

## O1 - LA RIFRAZIONE

La “luce”, si sa, viaggia in linea retta. Detto così, sembra ovvio. Ma ...

Prima di tutto, cos'è la “luce”?

In secondo luogo, come “viaggia”?

In terzo luogo, proprio sempre “in linea retta”?

Vediamo. La luce, dicono i trattati, è una sensazione, una rappresentazione della nostra psiche. Si può vedere “luce” anche ad occhi chiusi (“vedere le stelle” in seguito ad un pugno: uno stimolo meccanico, *improprio*, suscita nella nostra retina la stessa sensazione dello stimolo normale). Del resto, si vedono immagini e colori anche nel sogno.

Allora entrano i fisici a dire che sì, è vero, la sensazione di “luce” è un fenomeno psicologico, ma esso è normalmente suscitato da uno stimolo “*proprio*”, che è ... è “una radiazione elettromagnetica di lunghezza d'onda compresa fra circa 0,4 e 0,75  $\mu$ ”.

Intanto, quel simbolo ( $\mu$ ) è la lettera emme minuscola dell'alfabeto greco (mu), e sta per “micrometro”, cioè milionesimo di metro = millesimo di millimetro ( $\mu\text{m}$ ). Poi, la “radiazione” è una forma di energia che si propaga nello spazio, anche vuoto. Ma perché “elettromagnetica”?

Ecco, si tratta di un'onda. Il solito paragone delle onde sull'acqua va abbastanza bene, ma vediamone un altro. Supponiamo di trovarci ad un balcone tenendo in mano il capo di una lunga corda penzoloni; proviamo a far oscillare velocemente il capo della corda muovendo la mano a destra ed a sinistra. La corda non sarà più diritta, tenuta diritta dalla gravità, ma oscillerà, formerà delle onde, e tali onde si propagheranno dall'alto (dalla sorgente dell'oscillazione, che è la nostra mano), verso il basso. Se c'è qualcosa che oscilla, l'oscillazione si propaga dove può, nel nostro caso lungo la corda. Ma notate: l'onda è trasversale: si propaga verso il basso, è vero, lungo la corda, ma lo spostamento della corda è orizzontale: la corda non si sposta, mediamente, oscilla solo; è l'onda che si propaga lungo la corda e fa oscillare la corda in direzione perpendicolare alla corda stessa. Dunque, nulla si muove, mediamente; quando l'oscillazione finisce, la corda rimane dov'era prima, ma l'onda si è “irradiata” dalla sorgente (dalla nostra mano) lungo il cammino che le era consentito. Quest'onda però è “trasversale”: il movimento della corda avviene in una direzione perpendicolare alla direzione di propagazione dell'onda.

Infine: in una “radiazione elettromagnetica” nulla si muove, si propaga solo un'onda; ma cos'è che ondeggia, che oscilla? Nulla di materiale: due campi, uno elettrico ed uno magnetico.

E ci risiamo. Cos'è un campo? È una porzione di spazio in cui una forma di energia manifesta la sua presenza. Un esempio? Una calamita genera intorno a sé un “campo magnetico”, entro il quale essa attira, cioè esercita una forza, sul ferro e su qualche altro oggetto. Bene. Ricordate le onde della corda? Se tengo in mano una calamita e la faccio oscillare, anche il “campo magnetico” da essa generato oscilla, e quest'onda si propaga nello spazio, non ha bisogno di corda. La stessa cosa succede con una carica elettrica: crea anch'essa un “campo elettrico”, anch'essa può oscillare ed irradia tutto intorno un'onda.

Ma qui succede una cosa strana: insegna l'elettrologia che una carica elettrica in movimento produce un campo magnetico, come una calamita. Dunque, se una carica oscilla, produce un'onda sia magnetica, sia elettrica: ecco perché si parla di “onda” o “oscillazione elettromagnetica”. Anch'essa sarà trasversale. Con una complicazione: i due campi, elettrico e magnetico, oscillano in piani perpendicolari fra loro (e le due onde saranno sempre perpendicolari alla direzione di propagazione).

Per fortuna, la maggioranza dei fenomeni in ottica si spiega bene considerando il solo campo elettrico, per cui riusciamo a definire finalmente l'agente fisico “normale” della sensazione di luce come una “*oscillazione elettromagnetica trasversale*”.

Rimane da stabilire dov'è la carica oscillante che produce la radiazione elettromagnetica. Bè, nel caso delle onde radio (TV, Radar, cellulari e simili), si tratta di correnti elettriche (spostamenti di cariche) in un conduttore elettrico; “oscillanti” poiché si tratta di “correnti alternate” che cambiano continuamente verso, avanti ed indietro, con frequenze (oscillazioni al secondo) di decine di migliaia fino a miliardi. Nel caso della radiazione infrarossa (IR), possono essere oscillazioni di molecole, che portano sempre qualche carica. Per la luce, si tratta dello “spostamento” degli elettroni attorno al nucleo atomico, e gli elettroni portano una minuscola

carica negativa<sup>1</sup>. Quanto all'ultravioletto (UV), raggi X, raggi gamma ( $\gamma$ ), ecc. si tratta di vibrazioni di nuclei atomici o dei loro componenti.

Altra cosa. Prima, abbiamo accennato alla "lunghezza d'onda". Ripensiamo alla nostra corda che oscilla seguendo i movimenti della nostra mano. Supponiamo di fotografare con una breve istantanea la corda che oscilla: vedremo sulla stampa una linea ondulata, la materializzazione dell'onda. Con opportune calibrazioni, potremo misurare la distanza fra una cresta e l'altra dell'onda: è questa la "lunghezza d'onda", che indicheremo d'ora in poi con la lettera elle minuscola dell'alfabeto greco o "lambda" ( $\lambda$ ).

Di  $\lambda$  dovremo parlare ancora, negli articoli seguenti. Per ora diamo per scontato che le oscillazioni capaci (nell'occhio sano) di darci la sensazione di luce devono mostrare una lunghezza d'onda  $\lambda$  compresa fra 0,4 e 0,75  $\mu$  circa<sup>2</sup>, piuttosto piccola, meno di un millesimo di millimetro. Vedremo il rapporto fra il valore di  $\lambda$  ed il colore.

Circa il problema di come "viaggia" la luce, l'abbiamo già un po' spiegato: i campi elettrici e magnetici si propagano anche nel vuoto, senza un supporto materiale: una calamita fa sentire il suo effetto anche nello spazio cosmico. Circa la velocità di questa propagazione, dipende dal materiale in cui l'onda si propaga: è massima nel vuoto (circa 300.000 Km al secondo) ed è minore in tutti gli altri mezzi, mostrando un vago rapporto con la loro densità; è minore nei gas, ancora minore nella maggioranza dei liquidi, ancora minore nella maggioranza dei solidi.

Nulla toglie, poi, che l'onda, o la sua energia, sia assorbita più o meno dal mezzo che attraversa: vi sono solidi e liquidi trasparenti oppure più o meno opachi.

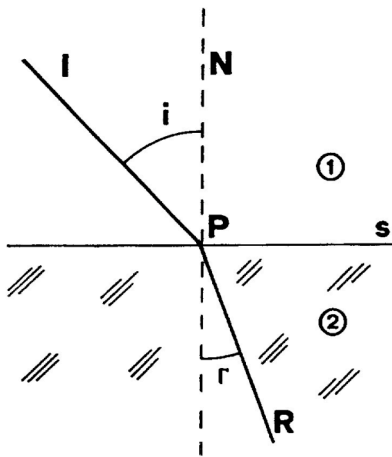


Fig. 1 - La rifrazione

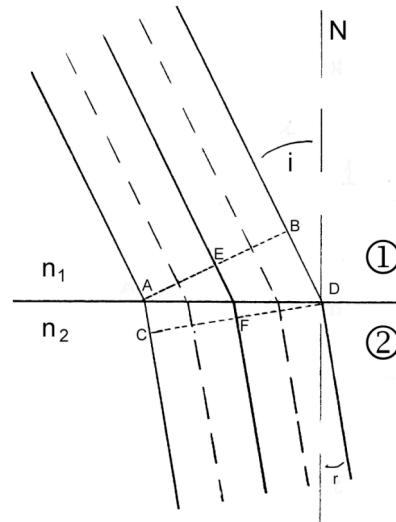


Fig. 2 - Spiegazione della rifrazione

Riguardo alla "linea retta" è bene specificare. Visto che la velocità della "luce"<sup>3</sup> si abbassa appena la luce dal vuoto o dall'aria entra in un liquido o in un solido, immaginiamo un fascio di "raggi"<sup>4</sup> che passa dal vuoto (o dall'aria, ① in fig. 1 e 2) in un liquido o un solido (② in fig. 1 e 2). In fig. 2, i vari raggi viaggiano tutti assieme, come le file di uno squadrone che marcia con ordine, dall'alto in basso; la prima fila è indicata col segmento AB. Però, mentre il soldatino B percorre lo spazio BD, il soldatino A percorre uno spazio minore (AC) poiché ha attraversato la superficie di separazione fra i materiali 1 e 2 ed ha rallentato. Per i punti intermedi fra A e B il ritardo sarà intermedio e, quando il soldato B ha raggiunto il punto D, la prima fila del plotone diventa CD, ovviamente inclinata rispetto alla direzione iniziale. Così si spiega perché il fascio, o il "raggio" di luce si spezza, si "rifrange".

Chiamiamo (I) il fascio in arrivo o "incidente" (fig. 1); esso "incide" nel punto P sulla superficie s di separazione fra due "mezzi" (o materiali) diversi, indicati con i numeri ① e ② (fig. 1). La perpendicolare (i matematici dicono "la normale") alla superficie s, passante per il punto d'incidenza P, è la retta NP.

<sup>1</sup> Evitiamo qui di tirare in ballo i livelli energetici dell'atomo, l'eccitazione e la diseccitazione degli elettroni, ecc.

<sup>2</sup> Entro questi valori di lunghezza d'onda, si parla specificamente di "radiazione ottica".

<sup>3</sup> D'ora in poi, diremo "luce" invece di "radiazione elettromagnetica" o "radiazione ottica", anche se non è esatto.

<sup>4</sup> Un "raggio di luce" non è una realtà fisica: è solo un simbolo per indicare la direzione di propagazione dell'onda, è un'astrazione.

Se il mezzo ② è più “denso” (termine per ora generico) del mezzo ①, si capisce ora perché il fascio in arrivo o “incidente” (I) forma con la “normale” NP un angolo  $i$ <sup>5</sup> maggiore dell’angolo fra il raggio emergente R e la normale stessa ( $r$ )<sup>6</sup>. Il raggio R si chiama “rifratto” ed il fenomeno si chiama **rifrazione**.

Dunque, al passaggio fra due mezzi diversi, se il secondo è più “denso”, il raggio cambia direzione e si avvicina alla normale. La fig. 3 mostra una conseguenza pratica del fenomeno: una bacchetta rigida immersa nell’acqua di una vaschetta appare spezzata in corrispondenza della superficie di separazione aria-acqua.

Se si confrontano le figg. 1 e 3, ci si accorge che il raggio incidente (I in fig. 1) si sposta verso il basso, mentre le parte sommersa della bacchetta (B2) di fig. 3 è spostata in alto rispetto alla parte emersa (B1). Cosa succede?

Quando ero piccolo e mi buttavo nello stagno vicino (allora si poteva fare), mio padre mi diceva: “L’acqua limpida inganna”. «Perché?». “Perché la rifrazione fa sembrare il fondo più in alto di quanto non sia”. Poi ho capito.

Vediamo di nuovo la fig. 1: se il mio occhio si trova sulla retta I e guarda in direzione di P, vedrà nella direzione IP anche il punto R, che in realtà si trova più in basso. Ovvero: la luce che dalla bacchetta sommersa o dal fondo dello stagno si dirige verso il mio occhio percorre il tragitto R-P- I e quindi obbedisce alla legge della rifrazione<sup>7</sup>, ma io vedrò il punto R in direzione IP, cioè più in alto di quanto non sia. Ecco perché lo stagno appare meno profondo della realtà e la bacchetta “si piega verso l’alto”.

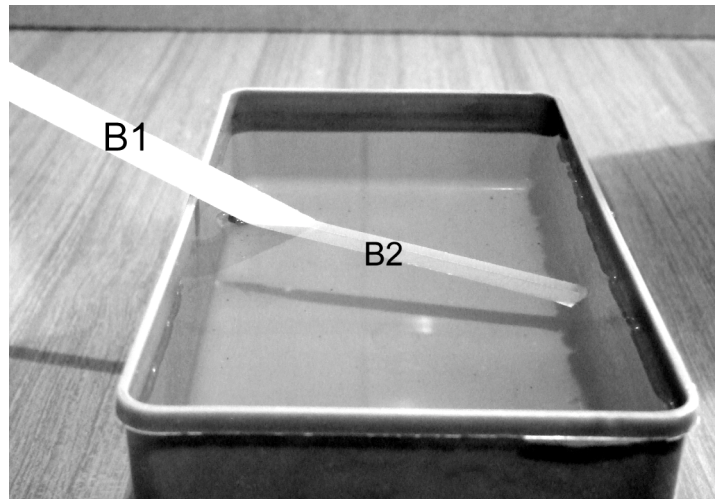


Fig. 3 - La rifrazione fatta in casa

Vediamo ora un’altra verifica sperimentale della rifrazione. Nella fig. 4, da confrontare ancora con la fig. 1, il raggio I è quello “incidente”; il fascio 2 è quello rifratto; la superficie s di fig. 1 è indicata con L in fig. 4 e rappresenta una superficie, piana e lucida, di un prisma in vetro. Il punto d’incrocio dei fasci I ed 1 rappresenta il punto d’incidenza P della fig. 1. Il fascio 1 nasce dalla riflessione parziale del fascio I che si verifica sulla superficie L (ogni superficie liquida o solida funziona da specchio parziale se è lucida).

Nella fig. 4 compaiono degli oggetti (C ed Lf) che vanno spiegati, e cominciamo a pensare a qualche realizzazione pratica.

•• Materiali occorrenti per realizzare i fenomeni descritti in questo articolo ed in qualcuno dei seguenti.

Due lenti d’ingrandimento del diametro di 5 - 8 cm, possibilmente con manico.

Scotch nero largo 10 -12 mm.

Cartoncino, possibilmente nero (del tipo per album di fotografie). Circa 10 × 10 cm.

Cartone bianco semi-rigido di dimensioni almeno 10 × 20 cm. Almeno due pezzi.

Alcuni pezzi di compensato o truciolare di spessore almeno 16 mm. Dimensioni di almeno 10 × 10 cm.

Alcuni pezzi di compensato di spessore 4 - 6 mm, dimensioni almeno 6 × 20 cm.

Un binocolo di basso prezzo (sulle bancarelle se ne trovano da 15 euro in su) del tipo “prismatico” (vedi la fig. 5, P1 e P2). Smontando una delle metà del binocolo prismatico, si recupera uno degli obbiettivi, che servirà più avanti, ed una coppia di prismi retti (fig. 6). Lo smontaggio può essere irreversibile, poiché molti costruttori usano adesivi ed agganci senza ritorno, ma i prodotti di provenienza orientale costano abbastanza poco da non farne rimpiangere la demolizione. ••

<sup>5</sup> chiamato “angolo d’incidenza”

<sup>6</sup> chiamato “angolo di rifrazione”

<sup>7</sup> La luce non conosce sensi unici: un raggio che provenga da I (fig. 1) si piega verso R; se proviene da R si piega verso I. Conta solo la differenza di “densità” (per l’esattezza, di “indice di rifrazione”) fra i due mezzi trasparenti.

Fig. 4- Verifica della rifrazione

Questo dispositivo è una modifica dell'impianto base descritto in fig. 9, che sarà utile anche per molte esperienze future. Dei 5 fasci visibili in fig. 9, solo uno (quello centrale) viene utilizzato poiché i 2 + 2 laterali vengono obliterati da due squadrette in cartoncino nero, indicate con C, poggiate sul piano orizzontale in cartone bianco ("Cart."). Su quel piano è poggiato un blocco di vetro con la faccia L lucidata.

La foto è ripresa dall'alto. La lente Lf è vista di scorcio. La corta traccia bianca indicata con r è il riflesso del fascio I creato dalla faccia lucida L.

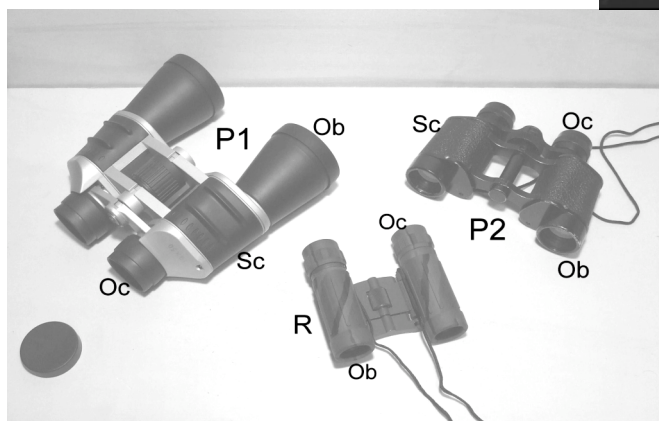
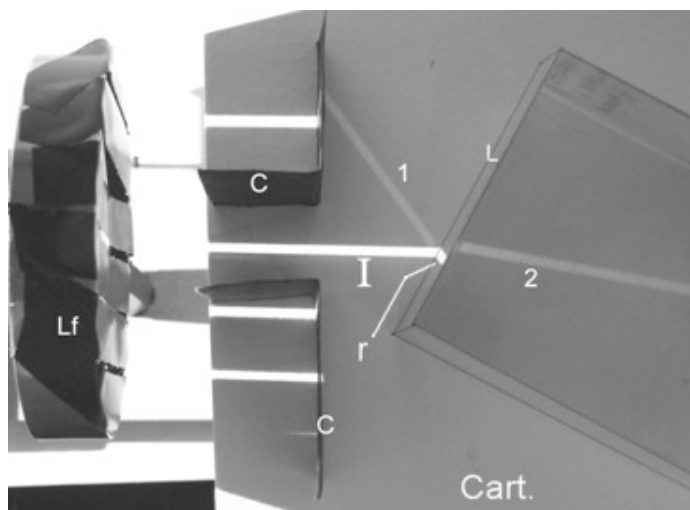


Fig. 5 - Vari tipi di binocoli

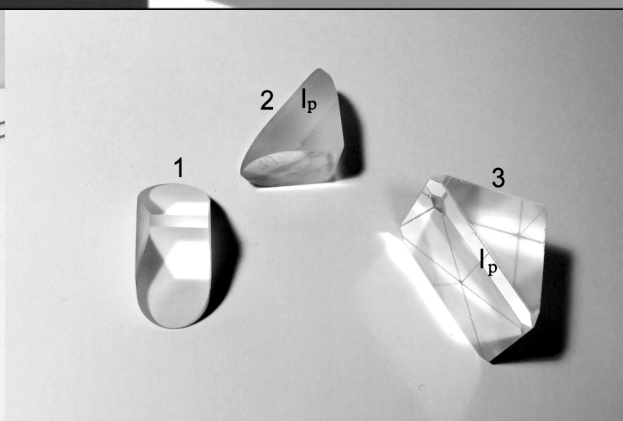


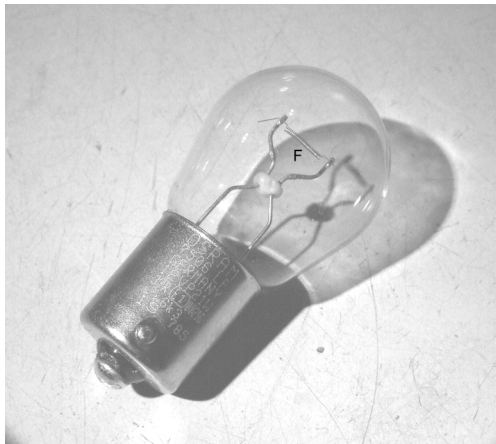
Fig. 6 - Vari tipi di prismi "retti"

NB: i piccoli binocoli compatti, sempre più diffusi, chiamati "roof binoculars" (poiché contengono un prisma composto con una faccia "a tetto"), come quello indicato con R in fig. 5, non vanno bene poiché il prisma è composto e molto piccolo. Occorre cercare il classico binocolo "prismatico" (P1 e P2 in fig. 5), del formato  $8 \times 30$  (P2) oppure il più diffuso "notturno"  $7 \times 50$  (P1). Smontando una delle due scatole dei prismi (Sc), si troverà una coppia di prismi a base triangolare (triangolo rettangolo a cateti uguali) del tipo illustrato in fig. 6, ove Ip indica la faccia ipotenusa. In certi casi, i prismi vengono smussati agli spigoli per ridurre l'ingombro (1 e 2 in fig. 6), e ciò ostacola la visualizzazione di certi fenomeni (vedi la fig. 4 qui sopra e 12-21 nell'articolo O2 ) poiché il fascio rifratto visibile in quelle figure non sfiora più il cartone d'appoggio (per es., "Cart." in fig. 4) e, per metterlo in evidenza, occorre disporre un secondo cartone rialzato di qualche millimetro per evitare l'ombra della smussatura; ciò è facile per il fascio che emerge dal prisma, ma non per il fascio interno (2 in fig. 4). Più semplice è il lavoro se si dispone di un prisma a spigoli vivi (3 in fig. 6). Un tale prisma è reperibile presso la ditta E.D.-Elettronica didattica, CP 87, CAP 23898, IMBERSAGO, (LC), tel. 039-99 20 107 (N° di catal. OT 0088 oppure OT 0239).

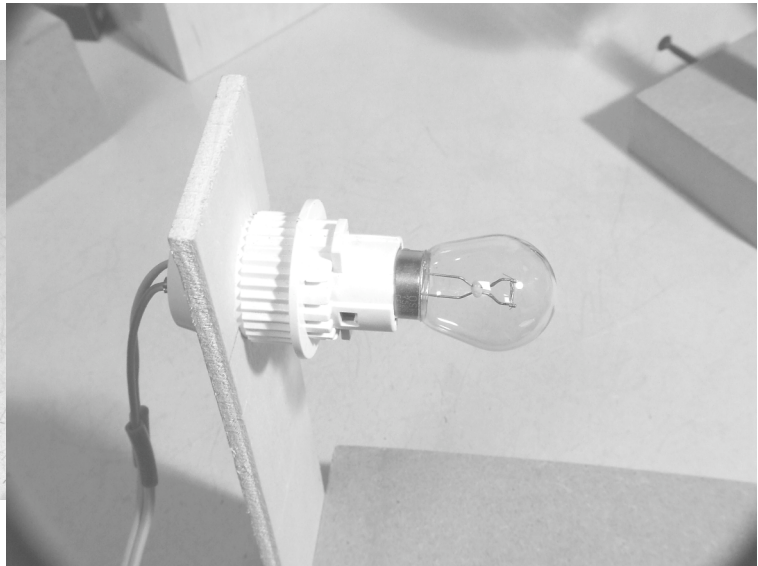
Le superfici di base del prisma (quelle a forma di triangolo rettangolo isoscele) sono otticamente inutili e quindi vengono lasciate smerigliate, non lucidate. Ma quando si desidera osservare il raggio rifratto all'interno del vetro (2 in fig. 4, 1 e 2 in fig. 13 nell'articolo O2, ecc.), occorre guardare dall'alto, proprio attraverso la base smerigliata del prisma. Si risolve il problema rendendo più o meno omogenea la superficie in questione. In ordine crescente di difficoltà, queste sono le soluzioni:

- bagnare la superficie con uno strato sottile ma omogeneo di acqua o, meglio, di olio d'oliva o olio di paraffina (per i micrografi, va benissimo l'olio da immersione!);
- verniciare la detta superficie con uno strato omogeneo di vernice trasparente non satinata ("coppale" o simili);
- sull'olio o sulla vernice, prima che indurisca, poggiare un pezzo di lastra di vetro; va bene una scheggia di vetro da finestre, possibilmente delle stesse dimensioni del prisma;
- portare il prisma da un vetraio e farselo lucidare.

Osserviamo ora le seguenti: Fig. 7



e Fig. 8



A sinistra, si vede una lampadina: si tratta di una lampadina per auto, raffigurata anche a destra, in fig. 8, con attacco a baionetta, da 12 Volt, 21 Watt. Un negozio di accessori per auto può fornire la lampadina e relativo portalam-pada, come si vede in fig 8. La lampadina va alimentata con un trasformatore da 12 V, 30 W, reperibile presso un buon elettricista. Si noti che una tale lampadina deve recare un filamento (F in fig. 7) sottile e dritto, ben diverso dai filamenti delle equivalenti lampadine alimentate a 220 V (come quelle per frigoriferi), che hanno forma a semicerchio o a zig-zag, e che useremo più avanti per altri scopi (vedi O3).

Il porta-lampada può essere sostenuto da un pezzo di compensato dotato di un foro capace di serrare il porta-lampada. Il pezzo di compensato è tenuto in posizione verticale fissandolo ad un blocchetto di legno o ad una scatolina di peso sufficiente (per evitare che si ribalti; vedi la fig. 9).

In fig. 9, al centro, un secondo blocchetto di legno con un foro sostiene per il manico una lente d'ingrandimento di circa 70 mm di diametro. Tale lente va preparata come segue (fig. 10).

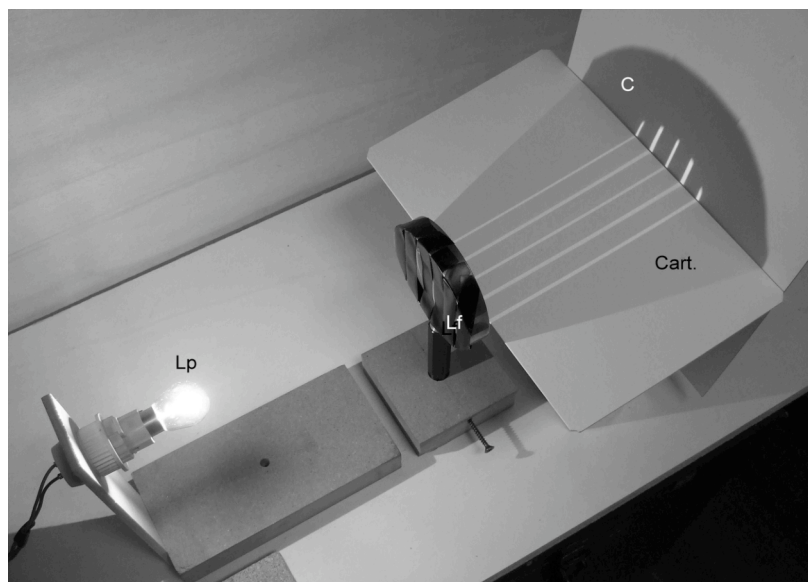


Fig. 9 - Come creare dei fasci paralleli.

Si prenda dello scotch nero largo circa 10 mm. Se ne ricavino sei pezzi lunghi quanto almeno il diametro della lente. Si incollino tali pezzi sulla lente, ben paralleli fra loro e paralleli al manico della lente, lasciando fra un pezzo e l'altro una fessura di circa 3 mm. Ne ricaveremo cinque fessure parallele (fig. 10). Possiamo ora chiamare questa lente "lente a fessure".

Si ponga ora un pezzo di cartone bianco (almeno  $10 \times 10$  cm) su una scatola o su una striscia di cartone piegata a zig-zag, in modo da portare questo cartone bianco ("Cart." in fig. 9) all'altezza del centro della lente. Poiché il filamento della lampadina è allungato verticalmente, i fasci emergenti dalle fessure della lente sono sparsi a ventaglio in senso verticale e quindi sfioreranno la superficie del cartone rendendosi visibili.

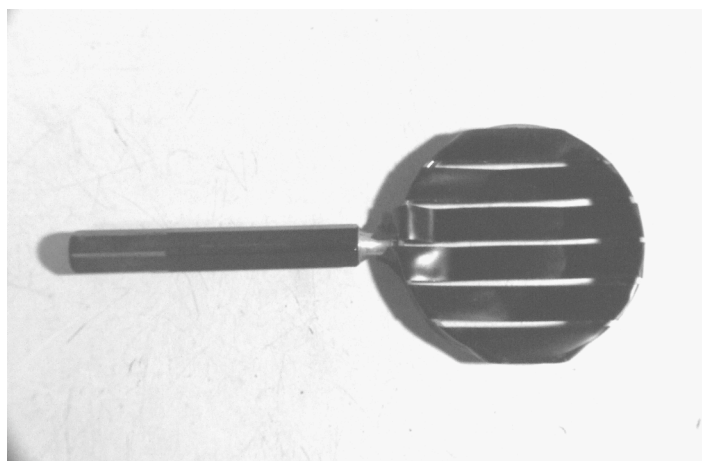


Fig. 10 - La lente d'ingrandimento preparata come "Lente a fessure" (Lf).

Se si ha l'accortezza di sollevare il cartone "Cart." dal lato destro (con una scheggia di legno di qualche mm), i fasci emergenti dalla lente incideranno più obliquamente sul cartone e la loro traccia sarà ancora più visibile.

Se si dispone poi un secondo cartone bianco sulla destra, verticalmente (C in fig. 9), si vedranno su di esso i cinque fasci emergenti dalla lente, all'interno di un cerchio più scuro, che è l'ombra della lente. La lente a fessure di fig. 10 è la lente che appare di striscio in fig. 4 ed un po' obliquamente in fig. 9 (Lf).

Perché questa lente produce dei fasci paralleli come si vedono in fig. 9, se la lampadina è unica?

Impareremo nell'articolo O3 che, se si pone una sorgente "puntiforme" (supponiamo di considerare come un punto la sezione del filamento F di fig. 7) davanti ad una lente convergente, ad una distanza pari alla "lunghezza focale" della lente (ne riparleremo), tutti i raggi emergenti dalla lente saranno paralleli. Ecco che la disposizione di fig. 9 pone una sorgente molto piccola Lp (il filamento della lampadina di fig. 7) ad una certa distanza dalla lente convergente Lf, con le sue cinque fessure; ciò che ne esce sono allora cinque fasci paralleli, visualizzati dalla loro traccia sui cartoni orizzontale (Cart.) e verticale (C).

Torneremo sul concetto di lunghezza focale, ma per ora basterà variare la distanza fra la lente Lf e la lampadina Lp (fig. 9) finché i cinque fasci sul cartone orizzontale "Cart." appaiano paralleli. È ovvio che il piano della lente Lf sarà parallelo al cartone C e la lampadina Lp si trova sull'asse della lente. L'asse ottico di una lente sferica si intuisce come l'asse di simmetria rotatoria della lente stessa, che coincide con la retta perpendicolare al piano della lente e passante per il suo centro. Una definizione più rigorosa nel testo "Problemi tecnici della microscopia...", Cap. 2.5.

Ebbene, in fig. 4 si sono posti sul cartone orizzontale due squadrette di cartoncino nero, indicate con "C", capaci di obliterare i 2 + 2 fasci laterali e si è utilizzato il fascio centrale residuo per osservarne la rifrazione sulla superficie L del prisma. Questo fascio unico ci servirà per altre osservazioni, e ne parleremo nei prossimi articoli.

Per talune osservazioni, il fascio o i fasci che sfiorano il cartone "Cart." di fig. 9 si rendono più brillanti sollevando di qualche mm la lampadina. Abbiamo già accennato ad alcuni accorgimenti che rendono più evidenti i fenomeni che andiamo descrivendo: volta per volta, si cercheranno gli aggiustamenti più opportuni, tenendo presente che ciò che giova da un certo punto di vista, può divenire dannoso da un altro.

Avendo realizzato la rifrazione su una superficie singola, passiamo ora alla sperimentazione su due o tre superfici, in particolare sulle facce laterali di un prisma di vetro.

Alla prossima puntata.