



Misura della velocità della luce: metodo dello spostamento di fase.

Lorenzo Santi e Stefano Vercellati

Unità di Ricerca in Didattica della Fisica dell'Università di Udine

Cenni sulla storia della misurazione della velocità della luce

Il dibattito concernente la finitezza o meno della velocità di propagazione della luce ha radici antiche. Già nell'antica Grecia Empedocle (490 – 430 a.C.) sosteneva che la propagazione della luce avvenisse con velocità finita, mentre altri, tra cui Erone di Alessandria (10 a.C. – 70 d.C.) ed Aristotele, erano convinti che la luce si propagasse istantaneamente.

Le argomentazioni portate a sostegno delle rispettive tesi però erano sostenute solo da ipotesi teoriche che si basavano sull'idea che i singoli studiosi avevano riguardo alla luce e/o alla spiegazione che loro davano del meccanismo della visione. Empedocle in particolare pensava alla luce come un qualcosa in moto e quindi gli sembra ovvio che lo spostarsi di questo qualcosa da un posto ad un altro richiedesse del tempo. Erone di Alessandria invece, basandosi sulla teoria emissiva della visione¹, afferma che la luce deve propagarsi con velocità infinita in quanto non appena apriamo gli occhi vediamo subito sia gli oggetti vicini che quelli lontanissimi (come ad esempio le stelle). Questo dibattito si mantenne sempre su di un livello teorico fino alla prima metà del XVII secolo rimanendo però pressoché in una situazione di stallo in quanto non vi erano forti evidenze sperimentali a sostegno dell'una o dell'altra tesi.

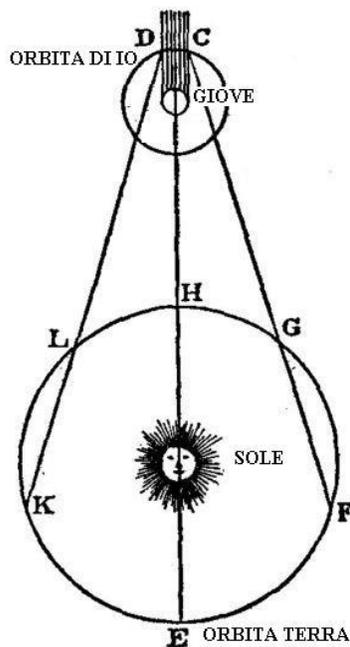
All'inizio del Seicento alcuni studiosi cercarono di ideare degli esperimenti specifici per cercare di misurare la velocità della luce, però non riuscirono a giungere a dei risultati soddisfacenti. Essi infatti non disponendo di strumenti sufficientemente precisi per riuscire a misurare sperimentalmente una velocità così elevata. Galileo (1562 – 1642) ad esempio propose di misurare la velocità della luce studiando l'intervallo di tempo presente fra la generazione di un segnale luminoso e la sua percezione da parte di un osservatore lontano. Per far ciò Galileo propose che due persone, ciascuna delle quali con una lanterna accesa e schermata, si posizionassero in cima a due montagne e non appena uno vedeva che l'altro aveva scoperto la sua lanterna doveva fare altrettanto. In questo modo la prima persona che aveva scoperto la lanterna poteva misurare l'intervallo di tempo che intercorreva tra quando lui aveva scoperto la lanterna e quando vedeva la luce proveniente dall'altra lanterna. Effettuata questa misura e sapendo la distanza a cui si trovavano le due persone, si poteva ricavare la velocità della luce. Questo metodo però non era funzionale in quanto il tempo di reazione delle due persone era molto maggiore rispetto al tempo che la luce impiega a percorrere lo spazio tra le due persone (generalmente si ha una differenza di 4-5 ordini di grandezza).

La velocità di propagazione della luce è talmente grande che per effettuare una sua misurazione sperimentalmente in termini di spazio percorso in un intervallo di tempo è necessario considerare o distanze grandissime (distanze astronomiche) o intervalli di

¹ Secondo questa teoria noi siamo in grado di vedere gli oggetti perché dall'occhio vengono emessi dei "raggi visuali" che colpiscono gli oggetti che stiamo guardando. Solo ciò che viene colpito dai raggi visuali risulta essere visibile.

tempo molto piccoli. Vedremo ora due metodologie di misura che vanno proprio a considerare queste due situazioni.

La prima tecnica di misura che ha portato a risultati soddisfacenti fu proposta da Rømer (1644 – 1710) e fa entrare in gioco le distanze interplanetarie. Rømer, proseguendo ed integrando gli studi di Cassini (1625 – 1712) sui satelliti di Giove (in particolare *Io*), si accorse che la misura del periodo di rivoluzione di *Io* variava a seconda che la Terra nel suo moto di rivoluzione intorno al Sole si stesse avvicinando o allontanando da Giove. In particolare egli osservò che quando la Terra si avvicinava a Giove la misura del periodo di rivoluzione di *Io* risultava minore rispetto a quando la Terra si allontanava da Giove. Facendo riferimento alla figura, supponiamo che la Terra si trovi nel punto L e che *Io* si



trovi nel punto D (vale a dire sia appena uscito dal cono d'ombra di Giove) e di voler misurare il tempo impiegato da *Io* per effettuare un certo numero (scelto arbitrariamente) di rivoluzioni intorno a Giove. Mentre *Io* orbita intorno a Giove, la terra prosegue nel suo moto di rivoluzione intorno al Sole, quindi, quando *Io* avrà completato il numero di orbite previsto, la Terra non si troverà più nel punto D, ma si troverà in un altro punto (indicato in figura con K). Per la misura del periodo orbitale di *Io* prendiamo quindi rispettivamente i due istanti coincidenti con gli istanti in cui dalla Terra si osserva *Io* uscire dal cono d'ombra di Giove. Le due osservazioni però vengono effettuate quando la Terra si trova a due distanze diverse da *Io*. Quindi, se la luce ha una velocità di propagazione finita, l'immagine di *Io* che esce dall'ombra di Giove impiegherà più tempo a raggiungere la Terra quando quest'ultima si trova nel punto K rispetto a quando si trovava nel punto L. Questo comporterà una sovrastima del periodo di *Io*. Analogamente se si ripete la misura del periodo di *Io* quando la Terra si sposta dalla posizione F alla posizione

G e si considerano gli istanti in cui *Io* entra nell'ombra di Giove si avrà una sottostima del periodo di *Io* in quanto l'immagine di *Io* che entra dall'ombra di Giove impiegherà meno tempo a raggiungere la Terra quando quest'ultima si trova nel punto G rispetto a quando è nel punto F. La semidifferenza fra la misura dei due periodi rappresenta il tempo impiegato dalla luce per percorrere la distanza LK. Rømer infine, effettuando numerose misure per angoli diversi ed estrapolando i dati raccolti, arrivò alla conclusione che la luce impiega 22 min per percorrere una distanza pari al diametro di rivoluzione terrestre²; vale a dire 220000 km/s.

Col passare degli anni e con lo sviluppo di strumenti scientifici più accurati si sono sviluppate altre tecniche utili per la misurazione della velocità della luce. Un interessante esperimento è quello proposto da Foucault (1819 – 1868). In questo esperimento, grazie allo stratagemma dello specchio ruotante, si vanno a considerare degli intervalli di tempo

² L'estrapolazione dei dati è necessaria perché non si può misurare direttamente con il metodo di Rømer il tempo impiegato a percorrere la distanza EH in quanto Giove ed *Io* non son visibili dalla Terra quando essa si trova nella posizione E.

molto piccoli permettendo in questo modo di far sì che l'apparato di misura abbia delle dimensioni modeste (se paragonato alle distanze astronomiche utilizzate da Rømer). L'apparato, rappresentato schematicamente nella figura qui sotto, consiste in una sorgente di luce, uno schermo, due specchi di cui uno ruotante ed un rivelatore. Foucault pose i due specchi S1 ed S2 ad una distanza di circa 30 km l'uno dall'altro. Lo specchio S2 viene fissato nella sua posizione, mentre lo specchio S1 viene fatto ruotare con una velocità nota. Lo specchio S1, ruotando su se stesso, ad un certo istante verrà a trovarsi nell'angolo necessario per far sì che la luce emessa dalla sorgente vada a riflettere sullo specchio S2. Una volta riflessa da S2 la luce tornerà a riflettersi su S1 che però, essendo in rotazione, avrà ruotato su se stesso di un angolo θ pari alla velocità angolare con cui sta ruotando (ω) per il tempo impiegato dalla luce a percorrere due volte la distanza (d) presente tra i due specchi (due volte perché la luce deve andare da S1 ad S2 e poi tornare indietro su S1). Indicando la velocità della luce con c possiamo quindi scrivere che $\theta = \omega \frac{2d}{c}$ da cui si ricava che: $c = \omega \frac{2d}{\theta}$.

Con un'apparecchiatura di questo tipo Foucault riuscì a stimare in 2980000 km/s la velocità della luce; valore molto vicino a quello accettato oggi. Differisce infatti da quest'ultimo dello 0.6%.

I due esperimenti sopra riportati sono esempi di misure che si basano sull'idea di velocità vista come rapporto tra lo spazio percorso e l'intervallo di tempo impiegato per percorrere quello spazio. Le tecniche moderne utilizzate per la misura della velocità di propagazione della luce si basano invece su misure indirette che fondano la propria legittimità su elementi teorici che permettono di effettuarne una stima della velocità di propagazione a partire dalla misurazione di altre grandezze. Questo connubio tra tecniche sperimentali e sviluppo teorico è uno degli elementi fondamentali della ricerca in fisica: lo sviluppo della teoria favorisce la nascita di nuove tecniche sperimentali e lo sviluppo delle tecniche sperimentali fornisce alla teoria nuovi elementi su cui costruirsi.

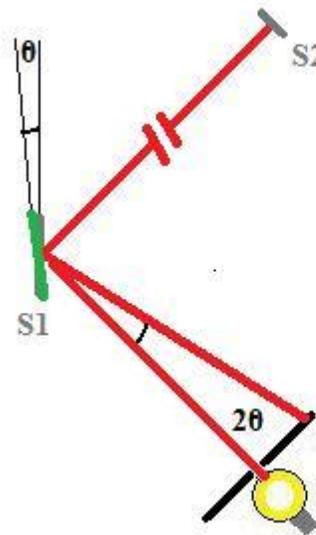


Figura 1 – Rappresentazione schematica dell'apparato di Foucault

La misura della velocità della luce con il metodo dello spostamento di fase

Come evidenziato nelle pagine precedenti, un approccio alla misura della velocità della luce basato sulla determinazione del tempo impiegato da un raggio luminoso a percorrere una data distanza (o, viceversa, dello spazio percorso in un dato tempo) comporta delle difficoltà tecniche notevoli, dovuto all'elevato valore (circa 10^8 m/s) di questa costante, e quindi alla necessità di misure temporali estremamente precise oppure di percorsi estremamente lunghi.

In questa esperienza come “cronometro” viene utilizzato un segnale di alta frequenza (circa 0.5 Ghz) per impulsare un fascio laser e viene rilevata la differenza di fase per diverse lunghezze di cammini ottici del fascio stesso. Ciò permette una notevole

precisione nelle misure di intervalli di tempo e quindi di limitare la lunghezza dei percorsi ottici utilizzati.

L'apparato, mostrato in figura, può essere schematizzato come segue

- L'unità di controllo contiene un oscillatore (del tipo usato nei computer per generare il segnale di clock) che genera un segnale elettrico sinusoidale ad una alta frequenza F . Tale segnale viene inviato mediante un cavo coassiale all'emettitore.

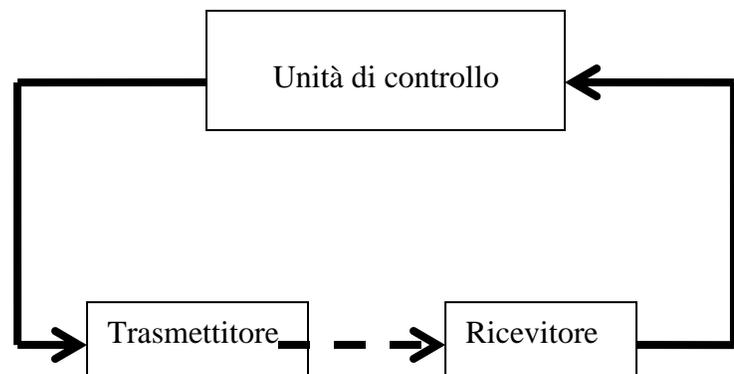
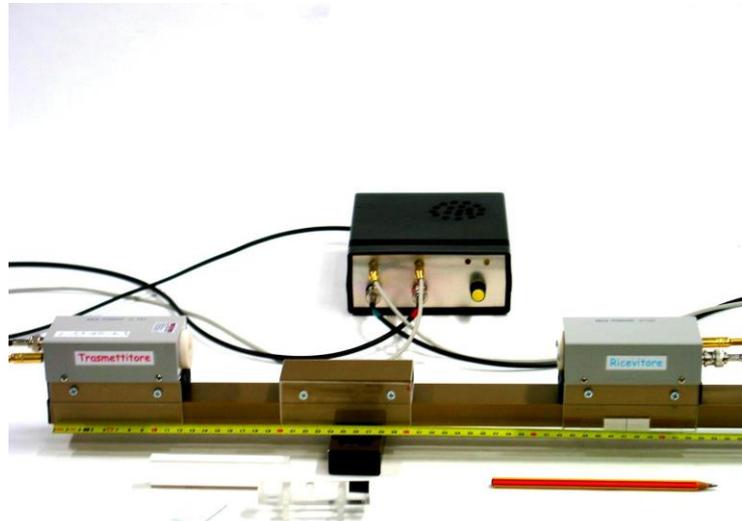
- Il trasmettitore consiste in un laser, il cui fascio luminoso viene modulato dal segnale inviato dall'unità di controllo. Il segnale originario viene così propagato nell'aria come modulazione dell'intensità del fascio luminoso, con frequenza F (è una frequenza di modulazione in ampiezza e non va confuso con la frequenza propria della luce) e velocità pari a quella c della luce.

- Il fascio laser arriva poi al ricevitore, che consiste in un sensore di luminosità. Questo sensore riconverte il segnale luminoso in un segnale elettrico, che viene inviato nuovamente all'unità di controllo.

- Nell'unità di controllo, il segnale inviato dal ricevitore (S), viene sommato ad uno di riferimento S_0 , generato da un secondo oscillatore nell'unità di controllo. Il risultato della composizione di questi due segnali dipende dalla loro fase reciproca. Se risultano in controfase, l'interferenza sarà distruttiva e il segnale composto sarà nullo, mentre se sono in fase, si comporranno in maniera costruttiva e si otterrà un segnale amplificato.

Il segnale $S+S_0$ può essere "sentito" inviandolo ad uno speaker (dopo averlo opportunamente amplificato)³.

La fase tra i due segnali deriva dalla somma di due fasi diverse: la fase tra i due oscillatori (sconosciuta ma che può essere considerata costante) e quella dovuta al ritardo del segnale S per la sua propagazione nei cavi e nell'aria, trasportato dal fascio laser.



³ L'orecchio umano non può percepire suoni alla frequenza utilizzata nell'esperimento ed è necessario produrre in qualche modo un suono che ricada nel campo dell'udibile (vi è anche una limitazione della dinamica dello speaker, che non consente di riprodurre suoni a frequenza troppo elevata). Di questo, si occupa un circuito elettronico che produce un segnale elettrico di ampiezza correlata a quella di $S+S_0$ e frequenza di circa 400 Hz.

In particolare, si può spostare il ricevitore avvicinandolo o allontanandolo dal trasmettitore, in maniera tale da ridurre o aumentare il cammino percorso e quindi il tempo di propagazione del segnale nell'aria. In questo modo si può variare la fase relativa tra S e S0: la scelta ottimale è quella di posizionare il ricevitore in maniera tale da ottenere un minimo del segnale combinato S+S0 (interferenza distruttiva). La ragione per cui si sceglie il punto di minimo è che le misure di zero sono intrinsecamente più sensibili e si può determinare la posizione desiderata con maggiore precisione, aumentando progressivamente l'amplificazione del segnale inviato allo speaker.

Determinata la posizione x1 del ricevitore per cui si ottiene un minimo di interferenza, lo si sposta. S+S0 in questo modo aumenta di intensità, fino a raggiungere un massimo (interferenza costruttiva) e poi diminuire, fino ad un nuovo punto di minimo, con il ricevitore nella posizione x2.

Spostando il ricevitore da x1 a x2, la fase relativa tra S e S0 è variata di 2π (la differenza di fase tra due successive situazioni di interferenza distruttiva). Questa variazione di fase è dovuta al fatto che il tempo di propagazione del segnale in aria è cambiato di una quantità pari al periodo del segnale elettrico, cioè il periodo τ (pari a $1/F$) dell'oscillatore.

Ne segue che nel tempo τ il segnale percorre una distanza $|x2-x1|$ e quindi la velocità con cui si propaga è pari a $|x2-x1|/\tau$. Nella pratica, conviene ridurre gli errori di misura prendendo una lunghezza di propagazione più lunga, ad esempio quella in cui si hanno tre minimi distruttivi e non due. (A causa di dettagli tecnici di come è realizzata la modulazione del fascio laser, le distanze tra due coppie di minimi consecutive, x1, x2 e x2,x3, possono risultare molto diverse fra loro e variare relativamente con il tempo: solo prendendo l'intervallo x1,x3 si ottiene una situazione corrispondente alla descrizione qui fatta).

L'intervallo di tempo da considerare è così il doppio del periodo dell'oscillatore: il T indicato sull'apparato corrisponde effettivamente a 2τ .

ATTENZIONE				
	<p>Il trasmettitore nell'apparato è costituito da un laser con le seguenti caratteristiche</p> <p>Laser a diodo lunghezza d'onda emessa : 630-680 nm (rosso) Potenza massima : minore di 5 mW. Emissione impulsata. Classe laser : II</p>			
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Rischi potenziali</th> <th>Misure di sicurezza</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td> <p>I laser di classe II emettono una radiazione che può essere pericolosa per gli occhi dell'operatore, ma considerata la relativa bassa potenza emessa, anche un'esposizione prolungata <u>non è in grado</u> di provocare danni rilevanti, salvo esposizioni dirette degli occhi per un tempo superiore a 0.25 s (esposizioni spesso eliminata dal riflesso palpebrale) ovvero quando si utilizzano di dispositivi ottici di osservazione.</p> </td> <td> <ul style="list-style-type: none"> • Non osservare direttamente il fascio laser, sia lunga la linea del banco ottico, sia al di fuori di essa per effetto di riflessioni generate frapponendo materiale riflettente: evitare quindi di porre sulla linea del banco ottico orologi, cellulari o altri dispositivi dotati di superfici riflettenti. • non osservare il fascio laser attraverso ottiche che amplificano l'intensità di radiazione; • non direzionare il fascio laser verso gli occhi di una persona. </td> </tr> </tbody> </table>	Rischi potenziali	Misure di sicurezza	<p>I laser di classe II emettono una radiazione che può essere pericolosa per gli occhi dell'operatore, ma considerata la relativa bassa potenza emessa, anche un'esposizione prolungata <u>non è in grado</u> di provocare danni rilevanti, salvo esposizioni dirette degli occhi per un tempo superiore a 0.25 s (esposizioni spesso eliminata dal riflesso palpebrale) ovvero quando si utilizzano di dispositivi ottici di osservazione.</p>
Rischi potenziali	Misure di sicurezza			
<p>I laser di classe II emettono una radiazione che può essere pericolosa per gli occhi dell'operatore, ma considerata la relativa bassa potenza emessa, anche un'esposizione prolungata <u>non è in grado</u> di provocare danni rilevanti, salvo esposizioni dirette degli occhi per un tempo superiore a 0.25 s (esposizioni spesso eliminata dal riflesso palpebrale) ovvero quando si utilizzano di dispositivi ottici di osservazione.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Non osservare direttamente il fascio laser, sia lunga la linea del banco ottico, sia al di fuori di essa per effetto di riflessioni generate frapponendo materiale riflettente: evitare quindi di porre sulla linea del banco ottico orologi, cellulari o altri dispositivi dotati di superfici riflettenti. • non osservare il fascio laser attraverso ottiche che amplificano l'intensità di radiazione; • non direzionare il fascio laser verso gli occhi di una persona. 			