E' SOLO QUESTIONE D'INTERFERENZA

Misura dell'indice di rifrazione di un prisma ottico utilizzando l'interferometro di Michelson

Bellotto Lucrezia, Buffolini Andrea,
Colonello Giovanni, De Dominicis Davide, Franti Alessandro

July 17, 2020

Abstract

The aim of this paper is to report a scientific experiment, linked to optical engineering, as part of the "PaGES5" project promoted by Cerci-Eric and held in the Elettra Sincrotone LABS in Trieste, Italy.

We were led by the LASER team tech support of FERMI (Free Electron Laser) as experts in the synchronization of the optical clock heart of the operating principle of FERMI. Our goal was to check the quality of a UV Fused Silica by measuring its refractive index. Michelson's interferometer was the ideal set up to make our calculation thanks to the transparency of the prism. Starting off from a plain working table, we built up the whole system.

After checking the efficiency and the correct working of our equipment we made some interesting considerations about the physical laws that ruled our experimental situation and tried to determine the refractive index of our prism.

Interferometro di Michelson

L'interferenza è un fenomeno che coinvolge più onde che, propagandosi nel vuoto o in un mezzo, si trovano a sovrapporsi. La sovrapposizione di due o più onde dà luogo ad un fenomeno costruttivo, distruttivo o una combinazione lineare di entrambi.
Un dispositivo interferenziale è uno strumento che quantifica la radiazione elettromagnetica, proveniente da due o più sorgenti, nel momento in cui avviene il fenomeno dell'interferenza.
Di tutti i dispositivi interferenziali progettati nel corso della storia, l'interferometro di Michelson è uno dei più ingegnosi e utili per misure di precisione in diverse branche delle scienze pure e applicate. Esso venne ideato per dimostrare l'esistenza dell'etere e da allora ha trovato numerose applicazioni: per esempio in geofisica (studio delle trasformazioni della crosta terrestre), fisica delle interazioni fondamentali (esperimento VIRGO, che ha rivelato l'esistenza delle onde gravitazionali), cristallografia (determinazione del passo reticolare) e tecnologia delle comunicazioni (sistema satellitare GPS).
I primi utilizzi dell'interferometro di Michelson si ebbero nel:

- 1887 esperimento di Michelson-Morley per lo studio del vento d'etere;

Figure 1: dall'articolo di Michelson del 1881

- 1891 primo studio sistematico della struttura fine delle righe spettrali e della loro forma;
- 1895 primo confronto diretto tra la lunghezza d'onda delle righe spettrali e la lunghezza del metro campione.

Oggi questo tipo di interferometro è in grado di misurare spostamenti di oggetti materiali dell'ordine di qualche nanometro utilizzando come sorgente un laser. Risultati ancora più sorprendenti si ottengono con un interferometro a raggi X.
L'interferometro di Michelson può essere utilizzato anche per valutare la qualità di elementi ottici.
FERMI è un acceleratore di quarta generazione. La macchina si compone di un lungo tratto rettilineo in cui viene immesso un fascio di elettroni. Accelerando e modificando ripetutamente il moto degli elettroni, questi acquisiscono una grande quantità di energia che viene poi liberata sotto forma di brevi ed intensi impulsi di luce. All'interno dell'acceleratore si trova un laser, che, emettendo impulsi luminosi colpisce le cariche, eccitando gli elettroni e inducendoli ad emettere fotoni. La sincronizzazione dunque, tra l'impulso laser e il movimento degli elettroni è fondamentale. L'orologio che scandisce gli intervalli di tempo tra gli impulsi laser ha una precisione nell'ordine dei femtosecondi ($10^{-15}\,s$). Per modificare il tempo che intercorre tra le emissioni luminose del laser è necessario modificare la distanza presente tra due specchi posti all'interno del sistema. Il loro avvicinamento o allontanamento, infatti, rende possibile modificare l'intervallo di tempo che intercorre tra gli impulsi del

laser. A causa della necessità di ottenere correzioni agli intervalli di tempo nell'ordine dei femtosecondi, gli spostamenti devono essere pressoché impercettibili. Per fare ciò si utilizza all'interno del meccanismo di movimento di uno dei due specchi un materiale noto come "piezo" elettrico che, sottoposto ad una differenza di potenziale, modifica le sue dimensioni, dilatandosi o restringendosi.

Funzionamento dell'interferometro di Michelson

Il principio di funzionamento è semplice: una sorgente produce luce coerente, ovvero radiazione elettromagnetica. Dopo un certo percorso la luce viene separata in due fasci distinti tra loro ortogonali, uguali in intensità, mediante un *beam splitter* (divisore di fascio) come, ad esempio, una lastra piana parallela con la superficie debolmente metalizzata che funge da specchio semiriflettente.
Dopo aver percorso una certa distanza entrambi i fasci vengono riflessi da due specchi. Ritornano così al *beam splitter* che, combina parti di fasci insieme, li dirige verso uno schermo. Qui, sovrapponendosi, generano delle frange di interferenza che, in base alla *differenza di cammino ottico*, presenteranno dei massimi e dei minimi.
Tenendo fisso un cammino ottico lungo un braccio
dell'interferometro, lo schermo dell'apparato diventerà estremamente sensibile a variazioni dell'altro percorso del laser e a vibrazioni del suo specchio mostrando uno spostamento delle frange di interferenza.
Se si utilizza come sorgente un *LASER* (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) si ha a disposizione una luce coerente, monocromatica ad una determinata lunghezza d'onda.

Figure 2: Schema dell'interferometro

Utilizzo dell'interferometro di Michelson nella caratterizzazione di un prisma ottico

Il fascio emesso dalla sorgente laser incontra una lente negativa, necessaria per far divergere leggermente il fascio, e viene inviato all'ingresso dell'interferometro, che è quindi percorso da onde sferiche.
In uno dei bracci viene posto l'elemento ottico da analizzare: nel nostro caso un prisma triangolare (*UV Fused Silica*) con angolo al vertice di 6.3°. La figura d'interferenza si forma per la differenza di *cammino ottico* percorso dal fascio nei due bracci dell'interferometro dovuto alla differenza di lunghezza tra i due bracci e/o alla rifrazione causata dalla presenza del prisma lungo uno dei due bracci.

Nel primo caso, considerando che la propagazione del fascio avvenga nell'aria e assunto indice di rifrazione dell'aria pari a 1, il numero N di frange, la differenza Δl di lunghezza tra i due bracci e la lunghezza d'onda λ del fascio sono legati dalle relazione

$$2\Delta l = N\lambda$$

Nel secondo caso la variazione $\Delta L = N\lambda$ del *cammino ottico* dipende dalle caratteristiche geometriche e chimico-fisiche del prisma e quindi dall'angolo al vertice α del prisma e dall'indice n di rifrazione del materiale ottico. Vale allora la relazione

$$2(n-1)s = N\lambda$$

che permette di ricavare l'indice di rifrazione del prisma, essendo s lo spessore del mezzo rifrangente che viene attraversato, variabile se il prisma viene mosso rispetto una posizione iniziale (vedi paragrafo Cammino ottico e frange d'interferenza).
La forma circolare delle frange di interferenza, che si raccolgono sullo schermo, dipende dalla divergenza del fascio. Sullo schermo si sovrappongono i due fasci che si sono ricongiunti nel beam splitter e su questa superficie è costante la differenza di fase delle radiazioni, cioè i fasci sono coerenti. I fasci riflessi dagli specchi possono essere considerati come se fossero emessi da due sorgenti virtuali, in approssimazione puntiformi, e quindi i fronti d'onda di sovrapposizione sono iperboloidi di rotazione a due falde. Le figure di interferenza, che si raccolgono sullo schermo, sono le sezioni piane degli iperboloidi e quindi sono curve coniche.
I due fasci che percorrono i bracci dell'interferometro di Michelson sono tra loro *coerenti* perché prodotti dalla stessa sorgente entro il suo tempo di coerenza.
In ottica si definisce *coerenza* la proprietà di un'onda elettromagnetica di mantenere una certa relazione di fase con se stessa durante la propagazione. Macroscopicamente questa proprietà è visibile nel fenomeno dell'interferenza, dove più fasci di luce coerenti, come quelli prodotti da un laser, sovrapponendosi, creano una figura di interferenza.
La coerenza può essere considerata sia da un punto di vista *temporale* che da un punto di vista *spaziale*.
Si è in presenza di *coerenza spaziale* quando la differenza di fase tra due punti distinti di un fronte d'onda è costante nel tempo.
Si è in presenza di *coerenza temporale* quando la differenza di fase di un punto fissato di un fronte d'onda misurata in istanti distinti, si mantiene costante.
Un fascio di luce coerente corrisponde ad un emissione di fotoni tutti in fase e nella stessa direzione. Quindi utilizzando sorgenti laser è possibile avere, anche su grandi distanze, fasci unidirezionali e collimati.
Sullo schermo dell'apparato sperimentale le frange d'interferenza sono visibili se la differenza di cammino della luce nei due bracci dell'interferometro è minore della *lunghezza di coerenza* della luce utilizzata, dove per lunghezza di coerenza s'intende il cammino fatto dalla luce nel vuoto in un intervallo pari al *tempo di coerenza* $\Delta\tau$.
Il tempo di coerenza rappresenta la durata media delle oscillazioni perfettamente sinusoidali dell'onda elettromagnetica ed è legato alla monocromaticità della radiazione dalla relazione di indeterminazione $\Delta\tau\Delta\nu \simeq 1$.
La lunghezza di coerenza può essere valutata con l'interferometro di Michelson traslando lungo il braccio dell'interferometro lo specchio mobile ed osservando la comparsa/scomparsa della figura d'interferenza sullo schermo. Portando lo specchio mobile oltre queste posizioni limite si osserva un'illuminazione uniforme all'uscita dall'interferometro e si rende quindi necessario resettare il set up dell'apparato sperimentale.
Le sorgenti laser sono approssimativamente monocromatiche, coerenti sia nel tempo che nello spazio, monodirezionali, altamente brillanti e intense. Tutto ciò permette in modo semplice di visualizzare figure d'interferenza e utilizzarle, come abbiamo fatto nel LASER lab di FERMI, per la caratterizzazione di elementi ottici con altissima precisione.

Esperimento: misura dell'indice di rifrazione di un prisma ottico

Obiettivo

Misurare l'indice di rifrazione n di un prisma ottico utilizzando un interferometro di Michelson.

Riferimenti teorici

La rifrazione in un prisma ottico

Quando un raggio luminoso devia dalla sua traiettoria passando da un mezzo ad un altro, con caratteristiche ottiche diverse, si verifica il fenomeno della rifrazione. Le leggi della rifrazione affermano che:

- **prima legge**: il raggio incidente, il raggio rifratto e la normale alla superficie rifrangente nel punto di incidenza giacciono sullo stesso piano;
- **seconda legge o di Snell**: è costante il rapporto tra il seno dell'angolo i di incidenza, cioè l'angolo che si forma tra il raggio incidente e la normale alla superficie di separazione nel punto di incidenza, e il seno dell'angolo r di rifrazione, cioè l'angolo che si forma tra la normale e il raggio rifratto.
  Questo rapporto è uguale al rapporto tra l'indice di rifrazione n_2 del secondo mezzo e quello del primo mezzo n_1
  $$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{n_2}{n_1}$$

Assumiamo che il prisma ottico, di indice di rifrazione n e angolo al vertice α, sia immerso in aria con $n_{aria} \approx 1$. Il fenomeno è schematizzato in figura 3 e si può quindi osservare quanto segue:

Figure 3: Rifrazione nel prisma

- Nel triangolo AIJ
  $$\widehat{A} + \widehat{I} + \widehat{J} = 180°$$
  $$\alpha + 90° - r + 90° - j = 180°$$
  da cui $j = \alpha - r$
- Per la legge di Snell la prima rifrazione in I è descritta da
  $$\frac{\sin i}{\sin r} = n$$

- Per la legge di Snell la seconda rifrazione in J è descritta da

$$\frac{\sin j}{\sin \beta} = \frac{1}{n}$$

Allora si deduce

$$\sin \beta = n \sin j = \frac{\sin i}{\sin r} \sin (\alpha - r)$$

La rifrazione nel prisma ottico dell'esperimento

Nell'esperimento il prisma ottico è disposto lungo un braccio in modo che il fascio incida la prima faccia lungo la normale, quindi in I non c'è rifrazione. Il fascio entra nel prisma e incide la seconda faccia in J con un angolo $j = \alpha$.

Figure 4: Prisma esperimento

Si deduce quindi

$$\sin \beta = n \sin \alpha$$

Se l'angolo di divergenza del prisma è di circa 6.3° e se ipotizziamo come valore dell'indice di rifrazione del prisma $n \simeq 1.5$, possiamo valutare lo scostamento $\beta - \alpha$ del fascio all'uscita dal prisma rispetto la direzione del braccio dell'interferometro. Si ha

$$\beta = \sin^{-1} (1.5 \sin 6.3°) \simeq 9.5° \Rightarrow \beta - \alpha \simeq 3.2°$$

La riflessione su uno specchio piano

Quando un raggio luminoso incontra una superficie che delimita il mezzo in cui la luce si propaga e devia dalla sua traiettoria rimanendo nello stesso mezzo, si verifica il fenomeno della riflessione. Le leggi della riflessione affermano che:

- **prima legge**: il raggio incidente, il raggio riflesso e la normale alla superficie riflettente nel punto di incidenza giacciono sullo stesso piano;
- **seconda legge**: l'angolo i di incidenza, cioè l'angolo che si forma tra il raggio incidente e la normale alla superficie riflettente nel punto di incidenza, è congruente all'angolo r di riflessione, cioè l'angolo che si forma tra il raggio riflesso e la normale

La riflessione nell'esperimento

Il fascio, dopo aver attraversato il prisma, devia poco dalla direzione data dal braccio dell'interferometro, come discusso sopra. A questo punto il fascio prosegue verso lo specchio (vedi figura 5), viene riflesso e si dirige nuovamente verso il prisma.

Osservando il *cammino geometrico* del fascio, con considerazioni geometriche e applicando le leggi della riflessione e della rifrazione, si deduce che il fascio incide la superficie rifrangente

Figure 5: Riflessione

del prisma con un angolo pari a $2\alpha - \beta$, viene rifratto con angolo pari ad α e quindi, non subendo rifrazione sulla seconda faccia del prisma, riemerge in aria in direzione del braccio dell'interferometro. Nell'esecuzione dell'esperimento il set up è stato allineato con lo specchio ruotato in modo che il percorso di ritorno del raggio riflesso coincidesse con il percorso di andata.

Cammino ottico e frange d'interferenza

Si definisce *cammino ottico* L la distanza percorsa dalla luce nel vuoto con velocità c nello stesso tempo Δt impiegato dalla luce a percorrere, con velocità v, un tratto d, detto *percorso geometrico*, in un mezzo di indice di rifrazione n, dove $n := \frac{c}{v}$. Allora:

$$L = c\Delta t = c \cdot \frac{d}{v} = nd$$

Se il cammino ottico subisce una variazione ΔL e sullo schermo si contano N frange, allora

$$2\Delta L = N\lambda$$

perché il fascio percorre due volte, in andata e in ritorno, il braccio dell'interferometro. E' possibile anche esprimere la variazione di cammino ottico in termini di variazione ΔC di cicli dell'onda, dove il numero C di cicli è dato dallo spazio percorso dalla luce rapportato alla lunghezza d'onda. Quindi, in corrispondenza di una figura d'interferenza e cioè in corrispondenza ad una variazione ΔL del cammino ottico, la variazione ΔC di cicli dell'onda sarà pari a metà del numero N di frange.
E' necessario però valutare la variazione di cammino ottico quando il prisma viene traslato di un tratto Δx, lungo la direzione perpendicolare al braccio dell'interferometro (vedi figura 6).

Figure 6: Movimento del prisma ed evidenza della variazione del cammino ottico

Considerando la prima posizione del prisma, quando il suo vertice si trova in A (vedi 6), valutiamo il cammino ottico:

$$L_1 = \overline{RS}n$$

In seguito trasliamo di un tratto $\Delta x := \overline{AA'}$ con un movimento ortogonale al braccio dell'interferometro, per esempio estraendo il prisma, e valutiamo il nuovo cammino ottico. Con il prisma nella nuova posizione, cioè con il vertice in A', i fascio percorre il tratto $\overline{RR'}$ in aria, incide in *R'* sul prisma con angolo d'incidenza pari a $2\alpha - \beta$ ed è rifratto nel prisma con un angolo di rifrazione pari ad α. Il cammino ottico in questa posizione del prisma è dato da

$$L_2 = \overline{RR'}n_{aria} + \overline{R'S'}n_{prisma}$$

Essendo $n_{aria} \approx 1$, la variazione di cammino è

$$\Delta L = L_2 - L_1 = \overline{RR'} + \overline{R'S'}n - \overline{RS}n$$

Poiché, come valutato sopra, $\beta - \alpha \simeq 3°$, è possibile considerare

$$\overline{RR'} \simeq \overline{RH} = \overline{AA'}\tan\alpha \quad \text{e} \quad \overline{R'S'} \simeq \overline{HS}$$

Figure 7: Valutazione della variazione del cammino ottico

Allora la variazione di cammino ottico è

$$|\Delta L| = (n-1)\,|\Delta x|\tan\alpha$$

dove $s = |\Delta x|\tan\alpha$ è lo spessore del materiale che viene attraversato in più o in meno. Ricordando che $2\Delta L = N\lambda$ ed esplicitando la relazione per l'indice di rifrazione, si ottiene la sua dipendenza dal numero N di frange

$$n = 1 + \frac{N\lambda}{2\Delta x\tan\alpha}$$

Per valutare quindi l'indice di rifrazione del prisma ottico si dovrà misurare Δx e contare le frange.

Il micrometro

Il micrometro è uno strumento di misura lineare, il cui funzionamento è basato su di una vite. In questo caso, la vite è micrometrica e ciò consente una sensibilità maggiore, che può arrivare ai centesimi di millimetro (decine di micrometri), da cui il nome dello strumento. Prendiamo in considerazione la struttura di un micrometro per esterni. Esso si compone di:

- un'asta mobile, fissata alla vite micrometrica, che si allontana o avvicina dall'incudine fissa, in maniera da considerare la misura che intercorre tra i due componenti;
- una bussola graduata, sulla quale sono segnate delle tacche, che indicano uno spostamento dell'asta mobile pari al passo della vite (un giro completo di essa);

- un tamburo graduato, sul quale sono segnate delle tacche, distanziate le une dalle altre di una misura fissata. Ad esempio, sul bordo del tamburo possono esserci 50 tacche; ognuna di esse indica 1/50 del passo della vite. Se il passo della vite è pari a $0.5\,mm$, allora ognuna di queste tacche indica una misura pari a $0.01\,mm$.

Figure 8: Schema di funzionamento di un micrometro per esterni

Nell'esperimento, per misurare lo spostamento del prisma, abbiamo utilizzato traslatore manuale che presenta lo stesso dispositivo di lettura impiegato nei micrometri per esterni.

Figure 9: Traslatore con micrometro https://www.thorlabs.com/search/thorsearch.cfm?search=traslator

Materiali

Prima Parte dell'Esperimento

- 1 Laser He-Ne $\lambda = 632.8\,nm$
- 3 Specchi metallici
- 1 Beam Splitter metallico
- 1 Schermo bianco
- 1 Lente negativa
- 3 Mount cinematici
- 2 Traslatori con micrometro
- Prisma triangolare di angolo al vertice 6.3° fatto di UV Fuzed silica

Procedimento

Allestimento apparato sperimentale

Fissata la sorgente laser He-Ne, già predisposta sul piano ottico, posizioniamo uno specchio, che ci consenta di deviare il fascio luminoso e allestire l'apparato in una zona più isolata del piano. Inseriamo il beam splitter a 45° rispetto al fascio. Sui bracci in cui esso divide

Figure 10: Schema dell’interferometro

il fascio laser, posizioniamo due ulteriori specchi, perpendicolarmente ai due fasci. Uno specchio è posizionato sul traslatore e gli consente di essere avvicinato o allontanato dal beam splitter. Al termine del quarto braccio posizioniamo lo schermo. Tra il beam splitter e lo schermo posizioniamo la lente in modo che possa divergere il fascio e quindi rendere più facilmente osservabile la figura d’interferenza tra due fasci luminosi.

Figure 11: Allestimento dell’interferometro

Verifica set up

Accesa la sorgente, seguiamo il percorso del fascio sui singoli bracci dell’interferometro interponendo dei cartoncini bianchi per visualizzare lo spot del fascio. In questo modo verifichiamo che i fasci che si generano nel beam splitter incidano sugli specchi e i fasci riflessi si ricongiungano nel beam splitter. Agendo sui supporti cinematici, che permettono una rotazione dello specchio sia rispetto al piano verticale sia rispetto a quello orizzontale, correggiamo l’allineamento dei due spot sullo schermo fino ad osservare il fenomeno dell’interferenza. Assemblando l’interferometro abbiamo fatto in modo che la lunghezza dei due bracci fosse uguale. A questo punto valutiamo la lunghezza di coerenza: agiamo sul traslatore,avvicinando e allontanando lo specchio mobile visto che si continuano ad osservare figure d’interferenza, il laser ha una lunghezza di coerenza maggiore del doppio della corsa del traslatore.

Misura

Inseriamo il prisma in un braccio dell’interferometro, tra il beam splitter e lo specchio, montandolo sul secondo traslatore con micrometro e avendo cura di allineare una faccia del prisma perpendicolarmente al braccio dell’interferometro. Aggiustiamo le inclinazioni degli specchi, agendo sui supporti cinematici, in modo da osservare sullo schermo l’interferenza. Avendo posto il prisma sul traslatore è possibile spostarlo e con il micrometro misurare lo

spostamento Δx. Per ogni spostamento contiamo il numero N di frange, avendo concordato di contare le frange luminose.

Raccolta dati

i	Δx $(10^{-2}\,mm)$	N
1	0	0
2	16	30
3	30	60
4	46	90
5	60	128
6	76	150
7	90	180
8	106	210
9	120	240

Table 1: Raccolta dati

L'errore su Δx è la sensibilità del micrometro cioè $0,01\,mm$.

Elaborazione dati

$$n = 1 + \frac{N\lambda}{2 \cdot \Delta x \tan\alpha}$$

con $\lambda = 632.8\,nm$ e $\alpha = 6.3°$

i	n
1	-
2	1.54
3	1,57
4	1,56
5	1,57
6	1,57
7	1,57
8	1,57
9	1,57

Table 2: Indice di rifrazione

L'errore su n, indice di rifrazione, è stato valutato con lo scarto quadratico medio e risulta pari a 0.02.
La misura dell'indice di rifrazione è

$$n = 1.57 \pm 0.02$$

Tracciamo il grafico con i dati raccolti e, facendo il fit, otteniamo l'equazione della retta

$$y = 1.9997x - 0.869$$

Noto il coefficiente angolare $m = 1.9997 \times 10^5\ frange/metro$ esprimiamo l'indice di rifrazione dalla relazione

$$n = 1 + \frac{m\lambda}{2\tan\alpha} \simeq 1.57$$

Figure 12: Elaborazione grafica

Osservazioni e conclusioni

Il risultato da noi ottenuto è 1.57 con un errore dell’1%, ma non corrisponde all’ipotesi fatta. Il risultato della misura infatti si scosta del 7% dal valore 1.5 indicato dal costruttore e dagli esperti.

Δx (10^(-2) mm)	errore Δx (mm)	N (numero frange)	lambda (nm)	alpha (°)	n=1+ (NλΔx tan α)	Valore medio di n	Scarto quadratico medio Δn	Scarto quadratico medio Δn percentuale
0		0			-			
16		30			1,54E+00			$\Delta n = \sqrt{\sum_{i=2}^{i=9} \frac{(n_i - \bar{n})^2}{8}} =$
30		60			1,57E+00			
46		90			1,56E+00			
60	0,01	120	632,8	6,3	1,57E+00	1,57E+00	1,15E-02	1%
76		150			1,57E+00			
90		180			1,57E+00			
106		210			1,57E+00			
120		240			1,57E+00			

Figure 13: Elaborazione su foglio di calcolo

Dobbiamo quindi concludere, anche sentiti i nostri supervisori, di aver commesso un errore sistematico forse nell’allestimento dell’apparato sperimentale o forse nella lettura dello spostamento Δx o nel conteggio delle frange.
Non abbiamo però avuto l’opportunità di rifare l’esperimento. Infatti l’unico modo per raggiungere il nostro obiettivo sarebbe rivedere il set up e ripetere la misura.

Bibliography

[1] GRUPPO VII: Alessio Federico, Bracco Luca, Franco Andrea, Midolo Leonardo, Pedrazzo Francesco, *Laboratorio di Tecnologie Avanzate a.a. 2005/2006*, capitolo 1, Università degli Studi di Torino

[2] Albert Abraham Michelson, *The relative motion of the Earth and the Luminiferous ether*, American Journal of Science, 1881, 22: 120–129

[3] Paolo Sigalotti, *How to use a Michelson Interferometer to improve Laser Synchronization at FERMI*, Laser Laboratory Elettra Sincrotrone Trieste, PaGES5 Evento1 – Formazione degli insegnanti

[4] Paolo Sigalotti, *Note*, PaGES4

[5] Biancalana Andrea, *Interferometro di Michelson*, Liceo Majorana Orvieto, settembre 2002

[6] I. H. Malitson, "Interspecimen Comparison of the Refractive Index of Fused Silica" J. Opt. Soc. Am. 55, 1205-1209 (1965) consultato tramite https://refractiveindex.info/?shelf=glassbook=fused$_s ilicapage = Malitson$

Ringraziamenti

Referente | Stefania Negri

Electromagnetism Group Laser Lab | Militcho Boyanov Danailov, Paolo Sigalotti