

Ottica sperimentale quantistica e geometrica

Costantino Sigismondi (ICRA/Sapienza, Liceo G. Ferraris, Roma)

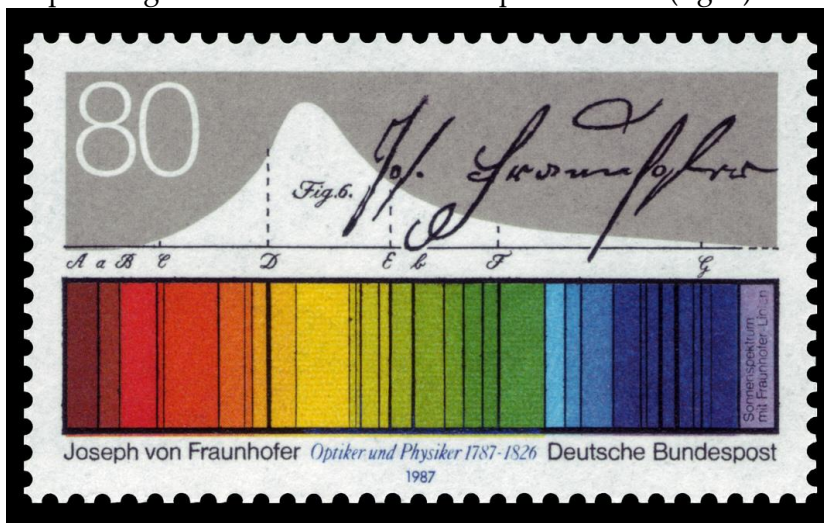
Daniele Impellizzeri (Osservatorio di Gorga e ITA G. Garibaldi, RM)

Abstract Some experiments of Quantum and Geometrical Optics are presented for the Secondary School. The theoretical difficulties are reduced to the minimum required to obtain usefull results.

Sommario Alcuni esperimenti di Ottica Quantistica e Geometrica sono presentati riducendo al minimo il contenuto matematico.

1. La diffrazione di Fraunhofer da una fenditura

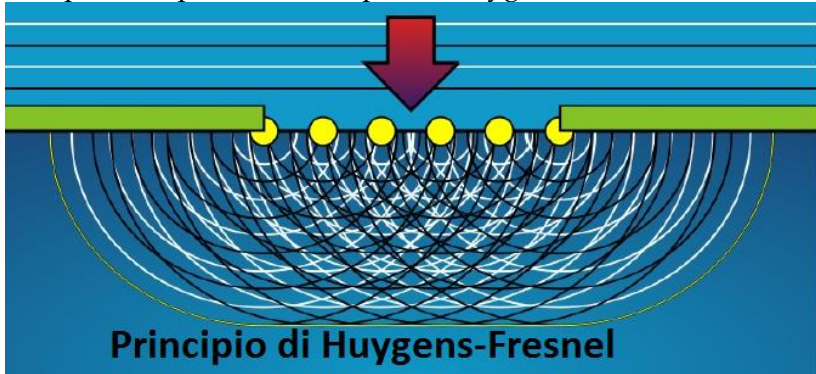
Ci sono due modi di fare diffrazione, alla Fraunhofer e alla Fresnel: due grandi ottici della prima metà dell'ottocento. Joseph Fraunhofer (1787-1826) era il migliore costruttore di strumenti della sua epoca, realizzò tra gli altri l'eliometro e scoprì le righe di assorbimento dello spettro solare (fig. 1).



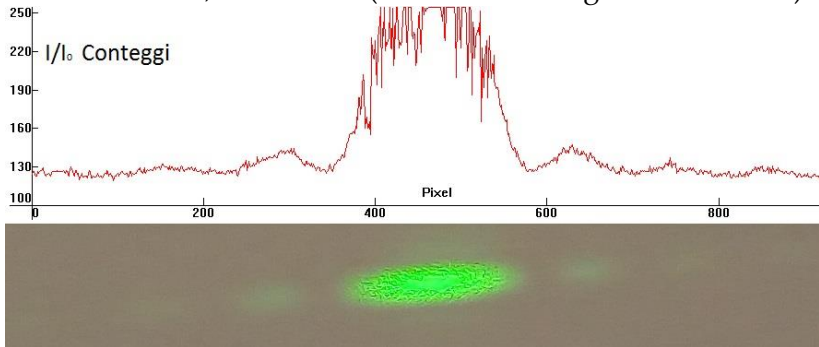
Augustin-Jean Fresnel (1788-1827) ingegnere francese¹ sosteneva la teoria ondulatoria della luce, ed è considerato il secondo fondatore dopo Christiaan Huygens (1629-1695).

1 https://it.wikipedia.org/wiki/Lente_di_Fresnel

Per questo si parla di Principio di Huygens-Fresnel sulle onde.



Ogni punto della fenditura in **fig.2** dove arriva un treno d'onde piano dall'alto, diventa sorgente elementare di onde sferiche: la loro sovrapposizione dà la forma dell'onda uscente, che sullo schermo dà luogo a figure d'interferenza, un'alternanza di luce e ombra, come sotto (in verde l'immagine con $F=40$ m).



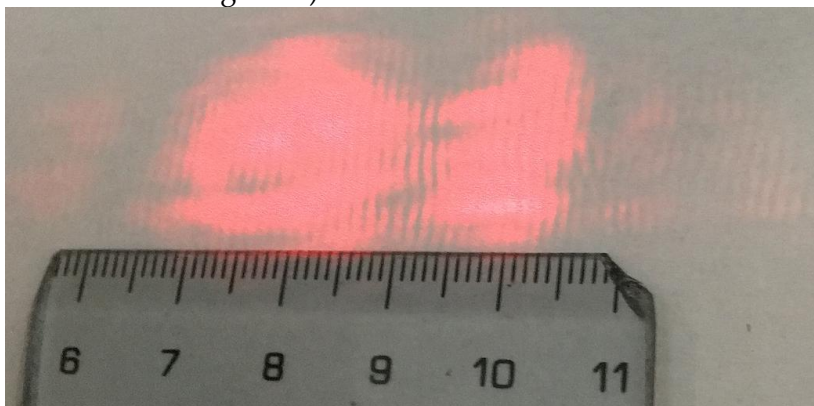
L'intensità teorica del picco centrale di **fig. 3** è il doppio di quella dei picchi secondari. L'ampiezza D dal picco centrale dal massimo al primo minimo a $F=40$ metri dalla fenditura vale $D=10$ cm. L'angolo $\theta=D/F$ sotteso da D alla distanza focale F vale $\theta=\lambda/d$, con λ lunghezza d'onda del Laser, e d apertura della fenditura. Se $D=10$ cm e $\lambda=532$ nm si ha $d=0.106$ mm. Condizioni teoriche per avere l'interferenza alla Fraunhofer sono quelle che sia sulla fenditura che sullo schermo arrivino

onde piane, in numeri focale F e schermo-fenditura $S, F > d^2/\lambda$.

2. Interferenza di Young con due fenditure

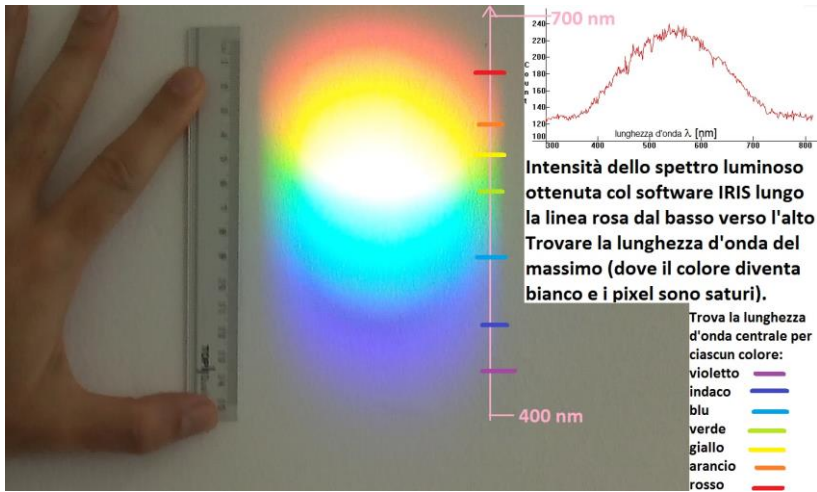
Con un apparato simile a quello per l'esperimento di Fraunhofer le fenditure sono colpite dallo stesso fascio laser. Per allungare la focale f e vedere bene l'effetto dell'interferenza delle due fenditure strette con separazione s tra loro, si è posto uno specchio piano dopo le fenditure, che rimandasse la luce indietro. Le figure di interferenza così ottenute sono solcate da tante piccole linee oscure verticali separate d tra loro.

La teoria di Young dice che $d = \lambda f / s$ e con $\lambda = 638.2 \text{ nm}$, $f = 9 \text{ m}$, $s = 5.5 \text{ mm}$, $d = 1.04 \text{ mm}$. Le misure di $d = 1.11 \text{ mm}$ (27 righe su 30 mm nella foto seguente) la confermano.



3. Il Prisma di Newton e lo spettro di Planck

Ponendo un prisma di vetro con 2 angoli a 45° col lato verticale verso il Sole è stata ottenuta sul muro a 6.5 metri di distanza un'immagine dello spettro solare di circa 15 cm.



L'immagine di **fig. 4** è la sovrapposizione di 7 immagini stenopeiche (vedi § 3) di colori diversi ognuna di diametro 6.5 cm. Dove si sovrappongono tutte abbiamo il colore bianco (sintesi cromatica additiva) e la saturazione. Il picco di intensità corrisponde anche alla temperatura $T \approx 3 \cdot 10^6 / \lambda_{\max} [\text{nm}]$ usando la legge sperimentale di Wien (1893). Esaminando la foto è possibile ricavare la lunghezza d'onda del massimo conoscendo quella degli estremi dello spettro visibile (violetto 400 nm e rosso 700 nm) e così valutare la temperatura della fotosfera solare dalla teoria del Corpo Nero di Max Planck (1900). La foto originale in jpg è stata analizzata con la funzione *slice* del software IRIS,² la stessa usata per le intensità dei picchi di Fraunhofer in fig. 3. Le lunghezze d'onda dei colori risultano approssimate.

4. Lo specchio piano, il foro stenopeico e il Sole

Ogni punto dello specchio è una sorgente stenopeica infinitesima che produce un'immagine del Sole. *Stenopeico* è sinonimo, in greco, di *stretto*. La convoluzione di tante

² <http://www.astrosurf.com/buil/us/iris/zip/iris.zip>

immagini stenopeiche elementari è l'immagine integrale che noi vediamo. Uno specchietto a grande distanza produce, indipendentemente dalla sua forma, un'immagine circolare o ellittica del Sole, a seconda dell'inclinazione dello schermo su cui proietta. Provare con degli specchi schermati con un quadrato o un triangolo di carta di 2 cm di dimensioni, proiettando l'immagine ad almeno 5 metri di distanza.

Mandando la luce del Sole su uno schermo in cui è praticato un foro circolare riproduciamo in piccolo il funzionamento di una grande meridiana solare a foro stenopeico come quelle di Santa Maria degli Angeli a Roma, San Petronio a Bologna o del Duomo di Milano e della Cattedrale di Palermo, o ancora di Santa Maria del Fiore a Firenze (ma solo al solstizio d'Estate).

Quella di Bologna fu anche chiamata Eliometro da Giandomenico Cassini (1625-1712) che la ricostruì nel 1655, perché serviva a misurare il Sole con una precisione mai raggiunta prima. Quell'eliometro non utilizzava lenti, solo un foro vuoto. Con questo foro si possono vedere dei dettagli sul Sole, come le macchie solari, impossibili da vedersi ad occhio nudo anche con un vetro affumicato. La luce solare che attraversa un foro stenopeico ha una collimazione piuttosto elevata, tanto che è possibile vedere fenomeni di diffrazione alla Fraunhofer ponendo un ostacolo tra il foro e lo schermo: l'ombra gettata da questo ostacolo è molto netta, ed un tenue filo di luce appare nella zona buia.³

5. La luce collimata, la penombra e la diffrazione

I fari di un'automobile sono il primo esempio di luce collimata.

3 Osservazioni fatte a Bukowiec, Polonia con un foro stenopeico a specchio di 80 metri di focale (Osservatorio Astronomico Silvestro II – e scuola elementare Copernico)
<https://www.youtube.com/watch?v=eRMONTQy3Z4>

Se così non fossero l'energia generata dal faro si disperderebbe rapidamente su un angolo di apertura grande mancano l'obiettivo di illuminare a distanza. Misurare l'angolo di collimazione di una sorgente luminosa serve a capire come l'energia viene diffusa. Un altro aspetto legato alla collimazione della luce è la penombra: più la sorgente è puntiforme, più le ombre che gettano ostacoli intermedi sono nette, senza penombra. La **penombra** è una regione dell'immagine dove cade solo una parte della luce della sorgente, l'**ombra** invece è la regione dove non cade alcuna luce dalla sorgente. Se la sorgente è puntiforme, non esiste una regione da cui si possa vedere solo una parte della sorgente, perciò non esiste penombra. Il Sole è una sorgente estesa, infatti ci si può trovare in una zona da cui se ne vede metà o una parte, per esempio sul limite dell'ombra di un palazzo.

L'ombra di un registro di classe a F metri comprensiva di penombra va confrontata col registro stesso. La differenza è la penombra p , ed il diametro del Sole è $\theta \approx 57^\circ \cdot d/F$. Qui misuriamo il diametro del Sole a partire dalla dimensione della penombra e dalla distanza oggetto-schermo.

Un altro esperimento da fare sulla collimazione della luce è con la luce di un proiettore. L'ombra di un oggetto tra il proiettore e lo schermo è tanto più netta quanto meglio le lenti del proiettore sono corrette rispetto alle aberrazioni sferiche. Con un proiettore in dotazione in classe abbiamo verificato dalla penombra di oggetti valori della collimazione attorno ad $1/3$ di grado, appena tollerabili perché la proiezione avviene tra 1 e 2 metri di distanza e la lavagna luminosa è vista da 2 a 7 metri di distanza.

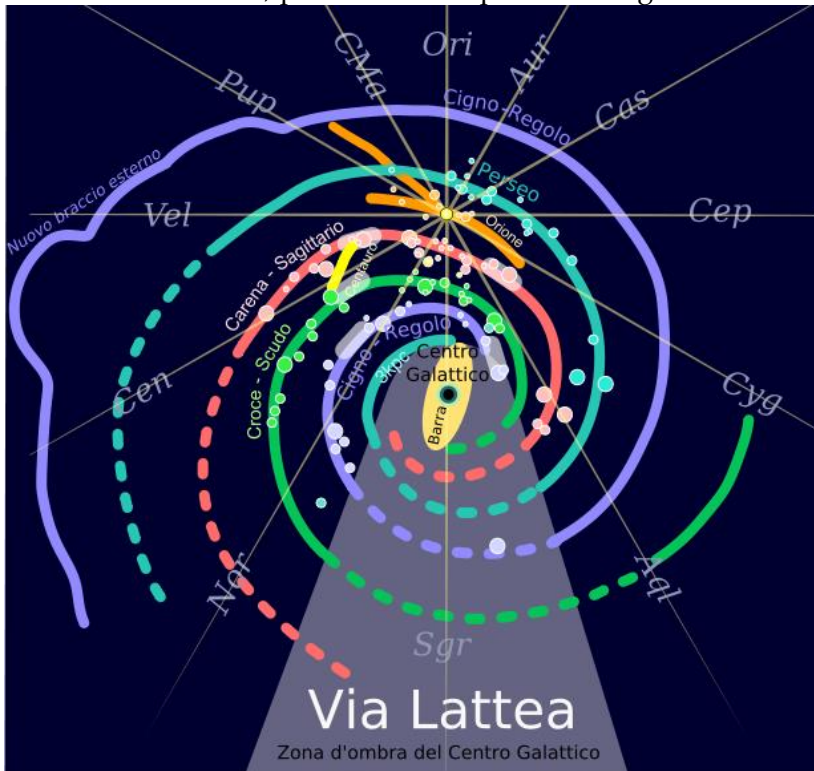
Se abbiamo una immagine stenopeica del Sole, i raggi che la producono sono separati al massimo di 32 minuti d'arco che è il diametro angolare del Sole. Tuttavia tra un punto e l'altro

dell'immagine, separati della dimensione lineare del foro, che è il *pixel di risoluzione* dell'immagine, possiamo avere raggi che sono inclinati tra loro meno di 60 secondi d'arco, fino a 10 secondi d'arco nelle immagini più grandi. Questa minima inclinazione dei raggi permette di realizzare le esperienze di diffrazione alla Fraunhofer e vedere le interferenze costruttive e distruttive sotto forma di buio e luce anche con luce bianca. Il Laser è monocromatico, ma non perfettamente collimato.

6. La fotometria delle stelle variabili e le Novae

La Nova dello Scudo 2017 è stata scoperta il 23 giugno dalla "All Sky Automated Survey for SuperNovae" ed ha raggiunto il primo massimo tra il 26 ed il 30 Luglio. Fino al 20 Novembre dove ha raggiunto un altro massimo di magnitudine 9.9 ho fatto una serie di 57 osservazioni in visuale con la Nova che ha raggiunto 5 massimi e 4 minimi successivi, con trend decrescente. La luminosità della stella ha oscillato su e giù già 4 volte e questa è la quinta volta che si riaccende. Ogni volta risale di almeno 5 volte (circa 2 magnitudini) in luminosità nello spazio di 10 giorni e si indebolisce di altrettanto in 20 giorni circa. Questo è un comportamento simile alla seconda Nova del Sagittario del 2015 (V5668 SGR), che ho osservato il 20 settembre 2017 ancora di magnitudine 11.6 dal massimo raggiunto a partire da un massimo iniziale di magnitudine 3.9. La V5668 SGR ha oscillato sette volte all'inizio, per poi perdere velocemente 7 magnitudini e poi ritornare alla 8.5 per iniziare una lentissima discesa di 3 magnitudini in 2 anni ancora in corso. La Nova Scuti 2017 sembra dunque ripercorrere la fase oscillatoria, ma partendo da una magnitudine iniziale massima quasi 5 volte più debole. Ciò corrisponderebbe ad un'intensità 1/100 e ad una distanza 10 volte maggiore (se l'oggetto esploso avesse avuto la stessa intensità) e ciò

potrebbe accordarsi con la geometria del braccio dello Scudo-Croce nella Galassia, più lontano di quello del Sagittario.⁴



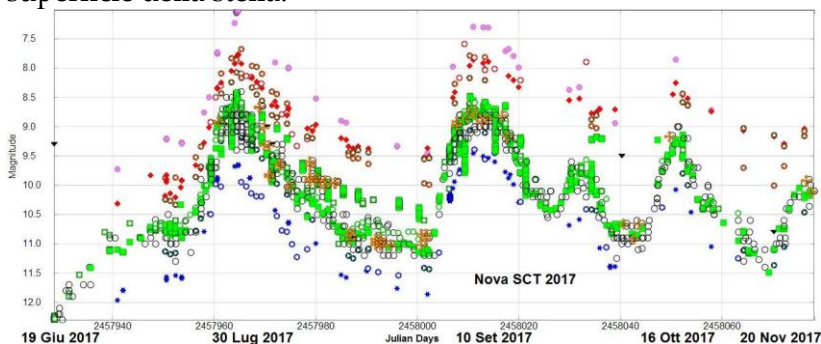
Il confronto tra queste due Novae, e tra le migliaia di curve di luce raccolte, tra gli altri, dall'Osservatorio di Asiago, permette di comprendere meglio la fisica di queste esplosioni nucleari che avvengono sulla superficie di stelle nane bianche, generalmente in un sistema binario con una gigante che cede materia attraverso il lobo di Roche. Tuttavia desidero mostrare come l'interpretazione della prima fase, quella oscillatoria, possa condurre normalmente ad un modello basato sui moti circolari, non troppo dissimile da quello proposto

4 https://it.wikipedia.org/wiki/Braccio_Scudo-Croce

dall'astronomo polacco Hevelius (1611-1687) per Mira, la più antica delle stelle variabili storiche, ancora basato sugli epicicli classici. Il sacerdote Ismael Boulliau⁵ (1605-1694) spiegò i massimi irregolari di Mira con la variazione della posizione delle macchie, le quali ruotando la stella producevano le variazioni periodiche della luminosità.

Una stella che orbita su un epiciclo oppure le macchie sulla superficie di una stella rotante appartengono ad uno stesso modello basato sul moto circolare uniforme.

La Nova Scuti 2017 nelle sue oscillazioni quasi periodiche di circa 25 giorni, potrebbe essere rappresentata da una nube che ruota attorno alla stella con periodo 25 giorni, che periodicamente la oscura e la svela. Il trend decrescente in luminosità dei massimi invece riguarda ciò che accade sulla superficie della stella.



Benché i modelli interpretativi delle Novae siano oggi molto più complicati, i sali-scendi della Nova Scuti 2017 difficilmente trovano spiegazioni più semplici da immaginare. La discussione di modelli più complicati è il lavoro specifico degli astronomi, che devono dimostrarne la validità con

5 M. Hoskin (2002) in http://www.treccani.it/enciclopedia/l-eta-dei-lumi-astronomia-l-astronomia-stellare_%28Storia-della-Scienza%29/

osservazioni più accurate e previsioni più precise.

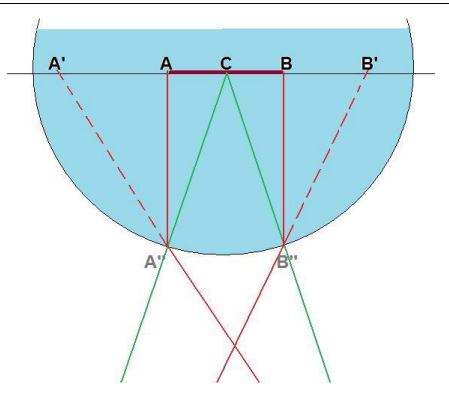
La fotometria viene fatta confrontando la luminosità della Nova con quella di altre stelle circostanti considerate fisse. Il metodo che è dovuto ad F. W. A. Argelander (1799-1875) è sostanzialmente una interpolazione lineare tra una stella più luminosa ed una più debole della Nova. La precisione può arrivare anche a ± 0.01 magnitudini, ad occhio nudo.

7. La matita spezzata e l'indice di rifrazione dell'acqua

L'esempio di una matita immersa nell'acqua, che appare spezzata, è molto popolare per mostrare gli effetti della rifrazione della luce nell'acqua. La misura dell'indice di rifrazione dell'acqua può essere fatta usando un bicchiere cilindrico e una matita immersa per metà lungo l'asse centrale. Facendo una foto che includa nel campo di vista la parte emersa e quella immersa nell'acqua si vede come la seconda sia ingrandita. Per un bicchiere di diametro 10 cm, l'ingrandimento vale 1.6x.

Tracciando lo schema ottico di quanto accade e prolungando i raggi luminosi che arrivano all'osservatore esterno da AB all'indietro si crea un'immagine virtuale ingrandita A'B' dentro la diottra d'acqua, lungo il diametro stesso.

AB=1, $A'B'/AB=1.6$ è stato misurato con questa configurazione; l'angolo d'incidenza è $\hat{C}A''A$, l'angolo di rifrazione è opposto al vertice di $A'\hat{A}''A$; la legge di Snell $n \cdot \sin(i) = \sin(r)$ si approssima $n \cdot CA/CA'' \approx 1 \cdot A'C/A'A''$ da cui $n \approx 0.8/5/(0.5/5) = 5/8 = 1.4$ valore molto vicino ad $n=1.33$ che è il valore giusto. Risolvendo i triangoli $n=1.597$



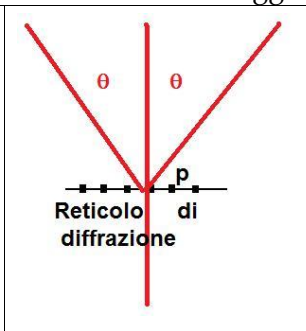
8. La diffrazione alla Bragg e la misura della λ

Usando un reticolo di diffrazione gli si manda contro perpendicolarmente un raggio Laser o un pennello di luce solare. La luce riemerge divisa in tre fasci principali: quello diretto, e i due diffratti e simmetrici rispetto al centrale.

L'angolo formato dai due raggi diffratti, θ , è in relazione con il passo del reticolo p e la lunghezza d'onda λ mediante la legge:

$$\lambda = p \cdot \sin(\theta),$$

ottenuta imponendo semplicemente che da un reticolo orizzontale di passo p ad un angolo θ differenti onde interferiscano positivamente sullo schermo parallelo al reticolo (lo schermo sta sopra nella figura con i due massimi secondari, qui a fianco)



Abbiamo svolto esperimenti con il laser verde, quello rosso e con la luce solare, ottenendo con questa legge i valori di λ col 5% di precisione.

La trattazione completa dello spettroscopio a reticolo e di quello a prisma sono molto più complicate matematicamente.

9. Lo spettro della luce a fluorescenza

La taratura di uno spettroscopio a reticolo consente di misurare i valori della lunghezza d'onda di alcune righe di emissione, come nel caso delle lampade a fluorescenza usate per l'illuminazione in classe.

Confrontando i valori misurati con quelli degli atlanti di spettroscopia si può risalire all'elemento chimico che ha prodotto quelle righe, e nel caso delle luci «al neon» si scopre che sono le radiazioni prodotte dai vapori del Mercurio ad illuminare, il Mercurio che è rarefatto nel Neon, necessario a raggiungere la pressione atmosferica all'interno del tubo.

10. Le stelle al telescopio, il disco di Airy e la diffrazione

alla Fresnel

Quando si ha l'occasione di vedere le stelle al telescopio il commento che tutti fanno è «quanto sono piccole!» eppure non sanno che il pallino che vedono non è la dimensione fisica della stella, molto lontana, ma ne è la sua figura di diffrazione attraverso l'apertura di diametro D che è l'obbiettivo del telescopio. George Biddle Airy (1808-1894) Astronomo Reale a Greenwich, trovò la formula che descrive l'ampiezza angolare del disco centrale di diffrazione: $\theta = 1.22 \cdot \lambda / D$, dove λ è la lunghezza d'onda della luce e D il diametro dell'apertura attraverso cui la luce passa. Per angoli piccoli vale la definizione geometrica che $\tan \theta = r/f \approx \theta$

Misurando $f = 37777$ mm ed $r = 27.1$ mm risulta $\theta = 7.17 \cdot 10^{-4}$ rad.

Con $\lambda = 632.8$ nm risulta $D = 1.09$ mm.

In questa legge il diametro D dell'apertura è inversamente proporzionale all'angolo formato dal pallino sullo schermo visto dall'apertura circolare. Così da un'apertura di 109 mm ci aspettiamo un angolo $\theta = 7.17 \cdot 10^{-6}$ rad ovvero di $1.48''$. Questa è la dimensione angolare dell'immagine delle stelle al telescopio, ed anche di un tipico seeing atmosferico. Osservando bene possono vedersi anche le centriche di diffrazione, prodotte dai massimi successivi di interferenza. Invece un piccolo pianeta o satellite che abbia dimensioni angolari anche inferiori di $1.48''$ non appare con le centriche perché ciascun punto della sua superficie estesa genera una figura con centriche, ma l'involuppo di tutte loro cancella le singole centriche.⁶

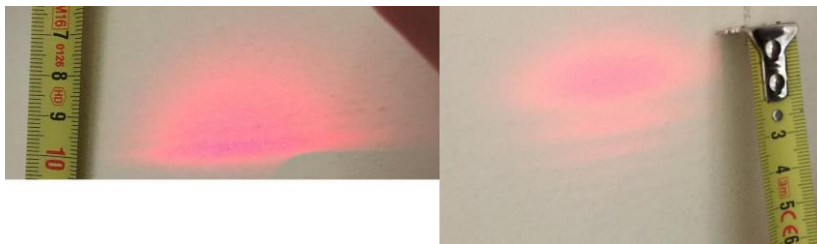
Con lo stesso apparato sperimentale si può misurare la diffrazione di Fresnel, per cui l'interferenza costruttiva delle

6 È il caso di Nettuno e Tritone ripresi con un telescopio Newton di 40 cm
<http://www.acquerra.com.au/astro/gallery/other/20171113-092048/n20171113-0920-0946-1016.gif>

ma anche Urano e Nettuno con un Newton di 7.6 cm privi di centriche, e simili in dimensioni alle stelle vicine cf. Sigismondi, Gerbertus **8**, 91 (2015)

onde che partono vicino ad un bordo infinitamente esteso produce un'alternanza di luce e ombra sullo schermo.

La formula⁷ di Fresnel dà la distanza angolare del primo minimo pari a $b=\sqrt{(\lambda \cdot f)}$, che nei due casi esaminati con $f=19\text{m}$ (a sinistra) ed $f=38\text{m}$ (a destra), e $\lambda=632.8\text{ nm}$ vale $b=4.9$ e 3.5 mm .



Nel caso della diffrazione alla Fresnel gli spazi tra i minimi vanno diminuendo allontanandosi dal massimo, mentre nella diffrazione di Airy e di Fraunhofer restano equispaziati.

11. La riflettanza di uno specchio

Prendendo uno specchio piano è possibile inviare la luce del Sole su un pannellino solare collegato ad un voltamperometro: la potenza P_r prodotta dalla luce riflessa va confrontata con quella della luce solare diretta P_d , la riflettanza dello specchio vale $r=100\% \cdot (P_r/P_d)$. Se lo specchio è concavo bisogna avere l'accorgimento di riflettere la luce molto vicino allo specchio per poter trascurare l'effetto di focalizzazione.

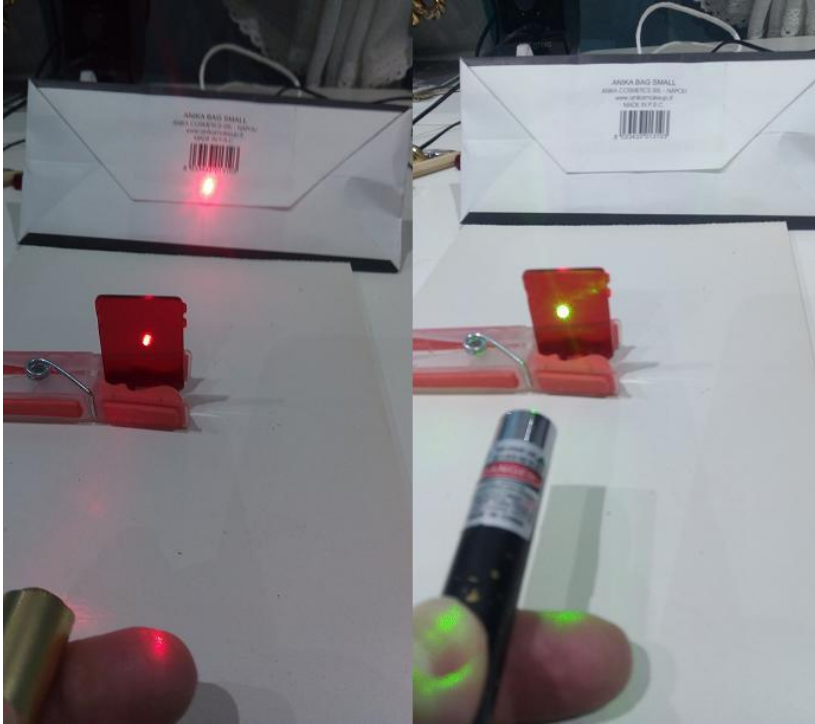
12. La trasmittanza degli occhiali e dei filtri

Analogamente di quanto fatto per la riflettanza si fa con la trasmittanza di lenti da occhiali o di filtri. $t=100\% \cdot (P_t/P_d)$, facendo attenzione a schermare il pannellino solare dalla luce ambientale durante la misura di luce trasmessa.

Nelle immagini seguenti si mostra un caso di trasmittanza nulla usando luce Laser: la rossa passa attraverso il filtro

⁷ <http://spiff.rit.edu/richmond/occult/bessel/bessel.html#mono>

rosso, e in parte è anche assorbita e riflessa, mentre la verde viene respinta o assorbita dal filtro, senza attraversarlo.



13. La rifrazione su Tritone e quella al tramonto

Il 5 ottobre 2017 Tritone, il maggiore satellite di Nettuno e tra i più grandi del sistema solare, ha occultato una stella ed il fenomeno è stato seguito da molti osservatori in Europa e negli USA. Al centro dell'occultazione è apparso un flash prodotto dalla rifrazione della luce della stella attraverso la tenue atmosfera di Tritone. Il fenomeno era accaduto nel 1997, e Voyager II visitò Nettuno e Tritone il 25 agosto 1989.⁸

8 D. Dunham, <http://www.skyandtelescope.com/astronomy-news/surprising-results-from-octobers-triton-occultation> (2017)

Queste occultazioni hanno permesso di stabilire i parametri dell'atmosfera di Tritone, che sublima a temperature di 40 K, e che negli ultimi 20 anni c'è stato un riscaldamento globale dell'atmosfera. La rifrazione di questa atmosfera può essere capita a partire dal tramonto del Sole qui sulla Terra: il Sole viene alzato di 35' dall'atmosfera. Su Tritone di 1354 km di raggio a 30 UA l'osservazione del flash implica che i raggi di luce di quella stella sono stati deviati di $\theta=1354/(30 \cdot 149.6 \cdot 10^6)=3 \cdot 10^{-7} \text{ rad}=0.06''$ dall'atmosfera, che quindi è meno densa di quella terrestre in ragione del rapporto tra 0.06'' e 35', cioè lo 0.03‰, ovvero 1/33700.

Un quadro completo viene però dalla termodinamica: il gas dell'atmosfera passa direttamente dallo stato solido a quello gassoso, e alla temperatura di 40 K esiste una pressione di equilibrio (40 mB, che sarebbe il 4% di quella terrestre), molto maggiore di quella su Tritone. Significa che non c'è equilibrio tra sublimazione e brinamento, con una maggior quantità di gas che sublima rispetto a quello che ritorna in fase solida. L'atmosfera non dovrebbe dunque essere stabile, benché la velocità di fuga 1500 m/s sia nettamente superiore alla velocità termica delle molecole a 40 K, cioè 190 m/s.

La variazione dell'intensità tra il 1997 e il 2017 del flash centrale è legata alla variazione di questa densità, che dipende dalla temperatura: al suo aumentare la rifrazione diminuisce, riducendosi l'effetto focalizzante dell'atmosfera di Tritone alla distanza della Terra.

14. Misura della focale di uno specchio concavo

Il metodo più rapido è trovare dove mette a fuoco il Sole, che si trova in pratica all'infinito, ma è istruttivo utilizzare pure l'equazione $1/p+1/q=1/f$ che vale pure per le lenti sottili.

Si prende come sorgente la luce di una lampada (e.g. neon

presenti nelle aule di scuola) e se ne proietta l'immagine sul muro. La distanza tra specchio e immagine è p , la distanza tra specchio e sorgente è q . Con $p=2.37$ m e $q=1.02$ si è trovato $f=0.713$ m; con $p=0.72$ m e $q=\infty$ (è il Sole), $f=0.72$ m. Con queste semplici misure si è determinata la focale di uno specchio da barba con la precisione migliore di ± 1 cm. **Tuttavia c'è un'altra immagine con $p=2.28$, $q=0.76$ e $f=0.57$, che non è spiegata.**

15. La rifrazione nel bicchiere d'acqua

Si pone un pezzo di righello nel fondo del bicchiere, si misura la profondità dell'acqua h , e si vede lo spostamento di una posizione del righello rispetto alla sua verticale osservato da una direzione inclinata.

16. Curvatura ed estinzione atmosferica

Con il pannellino solare si misura V e I dal Sole, con l'accorgimento di disporre il pannellino perpendicolarmente alla direzione dei raggi del Sole.

Facendo la misura a partire dal mezzogiorno di una giornata serena fino al tramonto si potranno disporre su un grafico Potenza[W]-Altezza[h°] i dati e verificare il loro andamento.

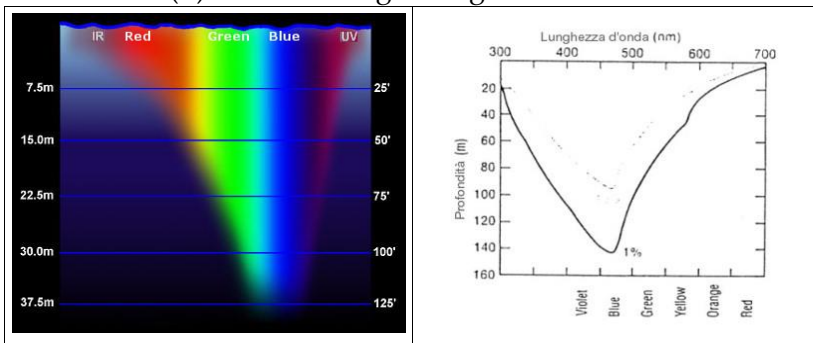
L'andamento del $\log(\text{Potenza}[W])$ in funzione dell'Altezza[h°] è una linea retta. Attorno a mezz'ora prima del tramonto la retta può cambiare d'inclinazione a causa degli strati più bassi di atmosfera ricchi di umidità. Se la Terra fosse piatta ed anche la sua atmosfera, al tramonto il Sole dovrebbe essere invisibile, perché offuscato da infinita atmosfera, se fosse piatta, ma finita l'andamento presso il tramonto dovrebbe mantenere un andamento rettilineo, che è la pura "legge della cosecante" (massa d'aria proporzionale a $1/\sin(h^\circ)$). La massa d'aria vale 1 in direzione verticale (zenit) ed aumenta verso l'orizzonte; la pendenza della retta fornisce l'estinzione per massa d'aria: a Roma vale 0.23 magnitudini/massa d'aria. Una magnitudine corrisponde ad un rapporto di intensità pari a 2.512, così che

cinque magnitudini corrispondano a 100, dieci magnitudini a 100^2 e così via. All'orizzonte si arriva a 5 masse d'aria, con la perdita netta di 1.15 magnitudini, per il Sole e per le stelle.

17. Trasmittanza e colore dell'acqua

Alla Fontana di Trevi sul lato sinistro c'è una vasca meno profonda (circa 15 cm) delle altre che superano i 50 cm. Nell'acqua sottile si vede bene il fondo bianco, mentre in quella profonda il colore si scurisce.

È interessante notare che questo è dovuto alla trasmittanza della luce nell'acqua, il cui andamento dipende dalla sua lunghezza d'onda λ . In particolare la luce blu riesce a penetrare più delle altre⁹ e questo dà luogo all'effetto finale che l'acqua del mare è blu. L'estinzione della luce solare in acqua è tale che la profondità a cui arriva l'1% della luce varia con il colore (λ) secondo le figure seguenti.



La componente rossa non arriva a 7 metri di profondità, la blu invece fino a 140 metri, 20 volte tanto. Per questo il colore del mare è blu. I due grafici sono speculari, e riferiti a diverse %.¹⁰

18. L'angolo di Brewster di 57° tra aria e acqua

Nella teoria della riflessione si trovano le equazioni di Fresnel che descrivono le intensità delle componenti della luce ai

⁹ <https://www.ilgiornaledeimarinai.it/la-penetrazione-della-luce-mare/>

¹⁰ http://www.biologiamarina.eu/Luce_in%20acqua.html

diversi angoli, in particolare la componente polarizzata trasversalmente alla direzione di propagazione è l'unica che si trasmette all'angolo di Brewster, dove l'altra va a zero. L'angolo β trovato da sir David Brewster (1781–1868) risolve l'equazione $\tan(\beta)=n(\text{acqua})/n(\text{aria})=1.33$, da cui $\beta=53^\circ$, formati con la normale. L'effetto della luce del cielo riflessa e polarizzata in un'unica direzione sull'acqua si vede bene a Villa Pamphili. Nel Giardino Segreto di Villa Algardi la luce



riflessa dalla Peschiera è più scura di quella del cielo il 4/12/17. L'acqua della fontana del Putto è più chiara perché la luce è riflessa ad un angolo minore di quello di Brewster (4/12/2017).



19. Parametri di uno specchio parabolico

A partire dall'equazione di una parabola $y=ax^2$ si ricavano il fuoco f e l'altezza del bordo dello specchio h rispetto al centro.

20. La rifrazione differenziale atmosferica di Laplace

Il Sole al tramonto sul mare si mostra di forma schiacciata, poiché il bordo inferiore è alzato di più di quello superiore dalla rifrazione atmosferica. Questo innalzamento differente a seconda della posizione nel Sole è dovuto alla rifrazione differenziale. La valutazione della rifrazione atmosferica su una stella di data altezza $h[^\circ]$ portò Laplace alla formulazione $z=z_0-60''\tan(z_0)$, dove z è l'angolo zenitale dopo la rifrazione e z_0 quello fuori dall'atmosfera. Il fatto che l'angolo zenitale diminuisca in presenza di atmosfera significa proprio che la stella (o il bordo del Sole) è spostato leggermente verso l'alto, e questo spostamento è tanto maggiore quanto più basso è l'astro (cioè quanto maggiore è z).

21. La luce stenopeica e la diffrazione di Fresnel

Si può vedere il fenomeno della diffrazione di Fresnel anche usando luce bianca, ma fortemente collimata. Questo avviene nella luce del Sole che attraversa un foro stenopeico. Se il foro ha diametro d e si trova a distanza L , su ogni punto dello

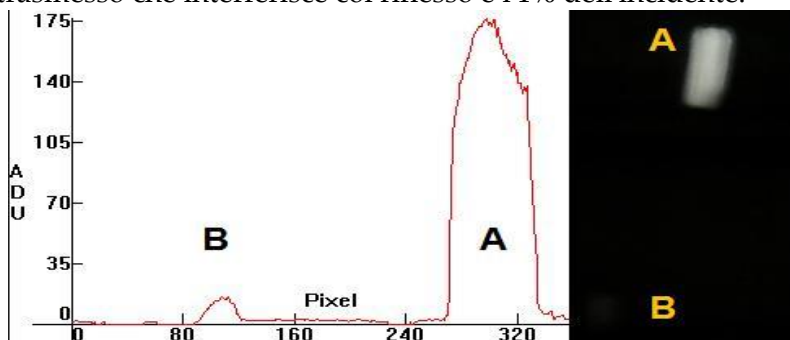
schermo su cui arriva la luce del Sole la luce in ogni regione di dimensione inferiore a d ha un grado di collimazione pari a $(57 \cdot d/L)^\circ$. Per esempio un foro di $d=1$ cm a $L=50$ m ha un grado di collimazione di $0.0114^\circ=41''$. Un ostacolo posto a 15 metri di distanza dallo schermo produce una regione brillante esterna al bordo dell'ombra, ben percepibile a 2 mm da questa, e poi una regione più oscura che aumenta il contrasto. La lunghezza di Fresnel vale circa 2.7 mm, che spazzano un angolo di $38''$ dal bordo allo schermo. Subito dopo il transito alla meridiana di S. Maria degli Angeli in Roma, per effetto della colonna che intercetta la luce, il fenomeno è visibile d'inverno. Un'altra circostanza per vedere il fenomeno è con il Sole che scende dietro una casa ad un centinaio di metri: negli ultimi istanti la luce diventa molto collimata e la diffrazione di Fresnel avviene nitidamente anche con i capelli più sottili.

22. L'interferometro di Michelson e lo specchio semiriflettente

Nel famoso esperimento di Michelson (1887) con cui si è provato a sommare vettorialmente la luce con la velocità orbitale terrestre, è stato realizzato un interferometro a croce, con uno specchio semiriflettente al centro, inclinato a 45° .

Lo specchio semiriflettente può essere realizzato con un vetro trasparente, che è anche uno specchio. Capito questo, poi si usa un laser in posizione fissa come sorgente e si procede con la configurazione. Sul rivelatore finale giunge un raggio riflesso dallo specchio semiriflettente e l'altro trasmesso due volte e riflesso una volta; questi due fasci provengono dallo stesso fascio incidente e percorrono cammini ottici differenti, andando ad interferire sullo schermo finale. Se assumiamo per semplificare i calcoli che gli specchi riflettano il 100% della luce e che il vetro rifletta $r\%$ e trasmetta $100\%-r\%$, abbiamo che la luce sullo schermo finale sia composta da un fascio intenso r , ed uno $r^2(1-r)=r^2-r^3$. Per un vetro che riflette al 9%, il fascio

trasmesso che interferisce col riflesso è l'1% dell'incidente.



A è l'immagine riflessa 2 volte, r^2 e B quella riflessa 3 volte, r^3 ; il rapporto tra le due fornisce $r=16/176\sim9.1\%$ (analisi con IRIS)

23. L'energia dei raggi cosmici, e loro collimazione

I raggi cosmici sono talmente energetici da potersi considerare in moto rettilineo uniforme, o leggermente curvato dal campo magnetico solare o terrestre. Sono da considerarsi in regime di ottica geometrica. Un rivelatore di raggi cosmici è il contatore di muoni, composto da tre strati come un letto a castello.

Se il muone attraversa tutti e tre questi strati si può considerare proveniente dalla direzione individuata da questi tre strati. Quanto più sono distanziati tanto più il campo di vista del "telescopio di muoni" è stretto.

Si può calcolare il campo di vista dal rapporto tra l'area dell'ultimo strato divisa per l'altezza di quello strato sul primo.

24. Righe solari di assorbimento e di emissione e quota

Nella spettroscopia solare con un reticolo da 700 e meglio da 1000 righe per mm è possibile identificare alcune righe oscure che solcano lo spettro solare colorato dell'arcobaleno.

Queste righe oscure sono di elementi che assorbono i fotoni provenienti dalla fotosfera solare, che si trovano o attorno alla superficie del Sole, come atmosfera solare, oppure nell'atmosfera terrestre. Nel caso di elementi solari si può

associare a ciascuno di essi, in base alla loro temperatura, una quota nell'atmosfera solare, che ci si aspetta più calda vicino alla superficie e meno lontano. In realtà l'andamento della temperatura è complesso ed ancora non si riesce a spiegare completamente la temperatura della cromosfera di circa 10000°C e quella della corona di due milioni di gradi: l'involucro è più caldo del contenuto...

La temperatura di equilibrio di un certo strato di atmosfera solare determina quali righe di emissione o assorbimento prevalgono ad una certa quota.

25. Campi magnetici e vento solare

Il vento solare porta con sé un campo magnetico, e quando questo investe la Terra, si possono avere conseguenze fino alla superficie.

26. Esercizi

- a) Per ogni fenomeno qui descritto elenca le grandezze fisiche che occorre misurare per verificare la teoria che lo descrive.
- b) Associa ad ogni fenomeno una formula che lo riassume, spiegandone bene l'uso.
- c) Per ogni fenomeno compila una scheda che indichi bene:

Titolo (poche parole chiave)

Obiettivo (cosa vogliamo dimostrare o misurare)

Schema (disegno del set up dell'esperimento)

Descrizione (funzionamento dell'esperimento e procedure)

Elementi teorici (formule, chi le ha studiate, quando)

Dati sperimentali (quelli che hai misurato in lab o a casa)

Elaborazione dati (mediante grafici e tabelle)