Misura della velocità della luce

c una costante della fisica

La velocità della luce nel vuoto, comunemente indicata con c è qualcosa di più della velocità di una particolare radiazione, la luce. Secondo le attuali conoscenze c è la velocità massima a cui può viaggiare l' energia e quindi l' informazione, di conseguenza il suo valore vale non solo per la propagazione del campo elettromagnetico ma, ad esempio, anche per la propagazione del campo gravitazionale. Il suo valore nel vuoto è indipendente dalla velocità relativa dell' osservatore e della sorgente della radiazione.

c assume pertanto il ruolo di costante universale della fisica come la costante di gravitazione universale G, la carica e la massa dell'elettrone ecc.

Misure di c

A causa del suo elevatissimo valore c non è facilmente misurabile: è necessario infatti individuare una base di lunghezza nota o misurabile e disporre di orologi capaci di misurare intervalli temporali tanto più brevi quanto più corta è la base, con accuratezza almeno un ordine di grandezza superiore al tempo impiegato dalla luce a percorrere lo spazio preso come base. Per questo le prime misure di c sono state effettuate su distanze astronomiche .

Con ottima approssimazione il valore misurato di c è $3\ 10^{8}$ m/s. Ciò significa che un raggio luminoso impiega $3.3\ 10^{-9}$ s = 3.3 n sec a percorrere un metro, 0.13 s a percorrere una distanza pari alla circonferenza della Terra, circa 1 s per andare dalla Terra alla Luna e circa 8 minuti per andare dal Sole alla Terra.

Il metodo proposto per LABEX

La strumentazione utilizzata è mostrata in figura 1

Materiale occorrente

- Trasmettitore laser
- Generatore di funzioni
- Oscilloscopio
- Specchio concavo
- Ricevitore di luce

Figura 1 – La strumentazione utilizzata per la misura di c

Il metodo proposto può essere detto della **modulazione**. Lo schema della misura è riassunto nelle figura 2a e 2b

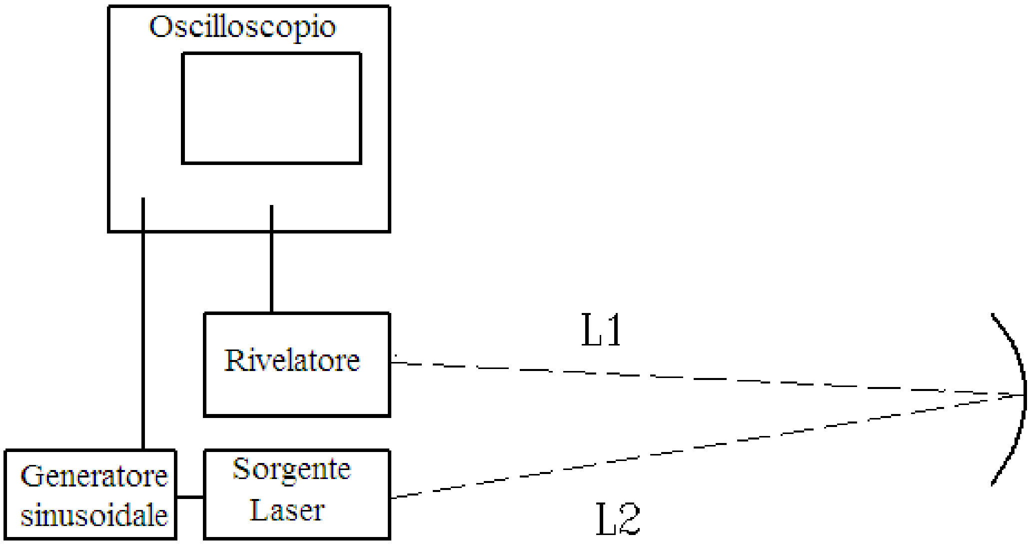

Figura 2a–Schema dell' apparato per misurare la velocità della luce

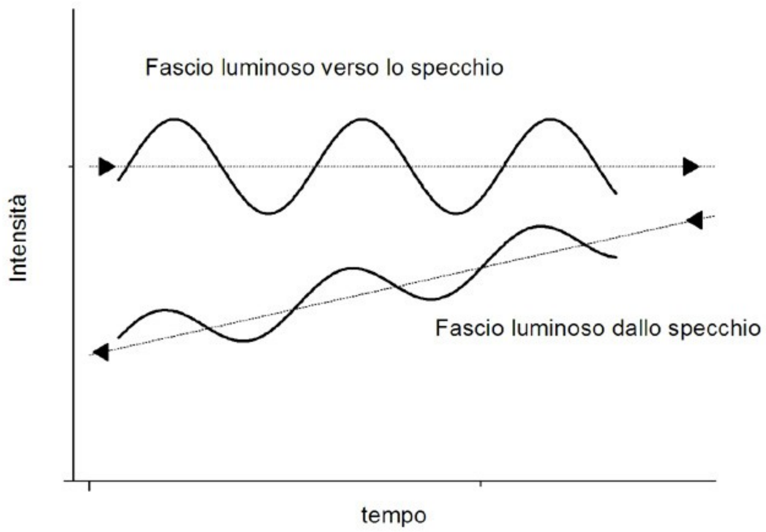

Figura 2b –Per poter seguire la propagazione del fascio di luce l' intensità del raggio luminoso viene modulata sinusoidalmente

Un fascio di luce (laser, rosso) percorre un cammino di lunghezza nota. Per misurare accuratamente il tempo impiegato dal fascio a percorrere tale cammino l' intensità del fascio luminoso viene fatta variare (*modulazione*) tra un minimo ed un massimo per mezzo di un ***generatore di segnali sinusoidali*** di frequenza nota f e ***periodo*** $T=1/f$ con T lungo rispetto al tempo impiegato dal segnale luminoso a a coprire la distanza tra la sorgente ed il rivelatore. Tale segnale svolge la funzione di orologio.

L' andamento del segnale modulato viene visualizzato inviando parte del segnale ad un ***oscilloscopio*** sul cui schermo appare il grafico della variazione sinusoidale dell' intensità del segnale luminoso in funzione del tempo.

Attraverso i comandi dell' oscilloscopio si seleziona una scala per l' intensità ed una scala per i tempi tali per cui sullo schermo risultino visibili due o tre cicli completi della sinusoide (se il periodo T della sinusoide non fosse noto a priori si potrebbe utilizzare la scala dei tempi dell' oscilloscopio per misurare il periodo T e la frequenza *f* del segnale sinusoidale, ma non è il caso nostro in quanto T ed *f* , fissati dal modulatore, sono noti a priori).

Il raggio modulato che esce dalla sorgente viene mandato ad uno specchio posto a distanza $\mathbf{L_1}$ che lo riflette indietro verso un sensore (generalmente posto a fianco della sorgente) lungo un cammino di lunghezza $\mathbf{L_2}$. Il sensore produce in uscita un segnale proporzionale all' intensità del raggio che lo investe e questo segnale viene inviato al secondo canale dell' oscilloscopio che ne visualizza l' andamento temporale.
Poiché la sinusoide modulante è parte integrante del fascio e viaggia con esso, l' andamento temporale del segnale rivelato dal sensore sarà ancora una sinusoide. Questa seconda sinusoide avrà la stessa frequenza della prima, ma ampiezza diversa (a causa delle inevitabili perdite), e tra le due sinusoidi ci sarà uno **sfasamento** dato da:

$$(2) \quad \Delta\varphi = 2\pi f \Delta t$$

dove Δt è il tempo impiegato dal segnale luminoso a percorrere il cammino $L = L_1 + L_2$. Quindi la velocità della luce è data da:

$$(3) \quad c = \frac{L}{\Delta t}$$

La Figura 3 mostra l' aspetto delle due sinusoidi visibili sullo schermo. Per facilitarne il confronto conviene spostare verticalmente (per mezzo dei comandi dell' oscilloscopio) le due tracce sinusoidali fino a sovrapporne gli assi mediani.

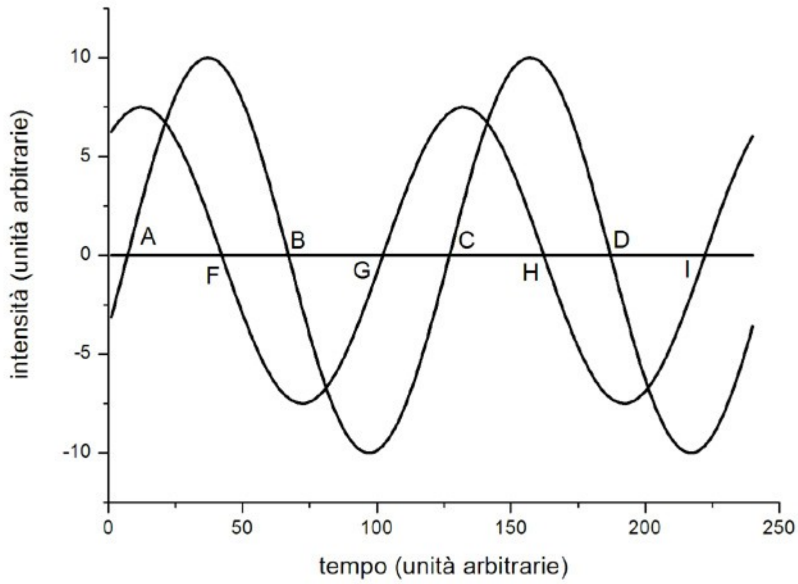

Figura 2 - 'L' immagine che appare sullo schermo dell' oscilloscopio
D = AB=BC=BD= FG=GH=HI = semiperiodo d= FB = GC=HD = sfasamento

E' evidente che se T è il periodo della sinusoide:

$$(4) \quad \Delta t = \left(\frac{d}{2D}\right)T$$

dove D, la distanza tra due zeri successivi della stessa sinusoide, è proporzionale al semiperiodo T/2 e d è la distanza tra punti corrispondenti in cui le due sinusoidi tagliano l' asse mediano. Poiché nelle relazioni precedenti compare solo il loro rapporto d e D possono essere misurate in unità arbitrarie, ad es in cm accostando un righello allo schermo dell' oscilloscopio oppure in unità della scala disegnata sullo schermo dell' oscilloscopio.

Sostituendo la (3) nella (4) si ottiene:

$$(5) \quad c = \frac{L}{\Delta t} = L\left(\frac{2D}{d}\right)\cdot f$$

Questa procedura è però affetta da grossi errori sistematici che falsano la misura di d e quindi il valore ricavato di c. Ci sono infatti ritardi a priori sconosciuti, nel trasferimento dell' informazione dal generatore all' oscilloscopio e dal sensore all' oscilloscopio. Poiché tali ritardi sono fissi, i loro effetti possono essere cancellati effettuando due misure anzichè una, ponendo cioè lo specchio a due diverse distanze e quindi facendo percorrere al fascio luminoso due diverse distanze $L_a=L_{a1}+L_{a2}$ ed $L_b=L_{b1}+L_{b2}$ Se indichiamo con d_a e d_b gli sfasamenti misurati nei due casi possiamo scrivere

$$c = (L_b-L_a)\,[2D/(d_b-d_a)]\,/\,T = (L_b-L_a)\,[2D/(d_b-d_a)]\,f$$

Note importanti :

a)Come in tutti gli esperimenti il valore così misurato di d e quello ricavato di c sono affetti da errori. Alcuni, di tipo statistico, possono essere ridotti ripetendo più volte le misure e calcolando il valor medio <m> di tali misure, la dispersione σ di tali misure e la dispersione σ_m della media (vedi scheda su "Analisi Statistica"). Gli errori sistematici, (di cui quello (vedi sopra) associato ai ritardi nell' invio dei segnali all' oscilloscopio è un esempio) possono essere talvolta individuati ripetendo la misura in modi diversi, ma non sono eliminabili ripetendo più volte la stessa misura nelle tesse condizioni.

Si suggerisce quindi di:1)ripetere più volte la misura con configurazioni diverse, 2)non meravigliarsi delle differenze tra valore misurato e valore atteso, 3)diffidare di risultati che mostrino un accordo troppo accurato con il valore atteso

b)il metodo proposto per misurare c richiede che lo sfasamento d sia inferiore a 2D e che quindi lo specchio sia posto ad una distanza massima Lmax < $\lambda = c/f$. Se si usa una frequenza di 3MHz la cui lunghezza d' onda è pari a 100 m questa condizione in laboratorio è generalmente soddisfatta. Individuare la frequenza più adatta a compiere una misura accurata.

c)nel ricavare d, se si confronta la distanza fra gli zeri delle due sinusoidi è essenziale fare riferimento allo stesso tipo di zeri per entrambe le sinusoidi.

d)la frequenza del segnale modulante e la risposta temporale dell' oscilloscopio devono essere stabili durante il tempo impiegato ad effettuare la misura.

Appendice : richiami sulla funzione sinusoidale

. La funzione sinusoidale

$$y = A\ \mathrm{sen}(2\pi f\ t + \varphi) = A\ \mathrm{sen}\ (2\pi\ (x/\lambda) + \delta)$$

estesa sia nello spazio che nel tempo da .-∞ a + ∞, ha un andamento ciclico (vedi figura 3) caratterizzato da una successione di massimi e minimi disposti simmetricamente attorno ad un asse mediano lungo cui scorre il tempo. lo spazio. Nell' arco di un ciclo completo tale asse viene attraversato due volte, una volta dall' alto verso il basso e la volta successiva dal basso verso l'm alto (o viceversa).

Caratteristiche di ogni sinusoide sono l' **ampiezza** A (distanza dei massimi e minimi dall' asse mediano), le posizioni (equispaziate) lungo l' asse delle ascisse dei massimi dei minimi e degli zeri. L' intervallo di tempo T tra due massimi o due minimi successivi o due zeri che precedono o seguono due massimi o due minimi o due punti successivi caratterizzati dalla stessa valore di φ è detto **periodo**. La quantità φ è detta **fase temporale**. L' intervallo spaziale tra le stesse quantità è la quantità δ sono dette rispettivamente **lunghezza d' onda** λ e **fase spaziale**.
L' inverso del periodo T è la **frequenza**.*f*.

Valgono le relazioni

$$T = 1/f = 2\ \pi/\omega \qquad \omega = 2\ \pi\ f \qquad \lambda f = v$$

dove v detta **velocità di fase** e la velocità con cui cambiano le fasi φ e δ spostandosi rispettivamente nel tempo e nello spazio.

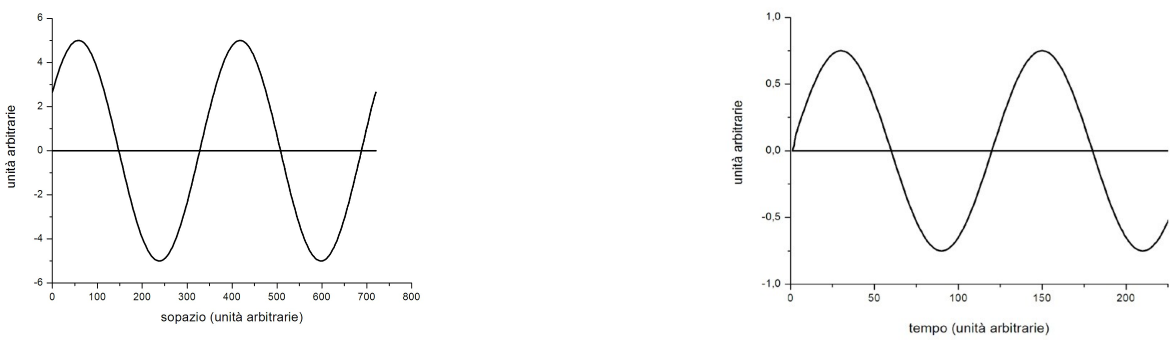

Figura 3 - Andamento spaziale e temporale della funzione sinusoidale (le due funzioni rappresentate hanno ampiezze e fasi diverse)