

## O9 - L'INTERFERENZA

Nell'articolo precedente, "La Diffrazione", abbiamo esaminato il comportamento di un fascio di luce o, per meglio dire, di un'onda ottica, **coerente**; potremmo dire: di un'onda con una forma geometrica definita (sferica, ad es.), che proviene da una sorgente sufficientemente "piccola". Se la sorgente è estesa, incoerente, produce un numero enorme di onde elementari i cui effetti si sommano caoticamente ed impediscono di osservare gli effetti generati da ogni singola onda. E gli effetti descritti a proposito della diffrazione sono stati evidenziati appunto con un piccolo Laser, che è una sorgente coerente.

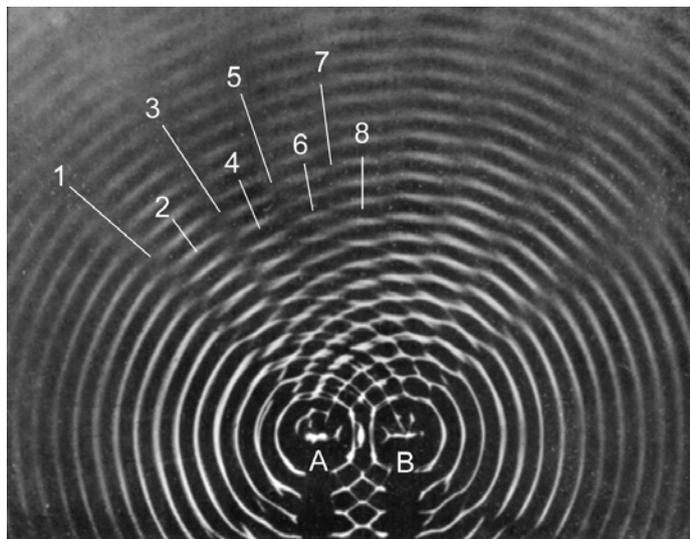
Ora vogliamo capire cosa avviene quando s'incontrano due o più onde elementari, coerenti fra loro (coerenti anche nel tempo, nel senso che hanno la stessa frequenza, ed i loro rapporti di fase rimangono costanti nel tempo e nello spazio).

La cosa più semplice da fare per ottenere onde coerenti fra loro è scomporre una singola onda in due o più onde le quali, per avere un'origine comune, saranno fra loro in rapporti temporali e spaziali costanti. Vedremo come ciò è possibile e, sempre nello spirito dei nostri discorsi, illustreremo cosa si può fare con mezzi semplici ed economici.

Intanto dobbiamo chiarire il concetto di **interferenza**, servendoci di onde non ottiche.

Fig. 125

Fotografia dall'alto di un "ondoscopio" che mette in evidenza le onde formate alla superficie di una bacinella d'acqua; i sistemi di onde sono due e sincroni ("coerenti") poiché sono formati da due punte solidali (A e B) che vibrano verticalmente e toccano ritmicamente la superficie dell'acqua. Il tipo di illuminazione utilizzato rivela come linee chiare le creste delle onde ed i punti in cui esse si sovrappongono, vale a dire interferiscono. Lungo le linee segnate con numeri pari le due onde si sovrappongono in fase (cresta con cresta) ed i loro effetti si sommano (e le linee appaiono più chiare; è questa l'interferenza "positiva"); lungo le linee dispari, le onde s'incontrano in opposizione di fase (una cresta con un avvallamento) ed i loro effetti si sottraggono (e le linee sono più scure = interferenza "negativa").



In fig. 125 si vede una fotografia della superficie di una bacinella d'acqua, illuminata con una piccola lampada, il cui riflesso mette in evidenza le increspature della superficie, ovvero le onde. Nella misura in cui le onde in un liquido sono paragonabili alle onde elettromagnetiche ed ottiche (si tratta pur sempre di onde trasversali), si può dire che sulla superficie del liquido si trovano due sorgenti coerenti, che oscillano colla stessa frequenza e la stessa fase (due punte vibranti all'unisono, A e B): due onde di pari frequenza sono in fase, quando la cresta positiva di una incontra sempre quella dell'altra. Da A e B si generano quindi due sistemi di onde i cui effetti si sovrappongono, vale a dire "interferiscono". La disposizione delle creste delle onde (linee chiare) mostra gli spazi in cui le onde interferiscono positivamente (i loro effetti si sommano). Negli spazi ove le due onde giungono in opposizione di fase, gli effetti si sottraggono (direzioni in indicate da numeri dispari: la cresta di un'onda s'incontra con avvallamento dell'altra).

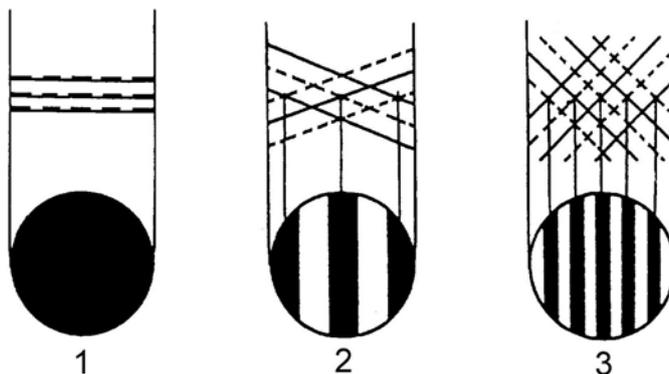
Ecco il mistero dell'interferenza: la sovrapposizione di due onde può dare effetto nullo. Due sorgenti di luce possono produrre buio: è solo questione di fase.

Nella figura seguente è uno schema d'interferenza: nella fascia alta della figura si vede la sezione di due sistemi di onde, parallele in (1), inclinate fra loro in (2) e (3); creste positive a linea intera, creste negative a linea tratteggiata. L'incontro di due creste dello stesso segno crea una "frangia" chiara (campi visuali nei cerchi in basso), una positiva con una negativa crea una frangia scura. L'inclinazione reciproca fra i due sistemi di onde determina il "passo" delle

frange; se le onde sono parallele (come in 1), le frange hanno larghezza infinita ed il campo avrà intensità uniforme. L'insieme delle frange si chiama **interferogramma**.

Fig. 126

Le due onde che originano dai punti A e B della figura precedente sono inclinate l'una rispetto all'altra poiché provengono da sorgenti non coincidenti. In tal modo le creste (per es.) positive di un'onda (linee intere, in alto qui a destra), dove s'incrociano con le positive dell'altra, creano un'interferenza positiva (fascia chiara nel cerchio inferiore); dove invece una cresta positiva incontra una negativa (linee tratteggiate), si ha interferenza negativa (fascia scura). Se l'inclinazione fra i due sistemi di onde è maggiore (vedi 3), le linee d'interferenza s'infittiscono. Se le onde sono parallele (come in 1), il campo mostra luminosità uniforme (maggiore o minore, secondo il rapporto di fase fra le due onde).



Per **interferenza** s'intende dunque la sovrapposizione di due vettori (due grandezze; per es. forme d'energia aventi una direzione definita, come le forze), che nel caso nostro sono due campi elettromagnetici, o due "raggi" di luce. Ogni onda produce un effetto che si somma con quello dell'altra, purché le due onde si sovrappongano nella stessa porzione di spazio. Se le due onde, i due vettori, sono orientate nella stessa direzione, i loro effetti si sommano e l'interferenza si dice "positiva"; se sono orientate in direzione opposta, gli effetti si sottraggono, il vettore "risultante" è più piccolo del maggiore dei due "componenti" e l'interferenza è "negativa".

Facendo interferire, cioè sovrapporre nello stesso spazio, due onde ottiche, si può percepire un effetto stabile se le due onde interferenti sono geometricamente definite (se nascono da sorgenti assai piccole o molto lontane {e si avranno onde sferiche o piane}) e rimangono stabilmente in un costante rapporto di fase: le "creste" positive, per es., dovranno sempre incontrarsi con creste positive e viceversa. Quest'ultima condizione esige che le due onde abbiano la stessa lunghezza d'onda.

Uno dei mezzi per avere una tale coppia di onde coerenti consiste nel realizzare due forellini assai vicini (meglio usare **due fenditure parallele** per disporre di maggiore intensità) e nell'illuminarli con una sorgente assai piccola, e quindi in sé stessa coerente. Nel nostro caso, si può ricavare la sorgente "piccola" da un forellino o una fenditura fortemente illuminati, utilizzando la solita lampadina da auto ed una lente d'ingrandimento, come illustrato nella fig. 98, articolo O7.

Però, come abbiamo fatto per realizzare i fenomeni di diffrazione, conviene utilizzare un piccolo Laser "puntatore", a stato solido, reperibile sulle bancarelle per pochi € (vedi le figg. 107 e 108, in O8). Col fascio Laser si può illuminare direttamente la doppia fenditura, senza lente interposta.

La doppia fenditura si può realizzare col metodo usato per la fenditura singola (Fig. 127 oppure Fig. 113, F1 in O8): su un vetrino porta-oggetti da microscopio si incollano due pezzi di lametta da barba, filo contro filo, lasciando però fra di loro una fessura di 0,4 - 1,0 mm<sup>61</sup>. In mezzo a questa fessura si deve però incollare un corpo allungato a lati paralleli, in modo da ricavare la coppia di fessure parallele; si può tentare con una strisciolina ricavata da un foglio di alluminio per alimenti ma, per facilitare l'osservazione dell'interferenza, occorre che questa strisciolina abbia una larghezza inferiore ad 1 mm. Più semplice è ricorrere ad uno spillo, possibilmente di diametro non superiore a 0,5 mm (vanno bene quelli da insetti). Fra la strisciolina d'alluminio o lo spillo ed i due pezzi di lametta devono rimanere le due fenditure, con una larghezza ognuna di circa 0,1 mm.

A questo punto, osserviamo cosa accade quando un fascio collimato<sup>62</sup>, come quello prodotto dal nostro puntatore Laser, incide sulla "doppia fenditura di Young" (vedi la nota 63).

Nella fig. 128 è schematizzato un fascio parallelo proveniente dal basso; solo due strette

<sup>61</sup> I vetrini da microscopio e l'obbiettivo sotto citato si trovano come indicato in O8 (nota 57, pag. 62).

<sup>62</sup> In ottica, si chiama "collimato" un fascio costituito da raggi ragionevolmente paralleli; tanto vale parlare di un'onda piana od anche sferica, ma con raggio di curvatura molto grande. Dunque, un'onda coerente generata da una sorgente piccola e lontana. Si dice anche "cammino telecentrico" (con centro a grande distanza).

porzioni di esso possono attraversare uno schermo opaco, in corrispondenza delle due fenditure parallele A e B. Per quanto detto nell'articolo precedente, da ognuna delle fessure non emerge un fascio geometricamente definito, ma un'onda con un andamento fotometrico a "frange", illustrato nelle fig. 106 e 117 (O8). Ognuna delle due onde ha globalmente una forma cilindrica e l'asse dei due cilindri risiede nelle fessure A e B. Nella fig. 128, le sezioni di questi cilindri apparirebbero come semicerchi con il centro in A e B.

Ora consideriamo cosa accade nello spazio al di sopra dello schermo, sopra la linea "Ret" nella figura. Prendiamo in esame le direzioni (parallele) AO e BO'.

Fig. 127

Doppia fenditura di Young realizzata con due pezzi di lametta da barba ed una strisciolina di foglio d'alluminio, il tutto incollato su un vetrino da microscopio (attenzione che la colla non invada le fenditure!).

Poiché è difficile realizzare una strisciolina di larghezza inferiore ad 1 mm, conviene sostituirla con un sottile spillo o con un filo metallico. Va bene uno spillo da insetti del numero 00 ( $\varnothing = 0,3$  mm) oppure un filo di rame, recuperato da un piccolo trasformatore.

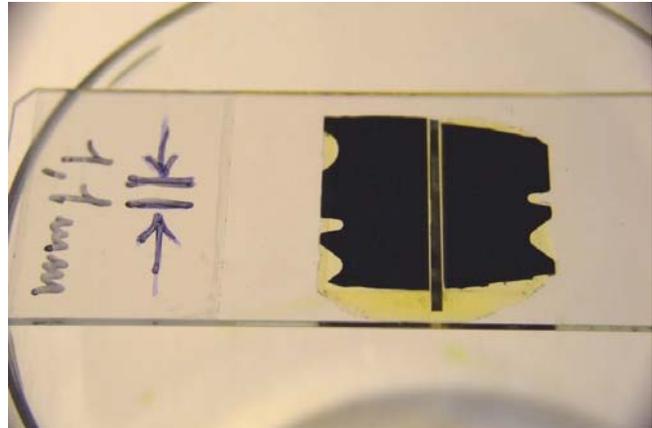
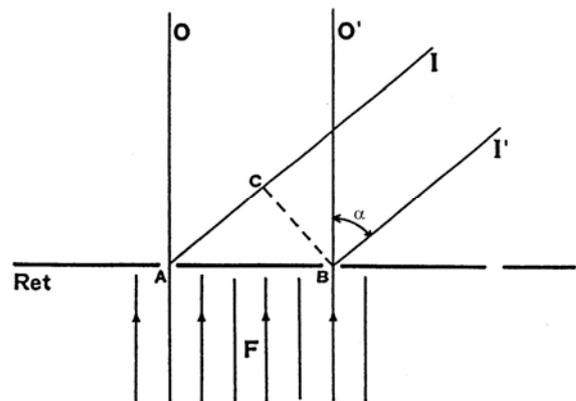


Fig. 128

Nell'ondoscopio di fig. 125 le due sorgenti coerenti erano ottenute da due punte solidali fra loro, che toccavano ritmicamente la superficie del liquido. In ottica si può partire da due fenditure molto vicine (A e B) colpite da un fascio più collimato possibile (F). Le onde che emergono dalle fessure A e B sono quindi in fase fra loro. Dalle fessure però emergono, in virtù della diffrazione, delle onde cilindriche, aventi l'asse nelle fessure stesse. Considerando varie direzioni (O - O' ; I - I' , ecc.), le due onde della coppia presentano fra loro delle differenze di fase che dipendono dalla direzione, dall'angolo  $\alpha$ .



La linea "Ret" indica la sezione dello schermo in cui si trovano le due fenditure.

Lungo queste due direzioni, le onde emergenti da A e da B (che derivano dal fascio coerente F) sono in fase e si propagano rimanendo in fase. Lungo quelle direzioni le due onde sono in concordanza di fase, si realizza l'interferenza positiva, i loro effetti si sommano ed il fascio avrà la massima intensità: in direzione AO (a grande distanza, è come dire BO') si avrà così un **massimo**, il massimo 0 (zero). Se però consideriamo una diversa direzione, per es. AI, parallela a BI', l'onda emergente da A si sovrappone a quella emergente da B lungo un piano perpendicolare, per es. CB. Ma su questo piano l'onda A giunge in ritardo, potendo raggiungere l'onda B solo dopo aver percorso il tragitto supplementare AC<sup>63</sup>. Se  $AC = \lambda$ <sup>64</sup>, oppure  $m\lambda$  (m = un numero intero), le due onde sono di nuovo in fase e nella direzione AI si avrà un altro massimo (una frangia chiara); se AC è pari ad un numero dispari di mezze lunghezze d'onda  $\{AC = (m + \frac{1}{2}) \lambda\}$  si avrà opposizione di fase e quindi un **minimo** d'intensità (una frangia scura).

Se ora si considera genericamente una coppia di fenditure (fig. 129) illuminata da un fascio collimato (F), nello spazio al di là di essa si avrà una successione di fasci sparpagliati a ventaglio i quali, intercettati da uno schermo, mostreranno una serie di fasce chiare e scure, le famose "frange d'interferenza", visibili nella fig. 130, 131 e 132. Le fasce chiare corrispondono ai "massimi"; quelle scure ai "minimi".

<sup>63</sup> Si può dimostrare che  $AC = d \sin \alpha$ , in cui  $d = AB$ . ed  $\alpha = \angle BC = \angle O'BI'$  (vedi il manuale "Problemi tecnici della microscopia...", Cap. 18.5).

<sup>64</sup>  $\lambda =$  lunghezza d'onda della radiazione utilizzata.

Fig. 129

Le direzioni (O, I, II, ecc.) lungo le quali le due onde di ogni coppia sono in fase, oppure sfasate di un numero intero di lunghezze d'onda, consentono l'interferenza positiva e quindi in quelle direzioni si verifica un "massimo" d'intensità. Fra l'una e l'altra di queste direzioni, l'interferenza sarà negativa o intermedia e l'intensità sarà minore fino ad annullarsi ("minimi").

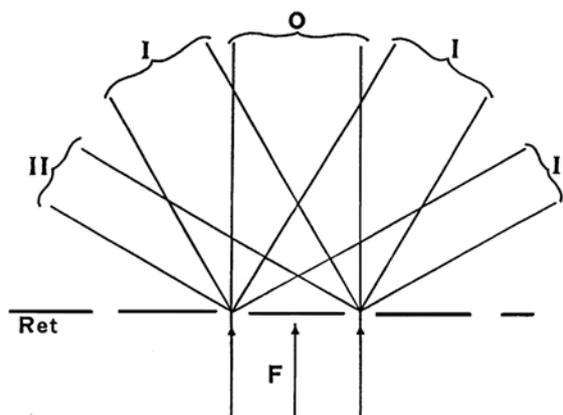
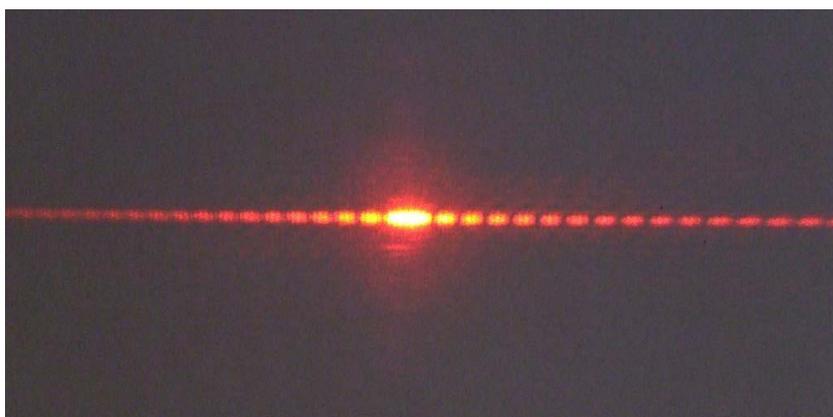


Fig. 130

Ecco come si presentano i "massimi" d'intensità creati dal fascio diretto del Laser quando esso attraversa la "doppia fenditura" di Young. La distanza fra le fenditure ed il laser non ha molta importanza. La figura d'interferenza si proietta sul solito schermo bianco ad almeno mezzo metro di distanza.

Al solito, la macchia bianca centrale è un artefatto fotografico, ed appare rossa come tutto il resto nell'osservazione diretta.



Per verificare tutti questi discorsi, basta mettere la doppia fenditura di fig. 127 davanti al Laser e mettere lo schermo bianco ad almeno mezzo metro di distanza. Se lo schermo è inclinato (ruotato attorno ad un'asse verticale), le frange lo illuminano obliquamente ed appaiono più larghe (fig. 130). La doppia fenditura dovrà essere disposta in modo che intercetti esattamente il fascio, altrimenti, si rischia di illuminare solo una delle due.

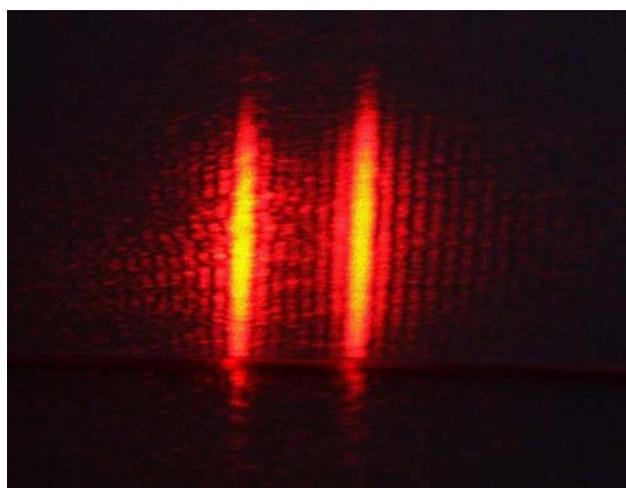
Ma si può esaminare il fenomeno anche col fascio che sia stato reso espanso (divergente) per opera di un obiettivo da microscopio, come si è illustrato in fig. 111 (art. O8). Consigliamo, per ragioni di ingombro, di usare un obiettivo acromatico da 10 ingrandimenti, è si è già detto (nota 57 in O8) dove cercarlo a prezzo modesto. Come avviene per le esperienze di diffrazione, illustrate a suo tempo, l'obiettivo dovrà essere ben centrato rispetto al Laser; l'allineamento (orientamento) invece non è critico. Vedi le figg. 131 e 132.

Fig. 131

Se invece si pone davanti al Laser un obiettivo da microscopio (possibilmente da 10 ingrandimenti), capace di allargare il fascio, oltre ai due "massimi 0" corrispondenti alle due fessure, si vedono i massimi di vari ordini, naturalmente allungati verticalmente poiché anche le fessure sono verticali.

La distanza fra obiettivo e Laser non è critica, ma l'obiettivo va voltato col filetto dalla parte del Laser; a circa 4 cm dalla sua lente frontale si pone la doppia fenditura, la cui centratura invece è critica, almeno in senso orizzontale. Lo schermo stia a circa mezzo metro di distanza (sempre con l'obiettivo 10x).

Questa esperienza ha dato fama al suo ideatore: T. Young<sup>65</sup>.



<sup>65</sup> Thomas YOUNG, fisico, medico ed egittologo inglese (Milverton, 1773; Londra, 1829).

Fig. 132 A

Modificando la distanza fra le due fenditure e la distanza fra fenditure ed obiettivo, la figura può cambiare come qui a lato. Si noti che le frange d'interferenza, quelle più fitte, sono equidistanti; ad esse però si sovrappone il sistema delle frange di diffrazione, il che produce una variazione dell'intensità (a passo più largo e variabile), che rapidamente si annulla e fa scomparire le altre frange. Si confronti questa figura con la 117 o la 121 (O8): le frange di diffrazione si esauriscono presto e quindi rapidamente nascondono quelle d'interferenza, che invece sarebbero visibili per uno spazio maggiore.

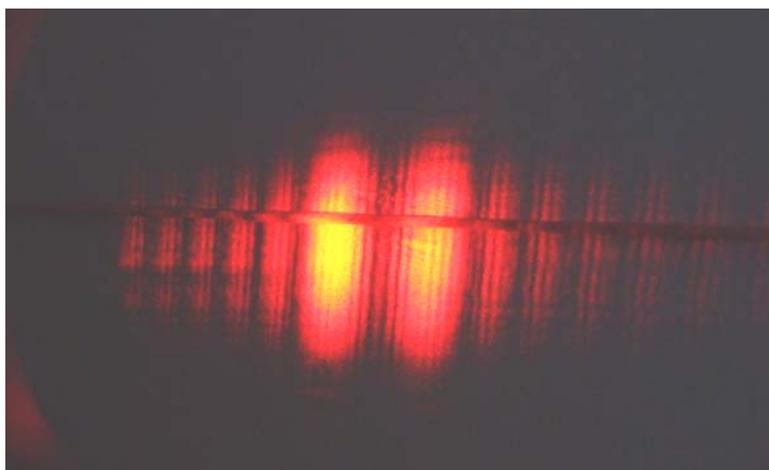


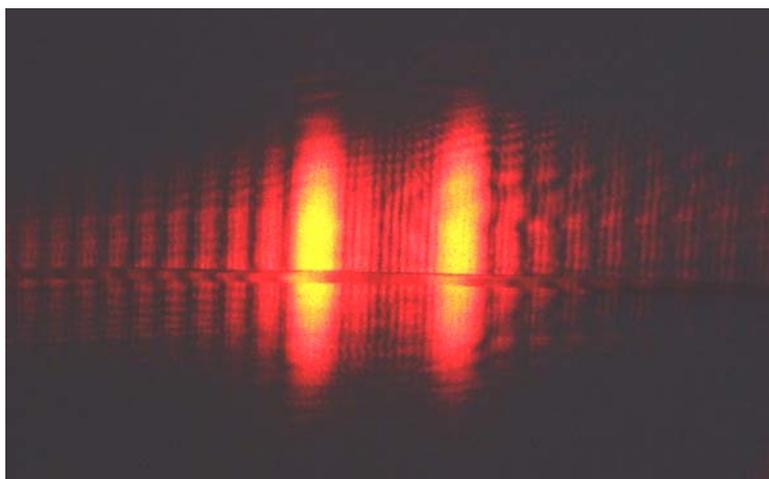
Fig. 132 B

Le varianti possibili sono infinite.

Anche qui, la riga scura orizzontale è stata tracciata sullo schermo bianco per favorire l'azione dell'autofocus.

Il passo delle frange d'interferenza (quelle più fitte) dipende dalla distanza fra le due fenditure, oltre che dalla distanza dello schermo, dalla lunghezza d'onda, ecc.

In tutte queste esperienze, l'oggetto, la doppia fenditura, può essere posto in un porta-oggetti come quello di fig. 111 (S) o 112 (articolo O8).



L'esperimento della doppia fenditura si può eseguire anche ad occhio: si pongano le fessure subito davanti all'occhio e, attraverso di esse, si guardi la macchiolina che il Laser proietta sul cartone bianco in assenza di obiettivo (meglio evitare di guardare direttamente dentro al Laser, anche se il modello da noi consigliato non è pericoloso per la vista). Si vedrà una piccola figura a metà strada fra la 130, la 131 e la 132. La macchiolina del Laser si trovi ad un paio di metri di distanza almeno. La stessa prova si può eseguire usando come sorgente il filamento della lampadina da auto a filamento concentrato (12 V, 21 W), già usata per tante applicazioni. La lampadina si trovi ad almeno due metri di distanza ed il suo filamento sia parallelo alle fessure. In questo caso, i "massimi" d'intensità, le chiazze più luminose, saranno colorate, come avviene passando dalla fig. 133 alla 134-136, e per gli stessi motivi, che illustreremo<sup>66</sup>.

Se poi le fenditure fossero più di due, il risultato sostanzialmente non cambia, in quanto ogni coppia di fessure contigue ripete i fenomeni delle coppie confinanti ed i vari "interferogrammi" si sommano. In realtà, questa "somma" produce qualche effetto: le frange d'interferenza diventano più sottili e più contrastate.

Una serie di fessure equidistanti e parallele si può chiamare un "reticolo"; procurarsi un tale reticolo non è facile, ma si può realizzare qualcosa con tre oggetti facili da trovare.

Il primo è un vetrino da microscopio, ben pulito e spalmato con un sottile strato di inchiostro di China. Si confezioni un pacco di lamette da barba, ben serrate, con il filo sullo stesso piano (prima di serrarle, poggiarle sul vetrino che le obbligherà ad allinearsi). Quando l'inchiostro è secco, vi si passi il pacco delle lamette, dalla parte del filo: ne nascerà una serie di fenditure parallele ed equidistanti. Il movimento del pacco dev'essere parallelo alle lamette stesse, è ovvio.

Le figure ottenibili saranno del tipo di fig. 130 - 132.

Il secondo oggetto è un pezzo di tela, del tipo usato per confezionare gli ombrelli o per le

<sup>66</sup> In realtà, il massimo 0 (centrale) è sempre bianco poiché in esso le due onde interferenti sono sempre in fase, indipendentemente dalla lunghezza d'onda. Nei massimi laterali il diverso valore di  $\lambda$  produce un diverso angolo di deviazione e quindi un piccolo spettro per ogni massimo (vedi l'articolo O4).

fodere dei vestiti. Si tratta di un tessuto sottile, a fili ben dritti e paralleli, che lasciano dei piccoli spazi fra un filo e l'altro; insomma, fenditure parallele in due serie, incrociate fra loro, due reticoli più o meno ad angolo retto.

Il terzo oggetto è la sottile rete in fibra sintetica che adoperano i naturalisti per raccogliere i campioni di "plancton" (microrganismi acquatici fluttuanti in tutte le acque a cielo aperto). Si trovano queste "retini da plancton" presso le ditte di materiale naturalistico. Il "passo" (distanza fra due fili contigui) deve essere di 0,2 - 0,5 mm. Si può rimediare anche con certe garze o "tulle" (del tipo per bomboniere), purché il "passo" non superi 0,5 mm.

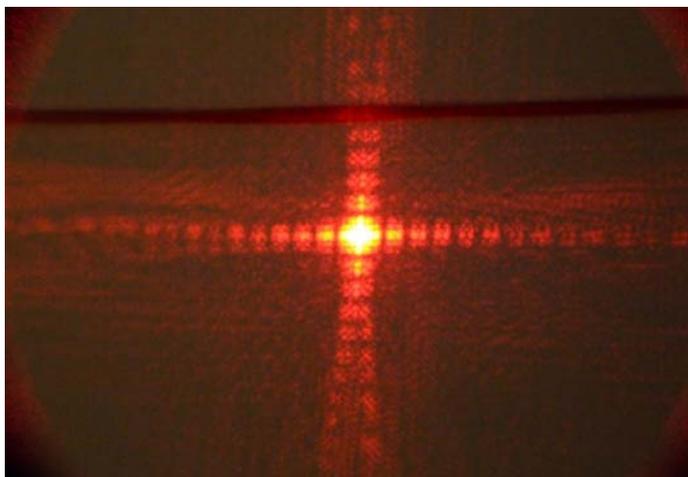
Il secondo ed il terzo oggetto presentano due sistemi di fenditure, incrociati fra loro.

Fig. 133

Se la figura che si vede, guardando attraverso una fine reticella la macchiolina proiettata dal fascio Laser, non è così regolare, quasi sicuramente dipende dalle irregolarità della trama del tessuto. Se poi le chiazze più chiare della croce sono troppo ravvicinate, significa che il "passo" della reticella è troppo grande.

A parte la macchia centrale, che appare bianca per un effetto fotografico, tutta la figura è dello stesso colore, poiché il Laser emette su una banda assai ristretta di lunghezze d'onda.

Se la figura appare troppo pallida, si provi a guardare direttamente dentro al Laser, sempre ad uno o due metri di distanza.



Ebbene, se si guarda la macchiolina del Laser (proiettata su una carta bianca) attraverso la tela o la reticella, si vede qualcosa come in fig. 133.

In sostanza, quello che si vedeva in fig. 130, lo si vede in figura di croce, poiché i sistemi di fenditure parallele sono due, incrociati.



Fig. 134 e 135

Osservando il filamento di una lampadina a filamento concentrato (per auto) attraverso un pezzo di tela d'ombrello si può vedere qualcosa di simile. L'inclinazione delle serie di "massimi" e l'angolo fra di esse dipendono dall'orientamento dei sistemi di fili del tessuto, quindi anche dallo stiramento del medesimo.

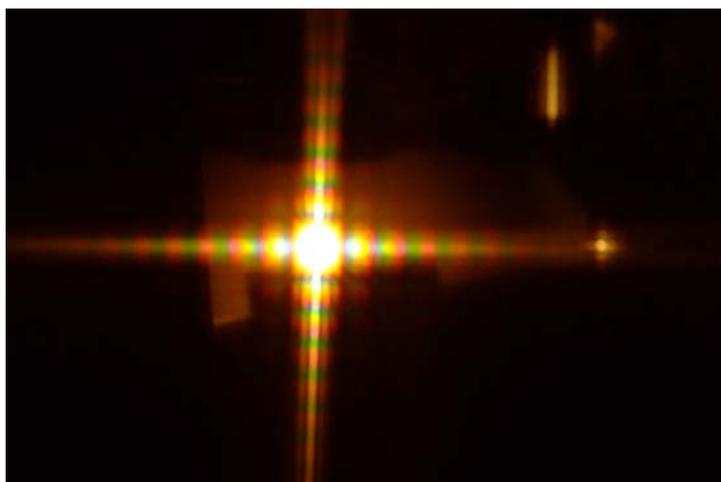
Se poi si vuol ripetere l'esperimento con luce bianca, si usi come sorgente "piccola" il filamento della lampadina per auto di fig. 7 ed 8 (articolo O1), osservandola da 1 o 2 metri di distanza, con la tela o il retino davanti all'occhio: si deve vedere qualcosa di simile alle figure 134 e 135 (dipenderà dall'orientamento e dallo stiramento delle maglie della tela) oppure alla fig. 136 (questa volta con un retino da plancton con passo 0,4 mm). In questo caso, la diffrazione e l'interferenza provocano una scomposizione della luce bianca, come fa la dispersione attraverso un prisma (articolo O4, fig. 56): la deviazione del fascio dipende dalla lunghezza d'onda<sup>67</sup>.

<sup>67</sup> Nella formula della nota 63), i massimi corrispondono ad un valore di  $AC$  pari ad  $m\lambda$ ; quindi  $\alpha$  dipende da  $\lambda$ . Visto che un "reticolo" a righe parallele equidistanti può "disperdere" la luce bianca o comunque una radiazione

Fig. 136

Tutto come nella figura precedente, ma osservando attraverso un retino da plancton del passo di 0,4 mm.

Come alla figura precedente, poiché la sorgente non è monocromatica (Laser) ma bianca (filamento incandescente), la frange chiare e scure dovute all'interferenza sono colorate, poiché la luce bianca contiene tutti i colori dell'iride e l'angolo di deviazione dei "massimi" (figg. 128-130) dipende dalla lunghezza d'onda.



Le figure dalla 133 alla 136 si possono ottenere anche ponendo davanti all'obiettivo della fotocamera la tela od il retino e fotografando il Laser, questa volta anche in luce diretta, oppure la lampadina da auto, tenuti sempre ad almeno uno o due metri di distanza.

Fig. 137

Franghe d'interferenza (le più fitte ed equidistanti) al centro della figura, all'interno dell'ombra geometrica dello spillo. Verso l'esterno, più intense, più larghe, ma d'intensità e di larghezza decrescente, le frange di diffrazione, simmetricamente disposte sui due lati dello spillo.

L'interferenza avviene fra le due onde diffratte, generate dai due lati dello spillo, onde coerenti fra loro poiché provengono dal fascio del Laser, in sé stesso coerente.

La riga orizzontale, al solito, per facilitare l'autofocus.

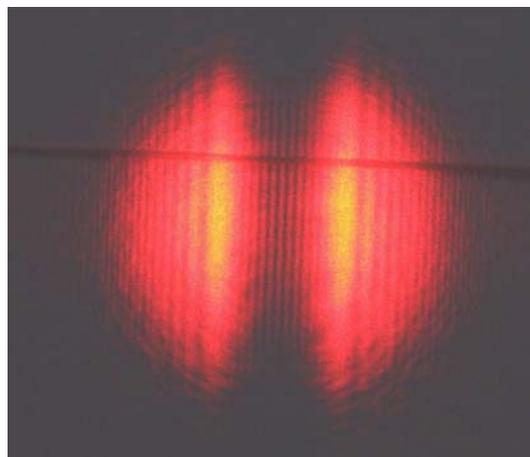
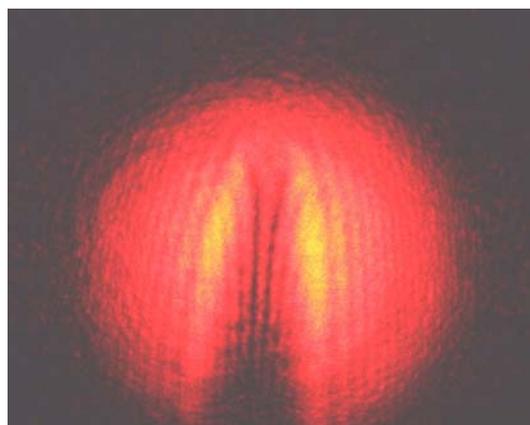


Fig. 138

Ombra della punta dello spillo. Le frange di diffrazione accompagnano, conservando una larghezza costante, l'intero profilo dello spillo. Invece, all'interno dell'ombra geometrica, le frange d'interferenza si allargano verso l'alto per la buona ragione che, verso l'alto appunto, i fianchi dello spillo si avvicinano, l'angolo fra le due onde diffratte diminuisce e le frange s'allargano (vedi la fig. 126). Nella formula della nota 63 si dimostra che, diminuendo la distanza fra le fessure (d), cioè fra le onde interferenti, deve aumentare  $\alpha$ , cioè l'angolo di deviazione dei massimi d'interferenza.



Parlando di diffrazione, abbiamo detto che uno spillo è il negativo di una fenditura (striscia opaca in campo trasparente invece che striscia trasparente in campo opaco). Ora possiamo dire che lo spillo è il negativo anche della doppia fenditura poiché sui due lati di esso si formano due onde diffratte coerenti, simili a quelle che emergono dalla doppia fenditura. Verifichiamo.

Riprendiamo la disposizione della fig. 111 o 114 nell'articolo O8; l'oggetto da porre dopo il

---

mista, è possibile ottenere con un reticolo quello che si ottiene con un prisma (figg. 56 e 58 in O4); infatti, molti strumenti dedicati all'analisi spettrale (spettroscopi, monocromatori, ecc.) si basano sull'uso di reticoli invece che di prismi, con qualche vantaggio tecnico. Occorrerà naturalmente utilizzare il "massimo" di 1° ordine, il più intenso, ed eliminare gli altri. Purtroppo, in commercio è difficile procurarsi tali reticoli, ed un'industria specializzata ha dei costi molto alti; per questo non proponiamo alcun'esperienza in questa direzione. È un vero peccato, poiché con tali reticoli si possono eseguire osservazioni molto interessanti, anche durante il lavoro al microscopio.

fuoco  $F$  dell'obiettivo (cioè in  $A_2$ , vedi lo schema di fig. 115), può essere il solito vetrino da microscopio, su cui si è incollata la punta di uno spillo (Sp in fig. 113, sempre in O8). Nella fig. 118 si è visto come l'ombra geometrica dello spillo sia accompagnata da entrambi i lati dalla serie delle frange di diffrazione. Ma ora ripetiamo questa disposizione con più cura, soprattutto guardiamo con più attenzione all'interno della fascia scura centrale della figura. Se fosse solo per la diffrazione, dovremmo vedere tale fascia centrale invasa dal lato sfumato della figura 117 (A), da ambo i lati, mentre la doppia serie delle frange di diffrazione sta all'esterno. E invece, all'interno di tale fascia, si osservano delle frange parallele che devono avere un'altra origine, e si noti che tali frange sono equidistanti e di pari intensità, almeno finché non si sovrappongono con le altre parti della figura<sup>68</sup>. Questo carattere le distingue dai fenomeni di diffrazione: sono frange d'interferenza, nate dalla sovrapposizione di due onde coerenti, diffratte dai due lati dello spillo.

Finora, dunque, abbiamo realizzato l'interferenza fra due onde coerenti ottenute da due fessure parallele o da una serie di fenditure egualmente distanziate ("reticolo") o da due reticoli incrociati (come nel caso della reticella) o dai due lati di un sottile oggetto opaco (il nostro spillo).

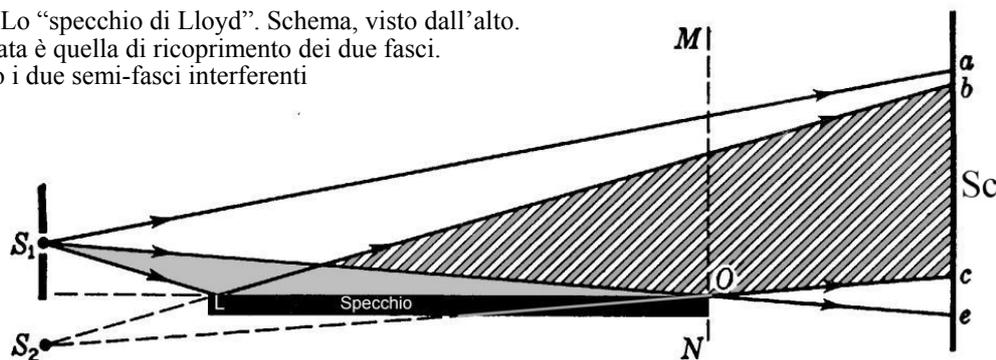
Ma le due onde coerenti da far interferire si possono ottenere anche in altro modo.

Un modo semplice può essere quello di intercettare con uno specchio una parte del fascio divergente fornito dall'obiettivo da microscopio e poi rifletterlo sull'altra parte, secondo lo schema di fig. 139. In questa,  $S_1$  rappresenta il vertice del fascio (punto  $F$  in fig. 115, articolo O8); tale fascio arriva in parte direttamente sul solito schermo bianco  $Sc$ , in particolare nella porzione «a -  $S_1$  - e», disegnata a fondo bianco. Un'altra parte del fascio: «O -  $S_1$  - L», disegnata a fondo grigio, incide sullo specchio L - O e viene riflessa, come se provenisse dall'immagine virtuale  $S_2$ ; tale fascio riflesso incide sullo schermo  $Sc$  nella zona «b - c». Ma la zona «b-c» è interna alla zona «a-e» per cui in «b-c» si sovrappongono il fascio diretto e quello riflesso. Così può avvenire l'interferenza fra di essi, in quanto essi provengono dalla stessa sorgente (in sé coerente perché piccola) e sono perciò coerenti fra loro. Nella zona «b-c» si possono quindi vedere delle frange parallele, che si rivelano come opera dell'interferenza poiché sono equidistanti e di pari intensità (fig. 142).

La disposizione pratica del dispositivo è visibile in fig. 140, tenendo presente che la figura mostra due specchi invece di uno solo, in quanto essa ci serve per illustrare anche l'esperienza successiva, a due specchi. L'obiettivo  $Ob$  fornisce il fascio divergente ed è illuminato dal Laser che si trova a sinistra, fuori figura.

Per questo esperimento occorre uno specchio "di superficie", cioè metallizzato sulla faccia riflettente (non sul retro della lamina di vetro, come nei normali specchi per uso domestico<sup>69</sup>). Un tale specchio sarebbe costosissimo se acquistato presso un'industria specializzata e va cercato nel mercato del "surplus"; a poco prezzo se ne può trovare (dimensioni  $50 \times 90$  mm, di ottima qualità) presso la ditta Foschini di Bologna (335-63 43 526).

Fig. 139 - Lo "specchio di Lloyd". Schema, visto dall'alto.  
La zona tratteggiata è quella di ricoprimento dei due fasci.  
In bianco e grigio i due semi-fasci interferenti



In fig. 140 è visibile, al centro dello specchio, una traccia (Tr) del fascio Laser che si rende percepibile, poiché l'inevitabile polvere diffonde un po' della sua luce rossa.

<sup>68</sup> Il diametro dello spillo può avere qualche importanza. Un normale spillo da sarti, del diametro, supponiamo, di 0,5 - 0,7 mm, presenterà nella fascia scura un maggior numero di frange d'interferenza, anche più di 10, ed andrà tenuto più lontano dall'obiettivo; uno spillo più sottile, con un diametro di circa 0,3 mm (può andar bene uno spillo da insetti, del numero 0 oppure 00), andrà tenuto più vicino all'obiettivo e produrrà nella fascia scura un minor numero di frange d'interferenza (per es. da 2 a 6). In questo caso, la fascia scura centrale può quasi scomparire perché interamente nascosta da 2 - 4 grosse frange di forte intensità.

<sup>69</sup> Vedi il manuale "Problemi tecnici della microscopia...", Cap. 22.1.

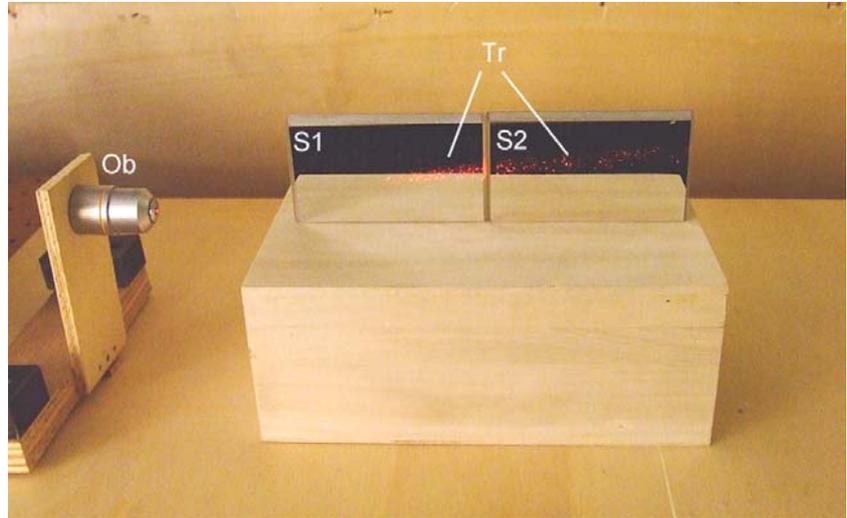
Se qualcuno volesse tentare quest'esperienza con un pezzo di specchio normale (argentatura sul retro di una lamina di vetro), potrebbe ottenere un ottimo interferogramma, come quello di fig.142, ma il risultato sarebbe imprevedibile e difficilmente interpretabile. Infatti, molto dipenderebbe dallo stato dell'orlo dello specchio (lucido, smerigliato, smussato, ecc.) attraverso il quale penetrerebbe una parte del fascio incidente, ma soprattutto tale fascio si propagherebbe almeno in parte all'interno della lamina di vetro e pertanto si ricadrebbe nello schema dell'interferometro di Pérot e Fabry, basato appunto sulla riflessione multipla fra due superfici parallele (vedi oltre, fig. 144 A).

Fig. 140

Disposizione per ottenere gli interferogrammi con lo specchio semplice di Lloyd o col doppio specchio di Fresnel. Gli specchi reperibili presso l'indirizzo sopra indicato hanno uno spessore sufficiente da creare, su uno dei lati lunghi, una base d'appoggio sicura. Il dispositivo richiede quindi solo una superficie d'appoggio piana ed orizzontale per gli specchi, oltre al solito supporto per l'obiettivo.

Il fascio Laser entra nell'obbiettivo provenendo da sinistra.

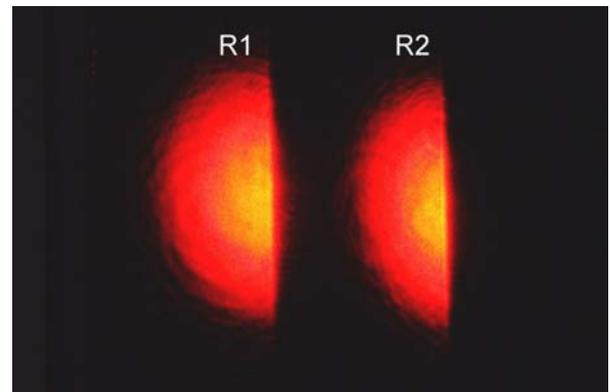
La distanza fra l'orlo dello specchio (S1) e la lente frontale dell'obbiettivo Ob influisce sul pas-so delle frange, come spiegato più sotto.



Sullo schermo apparirà inizialmente una figura come in fig. 141, in cui è visibile in forma di semiluna la metà del fascio diretta, che è sfuggita all'estremo dello specchio e, accanto, la metà riflessa, invertita in senso destra-sinistra per via della riflessione.

Fig. 141

Il fascio Laser, espanso dall'obbiettivo, passa per metà oltre l'orlo dello specchio di Lloyd e per metà è riflesso dal medesimo. Le due metà del fascio non possono ancora interferire, visto che non si sovrappongono. Ruotando con cura lo specchio, si può avere la sovrapposizione parziale e quindi una serie di frange d'interferenza, come nella figura seguente. La posizione e l'orientamento dello specchio sono assai critici e, inizialmente, le frange potrebbero risultare invisibili perché troppo sottili.



Ruotando con cura lo specchio intorno ad un asse verticale, le due semilune si portano a sovrapporsi almeno in parte, e si vedrà qualcosa di simile a ciò che si vede in fig. 142, ma si badi bene: l'allineamento dello specchio è molto critico. Esso va poggiato in posizione verticale su una superficie orizzontale, come in fig. 140 (ignoriamo per ora il secondo specchio), ma assai radente al fascio: la traccia Tr deve occupare quasi tutta la lunghezza dello specchio. Ottenuto questo, si deve spostare lo specchio parallelamente a se stesso e ruotarlo ancora finché le due tracce visibili sullo schermo si sovrappongono in parte (fig. 142). Nella fig. 141: il fascio diretto «a-e» della fig. 139 appare semicircolare (R1) poiché la sua metà destra è obliterata dallo specchio; questa parziale obliterazione si ottiene appunto muovendo lo specchio parallelamente a sé stesso. La metà riflessa del fascio (R2), semicircolare anch'essa poiché rappresenta l'altra metà del fascio originale, si deve portare a sovrapporsi alla metà diretta ruotando lo specchio attorno ad un asse verticale. Purtroppo, uno dei movimenti influisce sull'altro ed occorrerà molta pazienza. Probabilmente, all'inizio le frange saranno fittissime (quando l'angolo fra lo specchio ed il fascio è eccessivo) ed occorrerà una buona lente d'ingrandimento per osservarle.

Per avere frange più larghe, si abbia l'accortezza di porre l'orlo dello specchio (S1 in fig. 140) a 5 - 10 mm dalla lente frontale, la più esterna, dell'obbiettivo. Se l'obbiettivo usato non è da 10 ingrandimenti, come da noi suggerito, ma da 4, tale distanza andrà almeno raddoppiata.

La realizzazione dell'interferenza ottenuta da un singolo specchio è attribuita a LLOYD<sup>70</sup>, e si parla perciò di "specchio di Lloyd". Si tratta in fondo di una semplificazione di una precedente e più nota esperienza di FRESNEL<sup>71</sup>, che fa uso di due specchi: il fascio originale viene diviso in due parti da una coppia di specchi formanti fra loro un piccolissimo angolo ( $\alpha$  in fig. 143) Il risultato è simile, e simile è la criticità nell'allineamento degli specchi. Disposizione pratica ancora in fig. 140.

In tutte queste esperienze cogli specchi, come in quelle descritte sotto, capita spesso che il fascio espanso del laser incontri i margini degli specchi o delle lamine in vetro: ne nascono immediatamente delle frange di diffrazione, che si riconoscono subito per essere di passo variabile, generalmente più largo, e di intensità rapidamente decrescente (fig. 117 in O8; lato all'estrema sinistra della fig. 142; larghe fasce in fig. 132).

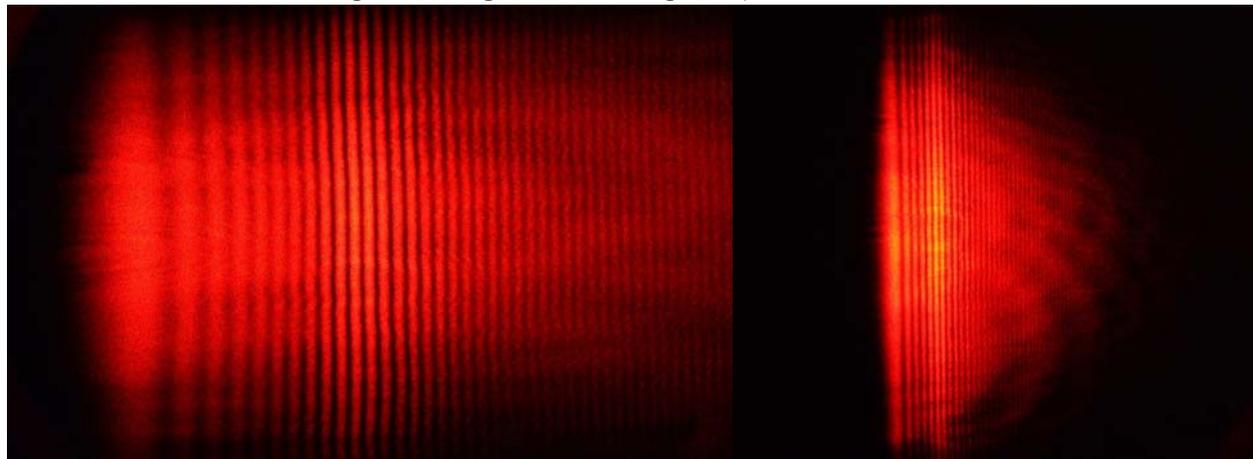
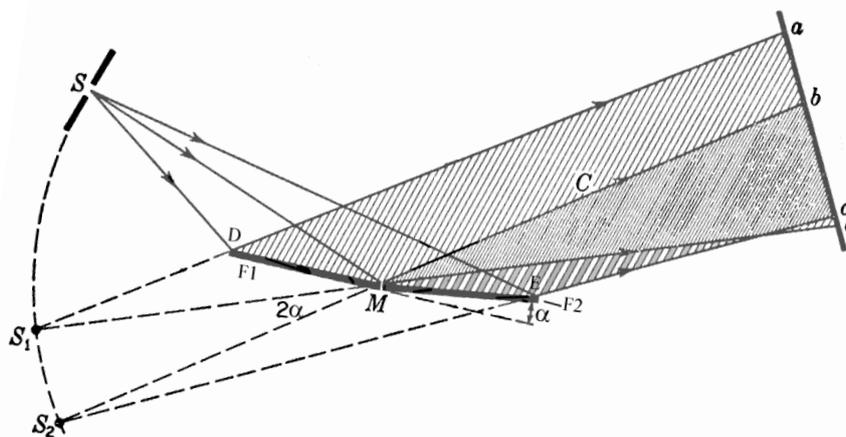


Fig. 142 A e B - Sistemi di frange d'interferenza ottenuti con lo specchio di Lloyd o col doppio specchio di Fresnel. Occorrerà molta pazienza per ottenere frange abbastanza larghe da essere facilmente osservate.

Fig. 143

Schema dell'esperienza degli "specchi di Fresnel". Il doppio specchio crea due immagini virtuali ( $S_1$  ed  $S_2$ ) della sorgente originaria  $S$ , che è nel fuoco dell'obbiiettivo. I due fasci riflessi (a -  $S_1$  - e) e (b -  $S_2$  - c) si sovrappongono nella regione «b-c» (a tinta unita) dove è possibile osservare le frange d'interferenza.

Il risultato è analogo a quello dello specchio unico di Lloyd.



Un altro modo di ottenere un interferogramma è quello dei "riflessi multipli", secondo lo schema di Pérot e Fabry. Si parte da due superfici semiriflettenti, parallele o quasi, secondo lo schema qui sotto (fig. 144 A). A e B rappresentano due superfici piane capaci di riflettere parzialmente (2, 3, ecc.) un fascio incidente (1) e di trasmettere ciò che non è riflesso (4, 5, ecc.). Ognuno dei fasci riflessi, come di quelli trasmessi, è in ritardo rispetto al precedente (4 rispetto a 5; 3 rispetto a 2, ecc.), ma questo ritardo reciproco corrisponde al doppio attraversamento della lamina ( $d_2 + d_3$  fra il fascio 4 ed il 5;  $d_1 + d_2$  fra il fascio 3 ed il 2, ecc.)<sup>72</sup>. Dunque abbiamo una serie di fasci parzialmente riflessi ed una serie di fasci trasmessi, ed all'interno di ogni serie vi è uno sfasamento costante fra ogni fascio e quello contiguo. Poiché si parte da una sorgente

<sup>70</sup> Humphrey LLOYD, ecclesiastico e fisico irlandese (Dublino, 1800; ivi, 1881).

<sup>71</sup> Augustin Jean FRESNEL (pron. Frenèl), fisico ed ingegnere francese (Eure, 1788; Parigi, 1827).

<sup>72</sup> In realtà, il fascio 2 è invertito di fase rispetto agli altri poiché subisce, esso solo, una riflessione esterna, ma alla fine i conti tornano lo stesso. Noi realizziamo il sistema delle due superfici semi-riflettenti per mezzo di una semplice lamina di vetro, ma è solo per praticità. Non è una questione di principio.

coerente (il Laser nel caso nostro), si avrà un'interferenza multipla all'interno di ogni serie ed ognuna delle due serie fornirà un'interferogramma.

Come si fa a trovare due superfici semiriflettenti parallele? Il mezzo più comodo è prendere un pezzo di lastra di vetro: si sa che la superficie del vetro "fa specchio" e riflette dal 4 al 100% della luce incidente (dipende dall'indice e dall'angolo d'incidenza). La cosa più semplice è utilizzare i vetrini "porta-oggetti" da microscopio (fornitore già indicato nella nota 57 in O8), economici, maneggevoli e con superfici molto regolari. Il vantaggio è che le due superfici sono quasi perfettamente parallele e non si possono spostare l'una rispetto all'altra poiché fanno parte dello stesso oggetto. La disposizione pratica è in fig. 145. Il risultato nelle figure 146 e 147.

Per osservare questi interferogrammi si può seguire una via anche più semplice: si ponga davanti al Laser l'obbiettivo, come di consueto, e si proietti il fascio espanso, almeno qualche cm di diametro, sullo schermo bianco. A questo punto, s'impugni il vetrino da microscopio come se fosse uno specchio e, riflessa dalla sua superficie, si osservi la macchia rossa che si è formata sullo schermo: si dovrebbero vedere subito le frange come in fig. 147.

Si può ripetere l'esperienza in luce bianca, ma non funzionerà, poiché le normali sorgenti non sono coerenti. Per avere la coerenza fra i fasci riflessi o trasmessi si deve ricorrere a coppie di superfici assai vicine (pochi  $\mu$ ); ed in realtà questo avviene comunemente:

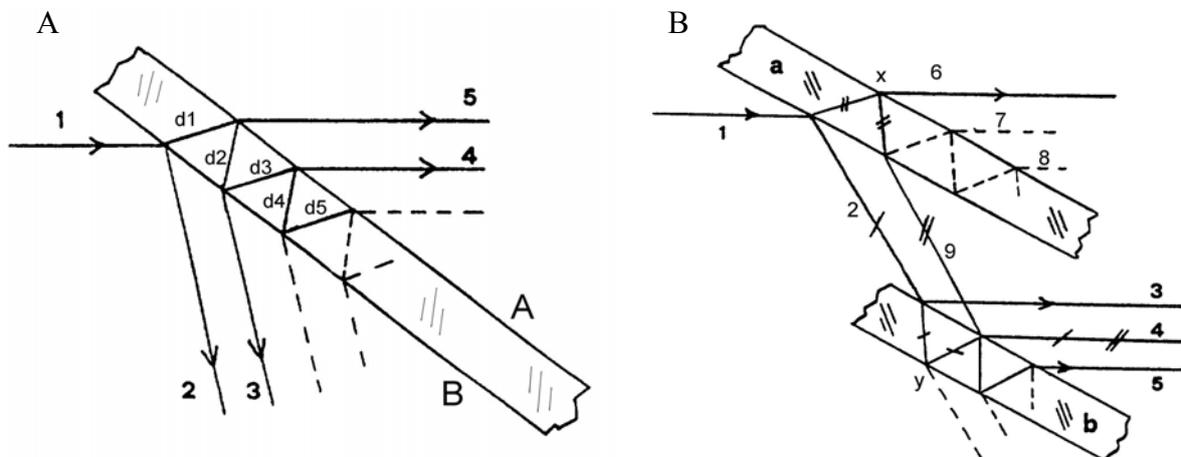
- nel caso delle bolle di sapone (le due superfici sono: aria - acqua saponata - aria);
- nel caso delle gocce d'olio che colano dagli automezzi in sosta sulle strade bagnate e si allargano a formare un sottile strato (aria - olio - acqua);
- nel caso degli "anelli di Newton", che si formano all'interno dei vetrini dei telaietti per diapositive (vetro - aria - pellicola);
- nel caso di certi trattamenti protettivi per metalli, detti "anodizzazioni" (aria - ossido - metallo);
- nel caso di certi Coleotteri a riflessi metallici come la cetonia (aria - cuticola - esoscheletro).

In tutti questi casi, si tratta di "strati sottili" di materiali trasparenti, limitati da altri materiali a diverso indice, in modo da formare una coppia di superfici semi-riflettenti parallele.

L'interferenza all'interno dello "strato sottile" porterà all'interferenza negativa, e quindi alla soppressione, per una parte dei colori dello spettro ottico, per cui l'oggetto apparirà colorato del colore complementare "di sottrazione" (vedi a pag. 39 in O4 ed il manuale "Problemi tecnici della microscopia...", Cap. 17.1.2, 22.1.3 e 23.1).

Poiché, secondo lo schema di fig. 144 A, il ritardo fra i singoli fasci dipende dal doppio cammino all'interno della lamina ( $d_1 + d_2$ , ad es.), esso dipende anche dall'angolo d'incidenza: in tutti i casi appena elencati, infatti, i colori saranno cangianti, nel senso che cambieranno al variare della posizione della sorgente o dell'occhio. È un modo sicuro di riconoscere i "colori interferenziali" creati dagli strati sottili.

Fig. 144 A e B- Schema dell'interferometro di Pérot e Fabry<sup>73</sup> e di quello di Jamin. Tutto si basa su riflessioni multiple fra due superfici semi-riflettenti.



Con due vetrini paralleli, è possibile ugualmente realizzare un interferogramma seguendo lo schema di Jamin<sup>74</sup> (fig. 144 B). I due fasci coerenti che interferiscono possono essere:

<sup>73</sup> Charles FABRY (1867-1945) e Alfred PÉROT (1863-1925), fisici francesi.

<sup>74</sup> Jules Célestin JAMIN (1818 - 1886), fisico francese.

1) quello riflesso esternamente dalla prima lamina (a) e poi trasmesso e riflesso internamente dalla seconda (percorso 1 - 2 - y - 4); questo percorso è segnato da un piccolo trattino trasversale;

2) quello trasmesso e poi riflesso all'interno della prima lamina (a) e poi riflesso esternamente dalla seconda (1 - x - 9 - 4), segnato da un doppio trattino.

Dalla figura 144 B si vede come il tratto 4 sia comune ai due percorsi e quindi in quel tratto può avvenire l'interferenza. Su uno schermo posto a destra si vedrà un interferogramma simile a quello di fig. 147, ma occorrerà bloccare con un corpo opaco qualunque i fasci diretti (6, 7, 8, ecc.) e, possibilmente, quelli estranei (3, 5, ecc.).

Fig. 145

Supporto per uno o due vetrini da microscopio, utile per realizzare l'interferometro secondo Pérot e Fabry oppure sec. Jamin. Su una basetta di legno B sono incollati tre blocchetti di legno (1, 2 e 3), fra i quali rimangono due spazi di circa 1 mm; in questi spazi vanno infilati uno o due vetrini da microscopio.

Per l'interferometro sec. Jamin, i due vetrini sono paralleli fra loro e formano con l'asse dell'obiettivo Ob (e col fascio del laser) un angolo molto piccolo. Tanto piccolo che il fascio che ha attraversato obliquamente il vetrino V1 rischia di sfuggire al vetrino V2. Per evitare questo, il vetrino V2 è stato spostato verso destra rispetto all'altro.

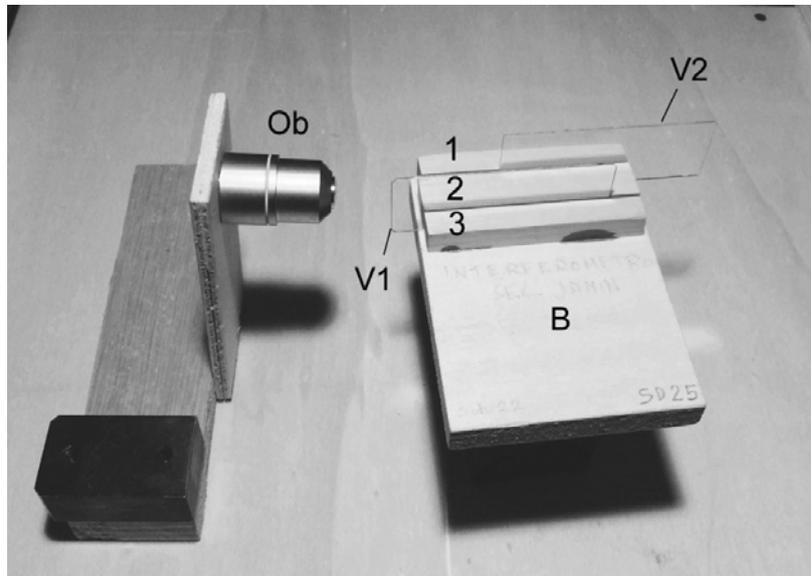


Fig. 146

Interferogrammi formati nell'interferometro di Pérot e Fabry, realizzato con un semplice vetrino da microscopio. A sinistra il fascio diretto (4, 5, ecc. in fig. 144 A); a destra, il fascio riflesso (2, 3, ecc.). Entrambi i fasci sono costituiti da una serie di fasci minori, creati da riflessioni multiple, coerenti fra loro; entrambi, quindi, mostrano fenomeni d'interferenza.

La riga nera orizzontale, al solito, serve all'autofocus e, della macchia gialla centrale, conosciamo l'origine.

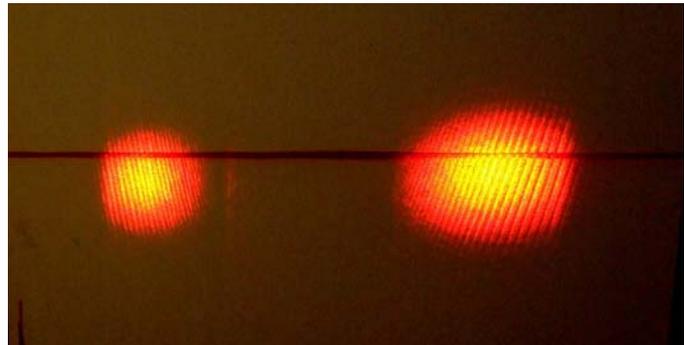
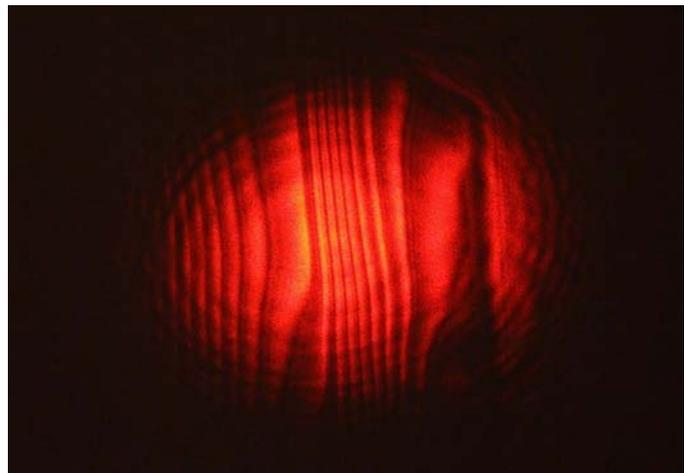


Fig. 147

Uno dei fasci della figura precedente ottenuto da un altro vetrino. Le frange appaiono qui deformate, poiché i vetrini usati non sono sempre perfettamente piani. Si pensi che, se una frangia è incurvata con una "freccia" pari al passo fra due frange contigue, significa che la superficie del vetrino è incurvata di meno di mezzo millesimo di mm ( $\mu$ ).

L'osservazione delle frange consente a livello tecnico un controllo della bontà delle superfici ottiche con una sensibilità di una frazione di  $\mu$ .

Durante quest'esperienza è possibile, spingendo con le dita, deformare leggermente il vetrino infilato nel supporto di fig. 145: si vedranno le frange alterarsi.



Per finire, fra i tanti possibili, accenniamo ad un altro schema d'interferometro, quello secondo Michelson<sup>75</sup>, che ha avuto molte applicazioni scientifiche e tecnologiche. I materiali necessari (prisma cubico a superficie interna semiriflettente, detto "splitter", più due specchi di

<sup>75</sup> Vladimir Aleksandrovič MICHELSON, fisico russo (1860 - 1927).

superficie) sono reperibili con poca spesa presso la ditta Foschini sopra citata, ma non ci dilunghiamo su questa realizzazione, poiché l'allineamento degli specchi è estremamente critico ed ognuno va orientato secondo due assi ortogonali. La fig. 148 illustra come il fascio coerente del Laser (1) venga suddiviso in due (2 e 4) dalla superficie semi-riflettente G, che è l'anima del dispositivo. I due fasci parziali 2 e 4, coerenti fra loro poiché derivano dalla suddivisione di un unico fascio, sono riflessi da due specchi (nel caso nostro, uno può essere poggiato sulla faccia B o C del cubo). Il fascio riflesso 3 in parte attraversa la superficie G e prosegue verso il basso; in parte viene riflesso da G e torna verso la sorgente (1). Analogamente, il fascio riflesso 5 è parzialmente riflesso da G verso il basso e parzialmente trasmesso verso la sorgente.

Sulla superficie D si sovrappongono quindi i due fasci coerenti 3 e 5 ed ivi si forma l'interferogramma, del tipo visibile nelle figg. 146 o 147.

Gli specchi necessari per questa realizzazione sono gli stessi utilizzati per i dispositivi secondo Lloyd o Fresnel.

Chi avesse difficoltà a realizzare questo dispositivo, può rivolgersi all'autore<sup>76</sup>.

Fig. 148

Schema dell'interferometro di Michelson. La superficie G è semi-riflettente e può essere costituita da una superficie diagonale all'interno di un prisma cubico ("splitter"), come si vede nella figura seguente. Gli specchi poggiati sulle superfici B e C devono essere di superficie e di buona qualità. Lo schema non specifica il tipo di sorgente, ma va benissimo il fascio espanso del Laser. Il risultato dell'interferenza si raccoglie sul piano D, che può essere una delle superfici smerigliate del prisma cubico. Uno degli specchi può essere semplicemente poggiato su una faccia del cubo (magari incollato con una goccia d'olio), ma l'altro deve essere orientato con estrema cura.

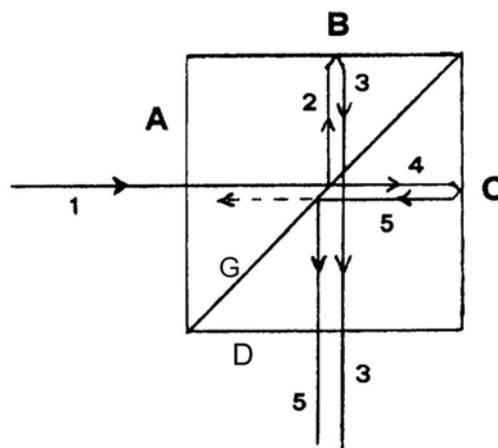
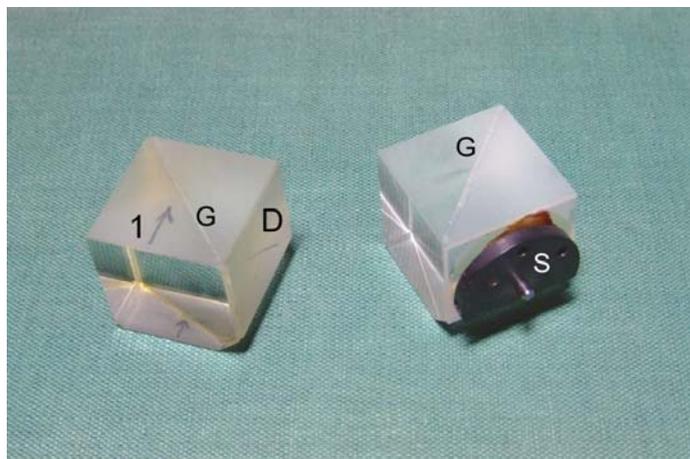


Fig. 149

Prismi cubici "splitter" con superficie interna semi-riflettente in diagonale (G). Il supporto meccanico (S) può essere staccato scaldandolo: può bastare il riscaldamento dovuto all'attrito mentre lo si consuma con una mola smeriglio.

Il fascio deve entrare secondo la freccia 1 e la figura d'interferenza si formerà sulla faccia smerigliata D, che va liberata dal supporto S e ben pulita con qualche solvente per vernici.



Queste considerazioni sull'interferenza ci possono aiutare a capire cosa succede in certi casi della vita quotidiana: di notte, camminando sotto un ombrello, può capitarvi di alzare gli occhi e guardare un lampione attraverso la tela dell'ombrello stesso; se la tela ha una struttura regolare, potreste vedere qualcosa di simile alla fig. 134 - 136. Ora ne sapete il motivo.

Sempre camminando per strada dopo la pioggia, potreste passare vicino ad un parcheggio dal quale si è da poco allontanata una vettura: sull'asfalto bagnato potreste vedere degli strani anelli concentrici, più o meno regolari, di vario colore; un sottile strato d'olio realizza un "interferometro a strati sottili", sec. Pérot e Fabry, come descritto sopra.

Se un bambino vi chiede come mai le bolle di sapone sono colorate, mentre l'acqua saponata non lo è, potreste dargli una spiegazione corretta.

Il piacere non dovrebbe venire dall'usare le cose o dal possederle, ma dal capirle.

<sup>76</sup> Dr. Giovanni Pietro Sini - Via D'Azeglio 5 - 40017 - S. Giovanni in Persiceto (Bologna). Tel.: Studio 051-68 10 849. Cell 339-71 54 957. Estate 0463-90 30 86.