

MISURARE LA VELOCITÀ DELLA LUCE

UN ESPERIMENTO STORICO A CONCLUSIONE DI STUDI TECNICI

di *Maurilio Bortolussi**

Una misura della velocità della luce con l'ausilio di un oscilloscopio e di pochi materiali a basso costo, per un'attività didattica alla fine dei cinque anni di Istituto Tecnico, che coniuga la dimensione storica e la dimensione sperimentale costitutive della scienza fisica. Un percorso che non raggiunge solo l'obiettivo di approfondire la conoscenza di una teoria fisica, ma che permette al giovane un'esperienza di progettualità e creatività realmente efficaci. Con il coinvolgimento di adulti, il docente di elettrotecnica e il genitore, essi stessi impegnati in una «sfida affascinante».

La luce ha sempre affascinato la curiosità dell'uomo fin dalle epoche più remote. È trascorso più di un secolo da quando Einstein pubblicò il suo celebre articolo sull'elettrodinamica dei corpi in movimento, in cui dimostrava che la velocità della luce era il limite massimo di velocità per qualsiasi oggetto fisico. Oggigiorno, l'idea di poter effettuare una stima sperimentale di questa velocità con materiali e strumentazioni facilmente reperibili nel laboratorio di una scuola - o di un hobbista - suscita sempre un primo iniziale sconcerto.

L'attività didattica proposta allo studente Federico Furlanetto, più che il raggiungimento di una misura più o meno accurata della velocità della luce, ha centrato l'obiettivo di coinvolgere il giovane in una sfida affascinante concretizzatasi in una significativa esperienza educativa capace di far emergere e consolidare nel giovane la passione per la realtà.

Storia della velocità della luce

Già nell'epoca antica l'uomo si era posto il problema della natura della luce e della sua velocità. Quasi tutti i pensatori greci e latini avevano abbozzato ipotesi in grado di avere più o meno ragione degli interrogativi posti da questo fenomeno che appariva così pervasivo e profondamente intrecciato con la percezione del mondo reale.

Per i filosofi ellenici e latini il problema della luce, fin da subito, fu

*docente di Elettrotecnica presso ITIS "J.F. Kennedy" di Pordenone.

L'esperienza didattica oggetto di questo articolo è nata dalla proposta fatta da Daniele Altan, docente di matematica e fisica presso il Liceo Scientifico "Le filandiere" di San Vito al Tagliamento (PN), a Federico Furlanetto, allievo dello stesso istituto, in occasione della preparazione all'Esame di Stato.

strettamente legato alla cosmologia. Nel suo trattato cosmologico, il *Timeo*, Platone (427-347 a.C.) afferma che il fuoco della nostra anima si effonde all'esterno e trasmette a noi una sensazione solo se incontra un altro fuoco. Più tardi, nella filosofia neoplatonica la luce verrà considerata come una manifestazione propria del divino, attraverso cui l'Uno si comunica per emanazione alle intelligenze celesti e quindi al mondo sensibile.

Aristotele (384-322 a.C.) attribuisce alla luce la caratteristica di essere l'etere, il quinto elemento composto di materia fluida e sottile in cui sono immersi gli enti composti da acqua, aria, terra e fuoco, i quattro elementi primordiali.

L'autore latino Lucrezio (98 ca-54 ca a.C.) nel suo poema *De rerum natura*, partendo dalla teoria atomica analizza i processi di formazione delle immagini e sostiene che dalle superfici di tutti i corpi vengono emesse delle scorze di atomi con la stessa forma e colore dei corpi stessi che si diffondevano nell'aria fino a raggiungere l'osservatore. Egli attribuisce alla luce una velocità «inimmaginabile».

Nel medioevo la luce è considerata il principio fisico originario da cui tutti gli enti derivano la corporeità. Di particolare rilievo è la figura del francescano Roberto Grossatesta (1175-1253), vescovo di Lincoln. Per la scuola francescana inglese, Dio è il *Numerator* e *Mensurator primus*, che ha costruito il mondo secondo principi matematici, linee, angoli e figure, a partire da una sostanza corporea straordinaria, la più simile all'essenza spirituale: la luce fisica; essa è lo strumento della percezione della bellezza del mondo visibile. Nell'ambito della scuola francescana fioriscono studi sulle lenti, sugli specchi, l'arcobaleno e l'ottica geometrica.

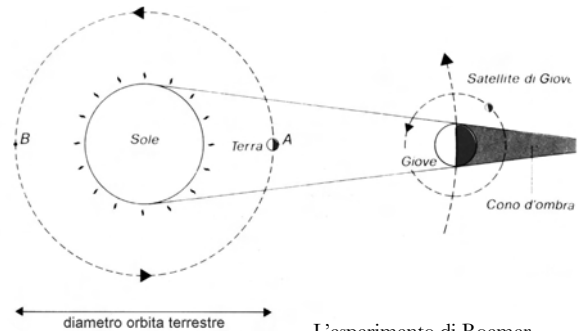
Per quanto è dato di sapere, il primo tentativo documentato di misurazione della velocità della luce risale a Galileo Galilei (1564-1642). Egli, intuendo che la luce ha una velocità finita, descrive un «esperimento ideale», da realizzarsi tra due opposte colline fuori Firenze. Su una collina immagina che si apposti un suo assistente e sull'altra egli stesso, entrambi muniti di una lanterna tenuta coperta. Galileo per primo scopre la sua lanterna seguito dal suo assistente appena abbia visto la luce proveniente dalla lanterna di Galileo. In questo modo, se la velocità della luce fosse sufficientemente bassa da essere confrontabile con i tempi di reazione umani, si potrebbe ottenere una stima del tempo impiegato dalla luce per percorrere la distanza tra le due colline e quindi calcolare la sua velocità.

Per una prima stima della velocità della luce bisogna attendere il 1676 quando l'astronomo danese Olaus Roemer (1644-1710) grazie ai suoi studi sulle irregolarità delle eclissi del satellite Io di Giove, effettuati in stretta collaborazione con Giovanni D. Cassini, pubblica una *Démonstration touchant le mouvement de la lumière* nella quale afferma «che per una distanza di circa 3000 leghe, valore molto

prossimo al diametro della Terra, la luce impiega meno di un secondo di tempo».

Cassini aveva osservato le lune di Giove tra il 1666 e il 1668 e aveva scoperto delle anomalie nelle sue misure; nel 1672 Roemer, recatosi a Parigi, come assistente di Cassini, osservò che i tempi delle eclissi di Io nell'ombra di Giove diventavano più brevi quando la Terra si avvicinava a Giove e più lunghi quando la Terra si allontanava. Nel primo caso, ogni sparizione di Io nell'ombra di

Giove ha luogo quando la Terra è più distante da Giove di quanto non lo fosse alla sparizione precedente, e ciò significa che la luce per giungere sulla Terra deve percorrere una distanza maggiore. Roemer valutò in circa 22 minuti il tempo impiegato dalla luce per percorrere il diametro dell'orbita terrestre. Ciò gli permise di stimare, in base all'accuratezza delle conoscenze astronomiche del tempo, la velocità della luce di circa 210000 km/s, valore dello stesso ordine di quello attualmente ritenuto corretto.



L'esperimento di Roemer

Le conclusioni di Roemer non furono accettate subito in modo unanime; bisognerà attendere ulteriori conferme. Nel 1729 l'astronomo inglese James Bradley (1693-1762) si imbatte quasi per caso nel problema della velocità della luce. In quegli anni uno dei problemi più spinosi dell'astronomia consisteva nella difficoltà di misurare le distanze delle stelle; uno dei metodi utilizzati era quello della parallasse trigonometrica che era già stato intuito dagli astronomi del XVI secolo, da Copernico e in particolare da Galileo. Consiste nel misurare la variazione dell'angolo con cui viene vista una stella quando la Terra viene a trovarsi in due luoghi opposti della sua orbita. Era un metodo molto utilizzato anche sulla superficie terrestre per misurare oggetti lontani e difficilmente raggiungibili. Il problema è che la parallasse delle stelle è un angolo piccolissimo, in genere inferiore al secondo d'arco.

Bradley notava che le sue misure delle variazioni d'angolo delle stelle erano tutte affette da uno stesso errore di circa 20 secondi d'arco, troppo grande per essere la parallasse; egli, in realtà, si era imbattuto nel fenomeno dell'aberrazione della luce.

In astronomia abbiamo due velocità che si sommano: quella della luce della stella che noi vediamo e quella della Terra che compie il suo moto orbitale attorno al Sole. Sommando le due velocità si ha l'impressione che la stella che osserviamo si trovi in una posizione diversa da quella che ci aspettiamo. In una giornata di pioggia in assenza di vento se stiamo fermi vediamo cadere la pioggia verticalmente; tuttavia se ci mettiamo in moto, i nostri sensi ci dicono che la

LINEA DIRETTA

¹ La velocità della luce si indica convenzionalmente con la lettera c , dal latino *celeritas*.



L'aberrazione astronomica

pioggia inizia a cadere obliquamente, e maggiore è la nostra velocità, tanto maggiore è la sua obliquità. Infatti, anche se siamo provvisti di ombrello ci bagniamo maggiormente quanto più velocemente ci muoviamo. Se consideriamo un telescopio puntato verso una stella, il raggio di luce proveniente dalla stella impiega un tempo Δt , pari a l/c , a percorrere la lunghezza l del telescopio¹ (si veda l'immagine a lato). Durante tale intervallo di tempo il telescopio, solidale con la terra, si è spostato di una distanza d pari a $v\Delta t$. Perché l'immagine della stella possa raggiungere l'oculare del telescopio è necessario che il telescopio presenti una opportuna inclinazione rispetto alla direzione effettiva della stella.

Poiché la direzione della velocità della terra cambia continuamente durante il suo movimento orbitale anche i punti in cui viene vista la stella nella volta celeste formeranno una curva chiusa ellissoidale molto simile all'orbita terrestre.

Considerando le due precedenti relazioni si ottiene

$$c = \frac{l}{d} \cdot v$$

Con questo metodo Bradley stimò la velocità della luce in circa 308000 km/s, con un'accuratezza veramente notevole considerando il grado di precisione degli strumenti del suo tempo.

I metodi di Roemer e di Bradley si basavano entrambi sull'osservazione astronomica e presupponevano la conoscenza esatta della distanza della Terra dal Sole. Questo dato fu determinato con buona precisione solo in tempi più recenti.

Era quindi necessario trovare un sistema per misurare la velocità della luce su distanze terrestri in cui le lunghezze fossero determinabili con un'accuratezza molto più elevata.

Il francese Armand H.L. Fizeau (1819-1896) applicò nel 1849 un metodo basato sull'interruzione del cammino di un raggio di luce tra due specchi mediante una ruota dentata.

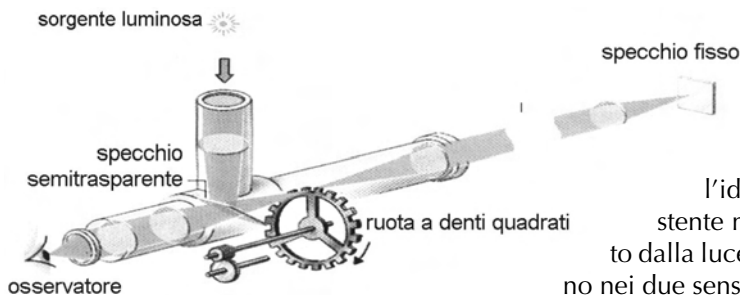
Dalla velocità di rotazione della ruota e dalla lunghezza del percorso effettuato dalla luce si poteva calcolare la velocità della luce.

Fizeau utilizzando il suo congegno su una distanza di circa 8 km, tra Suresnes e Montmartre, ottenne una stima di c pari a 313000 km/s. Egli in pratica applicò

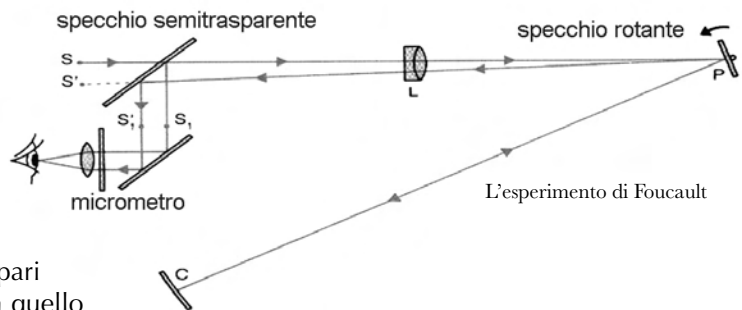
l'idea originaria di Galileo, consistente nel misurare il tempo impiegato

dalla luce a percorrere un certo cammino nei due sensi.

Il metodo di Fizeau



L'esperimento di Fizeau fu in seguito migliorato, nel 1862, dal con-
nazionale Jean-Bernard-Léon
Foucault (1819-1868), il
quale utilizzò uno spec-
chietto rotante al posto
della ruota dentata; in tal
modo l'estinzione del
raggio di luce veniva
sostituita da un suo spo-
stamento angolare.



Egli ottenne per c un valore pari
298000 km/s, molto vicino a quello
oggi giorno comunemente accettato.

Inoltre l'apparato sperimentale di Foucault
permetteva di misurare la velocità della luce in mezzi diversi dal-
l'aria, quali per esempio l'acqua, disponendo nel percorso del
raggio di luce un tubo pieno della sostanza nella quale si voleva
misurare c .

Non si può parlare della storia dei metodi di misurazione della luce
senza menzionare Albert Abraham Michelson (1852-1931), fisico
americano di origini polacche, premio Nobel per la fisica nel 1907.
Fin dal 1877, quando era ancora un ufficiale della Marina degli Stati
Uniti, Michelson iniziò a lavorare su un metodo di misura della velo-
cità della luce basato sugli specchi rotanti di Foucault, finché nel 1879
egli pubblicò il suo primo risultato (299910 ± 50) km/s.

Tutta la vita di Michelson fu dedicata alla ricerca di metodi sempre
più accurati per la misurazione della velocità della luce; famosa è
la sua misurazione (299976 ± 4) km/s del 1926 su una distanza di
circa 22 miglia che richiese oltre due anni per la misurazione della
linea di terra.

Il nome di Michelson è però passato alla storia, insieme a quello
di un altro scienziato, Edward Morley (1838-1923) per l'esperi-
mento dell'interferometro del 1887 che decretò la fine dell'ipote-
si dell'esistenza dell'etere, il misterioso mezzo trasmissivo
mediante il quale la luce si doveva propagare, e che rappresentò il
punto di partenza per la teoria della relatività ristretta di Einstein
del 1905.

Dopo il 1950, i risultati più importanti sono stati ottenuti tenendo
conto della relazione $c = \lambda f$, attraverso le misure separate della lun-
ghezza d'onda (λ) e della frequenza (f).

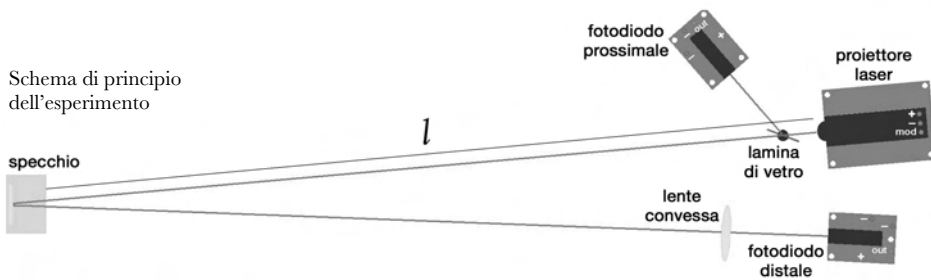
Nel 1973 lo sviluppo di laser elio-neon con stabilità spettrale molto ele-
vata e la possibilità di disporre di orologi al cesio estremamente precisi
hanno permesso di determinare il valore ($299792,4574 \pm 0,0012$) km/s,
ritenuto ancora oggi la misura più accurata dal *National Bureau of
Standards* degli Stati Uniti.

L'esperimento

Inizialmente Daniele Altan aveva proposto al suo studente alcune ipotesi di esperimento in cui erano presenti parti meccaniche in moto, ispirate agli esperimenti di Fizeau (disco rotante) e di Foucault (specchietto rotante). A causa di problemi tecnici, ritenuti quasi insormontabili con l'utilizzazione di soli materiali di recupero o a basso costo, la scelta è poi caduta su un metodo elettronico senza parti meccaniche in movimento basato sull'emissione e doppia ricezione di un fascio laser modulato.

Principio di funzionamento

Per il rilevamento della velocità della luce si impiega un fascio di luce laser modulato in ampiezza. Il fascio di luce viene prodotto da un generatore laser e l'intensità del fascio viene modulata con l'ausilio di un generatore di forme d'onda da banco.

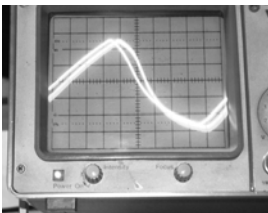


Una lamina di vetro è disposta in prossimità del generatore laser in modo tale da dividere il fascio in due parti. La parte deviata viene inviata a un primo fotodiodo (prossimale). La parte non deviata che è anche quella di maggiore intensità, prosegue il suo cammino fino a uno specchio posto a una distanza sufficientemente elevata.

Dopo essere stato riflesso dallo specchio, il fascio percorre un tratto di lunghezza uguale a quello precedente, fino a colpire un fotodiodo (distale), costruttivamente identico al fotodiodo prossimale. In prossimità del secondo fotodiodo è collocata una lente convessa necessaria per focalizzare il raggio laser sulla fotocellula, in modo tale da ottenere una intensità sufficiente per la sensibilità del fotodiodo. I due fotodiodi convertono i due segnali luminosi in segnali elettrici periodici. Questi vengono poi visualizzati con un oscilloscopio (si veda l'immagine che segue). Dalla misura del ritardo Δt tra i due segnali e dalla misura della distanza l del tratto percorso dal fascio laser due volte, si ottiene la misura indiretta della velocità della luce mediante la seguente semplice relazione $v = 2l / \Delta t$

È evidente che maggiore è il tratto l percorso dal fascio maggiore sarà il ritardo apprezzabile con l'oscilloscopio.

I segnali dei fotodiodi rilevati dall'oscilloscopio



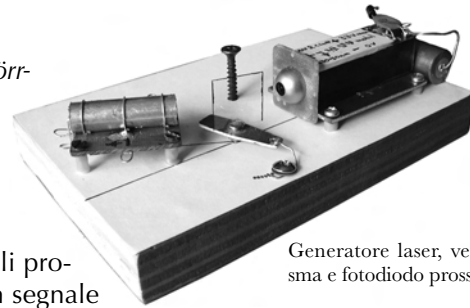
Generatore laser

È stato utilizzato un puntatore laser (modello *Dörr-Germany*), uno di quelli utilizzati nelle conferenze e reperibile al prezzo di pochi euro. Alimentato da due batterie stilo da 1,5 V, produce una luce rossa di lunghezza d'onda $\lambda = 630 \div 650 \text{ nm}$.

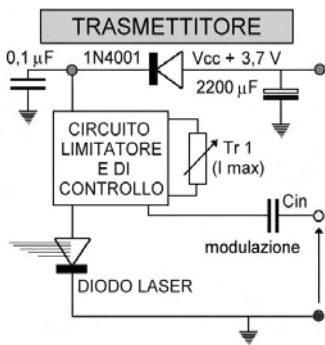
Per poter apprezzare il ritardo tra i due segnali prodotti dai fotodiodi è necessario disporre di un segnale modulante di periodo inferiore ai 5 μs , pari a una frequenza minima di 200 kHz.

Per la modulazione è stato utilizzato un generatore di funzioni d'onda con frequenza variabile tra 10 Hz e 2 MHz.

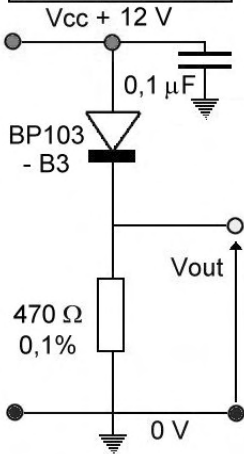
Dopo aver verificato che la modulazione d'ampiezza alle frequenze richieste non poteva essere effettuata agendo sulla tensione di alimentazione, lo studente, con l'aiuto del padre, hobbista elettronico, dopo aver aperto l'involucro del puntatore laser, ha rilevato lo schema elettronico di alimentazione e pilotaggio del diodo laser presente all'interno. L'analisi del circuito ha evidenziato la presenza di un ingresso di modulazione disaccoppiato dal condensatore C_{in} . Sono stati poi aggiunti un diodo di protezione 1N4001 e un condensatore da 2,2 μF portando la tensione di alimentazione intorno ai 3,7 V.



Generatore laser, vetrino-prisma e fotodiodo prossimale



RICEVITORE



Fotodiodi

Dopo una serie di prove con i diversi tipi di fotodiodi a disposizione, sono stati individuati i diodi BP103 B3 come quelli dotati del miglior compromesso tra sensibilità e tempo di risposta.²

I due fotodiodi sono stati collocati all'estremità di piccoli tubi di alluminio rivestiti internamente con adesivo opaco nero, in modo da schermare i segnali luminosi provenienti da altre fonti; inoltre, per ridurre al minimo i disturbi esterni, le prove sono state effettuate di notte.

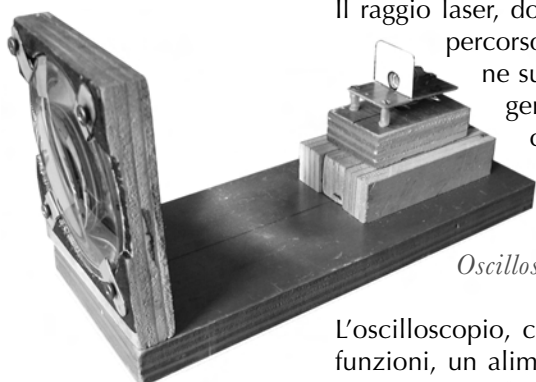
² Il tempo di risposta (*rise time*) del diodo BP103 è risultato accettabile per rilevare le modulazioni utilizzate nella prova.



Specchio riflettente

Come specchio riflettente è stato utilizzato un comune specchio dopo averlo fissato a una base in legno in modo da poter variare la sua inclinazione in tutte le direzioni. L'autore dell'esperimento aveva a disposizione uno specchio recuperato da un fotocopiatore, ritenuto uno degli specchi di migliore qualità tra i non professionali, da utilizzare eventualmente qualora lo specchio «casalingo» non fosse risultato adeguato.

Secondo ricevitore



Sistema ottico ricevitore

Il raggio laser, dopo aver attraversato il vetrino posto all'inizio del percorso, riduce la sua intensità e, in seguito alla riflessione sullo specchio, aumenta ulteriormente la sua divergenza. Esso necessita quindi di una lente convessa con posizione regolabile rispetto al fotodiode posto alla fine del percorso in modo da poter concentrare la luce su di esso.

Oscilloscopio

L'oscilloscopio, che svolge una funzione centrale, il generatore di funzioni, un alimentatore da banco e un multimetro per eventuali tarature sono gli unici strumenti di un certo rilievo necessari per l'esecuzione di questo esperimento. Essi, peraltro, fanno normalmente parte del corredo di laboratorio di un hobbista elettronico.

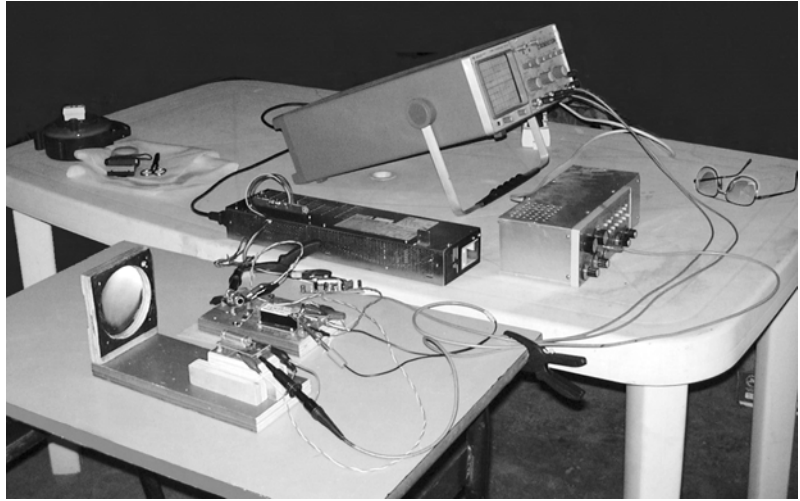
L'oscilloscopio utilizzato dallo studente, di proprietà del padre, è un classico oscilloscopio analogico con banda passante di 15 MHz. Attualmente si possono reperire a prezzi veramente accessibili oscilloscopi digitali con bande superiori ai 60 MHz.

Esecuzione

L'esperimento è stato effettuato in un primo momento nel corridoio di casa, dopo aver provveduto all'oscuramento. Ma, per il poco spazio a disposizione, è apparsa problematica l'eliminazione delle vibrazioni a causa dell'impossibilità di allestire un tavolo di lavoro stabile

In un secondo tempo si è optato per un luogo all'aperto, naturalmente di notte, in pratica il giardino di casa. In questo caso i problemi dovuti alle vibrazioni erano ridotti perché l'oscilloscopio, lo specchio riflettente e l'apparato trasmettente e ricevente erano stati collocati su tre diversi tavoli. Per contro, in questa seconda situazione, si è incontrata una certa difficoltà nell'operazione di puntamento, durata una buona ora, ed è risultata indispensabile la pre-

senza di due persone. Durante la fase di puntamento all'aperto si è toccata con mano l'esigenza di avere delle basi di appoggio molto stabili perché il solo passaggio nelle vicinanze di un automezzo o il movimento di una persona provocavano delle vibrazioni che rendevano impossibile la lettura dei segnali. Si è inoltre registrato qualche problema dovuto a un eccessivo riscaldamento del generatore laser durante la fase di puntamento a causa del tempo necessario e durante la fase di lettura vera e propria, perché la tensione di modulazione del generatore di funzioni veniva elevata da $2V_{pp}$ a quasi $5V_{pp}$ per rendere più leggibile il ritardo di propagazione della luce sullo schermo dell'oscilloscopio.³



Esecuzione dell'esperimento.

Risultati

Come già accennato, sono state effettuate due misurazioni: una nel corridoio di casa e l'altra nel giardino. La maggiore fonte di errore è risultata all'analisi dello studente il rilevamento del tempo di ritardo Δt attraverso la misura della distanza tra le creste delle due forme d'onda. Questo errore è stato apprezzato in un decimo di divisione, pari a circa 1 mm.

Tenendo conto che nella prima prova al valore di Δt era associata una distanza tra le due creste di appena 8 mm si può ritenere che tale misura fosse affetta da un errore percentuale superiore al 12%.

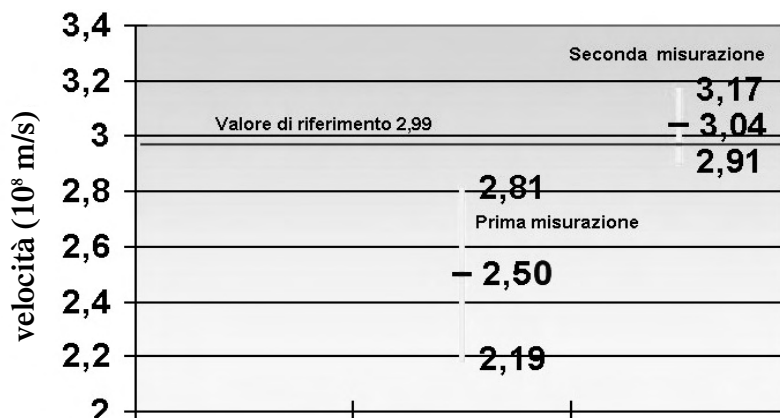
Durante la seconda prova, nonostante le difficoltà legate al puntamento, alle vibrazioni e alle fonti di luce esterne si è riusciti ad apprezzare una distanza tra le creste dei segnali pari 23 mm. Si riporta qui di seguito la valutazione della velocità della luce così come è stata effettuata dallo studente, trascurando l'errore dovuto alla misurazione delle distanze.

Misure $l = 35 \text{ m}$ $\Delta t = (0,23 \pm 0,01) \mu\text{s}$
 Velocità della luce $v = (3,04 \pm 0,13) 10^8 \text{ m/s}$

Nella tabella a pagina seguente è riportato il risultato ottenuto nelle due prove confrontato con il valore reale.

³ V_{pp} indica la tensione picco-picco.

Risultato delle misurazioni ottenute nelle due prove confrontato con il valore reale



Conclusioni

Si può ben immaginare la gioia e lo stato di eccitazione provati dal giovane e da suo padre quando, durante la seconda prova, hanno visto concretizzarsi lo sforzo di mesi di lavoro, di impegno e di applicazione. Leggendo la «tesina» preparata per l'Esame di Stato, da cui tra l'altro si è attinto a piene mani per la realizzazione di questo articolo, questo traspare in modo evidente, come testimonia lo stesso studente quando afferma: «man mano che passava il tempo ci siamo sempre più accorti della grandezza di ciò con cui avevamo a che fare: la velocità della luce. Trecento milioni di metri ogni secondo, detti così sono solo un numero, una cosa come un'altra; invece, dovendo aver a che fare direttamente con questo numero, ci si accorge che è proprio enorme, quasi "incommensurabile". Quando poi abbiamo affinato i sistemi usati e ottenuto risultati che si avvicinavano al vero $3 \cdot 10^8$ m/s, la nostra soddisfazione è salita allora a livelli superiori, sapendo che eravamo riusciti in qualcosa in cui non credevamo completamente».

Per ottenere questi risultati lo studente si è dovuto impegnare in un lavoro che ha richiesto energie, costanza e impegno come egli stesso evidenzia quando scrive che «il lavoro si è rivelato soprattutto di pazienza: provare, riprovare, costruire, migliorare, informarsi su materiali diversi, ordinarli, aspettare». È evidente che la fatica di questa esperienza è stata sostenuta grazie al rapporto con delle persone adulte, in questo caso il padre e l'insegnante, in grado di indicare un percorso e di sostenere il giovane nel suo impegno. ❖

INDICAZIONI BIBLIOGRAFICHE

R.P. Feynman, *La Fisica di Feynman*, vol.1, Zanichelli, Bologna 2001.

L. Mazzoni, *La luce, un percorso didattico*, in: *Emmeciquadro*, n. 27, agosto 2006.

F. Bevilacqua e M.G. Ianniello, *L'ottica dalle origini all'inizio del 700*, Loescher, Torino 1982.