 Hz?

$$f_s = 10^5 \text{ Hz}, \lambda = \lambda_s, v_s = 350 \text{ m/s}, c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$
$$\lambda_s = v_s/f_s = (350 \text{ m/s})/(10^5 \text{ Hz}) = 3.5 \times 10^{-3} \text{ m}$$
$$\lambda = \lambda_s = 3.5 \times 10^{-3} \text{ m}$$
$$f = c/\lambda = (3 \times 10^8 \text{ m/s})/(3.5 \times 10^{-3} \text{ m}) = 0.86 \times 10^{11} \text{ Hz} = 8.6 \times 10^{10} \text{ Hz} = 86 \text{ GHz}$$

Esercizio (es. 4, pag. 326, Cromer): qual è la frequenza della luce verde di lunghezza d'onda 525 nm?

$$\lambda_{\text{verde}} = 525 \text{ nm} = 5.25 \times 10^{-7} \text{ m}$$
$$f_{\text{verde}} = c/\lambda_{\text{verde}} = (3 \times 10^8 \text{ m/s})/(5.25 \times 10^{-7} \text{ m}) = 0.57 \times 10^{15} \text{ Hz} = 5.7 \times 10^{14} \text{ Hz}$$

CdL Professioni Sanitarie
A.A. 2012/2013

Effetto Doppler

[Questo argomento non fa parte del programma dei Corsi di Laurea in Fisioterapia e Tecniche di Radiologia]

Ogni volta che una sorgente di onde (di qualsiasi natura) si avvicina a o si allontana da un osservatore, la frequenza dell'onda osservata varia rispetto al valore nel sistema di riferimento in cui è stata emessa.

Ciò è dovuto al fatto che i fronti d'onda nella direzione del moto risultano più ravvicinati rispetto a quelli nella direzione opposta.

Figura: <http://ben.br1.net/2011/03/02/epirb-un-po-di-chiarezza/>

Se f_0 è la frequenza dell'onda emessa nel sistema di riferimento di una sorgente e quest'ultima si muove con velocità v_s rispetto ad un osservatore, la frequenza dell'onda osservata è:

$$f = f_0 / (1 \mp v_s/v),$$

dove i segni $\mp$ corrispondono rispettivamente al caso in cui il moto della sorgente sia di avvicinamento o di allontanamento.

Se è invece l'osservatore a muoversi con velocità v_A rispetto alla sorgente dell'onda, valgono considerazioni analoghe. In tal caso la frequenza misurata nel sistema di riferimento dell'osservatore è:

$$f = f_0 (1 \pm v_A/v),$$

dove i segni $\pm$ corrispondono rispettivamente al caso in cui il moto dell'osservatore sia di avvicinamento o di allontanamento.

La **flussimetria Doppler** utilizza l'effetto Doppler nelle tecniche ecografiche per misurare la velocità del sangue per mezzo di onde sonore che vengono inviate da un trasmettitore e riflesse dal sangue verso un ricevitore. L'onda riflessa è assimilabile ad un'onda emessa dal sangue in moto. Dalla differenza tra la frequenza emessa e quella misurata si risale alla velocità del sangue.

Esercizio: una sorgente di luce si allontana nel vuoto da un osservatore alla velocità di 90000 km/s emettendo radiazione ottica blu ($f = 7.5 \times 10^{14} \text{ Hz}$). Qual è la frequenza della radiazione osservata?

$$\begin{aligned}v_s &= 90000 \text{ km/s} = 9 \times 10^7 \text{ m/s}, \quad f_0 = 7.5 \times 10^{14} \text{ Hz} \\f &= f_0 / (1 + v_s/c) = (7.5 \times 10^{14} \text{ Hz}) / (1 + 9 \times 10^7 / 3 \times 10^8) \\f &= (7.5 \times 10^{14} \text{ Hz}) / 1.3 = 5.8 \times 10^{14} \text{ Hz} \text{ (luce verde)}\end{aligned}$$

CdL Professioni Sanitarie
A.A. 2012/2013

Esercizi riassuntivi

(1) Qual è la velocità di un'onda il cui periodo e lunghezza d'onda sono rispettivamente $T = 3 \text{ ms}$ e $\lambda = 0.03 \text{ m}$?

$$f = v/\lambda \rightarrow v = f \cdot \lambda \rightarrow v = \lambda/T$$
$$v = (3 \times 10^{-2} \text{ m})/(3 \times 10^{-3} \text{ s}) = 10 \text{ m/s}$$

(2) Se la sensazione sonora ad una distanza 8 m da una sorgente è pari a 40 dB, qual è il valore ad una distanza di 32 m?

[Esercizio relativo ad un argomento che non fa parte del programma dei Corsi di Laurea in Fisioterapia e Tecniche di Radiologia]

$$r_1 = 8 \text{ m}, r_2 = 32 \text{ m}, IL_1 = 40 \text{ dB}$$
$$IL_2 - IL_1 = 10 \log_{10}(I_2/I_1)$$

$$I_2/I_1 = (r_1/r_2)^2 = (1/4)^2 = 1/16$$

$$IL_2 = IL_1 + 10 \log_{10}(1/16) = 40 \text{ dB} - 12 \text{ dB} = 28 \text{ dB}$$

(3) Quale è la frequenza f di un'onda elettromagnetica nel vuoto di lunghezza d'onda 10^{-10} m ? Tale radiazione cade nella banda radio o X dello spettro elettromagnetico (si ricordi che la frequenza della luce visibile è circa 10^{15} Hz)?

$$\lambda = 10^{-10} \text{ m}$$

$$f = c/\lambda = (3 \times 10^8 \text{ m/s})/(10^{-10} \text{ m}) = 3 \times 10^{18} \text{ Hz}$$

Si tratta di radiazione X.