Università degli Studi di Ferrara

SCUOLA DI SPECIALIZZAZIONE PER L'INSEGNAMENTO SECONDARIO

PERCORSO DIDATTICO:

LUCE E VISIONE

Specializzanda
Giovanna Bellino

Supervisori di tirocinio
Prof. Fabiano Minni
Prof. Davide Neri
Prof. Luigi Tomasi

27 – FEBBRAIO - 2008

Anno accademico 2007/2008

CAPITOLO 1

1.1 Luce e visione nel contesto dei programmi ministeriali

Da molti anni e da più parti si accusa la scuola (anche quella dell'obbligo) di non "stare al passo" con i tempi e dunque di non essere in grado di fornire ai propri "utenti" tutti quegli stimoli e quegli strumenti di cui avrebbero bisogno per inserirsi con maggiore facilità ed efficacia nella società di oggi e più ancora in quella di domani.
La scuola, infatti, deve contribuire alla formazione di giovani capaci di affrontare i problemi individuali e sociali che gli si presentano quotidianamente, con autonomia e senso critico; capaci, quindi, di trovare le varie fonti di informazione di volta in volta necessarie per risolvere quei problemi, di usarle opportunamente e di valutare criticamente: semmai, di sapere come si può pervenire alle informazioni di cui si ha bisogno in modo scientificamente corretto.
In questo paragrafo si vuole inquadrare l'argomento preso in esame in questo percorso didattico, nel contesto dei programmi ministeriali di fisica della scuola secondaria superiore italiana.

1.1.1 I PROGRAMMI DI MATEMATICA NEI LICEI DI ORDINAMENTO

I programmi vigenti nella scuola liceale (Ginnasio e Liceo Classico, Liceo Scientifico), pur essendo datati 1952, sono sostanzialmente quelli della Riforma Gentile del 1923, dal nome del ministro della pubblica istruzione di allora, il filosofo Giovanni Gentile (1875 – 1944).

Liceo Scientifico

Al IV anno lo studio dell'ottica:

- Luce e sua propagazione. Brevi cenni di fotometria.
- Riflessione; specchi piani e specchi sferici. Rifrazione e riflessione totale, lastre e prismi; lenti e costruzione delle immagini relative.
- Strumenti ottici più comuni.
- Colori; dispersione della luce.
- Spettro; cenni sui raggi infrarossi e ultravioletti.
- Cenni sulla velocità della luce e sulla sua natura ondulatoria; frequenza e lunghezza d'onda.
- Cenni di spettroscopia e cenni sulla interferenza.

1.1.2 I PROGRAMMI DI FISICA DEL PIANO NAZIONALE PER L'INFORMATICA

L'intento del PNI era di introdurre l'informatica nelle scuole di ogni ordine e grado. In realtà il progetto, che pure fu di grande portata, coinvolse solo la scuola secondaria superiore. Con questo piano vengono anche elaborati nuovi programmi di matematica e fisica per tutte le scuole superiori, mentre le altre materie non vengono toccate. Viene avviato nelle scuole come progetto sperimentale nell'a.s. 1987 – 88.

I programmi del biennio furono elaborati da un comitato di matematici misto, formato da docenti universitari ed ispettori, appositamente istituito dal Ministro. Il comitato, ritenne, sia per la forte evoluzione che si era registrata nel pensiero matematico negli ultimi decenni, sia per la nuova impostazione metodologica che era andata emergendo, che non ci si potesse limitare ad una semplice aggiunta di contenuti, ma fosse necessario un riesame completo delle mete formative, e quindi dei contenuti e delle metodologie.
Diversamente dai vecchi programmi, le scansioni annuali degli argomenti vengono sostituite da 5 grandi temi per il biennio e da 7 temi per il triennio, ciascuno dei quali ha un commento che ne dà la chiave di lettura. Solo per il triennio si indicano le possibili classi in cui gli argomenti possono essere trattati.

Programma di fisica per il biennio degli istituti secondari superiori
Il TEMA 3 "La propagazione della luce":
- Propagazione rettilinea della luce, riflessione, rifrazione;
- lenti sottili;
- l'ipotesi corpuscolare ed interpretazione corpuscolare delle leggi dell'ottica geometrica;
- studio quantitativo e fenomenologico delle onde sulla superficie di un liquido;
- diffrazione ed interferenza della luce;
- scomposizione della luce e misura delle lunghezze d'onda.

Il commento al tema 3 riportato nei programmi ministeriali consiglia "di giungere ad individuare le leggi dell'ottica geometrica attraverso esperimenti sulla propagazione di pennelli di luce e quindi di mostrare come le leggi di Cartesio siano interpretabili in termini corpuscolari.
Prima di avviare lo studio delle onde, che a questo livello è bene sia limitato all'aspetto fenomenologico anche se quantitativo, si mostreranno all'allievo fenomeni ottici chiaramente non interpretabili in termini corpuscolari (fenomeni di diffrazione e interferenza). Si potranno mostrare agli allievi spettri sia continui che a righe, ottenuti per dispersione o attraverso reticolo a trasmissione.
La misura della lunghezza d'onda potrà anche limitarsi alla stima per mezzo dell'esperimento di Young dell'ordine di grandezza per luce di vari colori.
Il tema si propone di far studiare agli allievi una teoria organica (teoria corpuscolare della luce) e di far comprendere come sia possibile costruire una successiva teoria in grado di "spiegare" fenomeni già interpretati e altri non interpretabili con la prima teoria".

1.1.3 I PROGRAMMI DI FISICA ELABORATI DALLA COMMISSIONE BROCCA

Contemporaneamente al diffondersi dei programmi di Matematica e Fisica del PNI, nel 1987, la mancata approvazione delle diverse proposte di riforma della Scuola, indusse il Ministro della Pubblica Istruzione a costituire una Commissione, presieduta dall'onorevole Beniamino Brocca - sottosegretario alla Pubblica Istruzione, con il compito di redigere un progetto complessivo di riordino della Scuola secondaria

superiore e di riscrivere i programmi della nuova scuola superiore. La Commissione Brocca, composta da più di un centinaio di esperti, ha lavorato per alcuni anni definendo le finalità e l'impianto generale della nuova scuola, elaborando anche i piani di studio degli indirizzi che avrebbero dovuto sostituire la Scuola liceale e tecnica.
La Commissione, suddivisa per gruppi disciplinari e per biennio e triennio, elaborò i nuovi programmi: nel 1998 quelli del biennio e nel 1990 quelli del triennio. Il progetto elaborato dalla Commissione Brocca fu quindi attivato come uno dei tanti progetti sperimentali a partire dall'anno scolastico 1991/1992 con la differenza che questa sperimentazione è stata proposta dallo stesso Ministero della Pubblica istruzione ai vari istituti di istruzione secondaria.
Il progetto riguarda i programmi di tutte le materie (a differenza del PNI che riguarda solo matematica e fisica) e di tutti gli indirizzi e prevedeva una forte "licealizzazione" dell'istruzione secondaria superiore, con l'introduzione di un orario più consistente per le discipline di carattere generale e una certa riduzione – particolarmente nell'istruzione tecnica – delle discipline di carattere tecnico professionale.
La riforma della scuola secondaria superiore proposta dalla Commissione Brocca non venne approvata dal Parlamento.
I programmi della Commissione Brocca diventarono quindi dei programmi facoltativi, introdotti in modo sperimentale nei licei (licei scientifico-tecnologico, liceo linguistico, liceo psico-pedagogico, liceo delle scienze sociali,....).
Analogamente al PNI, la Commissione Brocca propone che gli argomenti dei programmi si articolino: al biennio in 5 temi e al triennio in 7 temi. Solo per il triennio si indicano le possibili classi in cui gli argomenti possono essere trattati.

Triennio, programma di fisica (scientifico, scientifico - tecnologico, economico)
Il TEMA 3 "Oscillazione ed onde". Si cita in particolare:
- La luce. Velocità della luce. Modello ondulatorio e corpuscolare.

Il commento al tema 3 riportato nei programmi ministeriali raccomanda che "l'esecuzione di esercitazioni adatte a far emergere i caratteri fondamentali delle onde meccaniche e delle onde luminose: ondoscopio, tubi sonori, corde vibranti, fenditure semplici e doppie investite dalla luce, fenomeni di interferenza e diffrazione con le microonde. Nel caso in cui non sia stata svolta al biennio, si proponga qualche esercitazioni di ottica geometrica relativa ad es. alla riflessione e rifrazione".

1.2 Considerazioni storico – epistemologiche

Lo studio della natura della luce si è svolto nell'arco di un migliaio di anni. Nell'antica Grecia, **Pitagora** e i **pitagorici** consideravano la visione come un processo di percezione tattile: dall'occhio partivano i raggi rettilinei che, toccando i corpi, generavano la sensazione visiva. A questa sensazione si ricollega **Euclide**, che si chiese in quale altro modo si sarebbe potuto spiegare perché non si vede un ago sul pavimento finché lo sguardo non cade su di esso.

Democrito e gli **atomisti** pensavano che dai corpi luminosi partissero atomi (corpuscoli) che rappresentavano le immagini dei corpi stessi che generano la sensazione visiva.
Platone fece propria la teoria di Empedocle che tentava di conciliare le due teorie, quella dei pitagorici e quella degli atomisti. Platone sosteneva che la visione era dovuta all'incontro di effluvi rettilinei uscenti dall'occhio e di effluvi simili uscenti dai corpi luminosi. Nel XV secolo persino **Cartesio** pubblicò un libro in cui sosteneva una teoria analoga.
In tempi più recenti l'astronomo danese **Ole Roemer** (1644 - 1710), contemporaneo di Newton, stabilì sperimentalmente che la velocità della luce, benché molto elevata, fosse finita. Il valore attualmente accettato per la velocità della luce è maggiore di circa la metà di quello calcolato da Roemer.

IL MODELLO CORPUSCOLARE E IL MODELLO ONDULATORIO

Molto difficile e arduo fu il cammino per determinare quale fosse la **natura della luce**: se essa fosse costituita da un fascio di particelle o da un'onda di qualche tipo. Nel corso degli anni si sono presentate diverse argomentazioni a sostegno dell'una e dell'altra ipotesi.
Vediamo innanzitutto che cosa si intende per **particella** e per **onda**.
In senso generale, questi termini si riferiscono a concetti diametralmente opposti. La posizione delle particelle è individuabile a ogni dato istante, in quanto si possono trattare come punti materiali o hanno dimensioni finite, e quindi le loro quantità di moto ed energie sono anch'esse localizzate. Le onde, d'altra parte, rappresentano movimenti coordinati che si estendono su grandi distanze. L'energia di un'onda dipende dall'ampiezza di questa; non è localizzata: è una proprietà dell'intera onda.
Isaac Newton rifiutò il modello ondulatorio della luce, perché riteneva che nello spazio vuoto le oscillazioni non potessero propagarsi senza un supporto materiale. Le particelle, invece, potevano muoversi senza impedimenti - in linea retta – nello spazio vuoto. Il fatto che i corpuscoli di luce non sembrassero venire influenzati dalla forza di gravità era attribuito da Newton alla loro elevatissima velocità. **Il modello corpuscolare** riusciva inoltre a spiegare il fenomeno della riflessione, dato che la direzione nella quale viene riflesso un raggio è la stessa di una palla che rimbalza elasticamente su una superficie.
Newton spiegava la rifrazione (la deviazione della luce nel passaggio da un mezzo a un altro) mediante l'attrazione esercitata dalle molecole di una sostanza trasparente sulle particelle di luce che vi penetrano. Questa forza avrebbe modificato la direzione di una particella aumentando la componente della sua velocità perpendicolare la superficie della sostanza, portando dunque la particella a venire deviata verso la normale: ovvia conseguenza di tale tesi sarebbe stata il fatto che la velocità della luce aumenta entrando nel mezzo trasparente. Il fatto, infine, che differenti colori subiscano differenti rifrazioni era attribuito da Newton all'esistenza di particelle di vari colori, aventi masse leggermente diverse l'una dall'altra. Fu un contemporaneo di Newton, il danese **Christiaan Huygens** (1629 – 1695), a elaborare la **teoria**

ondulatoria della luce. Egli trovava che la velocità che avrebbero dovuto possedere le particelle di luce era difficile da accettare, e osservò che fasci di luce che si intersecano non sembravano dare luogo a fenomeni di diffusione, come invece ci si aspetterebbe tra fasci di particelle che si incrociano.
Huygens sviluppò una spiegazione geometrica (il **principio di Huygens**) della forma assunta dalle onde quando filtrano attraverso aperture sottili o girano intorno al bordo di ostacoli, giungendo a una descrizione corretta del fenomeno della diffrazione. La teoria di Huygens spiegava la rifrazione sulla base del **rallentamento della luce** all'ingresso in un mezzo trasparente, contrariamente al modello di Newton.
Purtroppo non erano disponibili, all'epoca metodi per misurare effettivamente la velocità della luce in un mezzo trasparente, cosa che avrebbe fornito il criterio per decidere definitivamente quale modello fosse coretto. Il modello corpuscolare di Newton, per via della grande reputazione dello scienziato, fu quello prevalente sino a tutto il diciottesimo secolo.

SI AFFERMA LA TEORIA ONDULATORIA

Nel 1804 l'inglese **Thomas Young** (1773 – 1829) fornì il modo di provare definitivamente la correttezza dei due modelli contendenti. Egli predispose un esperimento in cui due sorgenti luminose puntiformi originavano una figura di intensità distribuita esattamente come si distribuisce l'intensità risultante dalla sovrapposizione di due onde a causa della interferenza reciproca. Dal momento che le particelle non posseggono la proprietà di interferenza tra le ampiezze, il risultato di Young mostrò definitivamente che la luce aveva carattere ondulatorio. Tuttavia questa conclusione non fu universalmente accettata sino a 15 anni più tardi, dopo l'elaborazione teorica dei risultati sperimentali di Young da parte del fisico francese **Augustin - Jean Fresnel** (1788 – 1827). La teoria di Fresnel caratterizzava la luce come onda trasversale, ipotesi supportata anche dalle osservazioni sperimentali (1808 – 1815) della polarizzazione della luce, fenomeno non riscontrabile – in base alla teoria classica – in un fascio di particelle.
Infine, il fisico francese **Armand Hippolyte – Louis Fizeau** (1819 – 1896) fu in grado di misurare direttamente la velocità della luce in acqua, trovando un valore inferiore a quello della luce in aria. Questa osservazione, in netto contrasto con la teoria di Newton, contribuì ad affermare la teoria ondulatoria sulla natura della luce.

IL PROBLEMA DELL'ETERE

Grazie a questa serie di evidenze sperimentali, si potrebbe pensare che ogni dubbio relativo alla natura della luce fosse fugato. In realtà non fu così, perché tutte le onde conosciute necessitavano di un mezzo per propagarsi. Per i fisici, sostenere che la luce fosse un fenomeno ondulatorio aveva come necessaria conseguenza quella di individuare il mezzo attraverso il quale tale onda si propagasse, mezzo che avrebbe dovuto riempire tutto l'universo visto che la luce ci arriva da qualsiasi stella per quanto lontana. Rimaneva, cioè, una domanda importante a cui trovare la risposta: "Come può la luce viaggiare nel vuoto, dove non sembra esservi mezzo in grado di

trasportare onda?". Il mezzo nel quale potrebbe propagarsi la luce avrebbe dovuto avere caratteristiche molto particolari. Il valore elevatissimo della velocità della luce nel vuoto avrebbe richiesto un mezzo oscillante molto rigido, e tuttavia tale da non offrire resistenza al moto dei pianeti. Anche coloro che avevano accettato il modello ondulatorio non erano in grado di dire cosa esattamente costituisse l'onda luminosa.
James Clerk Maxwell (1831 – 1879) diede la risposta a tale interrogativo mediante la sua teoria dei campi elettrici e magnetici oscillanti. Egli predisse inoltre l'esistenza di un intero spettro di onde elettromagnetiche, del quale la luce visibile era solo una piccola parte.
Era però ancora valida l'ipotesi dell'esistenza di un qualche mezzo (indicato come etere), le cui proprietà determinavano la velocità assoluta della luce. L'etere doveva riempire l'universo e, secondo l'ipotesi più ragionevole doveva essere immobile nello spazio siderale; tutti i corpi celesti, quindi, compresa la Terra, avrebbero dovuto avere una qualche velocità rispetto a esso. Negli anni tra il 1881 e il 1885 **Albert Michelson** (1852 – 1931) e **Edoard Morley** (1838 – 1923) tentarono di misurare la velocità della Terra rispetto all'etere circostante, usando uno strumento chiamato **interferometro**. Michelson e il suo collaboratore Morley non furono in grado di misurare alcuna velocità, pur disponendo di uno strumento estremamente sensibile e ciò portò la maggior parte dei fisici a concludere che l'etere non esisteva. Così, alla fine del diciannovesimo secolo, sembrava che l'antico interrogativo sulla natura della luce fosse definitivamente risolto. La luce è un'onda non materiale, costituita dall'oscillazione del campo elettrico e magnetico ed, essendo immateriale, può viaggiare nel vuoto senza il supporto di un mezzo.

IL DUALISMO ONDA - CORPUSCOLO

Tuttavia, la natura sembra riservare delle sorprese proprio quando crediamo di averla compresa. Gli ultimi anni del diciannovesimo secolo e i primi del ventesimo posero nuove sfide alla comprensione della natura della luce. Lo spettro luminoso emesso dai corpi ad alta temperatura non poteva essere spiegato dal modello ondulatorio, così come non poteva essere spiegato l'effetto fotoelettrico, nel quale gli elettroni vengono espulsi da una superficie metallica quando questa è illuminata da radiazione elettromagnetica. Entrambi i fenomeni poterono essere spiegati piuttosto accuratamente e precisamente (da Planck e quindi da Einstein) solo dietro l'ipotesi che la luce consiste in un fascio di particelle, dette **fotoni**, che viaggiano alla velocità della luce e trasportano un'energia proporzionale alla frequenza della radiazione. Negli anni Venti, **Compton** osservò che quando i raggi X bersagliano degli elettroni, essi scambiano energia e quantità di moto proprio come se i raggi X fossero particelle che urtano elasticamente gli elettroni.
A complicare la situazione fu il fisico francese **Louis- Victor de Broglie** (1892 – 1987): egli teorizzò, nel 1924, che le particelle materiali presentano un comportamento ondulatorio, ossia posseggono un'"onda di materia" la cui lunghezza d'onda è inversamente proporzionale alla quantità di moto della particella. Secondo questa ipotesi, le particelle che attraversano sottili aperture avrebbero dovuto manifestare

un comportamento ondulatorio, subendo diffrazione e interferenza. Nel 1927 venne osservata la diffrazione di elettroni, in accordo con la teoria di de Broglie, e da allora sono stati osservati anche effetti ondulatori presentati da fasci di protoni e neutroni. Arriviamo dunque ai giorni nostri, in cui la luce ha una natura **duplice**: essa si comporta come un'onda in certi esperimenti e come una particella in altri. Lo stesso dicasi per i "quanti" di materia che chiamiamo particelle. Fatto importante è che in un dato esperimento si manifesta solo uno dei due comportamenti opposti. La domanda iniziale sulla vera natura della luce ha quindi una risposta più complessa (e per molti fonte di perplessità) di quello che ci si aspettava: che la luce sia un'onda o sia un fascio di particelle dipende da quale indagine si compie con un dato esperimento.

Capitolo 2 Percorso Didattico

Il percorso didattico si suddivide in due unità:
U.D.1. Riflessione e rifrazione della luce
U.D.2. Interferenza e diffrazione della luce

Inizialmente verranno illustrati quelli che si possono definire i "caratteri comuni" alle due unità didattiche; successivamente si passerà ad analizzarle in dettaglio specificandone:

- gli obiettivi specifici;
- i contenuti;
- i tempi dell'intervento didattico;
- le verifiche sommative;
- griglia di valutazione della verifica sommativi, compilata nelle sue parti.

2.1 DESTINATARI

Unità didattica	Istituto	Studenti della classe	Periodo dell'anno in cui verrà svolta l'U.D.	Ore settimanali di matematica previste a livello ministeriale
U.D.1	Liceo Scientifico ad indirizzo Brocca	IV	I quadrim.	3(2[1])
U.D.2		IV	I quadrim.	3(2)

2.2 PREREQUISITI E LORO ACCERTAMENTO

Per i prerequisiti specifici si rimanda ad ogni singola unità didattica.
Si intendono verificare attraverso il dialogo e lezioni frontali le reali conoscenze ritenute indispensabili per il completo apprendimento degli argomenti che si dovranno trattare. Se necessario si provvederà quindi al recupero dei prerequisiti mancanti. Si cercherà comunque di richiamare concetti e proprietà ogni volta che questi verranno utilizzati.
Ulteriori dettagli riguardo l'accertamento dei prerequisiti sarà specificato di volta in volta nella varie unità didattiche.

2.3 OBIETTIVI GENERALI DEL PERCORSO DIDATTICO

- Acquisire le conoscenze e le abilità previste dal percorso didattico.

[1] Si suppone di avere la disponibilità di due ore consecutive di laboratorio.

- Comprendere i procedimenti caratteristici dell'indagine scientifica, che si articolano in un continuo rapporto tra costruzione teorica e attività sperimentale.
- Acquisire un insieme organico di metodi e contenuti finalizzati ad una adeguata interpretazione della natura.
- Acquisire la capacità di reperire informazioni, di utilizzarle in modo autonomo e finalizzato e di comunicarle con un linguaggio scientifico.
- Acquisire la capacità di analizzare e schematizzare situazioni reali e di affrontare problemi concreti, anche al di fuori dello stretto ambito disciplinare.
- Acquisire la capacità di cogliere l'importanza del linguaggio matematico come potente strumento nella descrizione del mondo e di utilizzarlo adeguatamente

2.4 OBIETTIVI TRASVERSALI DEL PERCORSO DIDATTICO

- Sviluppare attitudine alla comunicazione e ai rapporti interpersonali favorendo lo scambio di opinioni tra docente e allievo e tra gli allievi.
- Proseguire ed ampliare il processo di preparazione culturale e scientifica.
- Sviluppare l'attitudine a riesaminare criticamente e a sistemare logicamente le conoscenze acquisite.

2.5 OBIETTIVI SPECIFICI

Si rimanda agli obiettivi specifici delle singole unità didattiche.

2.6 CONTENUTI

Per i contenuti si rimanda alle singole unità didattiche.

1.8 SVILUPPO DEI CONTENUTI

Per ogni unità didattica verrà fatta una lista dei contenuti che si intende trattare in classe.
L'unità didattica 1 è stata sviluppata molto più dell'altra, in quanto si ritiene che una buona comprensione dell'ottica geometrica possa dare quelle basi per poter comprendere più facilmente l'ottica fisica.

2.7 METODOLOGIE DIDATTICHE

I nuovi argomenti verranno affrontati utilizzando contemporaneamente lezioni frontali e dialogiche in modo da favorire una partecipazione attiva degli alunni. L'utilizzo di esempi pratici sarà di ausilio e per introdurre concetti nuovi, e per chiarire o consolidare argomenti appena trattati. Il laboratorio di fisica sarà di ausilio per meglio chiarire alcuni concetti e fenomeni che a volte possono sembrare difficili e lontani dalla vita comune degli studenti; le relazioni prodotte a casa dagli alunni, relativamente al laboratorio svolto, saranno oggetto di valutazione da parte dell'insegnante. Si svolgeranno esercizi in classe di diverso tipo e di difficoltà crescente in modo che siano momento immediato di sostegno e anche di ripasso della teoria. Verranno assegnati degli esercizi a casa scelti con difficoltà crescente, in modo che gli studenti possano acquisire una maggiore familiarità con l'argomento.

2.8 MATERIALI E STRUMENTI UTILIZZATI

- Lavagna tradizionale e quindi anche gessi e cimosa.
- Libri di testo.
- Calcolatrice scientifica.
- Computer.
- Laboratorio di fisica.

2.9 CONTROLLO DELL'APPRENDIMENTO

La valutazione formativa si esegue tramite semplici verifiche orali, esercitazioni in classe, correzione degli esercizi assegnati per casa e valutazione delle relazioni di laboratorio.
Le verifiche orali e gli esercizi alla lavagna permetteranno inoltre di valutare l'acquisizione di proprietà di linguaggio degli alunni, e il loro criterio di scelta di una strategia risolutiva piuttosto che un'altra. La verifica sommativa, nella quale vengono proposti esercizi simili a quelli esaminati in classe, ma non solo, permette di verificare il livello di assimilazione degli argomenti trattati e l'autonomia nella risoluzione degli esercizi.

2.10 GRIGLIA PER LA VALUTAZIONE

Per determinare gli esiti della verifica sommativa assegniamo ad ogni esercizio un punteggio. La diversità di punteggio tra i vari esercizi rispecchia livelli diversi di difficoltà in termini di conoscenze, competenze e capacità richieste per svolgerli.
Nell'attribuzione del punteggio si tiene conto dei seguenti indicatori, suggeriti dal Ministero dell'Istruzione all'esame di Stato:

I. Conoscenze specifiche.
II. Competenze nell'applicare le procedure ed i concetti acquisiti.
III. Capacità logico e argomentative.
IV. Completezza e risoluzione.
V. Correttezza della risoluzione e dell'esposizione.

Nel caso di errore nello svolgimento degli esercizi si attribuisce solo parte del punteggio completo previsto per essi. La griglia di valutazione permette di attribuire un punteggio più oggettivo agli esercizi ed evitare disparità di giudizio del lavoro degli studenti.

2.11 ATTIVITA' DI RECUPERO

Sono previste attività di recupero articolate nei seguenti punti:

- Ripresa in classe dei concetti non assimilati e svolgimento di esercizi per colmare le eventuali lacune.
- Se previsto dalle linee di indirizzo determinate dal collegio docenti, saranno proposte attività pomeridiane per chi necessita di recupero.
- Proposta di esercizi atti a recuperare le difficoltà di ogni singolo studente.

Per individuare gli argomenti che necessitano di recupero, sia a livello collettivo sia a livello individuale, ci si avvale della verifica sommativa, delle prove orali e dell'attività di discussione in classe.

1.12 TEMPI DELL'INTERVENTO DIDATTICO

Si rimanda alle singole unità didattiche.

2.13 GRIGLIE DI VALUTAZIONE

Si propone una griglia di valutazione per la prova scritta e due griglie di valutazione per la prova orale. Queste ultime due, sono sicuramente molto particolareggiate, ma personalmente ritengo che di fronte ad una prova orale, sia molto difficile tener conto di tutti questi indicatori.

2.13.1 Griglia di valutazione per la verifica sommativa

	CONOSCENZA		ABILITA'	
	TOTALE	OTTENUTI	TOTALE	OTTENUTI
ESERCIZIO 1				
ESERCIZIO 2				
ESERCIZIO 3				
ESERCIZIO 4				
TOTALE	12		12	

Griglia di valutazione (ad uso del docente)

PUNTEGGIO GREZZO (TOT.36)	**VOTO IN DECIMI (ottenuto con la proporzione)**	**VOTO IN DECIMI (proposta di voto)**
1	0-1	2
2		
3		
4		
5	1-2	
6		
7		
8	2-3	
9		3
10		
11	3-4	
12		
13		4
14		
15	4-5	
16		
17		5
18	5-6	
19		
20		6
21		
22	6-7	
23		
24		7
25	7-8	
26		
27		
28		8
29	8-9	
30		
31		
32		9
33	9-10	
34		
35		
36		10

Capitolo 3 U.D.1 RIFLESSIONE E RIFRAZIONE DELLA LUCE

3.1 PREREQUISITI

- Conoscenza del concetto di congruenza.
- Conoscenza delle proprietà della retta, delle rette parallele, perpendicolari e incidenti.
- Conoscere le proprietà delle principali figure geometriche piane, quali triangoli, quadrilateri e poligoni regolari.
- Conoscere i criteri di congruenza dei triangoli.
- Conoscenza dei concetti di spazio tempo, velocità, velocità angolare e periodo.
- Conoscenza della geometria analitica: la parabola e l'iperbole.
- Conoscenza delle onde.
- Conoscenza delle approssimazioni di Gauss.

3.2 OBIETTIVI SPECIFICI

CONOSCENZE

- Conoscere il concetto di raggio luminoso e sorgente puntiforme.
- Conoscere le leggi della riflessione.
- Conoscere il concetto di raggio incidente e riflesso angolo di incidenza e riflessione.
- Conoscere le leggi della rifrazione.
- Conoscere i concetti di raggio incidente e rifratto; angolo di rifrazione.
- Conoscere l'indice di rifrazione relativo e assoluto.
- Conoscere il fenomeno di riflessione totale.
- Conoscere l'angolo limite.
- Conoscere il concetto di immagine reale e virtuale.
- Conoscere gli specchi curvi, sferici e parabolici.
- Conoscere la legge dei punti coniugati e l'ingrandimento.
- Conoscere lo specchio convesso.
- Conoscere l'ingrandimento lineare.
- Conoscere il principio di funzionamento dell'occhio umano e dei principali difetti visivi.
- Conoscere il funzionamento della macchina fotografica, del proiettore, della lente di ingrandimento,

ABILITA'

- Saper rappresentare un fascio di luce con una retta.
- Saper riconoscere ed applicare le leggi della riflessione.
- Saper applicare le leggi della riflessione ad uno specchio piano.

- Saper riconoscere ed applicare le leggi della rifrazione.
- Saper determinare l'angolo di rifrazione.
- Saper determinare l'angolo limite.
- Saper determinare l'indice di rifrazione.
- Sapere in quali condizioni si verifica la riflessione totale.
- Saper distinguere un'immagine reale da una virtuale.
- Sapere applicare le leggi della riflessione agli specchi curvi, sferici e parabolici.
- Sapere applicare la legge dei punti coniugati.
- Sapere interpretare le figure disegnate sul libro.

3.3 CONTENUTI

- I raggi di luce.
- Riflessione e rifrazione della luce.
- La riflessione totale.
- Specchi piani.
- Specchi parabolici.
- Specchi sferici.
- Costruzioni delle immagini.
- Analisi quantitativa.
- Ingrandimento lineare.
- Diottro sferico.
- Lenti sottili.
- Costruzione delle immagini prodotte da lenti sottili.
- Ottica fisiologica.
- Strumenti ottici.
- Leggere di fisica: - Nel buio, sapessi di Roberto Piumini.
  - Specchio di Salvatore Quasimodo.

3.4 SVILUPPO DEI CONTENUTI

Nel percorso didattico **LUCE E VISIONE** si propone un itinerario per affrontare lo studio di base dei fenomeni luminosi dal punto di vista fisico, sottolineandone le connessioni con altri punti di vista indispensabili per interpretare la vastissima esperienza quotidiana legata alla vista che ognuno di noi possiede. Gli argomenti di fisica affrontati si situano per la maggior parte nell'area tradizionalmente indicata come ottica geometrica. Non mancano tuttavia approfondimenti ad argomenti di ottica fisica che a mio parere non possono essere evitati in un percorso di apprendimento significativo.

Il percorso didattico non pretende infatti di trattare in modo esaustivo tutti i temi affrontati, ma piuttosto di costruire un quadro generale al cui interno i contenuti più usuali dell'insegnamento relativi al rappresentare e interpretare "il vedere" acquistino significato e pregnanza nel più vasto campo della cultura umana.

CONCEZIONI DEI NEOFITI SULLA NATURA DELLA LUCE

Gli studenti che iniziano lo studio del moto con preconcetti molto radicati dovuti al senso comune li trasferiscono anche nello studio della luce. Molti preconcetti non vengono notati dagli insegnanti e dai libri di testo, e interferiscono con lo sviluppo della comprensione della fisica. Il Prof. Watts riassume alcune delle idee che vengono considerate vere dagli studenti alle prime armi. (Naturalmente non tutte le persone ritengono valide contemporaneamente tutte le idee scritte; le percentuali variano a seconda dei gruppi e dei livelli di età). [Watts, 1985]

Una piccola percentuale di studenti ha un'idea della luce come un effetto fisico che esiste separatamente dalle sue sorgenti e dai suoi effetti. La luce illumina gli oggetti che così possono essere visti, ma l'atto del vedere non è associato in maniera esplicita all'arrivo della luce all'occhio dell'osservatore. Le sorgenti di luce (per esempio lampadine e candele) sono "viste" a distanza, ma non sono pensate come qualcosa che emette luce.

Per un insegnante è importante essere cosciente che questi preconcetti sono ampiamente diffusi, in modo da aiutare gli studenti a eliminarli attraverso delle domande appropriate che conducano a toccare con mano le contraddizioni e le incongruenze. Una rapida osservazione della visione "corretta" produce pochi vantaggi.

3.4.1 I raggi di luce

LE SORGENTI DI LUCE

Per superare le difficoltà che può presentare questo argomento, si è cercato di introdurlo a partire da situazioni concrete, note agli studenti.

La vita sul nostro pianeta è possibile grazie alla presenza del Sole, che illumina gli oggetti che noi vediamo. Il Sole è una sorgente di luce.

Si definiscono **sorgenti di luce** o **corpi luminosi** tutti i corpi che brillano di luce propria.

Le sorgenti che "brillano di luce propria" possono essere naturali o artificiali. Il Sole e le stelle sono esempi di sorgenti naturali. Sono sorgenti artificiali tutte le sostanze riscaldate ad una data temperatura, in genere, superiore agli 800 °C. Fra le sorgenti artificiali ricordiamo tutti i dispositivi destinati a produrre luce mediante la combustione di legna, carbone, petrolio o mediante la trasformazione dell'energia elettrica in energia luminosa.

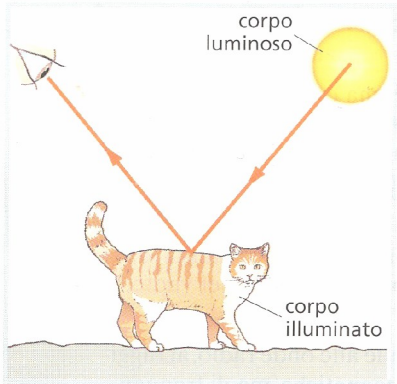


Fig. 1

La maggior parte degli oggetti che vediamo comunemente però non sono sorgenti, ma **corpi illuminati** da sorgenti luminose. Essi ricevono la luce emessa dalla sorgente e la diffondono in tutte le direzioni (figura 1).

La Luna e i pianeti, per esempio, sono corpi illuminati perché non emettono luce propria ma, illuminati dal Sole, diffondono questa luce in tutte le direzioni.

La percentuale di luce diffusa dipende dal colore dei corpi, infatti pareti chiare diffondono la luce meglio di pareti di colore scuro.

Osservazione didattica. E' questo il motivo per cui per rendere più luminoso un ambiente si preferisce dipingerlo di bianco.
I corpi colpiti dalla luce si distinguono in **trasparenti** e **opachi**.

I corpi **trasparenti** sono quelli che si lasciano attraversare dalla luce come l'aria, il vetro o l'acqua permettendo di vedere gli oggetti che si trovano dalla parte opposta dell'osservatore.
I corpi che si lasciano attraversare dalla luce sono detti **corpi trasparenti.**
Ovviamente la trasparenza di un corpo dipende, oltre che dalla sua natura, anche dal suo spessore. Per esempio, l'acqua del mare, se poco profonda, è trasparente; a grandi profondità, invece, regna il buio assoluto.
Tutti i corpi metallici, il legno, ecc. invece non si lasciano attraversare dalla luce.
I corpi che non si lasciano attraversare dalla luce sono detti **corpi opachi.**
Infine ci sono i corpi che hanno la caratteristica di far passare la luce ma non consentono una visione nitida degli oggetti posti al di là di essi. Tra questi oggetti troviamo il vetro smerigliato, il vetro bianco, la carta, ecc.
I corpi che pur lasciandosi attraversare dalla luce non permettono di distinguere gli oggetti sono detti **corpi traslucidi.**

LA PROPAGAZIONE RETTILINEA DELLA LUCE

La luce anche se attraversa un mezzo trasparente, non ha bisogno di questo come sostegno per la sua propagazione. La luce del Sole, infatti, arriva sulla Terra attraversando lo spazio vuoto interposto tra la Terra e il Sole. Inoltre, la propagazione della luce è rettilinea. Tale fenomeno si può facilmente osservare, ad esempio, in una stanza buia in cui, attraverso una sottilissima fessura, penetra un fascio di luce. Si può, in tal caso, notare il percorso rettilineo del fascio reso visibile dal pulviscolo presente nell'aria.
Si definisce **raggio luminoso** il percorso rettilineo effettuato dalla luce.
E' importante ricordare comunque che il raggio luminoso, che noi identifichiamo con una linea retta, non corrisponde però a un'entità fisica concreta: si tratta solo di uno schema utile per studiare una serie di fenomeni compresi nella cosiddetta ottica geometrica. Infatti, la definizione data di raggio luminoso prevede che il raggio luminoso sia privo di spessore, ma nella realtà non esiste un raggio luminoso siffatto.
La propagazione rettilinea della luce in un mezzo omogeneo e isotropo è indirettamente confermata dalla formazione delle ombre e dalle eclissi di Sole e di Luna.
Quando la Terra si trova allineata tra il Sole e la Luna, quest'ultima è immersa nell'ombra proiettata dalla Terra: si ha allora una eclissi di Luna (figura 2).

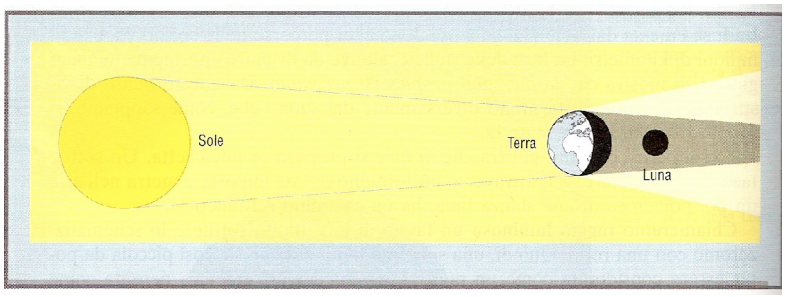


Fig. 2

Quando la Luna passa tra il Sole e la Terra ed è allineata con essi, si ha eclissi di Sole (figura 3). L'eclissi è totale per i punti che si trovano nel cono d'ombra proiettato dalla Luna; è invece parziale per quelli che si trovano nella zona di penombra. Da tutti gli altri punti l'eclissi non è visibile.

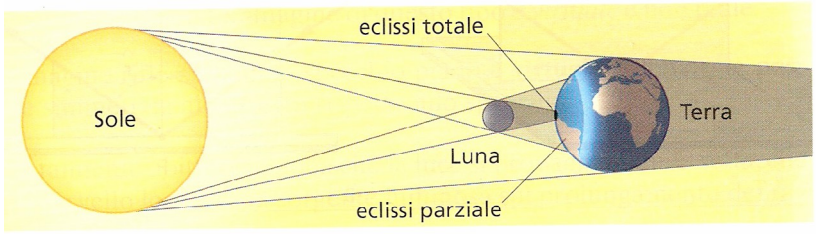


Fig. 3

Nota didattica. A questo punto gli studenti saranno portati in laboratorio, inteso come "ambiente" di simulazione, di stimolo e di apprendimento di concetti teorici propri della fisica. Si esegue l'esperienza relativa ai **RAGGI DI LUCE**.

Attività sperimentale

RAGGI DI LUCE

Introduzione: La luce si propaga in linea retta, con piccoli accorgimenti si osservano raggi di luce bianca e colorata.

Materiale occorrente:

Una torcia
Un proiettore di diapositive
Un puntatore laser
Talco, gesso, bastoncini di incenso
Cartoncino nero
Stoffa nera
Un righello
Una matita
Forbici

Preparazione:

Ritagliare nel cartoncino nero due quadrati di 10 cm di lato e fare un foro su ciascuno utilizzando la punta di una matita.

Svolgimento:

Si osservano dapprima dei raggi di luce bianca e rossa. Per la luce bianca si può osservare il fascio di luce proveniente da un proiettore di diapositive, evidenziato dal pulviscolo presente nell'aria. Per la luce rossa si può usare un puntatore laser. I raggi di luce si possono evidenziare ulteriormente con della polvere di gesso o talco, ma per evitare di inalare polveri fastidiose può venir utilizzato il fumo proveniente da alcuni bastoncini di incenso.

- Mettere la torcia dietro al foro di un solo cartoncino: si vedrà che la luce passa attraverso il foro.
  Sistemare dietro al primo cartoncino anche il secondo: la luce si vedrà solo se i fori sono allineati, mentre sparisce se uno dei cartoncini viene spostato facendo mancare l'allineamento dei fori.
- Si possono sistemare i cartoncini su delle fessure praticate su un bastone, costruendo così un rudimentale banco ottico.

Osservazioni:

I fori nei cartoncini vanno praticati con precisione, senza lasciare delle imperfezioni sui bordi, per evitare fenomeni di interferenza. Nel caso la torcia sia troppo estesa, può essere utile schermarla fissando con un elastico della stoffa nera e spessa, in cui si è praticato un forellino.

Nel caso si voglia utilizzare il proiettore di diapositive anche per la seconda parte dell'esperimento, può essere utile collegare al proiettore un tubo di cartone spesso (può venir utilizzato quello su cui viene avvolta la carta da cucina) a cui legare la stoffa nella maniera già descritta.

Si può osservare comunemente la propagazione rettilinea della luce: i raggi di sole che penetrano in una stanza buia attraverso le fessure di una tapparella, i raggi di sole che passano tra le nuvole dopo un temporale, il fascio di luce dei fari antinebbia nella nebbia fitta, i raggi di sole che penetrano nella

penombra del sottobosco attraverso le foglie degli alberi.

LA VELOCITA' DELLA LUCE

Fino al XVII secolo si riteneva generalmente che la luce si propagasse istantaneamente; cioè si pensava che la velocità della luce fosse infinita. Galileo discusse tale questione nella sua celebre opera Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze, pubblicata nel 1638. Egli presentò le sue argomentazioni sotto forma di dialogo tra diversi personaggi, tra cui Simplicio (che rappresenta l'ignoranza scientifica) e Sagredo (che rappresenta la voce della ragione e probabilmente Galileo stesso).

SIMPLICIO: L'esperienza quotidiana ci mostra che la propagazione della luce è istantanea; infatti quando si guarda un pezzo di artiglieria sparare a grande distanza, il lampo raggiunge i nostri occhi senza che trascorra alcun intervallo di tempo, mentre il suono raggiunge le nostre orecchie solo dopo un notevole intervallo di tempo.

SAGREDO: Bene, Simplicio, l'unica cosa che io riesco a dedurre da questa esperienza familiare è che il suono, nel raggiungere le nostre orecchie, viaggia più lentamente della luce; essa non mi dà alcuna informazione riguardo al fatto che l'arrivo della luce sia istantaneo piuttosto che esso richieda un intervallo di tempo finito, anche se molto breve.

Fig. 4

Galileo quindi prosegue descrivendo un esperimento (che egli fece davvero) per misurare la velocità della luce. Egli e un suo assistente si misero uno di fronte all'altro di notte, a circa un miglio di distanza, ciascuno con una lanterna che poteva essere coperta o scoperta a piacere (figura 4). Quando Galileo scopriva la propria lanterna, l'assistente doveva scoprire la sua appena vedeva la luce di quella di Galileo.

Galileo provò quindi a misurare l'intervallo di tempo tra l'istante in cui egli scopriva la propria lanterna e l'istante in cui lo raggiungeva la luce della lanterna dell'assistente. Anche se egli non riuscì a determinare un valore per la velocità della luce, a lui viene attribuito il primo tentativo di misurare la velocità della luce.

Nel 1676 **Ole Römer**, un astronomo danese che lavorava a Parigi, utilizzò alcune osservazioni astronomiche per dedurre che la velocità della luce è finita. La sua conclusione era basata su una discrepanza tra i tempi previsti e i tempi osservati

dell'eclissi della luna più interna di Giove. Circa 50 anni più tardi **James Bradley**, un astronomo inglese, impiegò una tecnica differente basata sulla luce delle stelle, ottenendo un valore di $3 \cdot 10^8 \ m/s$.

Il successivo tangibile miglioramento nella misura della velocità della luce non venne che oltre un secolo dopo. Nel 1849 il fisico francese **Hippolyte Louis Fizeau** (1819-1896) impiegò un dispositivo meccanico illustrato nella figura 5. In sostanza, un fascio percorre un cammino di andata e ritorno (di lunghezza $L = 8630 \ m$ in ciascun verso), passando due volte attraverso una ruota dentata. Tale ruota taglia il fascio diretto verso lo specchio, trasformandolo in una sequenza di brevi impulsi. Se, durante il tempo che impiega l'impulso per percorrere il cammino fino allo specchio e ritorno, la ruota gira di un angolo tale che un dente blocchi il percorso della luce, l'osservatore non vede l'impulso. Quando ciò accade, il tempo $2L/c$, necessario al fascio di luce per percorrere il cammino di andata e ritorno tra la ruota e lo specchio, deve essere uguale al tempo θ/ω che impiega la ruota per girare alla velocità angolare ω di un angolo θ sotteso tra il centro di un dente e il centro di un intaglio. Cioè

$$\frac{2L}{c} = \frac{\theta}{\omega},$$

ossia

$$c = \frac{2L\omega}{\theta}.$$

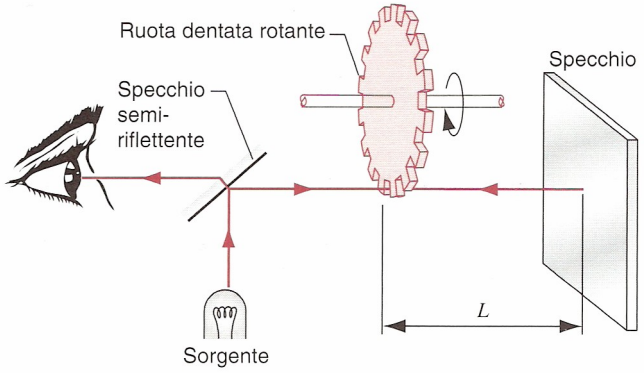


Fig. 5

Il risultato di Fizeau basato su questo metodo fu di $3{,}133 \cdot 10^8 \ m/s$. Altri sperimentatori, adottarono simili tecniche meccaniche tra la fine del XIX e l'inizio del XX secolo. Il lavoro di **Michelson** fu notevole per la sua cura e la sua precisione; egli venne insignito del premio Nobel per la fisica nel 1907 per le sue ricerche che, impiegando tecniche ottiche per effettuare misure, consentirono di ottenere risultati precisi. Dopo queste ricerche l'incertezza di misura sul valore di c si ridusse fino a circa $1000 \ m/s$.

Lo sviluppo di tecniche elettroniche, specialmente quelle applicate alle microonde, permise negli anni '50 di effettuare una nuova classe di misure. Tali misure portarono risultati in accordo con quelli di Michelson, con incertezze dello stesso ordine di grandezza.

Il passo decisivo che aprì la strada a nuove misure della velocità della luce si ebbe negli anni '70 con l'applicazione dei laser. Misurando direttamente la frequenza e la lunghezza d'onda, la velocità della luce si poté ottenere dalla relazione $c = \lambda\nu$. Rifiniture nell'applicazione di questa tecnica hanno portato a valori di c con incertezze inferiori a $1\ m/s$.

Oggigiorno la velocità della luce viene posta per definizione pari a

$$c = 2{,}99792458 \times 10^8 \frac{m}{s},$$

e il secondo è definito in funzione di misure di frequenza, sicché il metro oggi è un campione di misura secondario, definito in funzione del secondo e di c.

Osservazione didattica. Far notare agli studenti che quando si parla di velocità della luce, si intende generalmente la velocità nel vuoto.

Nell'aria è di poco più piccola: differisce da quella del vuoto di sole 3 parti su 10.000
Per entrambe queste velocità si usa spesso il valore approssimato

$$c = 3{,}00 \times 10^8 \frac{m}{s} = 300\ 000 \frac{km}{s}.$$

La luce percorre trecentomila chilometri al secondo.

Ora il docente mostra alla classe una tabella sui valori, sempre minori di c, della velocità della luce in differenti sostanze.

Sostanze	**Velocità della luce (10^8 m/s)**
Vuoto	3,00
Aria	3,00
Acqua	2,26
Vetro crown	1,97
Diamante	1,2 4

Tab. 1 - Velocità della luce in alcuni differenti sostanze.

3.4.2 Riflessione e rifrazione della luce

Il docente introduce la riflessione e la rifrazione della luce partendo da una situazione concreta, nota agli studenti.

.....guardate attraverso il vetro di una finestra, vi rendete conto naturalmente che la luce proveniente dall'altra parte del vetro può giungere a voi e che un amico collocato al di là del vetro è in grado di vedervi. Se osservate attentamente tuttavia, vedete riflessa nel vetro anche la vostra immagine. Se doveste emettere lampi di luce contro il vetro, il vostro amico vedrebbe i raggi di luce, ma anche voi potreste vedere una parte

della luce riflessa indietro verso di voi.
In generale questi due effetti possono avere luogo ogniqualvolta un raggio di luce passa da un mezzo (l'aria, per esempio) a un altro (il vetro). Parte del raggio può essere riflesso nel primo mezzo, e parte può essere trasmesso nel secondo.
La figura 6 illustra questi due effetti. Si noti che il raggio di luce può venire deviato o **rifratto** quando penetra nel secondo mezzo.

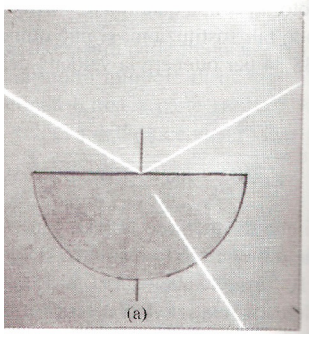


Fig. 6

Osservazione didattica. **Rifratto** viene dal latino **frangere**, come nel termine "frattura".
Se s'immerge una penna inclinata in una scodella d'acqua, la penna appare come spezzata.

Nella figura 7 i fasci di luce sono rappresentati come raggi.

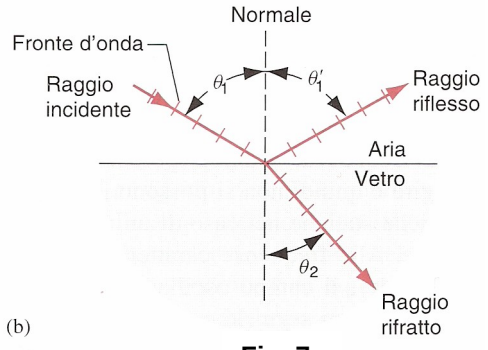


Fig. 7

I raggi, che sono disegnati come linee rette perpendicolari ai fronti d'onda (piani), indicano la direzione del moto dei fronti d'onda. Si osservano i tre raggi disegnati nella figura (sopra): il raggio originario o **incidente**, il raggio **riflesso** e quello **rifratto**, che cambia direzione non appena penetra nel secondo mezzo.
Nel punto in cui il raggio incidente colpisce la superficie, si traccia la normale (perpendicolare) alla superficie stessa, in modo da definire tre angoli misurati rispetto alla normale: l'**angolo di incidenza** θ_1, l'**angolo di riflessione** θ_1' e l'**angolo di rifrazione** θ_2. (I pedici relativi agli angoli indicano il mezzo attraverso il quale il raggio si sta muovendo. In questo caso il raggio incide provenendo dal mezzo 1, l'aria, e

penetra nel mezzo 2, il vetro). Il piano formato dal raggio incidente e dalla normale è chiamato **piano inclinato**.
Dall'esperienza si ricava le seguenti leggi che governano la riflessione e la rifrazione.

LEGGE DELLA RIFLESSIONE

Prima legge: il raggio incidente, il raggio riflesso e la perpendicolare alla superficie riflettente nel piano di incidenza appartengono allo stesso piano.
Seconda legge: l'angolo di incidenza è uguale all'angolo di riflessione, cioè $\theta_1' = \theta_1$.

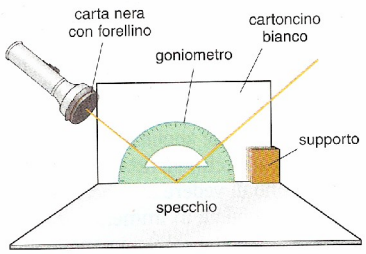
Attività sperimentale

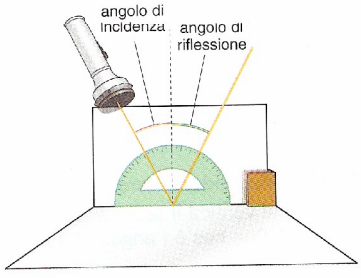
RIFLESSIONE DELLA LUCE

Introduzione: Con materiali semplici e di comune reperibilità è possibile osservare la riflessione della luce.

Materiali:
- Un cartoncino bianco
- Uno specchio
- Una pila portatile, coperta da carta nera e con un forellino centrale, in modo da ottenere una luce il più possibile puntiforme
- Un goniometro
- Un supporto

Preparazione:
- Sistemare il materiale come in figura.





- Orientare i raggi della pila in modo che la luce puntiforme sia visibile sul cartoncino e cada al centro del goniometro sullo specchio.
- Inviare ora un raggio di luce che formi, per esempio, un angolo di 30° con la perpendicolare allo specchio. Si osserva che anche il raggio riflesso forma un angolo di 30° con la perpendicolare.
- Spostare la pila in modo che il fascio di luce abbia una direzione diversa, per esempio si diriga verso lo specchio con angoli di 45°, di 60°, ecc.

Quali sono le direzioni del raggio riflesso?

Conclusioni: In seguito agli esperimenti fatti si può dire che se l'angolo di incidenza è di 30°, anche l'angolo di riflessione

è di 30°, se l'angolo di incidenza è di 45°, anche l'angolo di riflessione è di 45° ecc., generalizzando, si conclude: nella riflessione l'angolo di incidenza è uguale all'angolo di riflessione.

LEGGE DELLA RIFRAZIONE

Prima legge: il raggio rifratto giace nel piano di incidenza.
Seconda legge: il rapporto tra il seno dell'angolo di incidenza e il seno dell'angolo di rifrazione si mantiene costante al variare dell'angolo di incidenza, cioè:

$$\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} = n_{12}. \qquad [2\text{-}1]$$

dove n_{12}, valore costante del rapporto, si definisce **indice di rifrazione relativo** del secondo mezzo rispetto al primo. L'equazione [2-1] è detta legge di Snell.

Se il raggio rifratto nel secondo mezzo è più vicino alla normale di quanto lo è il raggio incidente, cioè l'angolo di rifrazione è più piccolo dell'angolo di incidenza si ha $\sin\theta_1 > \sin\theta_2$. Di conseguenza n_{12} è maggiore di 1. Si dice in tal caso che il secondo mezzo è più rifrangente del primo. L'acqua e il vetro, ad esempio, sono più rifrangenti dell'aria. Se invece l'angolo di incidenza è minore dell'angolo di rifrazione, cioè $\sin\theta_1 < \sin\theta_2$, si ha n_{12} è minore di 1. In questo caso il secondo mezzo è meno rifrangente del primo. Possiamo allora asserire che un raggio luminoso, passando da un mezzo meno rifrangente a un mezzo più rifrangente si avvicina alla normale, mentre un raggio luminoso che si rifrange da un mezzo più rifrangente ad uno meno rifrangente si allontana dalla normale.
La rifrazione avviene sempre in modo da verificare il **principio della reciprocità del cammino luminoso**, nel senso che se la luce proviene dal secondo mezzo incidendo con un angolo uguale a quello di rifrazione θ_2 nel secondo mezzo, allora esso si rifrange con un angolo uguale ad θ_1 nel primo mezzo. Pertanto indicando con n_{21} l'indice di rifrazione del primo mezzo rispetto al secondo vale la seguente relazione:

$$n_{21} = \frac{1}{n_{12}}.$$

Se il raggio incidente è normale alla superficie di separazione dei due mezzi, il raggio penetra nel secondo mezzo senza subire alcuna variazione di direzione. Se quindi l'angolo di incidenza è zero, tale è pure quello di rifrazione.

L'**indice di rifrazione assoluto** n, o semplicemente **indice di rifrazione**, di un mezzo è il rapporto tra la velocità della luce c nel vuoto e la velocità della v in quel mezzo:

$$n = \frac{c}{v}$$

ed e' sempre quindi maggiore o uguale a 1; e' una caratteristica del mezzo ma dipende anche dalla lunghezza d'onda della luce. Tipici valori di n sono riportati nella tabella 2.

Alla lunghezza d'onda	di 589 nm	(luce gialla	del sodio)
MEZZO	$n = \frac{c}{v}$	**MEZZO**	$n = \frac{c}{v}$
Vuoto (valore esatto)	1	Plexigas	1,51
Aria*	1,0003	Vetro crown	1,52
Acqua (20 °C)	1,33	Cloruro di sodio	1,54
Alcol etilico	1,36	Polistirene	1,55
Acetone	1,36	Disolfuro di carbonio	1,63
Quarzo fuso	1,46	Vetro flint	1,65
Soluzione zuccherina (80%)	1,49	Ioduro di metilene	1,74
Benzene	1,50	Diamante	2,42
* Temperatura e pressione standard			

Tab. 2 - Alcuni indici di rifrazione.

Come da essa si vede, l'indice di rifrazione dell'aria è molto vicino all'unità, mentre quello del diamante è elevato, pari a 2,42; naturalmente, il valore nel vuoto è esattamente uguale a uno.

Osservazione didattica. Si noti che, per la maggior parte degli scopi, l'aria può essere considerata equivalente al vuoto per ciò che riguarda la rifrazione della luce. L'indice di rifrazione di un materiale in genere cambia col variare della lunghezza d'onda della luce. Si può pertanto sfruttare il fenomeno della rifrazione per analizzare un fascio di luce, scomponendolo nelle lunghezze d'onda che lo costituiscono, come accade nell'arcobaleno o in un prisma di vetro. Tale effetto è chiamato dispersione cromatica.

INTERPRETAZIONE DEL FENOMENO DELLA RIFRAZIONE

Osservazione didattica. Il docente, utilizzando un modello meccanico (figura 8), fornisce un ulteriore esempio per la comprensione del fenomeno della rifrazione.

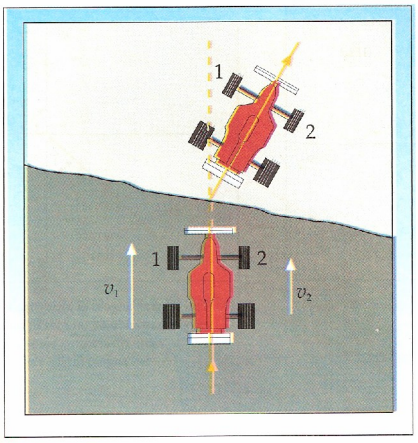


Fig. 8

Nel modello una macchina passa dalla strada asfaltata a una distesa di sabbia. E' evidente che a parità di spinta la velocità è maggiore sull'asfalto che non sulla sabbia. Ciò comporta se la direzione della macchina è perpendicolare alla linea di separazione tra l'asfalto e la sabbia, la macchina attraversata la linea di separazione, mantiene la stessa direzione e diminuisce la propria velocità. Se invece la direzione del moto della macchina è obliqua rispetto alla linea di separazione, allora, oltre a una diminuzione di velocità, si verifica anche un cambiamento della direzione del moto.

Ciò si spiega con il fatto che la ruota 2 attraversa prima della ruota 1 la linea di separazione. Di conseguenza, nell'intervallo di tempo necessario perché la linea sia

attraversata anche dalla ruota 1, la ruota 2 si muove a una velocità inferiore rispetto alla ruota 1. Ecco spiegata la deviazione.

SEMPLICI ESPERIENZE DI RIFRAZIONE DELLA LUCE

A questo punto il docente esegue delle semplici esperienze sulla rifrazione della luce.

1° Esperienza. Moneta sul fondo di un recipiente pieno di acqua.

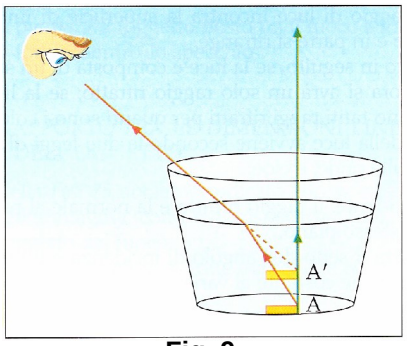


Fig. 9

Se in un bicchiere di vetro contenente dell'acqua immergiamo una moneta, quest'ultima, all'occhio dell'osservatore, apparirà sollevata rispetto al fondo dove realmente è adagiata. L'estremo A della moneta, come si comprende dalla figura 9 sarà localizzato dall'occhio dell'osservatore in A'. Infatti A' si trova sulla direzione del raggio (rifratto) rilevato dall'osservatore ed è anche il punto di incontro con il prolungamento dell'altro raggio rifratto perpendicolare alla superficie dell'acqua. Lo stesso discorso vale per tutti gli altri punti della moneta che apparirà, dunque, spostata verso la superficie.

2° Esperienza. Bastone immerso in un recipiente pieno di acqua.

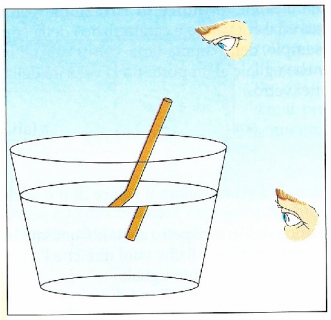


Fig. 10

Si consideri un bastoncino immerso parzialmente in acqua (figura 10). Ripetendo le stesse considerazioni fatte in precedenza si può facilmente comprendere come esso apparirà piegato a un osservatore che lo guarda dall'alto e spezzato a un osservatore che lo guarda attraverso le pareti del recipiente.

Si propone alla classe il seguente esempio concettuale.

Esempio. Un intenso raggio luminoso incide sopra una vasca piena d'acqua, avente la parete di fondo perfettamente riflettente. Come si osserva in figura 11, una parte del raggio viene riflesso dalla superficie dell'acqua e una parte dal fondo della vasca. Dimostrare che i due raggi emergenti dalla vasca sono paralleli.

Discussione. Dalla seconda legge della riflessione, ricordando anche che gli angoli alterni interni di due rette parallele tagliate da una trasversale sono uguali, segue che:

$$r_1 = i_2 = i_2' = i_3.$$

Indicando con n l'indice di rifrazione dell'acqua, e considerando uguale a 1 quello dell'aria, per la legge di Snell si ha inoltre:

$$\sin i_1 = n \sin r_1$$
$$n \sin i_3 = \sin r_3$$

da cui si vede che, essendo $r_1 = i_3$, è anche $i_1 = r_3$. Allora, dall'uguaglianza fra i_1' e i_1, segue che è $i_1' = r_3$, cioè che i raggi emergenti sono paralleli.

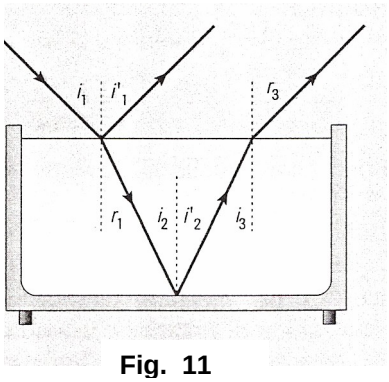


Fig. 11

3.4.3 La riflessione totale

La fig. 12 illustra i raggi uscenti da una sorgente posta in un vetro e incidenti sulla superficie di separazione vetro – aria.

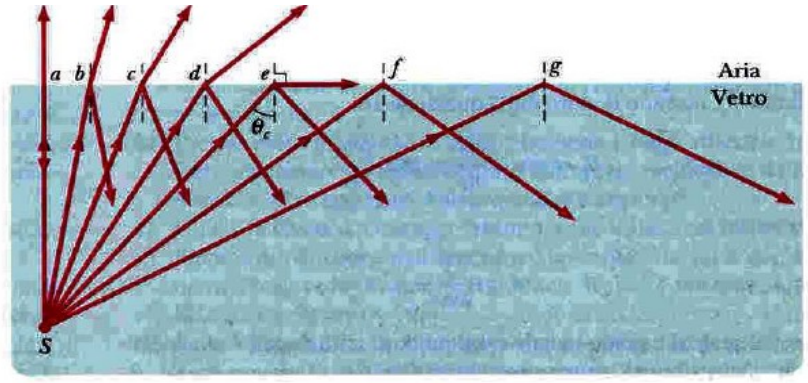


Fig. 12

Al crescere dell'angolo di incidenza θ si raggiunge una situazione (il docente fa osservare agli studenti il raggio e) in cui il raggio rifratto è parallelo alla superficie, essendo $90°$ l'angolo di rifrazione. Se l'angolo di incidenza è maggiore di questo angolo limite θ_c, non esiste nessun raggio rifratto e ha luogo il fenomeno chiamato **riflessione interna totale** o brevemente **riflessione totale**.

L'angolo limite si calcola ponendo $\theta_2 = 90°$ nella legge della rifrazione (equazione [2-1]):

$$n_1 \cdot \sin \theta_c = n_2 \cdot \sin 90°,$$

ossia

$$\theta_c = \arcsin \frac{n_2}{n_1}.$$

Osservazione didattica. Per il vetro rispetto all'aria $\theta_c = \arcsin\frac{1{,}00}{1{,}50} = 41{,}8°$.

Il seno di un angolo non può essere maggiore di 1, sicché deve essere $n_2 < n_1$. Questo ci dice che la riflessione totale non avviene quando la luce proviene dal mezzo a indice di rifrazione inferiore. Il termine **totale** indica esattamente questo: la riflessione avviene senza perdita di intensità.

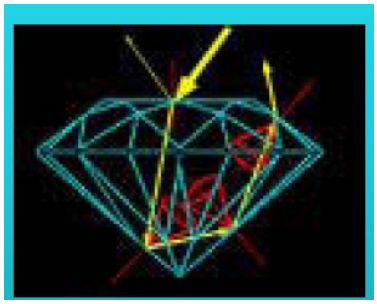


Fig. 13

Osservazione didattica. Far notare agli studenti il particolare "taglio" del diamante (fig. 13) che, sfruttando la riflessione totale, mette in risalto la sua pregiata brillantezza, perché l'angolo limite di questo materiale è piccolo (24,4°). Questa è una delle causa dei lampi di luce che sembrano uscire dai diamanti.

A questo punto il docente stimola gli studenti ponendo tale quesito: "A causa della rifrazione, come è il mondo visto da un sub in immersione, che guarda verso la superficie tranquilla dell'acqua (fig. 14)?
Dopo le loro risposte si procederà dicendo che egli vede nella posizione corretta un aereo che passa direttamente sopra la sua testa, ma una nave che si trova in corrispondenza all'angolo limite gli appare obliqua invece che orizzontale. Inoltre, è in grado di vedere, per riflessione totale, un pesce che si trova nascosto da uno scoglio.

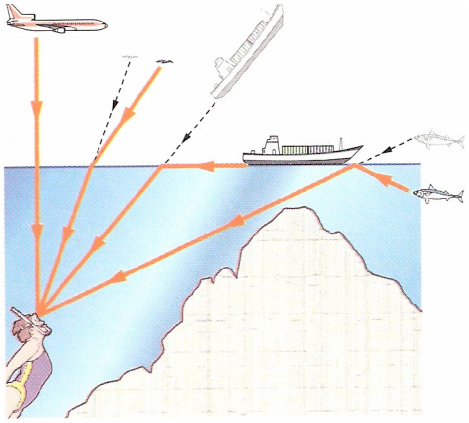


Fig. 14

QUALCHE APPLICAZIONE DELLA RIFLESSIONE TOTALE

IL MIRAGGIO. Si spiega il fenomeno con l'esempio della palma nel deserto (fig. 15): un raggio di luce che proviene dalle foglie della palma, in direzione obliqua verso il basso, subisce rifrazioni successive, incontrando nel suo cammino discendente, strati di aria sempre più calda e quindi sempre meno rifrangenti: il raggio di luce viene deviato ad angoli sempre più grandi finché viene riflesso totalmente. L'osservatore vede così sia l'albero sia la sua immagine capovolta come se la palma fosse riflessa in uno specchio d'acqua.

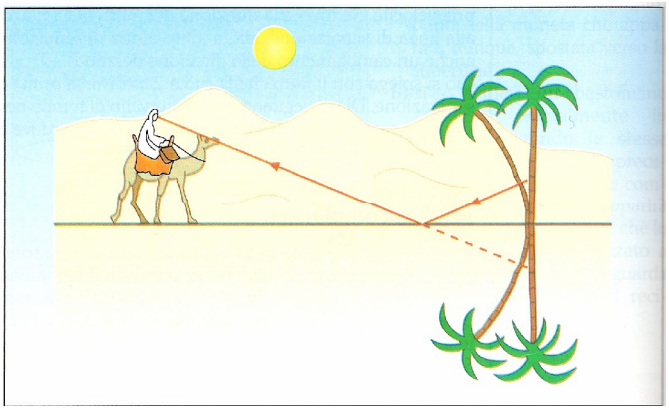


Fig. 15

LA "FATA MORGANA". Si spiega con l'esempio della nave nel mare (fig. 16): un raggio luminoso che parte dalla nave, in direzione obliqua verso l'alto, se incontra nel suo cammino strati d'aria meno densi, si rifrange allontanandosi dalla normale finché si riflette totalmente. L'osservatore, sulla costa, che intercetta tale raggio vede,in alto, l'immagine della nave capovolta, come se volasse.

Fig. 16

LE FIBRE OTTICHE. Un'altra interessante applicazione della riflessione totale sono le fibre ottiche, attraverso le quali è possibile trasmettere la luce a una certa distanza lungo un cammino anche tortuoso. Una fibra ottica (fig. 17) è costituita da un nucleo trasparente circondato da una corona il cui indice di rifrazione è leggermente più piccolo di quello del nucleo. Una volta immerso un raggio luminoso nel nucleo, vi rimane confinato a seguito di una successione continua di riflessioni totali. Le fibre ottiche si trovano nei lettori cd e negli endoscopi.

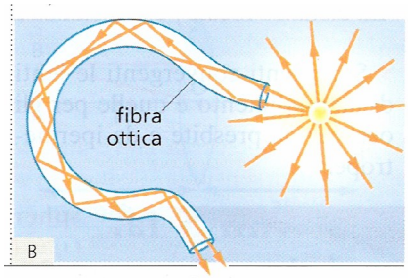


Fig. 17

Nota didattica. A questo punto gli studenti saranno portati in laboratorio, inteso come "ambiente" di simulazione, di stimolo e di apprendimento di concetti teorici propri della matematica. Esegue l'esperienza relativa al **MIRAGGIO DELLO SPILLO.**

Attività sperimentale

MIRAGGIO DELLO SPILLO

Introduzione: Un semplice esperimento consente di osservare la riflessione totale dei raggi di luce che passano da un mezzo trasparente otticamente più denso ad uno meno denso.
Si tratta di quanto si verifica quando si assiste a fenomeni come il miraggio e la Fata Morgana.

Materiali:
- Un tappo di sughero
- Uno spillo
- Un bicchiere trasparente oppure un barattolo di marmellata vuoto
- Un coltello o un taglierino
- Acqua

Preparazione: Tagliare dal tappo un disco di circa mezzo cm di spessore e fissare lo spillo al centro del disco in posizione verticale. Mettere il turacciolo nel bicchiere con acqua, in modo che lo spillo sia rivolto verso il basso.

Svolgimento: Se si guarda il tutto dall'alto si vede lo spillo immerso nell'acqua; se invece si osserva dal basso (per esempio tenendo gli occhi all'altezza del piano del tavolo sul quale è appoggiato il bicchiere), si vede un'immagine dello spillo al di sopra del turacciolo come in uno specchio.

Osservazioni: Miraggio e Fata Morgana sono fenomeni legati alla riflessione totale. Gli strati d'aria più vicini alla strada, riscaldandosi, hanno minore densità; i raggi di luce che li attraversano vengono deviati, talvolta tanto che possono superare l'angolo limite e produrre il fenomeno della riflessione totale. In questo modo oltre a vedere direttamente l'oggetto, se ne vede la sua immagine
capovolta, molto simile a quella che si formerebbe su uno specchio.

3.4.4 Specchi piani

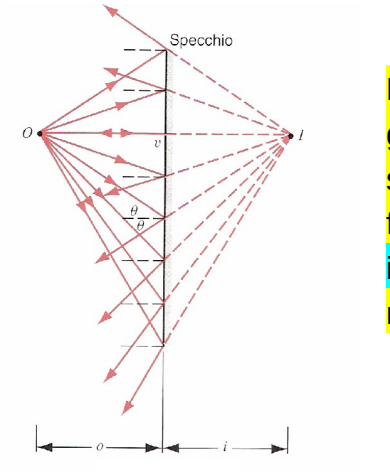


Fig. 18

Forse la più familiare esperienza di ottica consiste nel guardare in uno specchio. Nella fig. 18 è disegnata una sorgente puntiforme di luce O, chiamata oggetto, di fronte a uno specchio piano a distanza o da esso. La luce investe lo specchio rappresentata nella figura mediante raggi uscenti da O.

Osservazione didattica. Parlando della riflessione (vedi paragrafo 2.4.2), abbiamo fatto l'ipotesi che l'onda incidente fosse piana; in quel caso i raggi incidenti sono tutti paralleli tra di loro. In questo caso abbiamo, invece, una sorgente puntiforme e i raggi che incidono sullo specchio divergono da tale sorgente puntiforme. Possiamo considerare la sorgente puntiforme come una sorgente di onde sferiche, tale cioè che i raggi da essa emessi siano tutti perpendicolari ai fronti d'onda di forma sferica.

Costruiamo i raggi riflessi nei punti in cui ogni raggio incidente colpisce lo specchio, facendo uso della legge della riflessione. Se si tracciano i prolungamenti dei raggi riflessi oltre lo specchio, essi si incontrano nel punto I, chiamato immagine di O, che si trova al di là dello specchio alla stessa distanza da esso del punto O.
Nella fig. 19 sono riportati due dei raggi della figura precedente; uno colpisce lo specchio in v lungo la normale e l'altro in un punto qualsiasi a formando un angolo di incidenza θ con la normale in quel punto.

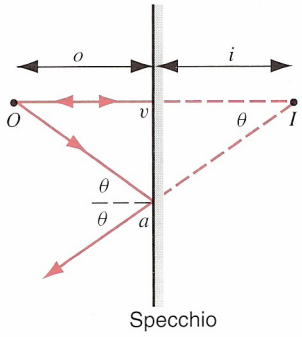


Fig. 19

Con semplici considerazioni geometriche, si può vedere che O e I sono equidistanti dalla superficie dello specchio. Ciò significa che le distanze

$$i = -o,$$

dove abbiamo introdotto il segno meno per indicare che I e O si trovano, rispetto allo specchio, da parti opposte.

Il docente ora stimola gli studenti ponendo tale quesito: "Perché le distanze sono uguali?" Dopo le loro risposte si procederà dicendo che queste distanze sono uguali, perché i due triangoli rettangoli aOv e aIv sono uguali per il secondo criterio di uguaglianza. Infatti, i triangoli hanno il lato verticale in comune e due angoli adiacenti uguali: uno è l'angolo retto e l'altro è l'angolo $O\hat{a}v = 90° - \theta = v\hat{a}I$.

Nel punto dove si forma l'immagine, al di là dello specchio, non c'è luce: se mettessimo uno schermo in quel punto, non vedremmo l'immagine della sorgente puntiforme di luce. Si dice che un'immagine di questo tipo è **virtuale** e non reale.
L'immagine riflessa da uno specchio piano è **virtuale** e appare in posizione simmetrica all'oggetto rispetto allo specchio.

Osservazione didattica. L'immagine riflessa in uno specchio (fig. 20) sfrutta il fatto che il cervello ritiene che ogni raggio luminoso debba necessariamente percorrere una retta; l'**immagine virtuale** viene quindi interpretata come un'immagine di un oggetto che si trova sul prolungamento dei raggi. A causa della riflessione l'immagine viene simmetrizzata, invertendo la destra con la sinistra.

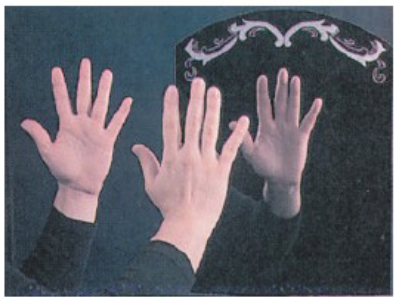


Fig. 20

Per questa ragione la parola «ambulanza» è scritta alla rovescia (fig. 21), in modo che si legga bene dallo specchietto retrovisore.

Fig. 21

Attività sperimentale

COSA C'E' DIETRO L'ANGOLO?

Introduzione: Con materiali semplici e di comune reperibilità è possibile costruire un periscopio.

Materiali:

- Un cartone del latte vuoto (del tipo a sezione quadrata) oppure un foglio di cartoncino rigido.
- Due specchi piani rettangolari di dimensioni 10 x 5 cm
- Una penna
- Una squadretta
- Forbici

Preparazione:

Costruire con il cartoncino un parallelepipedo di lato 10 cm e di lunghezza 50-70 cm.
Disegnare due linee diagonali su una faccia del cartone vuoto o del parallelepipedo in modo che risultino parallele tra loro e inclinate di 45° rispetto alla normale (aiutarsi con la squadretta). La distanza tra le due deve essere di circa 15-20 cm. Incidere una fessura lungo ciascuna delle due linee. Girare il cartone, disegnare due righe diagonali alla stessa altezza delle precedenti già incise e tagliare anche qui le fessure. Introdurre gli specchi nelle fessure in modo che quello inferiore abbia la superficie riflettente rivolta verso l'alto e quello superiore abbia la superficie riflettente rivolta verso il basso.
Disegnare un quadrato abbastanza largo davanti allo specchio superiore e ritagliarlo.
Con una matita praticare un forellino sul retro del cartone, all'altezza dello specchio inferiore.
Il periscopio è pronto.

Svolgimento:

Guardando attraverso il forellino sarà possibile osservare oggetti che a occhio nudo non sono visibili perché nascosti da un ostacolo ingombrante oppure perché posti dietro... l'angolo!

Osservazioni:

• Il periscopio delle navi si basa sul principio della riflessione.
Gli specchi si possono utilizzare per alcune esperienze divertenti:
• Scrivere il proprio nome guardando esclusivamente in uno specchio piano, posto verticalmente su un piano ortogonale rispetto al foglio.
• Scrivere una parola su un foglio sotto il quale è stato steso un foglio di carta copiativa, col lato copiativo rivolto verso l'alto: per leggere la parola si dovrà guardarla mediante uno specchio.
• Leggere l'ora guardando esclusivamente l'immagine riflessa in uno specchio.
• Specchiarsi in un cucchiaio: uno specchio curvo dà un'immagine deformata, come al luna park.

3.4.5 Specchi parabolici

Nei fari delle auto (fotografia a sinistra) la luce emessa dalla lampadina è riflessa in avanti da uno specchio che ha il profilo a forma di parabola.

La superficie degli **specchi parabolici** è generata dalla rotazione di una parabola intorno al proprio asse di simmetria (che prende il nome di asse ottico dello specchio).

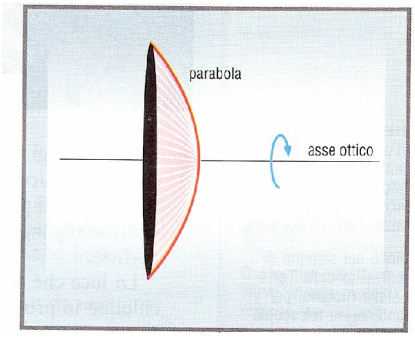


Fig. 22

Tutti i raggi paralleli all'asse ottico che colpiscono la parte concava dello specchio parabolico vengono riflessi in un punto che si chiama **fuoco**, che ha due proprietà.

- I raggi emessi da una sorgente puntiforme posta nel fuoco si riflettono sullo specchio, in modo da allontanarsi un fascio di raggi paralleli.

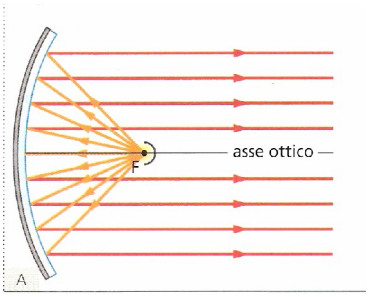


Fig. 23

- I raggi che arrivano paralleli all'asse di simmetria dello specchio (chiamato asse ottico), dopo essere stati riflessi, si intersecano tutti nel fuoco.

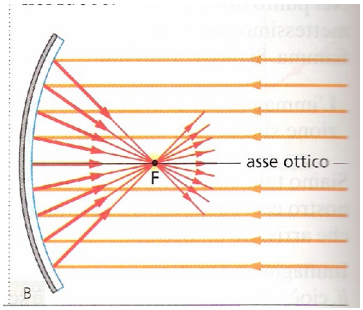


Fig. 24

Matematicamente

Si vuole dimostrare che uno specchio parabolico concentra nel proprio fuoco tutti i raggi che giungono su di esso parallelamente all'asse.

Allo scopo, si rappresenta la sezione parabolica dello specchio in un diagramma cartesiano.

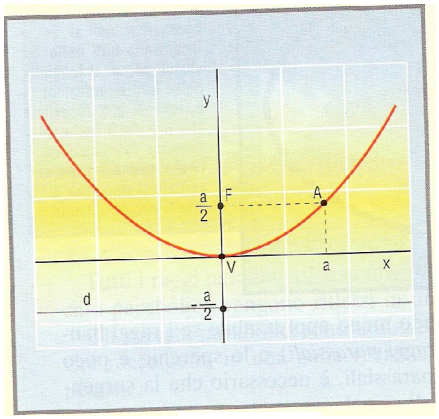


Fig. 25

Si assume l'origine degli assi nel vertice V e l'asse x parallelo alla direttrice d; si suppone, inoltre, che la distanza fuoco-direttrice valga a e che il fuoco F abbia ordinata positiva.

Osservazione didattica. La parabola si definisce come il luogo dei punti equidistanti dal fuoco e dalla direttrice.

Con queste ipotesi, l'equazione della parabola risulta:

$$y = \frac{x^2}{2a}.$$

Infatti, poiché l'origine degli assi è in V, l'equazione deve essere del tipo:

$$y = kx^2.$$

Inoltre, tracciando dal fuoco la parallela all'asse x, si intercetta il punto A, che ha coordinate $\left(a;\frac{a}{2}\right)$, perché la distanza di A dal fuoco è uguale alla distanza di A dalla direttrice. Sostituendo, si ricava quindi:

$$\frac{a}{2} = ka^2,$$

da cui:

$$k = \frac{1}{2a}.$$

Dimostrazione

Si consideri un qualunque raggio i parallelo all'asse y, che incida in un punto P dello specchio. Si disegni la congiungente del punto P con il fuoco F e si tracci la bisettrice s dell'angolo formato tra il raggio incidente e PF (fig. 26).

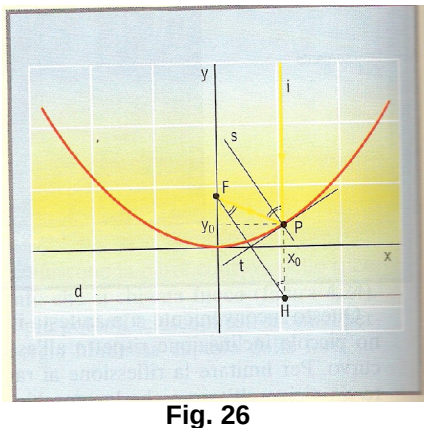


Fig. 26

Si prolunghi il raggio incidente, fino a intersecare, in H, la direttrice della parabola e si tracci la congiungente FH.

Il triangolo FPH è isoscele, perché il punto P, trovandosi sulla parabola, è equidistante dal fuoco e dalla direttrice.

Perciò sono eguali tra loro gli angoli in F e in H i quali, in tal modo, risultano anche eguali a ciascuno dei due angoli formati da i con s e da PF con s (la loro somma è uguale all'angolo esterno al triangolo formato appunto dai raggi i e PF).

Ne viene che, avendo eguali gli angoli alterni interni formati con la trasversale PF, le due rette s e FH sono tra loro parallele.

Se il raggio riflesso è effettivamente PF, la retta t passante per P e perpendicolare a s (ovvero a FH) deve essere tangente alla parabola: in questo caso e solo in questo caso, infatti, i due angoli formati dai raggi con s sono gli angoli (eguali) di incidenza e riflessione nel punto P.

Osservazione didattica. Non resta che dimostrare questo, per convalidare la tesi.

Si ricava facilmente dalla figura che la retta FH ha coefficiente angolare:

$$m = -\frac{a}{x_0},$$

se si indica con x_0 l'ascissa di P. Dunque la retta t, ad essa perpendicolare, ha coefficiente angolare

$$m' = \frac{x_0}{a}.$$

Ora si mostra che il coefficiente angolare della tangente è proprio eguale a m'.

Una retta generica per P (di coefficiente angolare m_1), ha equazione:

$$y - y_0 = m_1(x - x_0);$$

sostituendo a y_0 il suo valore, si ha:

$$y - \frac{x_0^2}{2a} = m_1(x - x_0),$$

da cui

$$y = m_1(x - x_0) + \frac{x_0^2}{2a}.$$

La retta trovata interseca la parabola nei punti per i quali:

$$\frac{x^2}{2a} = m_1(x - x_0) + \frac{x_0^2}{2a},$$

ovvero quando

$$(x - x_0)(x + x_0 - 2am_1) = 0.$$

Imponendo che la seconda soluzione coincida con la prima (condizione di tangenza), si ha:

$$2x_0 - 2am_1 = 0,$$

cioè

$$m_1 = \frac{x_0}{a}$$

che quindi coincide con m'.

Resta così dimostrata la tesi: come il generico raggio i, così tutti i raggi che giungono sullo specchio parabolico parallelamente all'asse sono riflessi nel fuoco.

☐ LE ANTENNE PARABOLICHE

Le proprietà degli specchi parabolici di concentrare i raggi paralleli all'asse nel fuoco viene sfruttata non solo con la luce, ma anche con le microonde, che sono particolari onde elettromagnetiche in grado di trasportare segnali audio e video. Le antenne paraboliche installate nei tetti delle case (fig. 27) sono orientate in modo che i raggi delle microonde (provenienti da satelliti per le telecomunicazioni in orbita geostazionaria) arrivino paralleli al loro asse. Dopo essere stati concentrati nel fuoco, i segnali giungono al televisore, dove sono trasformati in immagini e suoni. Antenne paraboliche più grandi sono utilizzate per scambiare grandi quantità di segnali con i satelliti.

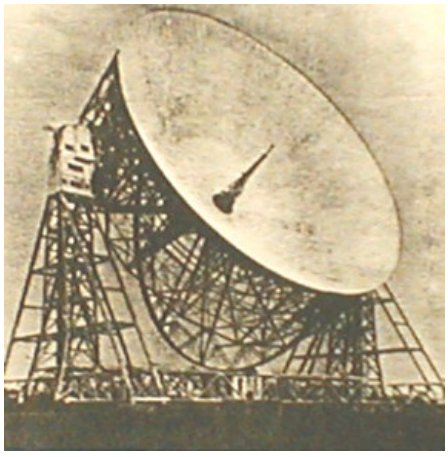


Fig. 27

3.4.6 Specchi sferici

Uno specchio sferico è una superficie speculare avente la forma di una calotta sferica dotata di un elevato potere riflettente. Gli specchi sferici si dividono in due categorie:

a) **specchi concavi**, se la superficie speculare è quella interna della calotta (fig. 28);
b) **specchi convessi**, se la superficie speculare è quella esterna (fig. 29).

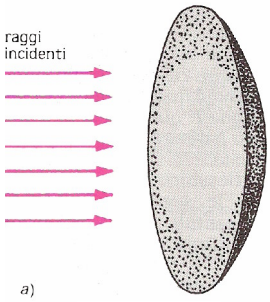


Fig. 28

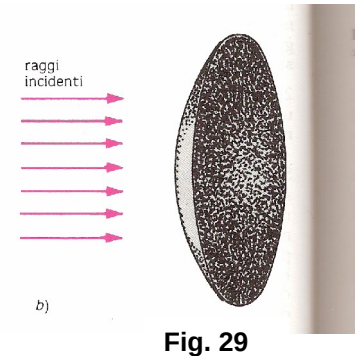


Fig. 29

Gli elementi caratteristici per lo studio della riflessione su uno specchio sferico (fig. 30) sono:

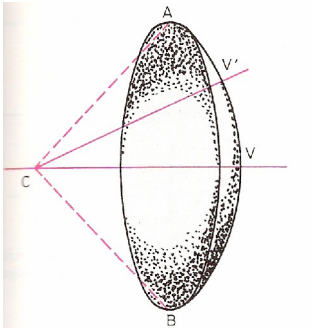


Fig. 30

1) **centro di curvatura** C, è il centro della superficie sferica alla quale la calotta appartiene;
2) **asse ottico principale**, rappresenta l'asse di simmetria della calotta sferica; esso passa per il centro di curvatura C;
3) **vertice** V, è il punto di intersezione tra l'asse ottico principale e la calotta sferica;
4) **angolo di apertura**, è l'angolo compreso tra i due raggi condotti dal centro agli estremi dell'arco passante per V;
5) **asse ottico secondario**, è qualsiasi altra retta passante per il centro di curvatura e intersecante la calotta sferica in un punto

Per studiare le immagini prodotte dagli specchi sferici si fanno delle ipotesi semplificative, dette **approssimazioni di Gauss**, che consistono nel supporre che:

- l'angolo di apertura sia piccolo, in modo che la porzione di calotta sferica sia molto piccola rispetto alla superficie sferica alla quale appartiene;
- i raggi luminosi che giungono sullo specchio siano poco inclinati rispetto all'asse ottico principale, questi raggi sono chiamati **raggi parassiali**.

Ciò premesso consideriamo un fascio di raggi ottici paralleli all'asse ottico principale di uno specchio concavo, come mostrato nella fig. 31.

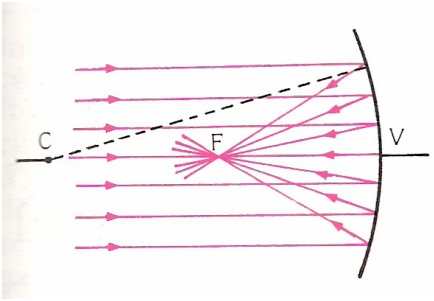


Fig. 31

Tenuto conto che la normale alla superficie riflettente in un qualunque punto, perpendicolare al piano tangente in quel punto, passa per il centro di curvatura C, costruiamo, mediante la legge della riflessione, il raggio riflesso corrispondente a ogni raggio incidente. Osserviamo che i raggi riflessi convergono in un unico punto F, che giace sull'asse, chiamato **fuoco principale** dello specchio, che lo si trova nel punto medio del segmento VC, cosicché la lunghezza del segmento VF, chiamata **distanza focale** e comunemente indicata con la lettera f, è pari alla metà del raggio r della calotta sferica:

$$f = \frac{r}{2}, \text{ con } r \text{ raggio della calotta sferica}$$

Nel caso di uno specchio convesso, la costruzione geometrica della fig. 32 mostra che un fascio di raggi incidenti paralleli all'asse ottico principale viene riflesso in un fascio di raggi divergente dal punto medio F del raggio VC.

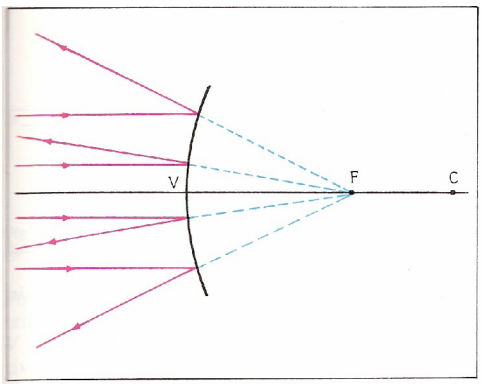


Fig. 32

In analogia con gli specchi concavi tale punto è chiamato **fuoco principale** e si indica con la lettera F; esso però è un punto virtuale, cioè fittizio, in quanto il luogo di incontro dei prolungamenti dei raggi riflessi non rappresenta nel caso in esame, alcuna concentrazione dell'energia luminosa associata ai raggi riflessi.

Consideriamo ora uno specchio concavo. Prendiamo il punto P sull'asse ottico principale e vediamo dove si forma il punto immagine P'. Il raggio luminoso PV viene riflettuto su sé stesso, per cui il punto immagine P' dovrà trovarsi proprio sull'asse ottico principale. Inoltre, se valgono le approssimazioni di Gauss, allora i raggi passanti per P e per un generico punto I della superficie dello specchio vengono riflessi in raggi che si intersecano tutti in uno stesso punto P'. La costruzione geometrica della fig. 33 mostra che ogni raggio uscente dalla sorgente converge, dopo la riflessione, nel punto P', che prende il nome di **immagine reale** del punto P o semplicemente **punto immagine** di P.

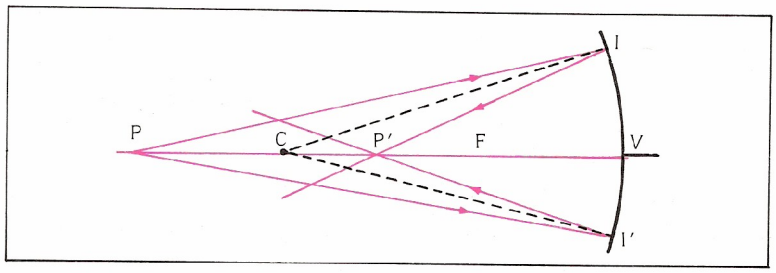


Fig. 33

Se poniamo la sorgente in P' otteniamo l'immagine riflessa nella posizione P. Questo può essere generalizzato mediante il **principio della reciprocità dei cammini luminosi**, in base al quale se si prende il punto immagine come punto oggetto, quest'ultimo diventa punto immagine. Per tale motivo ogni coppia di punti costituita da un punto oggetto e dal relativo punto immagine forma un sistema di **punti coniugati**.
Si può osservare che se la sorgente luminosa è posta nel fuoco F, i raggi che giungono sullo specchio si riflettono paralleli all'asse ottico principale. La situazione è la stessa della fig. 30, cambiando la direzione dei raggi. Possiamo dedurre allora che il fuoco è il punto coniugato di punto situato sull'asse ottico principale ad una distanza infinita dal vertice (fig. 34).

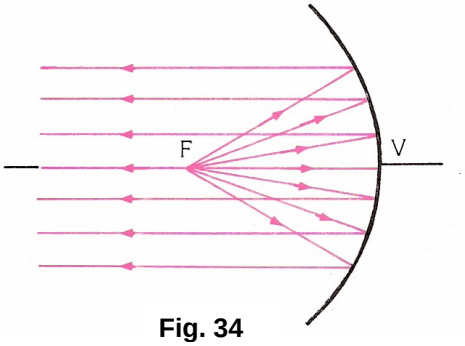


Fig. 34

Se invece la sorgente è posta tra il fuoco e il vertice, i raggi riflessi non convergono in alcun punto anteriore allo specchio, bensì originato un fascio divergente. Tale fascio comunque è convergente in un punto posto dietro allo specchio, come mostrato dalla fig. 35.

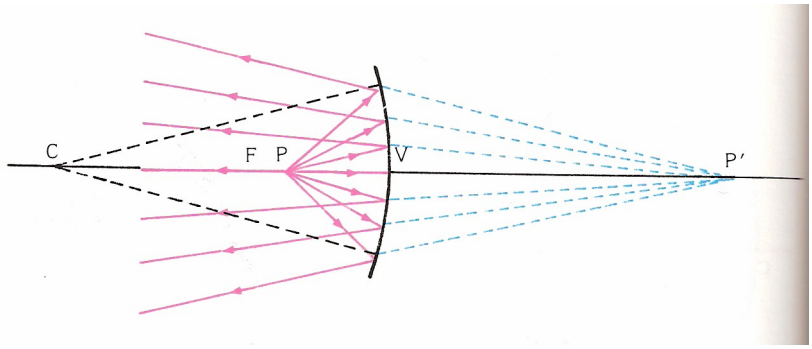


Fig. 35

In questo caso, l'osservatore può rilevare la presenza dell'immagine in P' solo se si trova situato sulla traiettoria dei raggi riflessi, poiché tale immagine non rappresenta un'immagine reale essa viene chiamata **immagine virtuale** di P. Mentre l'immagine reale può essere sperimentalmente osservata su uno schermo disposto opportunamente sull'asse principale, l'immagine virtuale non può essere raccolta su alcuno schermo.

Osservazione didattica. Le considerazioni appena fatte valgono anche nel caso in cui P non si trovi sull'asse principale, basta infatti sostituire all'asse principale l'asse secondario $V'C$ e considerare il punto P su tale asse. Così un fascio di raggi paralleli all'asse secondario origina dopo la riflessione sullo specchio un fuoco secondario F''.

Se consideriamo uno specchio convesso (Fig. 36), preso un punto P posto sull'asse principale e davanti allo specchio, qualunque sia la sua posizione, si nota che i raggi incidenti partenti da P originano sempre un fascio di raggi divergenti. Questo fascio si comporta come se provenisse dal punto P' posto sempre sull'asse principale, ma dietro allo specchio. Di conseguenza, il punto P', coniugato di P è sempre un'immagine virtuale.

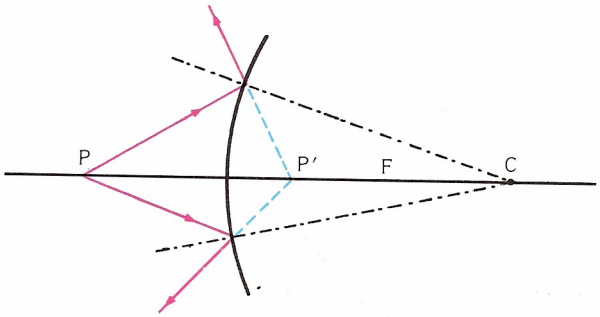


Fig. 36

3.4.7 Costruzioni delle immagini

Esaminiamo ora il caso in cui la sorgente luminosa, anziché essere puntiforme, ma abbia dimensioni geometriche finite. L'esperienza mostra che, ponendo l'oggetto

luminoso davanti a uno specchio sferico, si forma un'immagine simile alla sorgente, ma avente dimensioni generalmente diverse. Noi per semplicità considereremo solamente oggetti lineari che fungono da sorgenti. In particolare considereremo un segmento AB rappresentato da una freccia.

Se l'oggetto si trova su un piano perpendicolare all'asse, l'immagine si formerà nel piano coniugato, formato quindi dai punti coniugati dei punti del piano su cui giace l'oggetto, pure perpendicolare all'asse. Allora la costruzione geometrica dell'immagine di un oggetto lineare viene ricondotta facilmente a quella dell'immagine di un solo punto.

Basta infatti considerare due raggi qualsiasi uscenti dall'estremo A del segmento che giace fuori dell'asse e determinare, mediante le leggi della riflessione, i corrispondenti raggi riflessi. L'intersezione di questi due raggi dà l'immagina A' del punto A.

Si può ulteriormente semplificare la costruzione considerando alcuni particolari raggi incidenti, i cui corrispondenti raggi riflessi possono essere tracciati senza ricorrere a misure angolari. E' noto infatti che

a) ogni raggio parallelo all'asse ottico origina un raggio passante per il fuoco principale;

b) ogni raggio passante per il fuoco principale origina un raggio parallelo all'asse;

c) ogni raggio passante per il raggio di curvatura incidendo normalmente alla superficie dello specchio viene riflesso nella stessa direzione.

Esempi possono essere i seguenti:

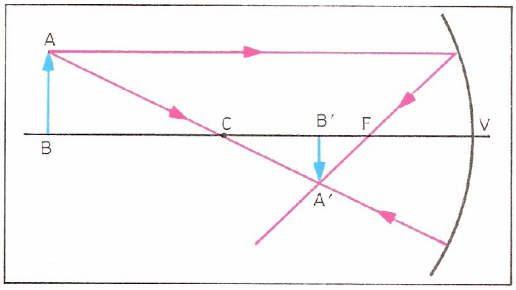


Fig. 37 - Oggetto tra l'infinito e il centro di curvatura: immagine reale, capovolta e rimpicciolita, disposta tra il centro e il fuoco.

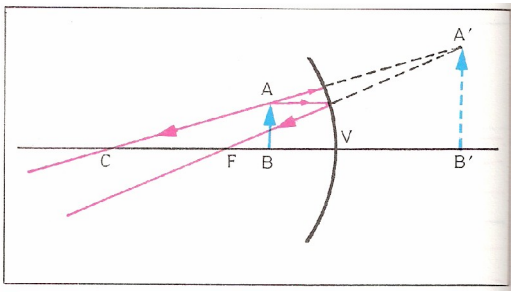


Fig. 38 - Oggetto tra il fuoco e il vertice: immagine virtuale, diritta e ingrandita, disposta dietro lo specchio.

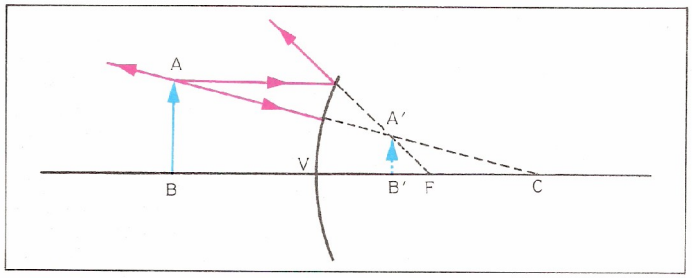


Fig. 39 – Negli specchi convessi, qualunque sia la posizione dell'oggetto, l'immagine è semplice e virtuale, diritta e rimpicciolita, disposta tra il vertice e il fuoco.

Se si utilizzano specchi sferici che non soddisfano le approssimazioni di Gauss, le immagini vengono poco nitide e alquanto distorte. Ciò si verifica in quanto un fascio di raggi paralleli non convergono più nel fuoco ma in una zona più estesa, chiamata **superficie caustica** (fig. 40)**.**

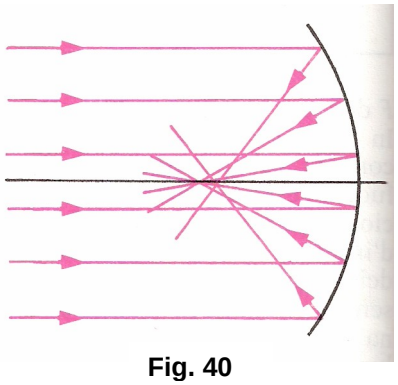


Fig. 40

3.4.8 Analisi quantitativa

Sempre nell'ipotesi che siano verificate le approssimazioni di Gauss ci proponiamo di determinare l'**equazione dei punti coniugati**, che rappresenta la relazione fondamentale tra la distanza del punto oggetto e del punto immagine dallo specchio e il raggio di curvatura della calotta sferica.

Consideriamo (fig. 41) quindi uno specchio concavo e un punto oggetto P posto sull'asse principale. Sia in oltre PI un generico raggio incidente sul punto I della calotta sferica, IC la normale allo specchio nel punto I e IP' il corrispondente raggio riflesso. Evidentemente P' è l'immagine di P.

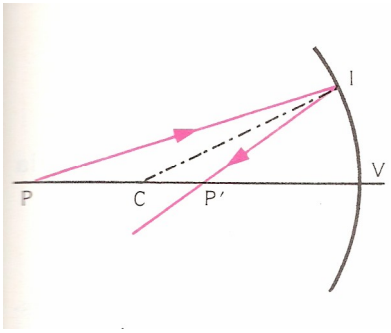


Fig. 41

Consideriamo quindi uno specchio concavo e un punto oggetto P posto sull'asse principale. Sia inoltre PI un generico raggio incidente sul punto I della calotta sferica, IC la normale allo specchio nel punto I e IP' il corrispondente raggio riflesso. Evidentemente P' è l'immagine di P.

Essendo per le leggi della riflessione $P\hat{I}C = C\hat{I}P'$, IC è la bisettrice dell'angolo $P\hat{I}P'$ e, poiché la bisettrice di un angolo interno di un triangolo divide il lato opposto in parti proporzionali agli altri due lati, si ha:

$$\frac{IP}{IP'} = \frac{PC}{CP'} \qquad [2\text{-}2]$$

Poiché lo specchio è di piccola apertura, approssimativamente risulta:

$$IP \cong VP \text{ e } IP' \cong VP'.$$

La [2-2] allora diventa:

$$\frac{VP}{VP'} = \frac{PC}{CP'}.$$

Ponendo $VP = p$, $VP' = q$ e $VC = R$, si ottiene:

$$\frac{p}{q} = \frac{p - R}{R - q}$$

Riducendo a forma intera:

$$pR + qR = 2pq$$

e dividendo per pqR, si ha infine:

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{2}{R}$$

La relazione trovata, nota come **equazione dei punti coniugati** mostra che entro le approssimazioni di Gauss il raggio riflesso corrispondente a un generico raggio uscente dal punto P interseca l'asse sempre nello stesso punto P'. Ne segue che al fascio omocentrico di raggi incidenti uscenti da P corrisponde nella riflessione sullo specchio un fascio di raggi ancora omocentrico con centro P'.

Entro le approssimazioni di Gauss uno specchio sferico forma un'immagine puntiforme P' di una sorgente puntiforme P che può essere reale o virtuale. Si può osservare che l'equazione dei punti coniugati da noi ricavata nel caso particolare dell'immagine reale prodotta da uno specchio concavo, vale in ogni caso per oggetti e immagini sia reali che virtuali e per specchi sia concavi che convessi, se alle distanze p e q dell'oggetto e dell'immagine e al raggio di curvatura R si attribuisce un segno secondo le seguenti convenzioni:

1. per oggetti reali $p>0$, mentre per oggetti virtuali $p<0$; in modo analogo $q>0$ per immagini reali e $q<0$ per immagini virtuali;
2. il raggio di curvatura R è positivo se il centro C si trova nello spazio in cui si formano le immagini reali, cioè nella stessa parte da cui proviene la luce (specchio concavo), è invece negativo se il centro C si trova nello spazio in cui si formano le immagini virtuali, cioè nella parte opposta a quella da cui proviene la luce (specchio convesso).

Se consideriamo ad esempio uno specchio concavo (con la luce che proviene dalla parte concava, cioè $R>0$) e un oggetto virtuale P posto dietro allo specchio ($p<0$), l'immagini di P' che ne risulta è reale ($q>0$). Con le convenzioni viste l'equazione dei punti

coniugati resiste anche in questo caso ed è simmetrica rispetto a p e q, cioè se il punto oggetto va in P' il punto immagine si sposta in P.
Possiamo osservare che, sempre per uno specchio concavo,quando il punto oggetto si allontana infinitamente dal vertice (p assume valori estremamente grandi), il valore del rapporto $\frac{1}{p}$ risulta nullo. L'equazione dei punti coniugati si riduce alla seguente forma:

$$\frac{1}{q} = \frac{2}{R}$$

e quindi $q = R/2$
Questo particolare valore di q rappresenta la distanza focale f che può essere scritta nella forma:

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{f}$$

Se si riportano su un sistema di assi cartesiani ortogonali (p,q) le corrispondenti distanze p e q appunto, si trova che il luogo geometrico individuato dalle coppie di valori p e q che soddisfano l'equazione dei punti coniugati è proprio un ramo di iperbole equilatera avente per asintoti le rette di equazioni $p = f$ e $q = f$. Infatti:

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{f} - \frac{1}{p} = \frac{p - f}{pf}$$

quindi

$$q = \frac{pf}{p - f} = \frac{f}{1 - \frac{f}{p}}$$

Mediante questa relazione è possibile determinare in modo semplice il valore di q corrispondente al valore di p. Vediamo i casi più significativi:

- $p \to \infty$ allora $q = f$
- $p > 2f$ allora $f < q < 2f$
- $p = 2f$ allora $q = 2f$
- $f < p < 2f$ allora $q > 2f$;
- $p = f$ allora $q \to \infty$;
- $p < f$ allora $q < 0$; in questo caso l'immagine passa dietro allo specchio, cui corrisponde una distanza del punto immagine negativa; in questo caso le immagini divengono virtuali
- $p = \frac{f}{2}$ allora $q = -f$;
- $p = 0$ allora $q = 0$;

Si vede quindi che man mano che il punto oggetto si sposta dal vertice dello specchio (p=0) fino all'infinito ($p \to \infty$) l'immagine si sposta dal vertice verso il fuoco.

Per quanto riguarda gli specchi convessi, in base alle convenzioni fatte, R<0, cosicché anche la distanza focale è negativa (f<0) e quindi il fuoco risulta virtuale. Per tali

specchi sussiste ancora la legge dei punti coniugati, in cui però la distanza focale è negativa. Dalla legge dei punti coniugati con $f < 0$ discende che per oggetti reali, se p è positivo, q sarà negativo; l'immagine pertanto si forma dietro la superficie riflettente e quindi si tratta di un'immagine virtuale. La situazione è mostrata in fig. 42.

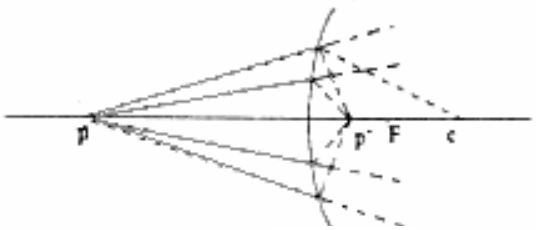


Fig. 42

3.4.9 Ingrandimento lineare

Dato ora un segmento AB situato in un piano perpendicolare all'asse ottico, sappiamo già che la sua immagine è ancora un segmento $A'B'$ situata in un piano anch'esso perpendicolare all'asse ottico. Se poniamo $y=AB$ e $y=A'B'$, si definisce **ingrandimento trasversale o lineare** e lo si indica con la lettera ***G***, il rapporto:

$$G = \frac{y'}{y} = \frac{A'B'}{AB}$$

Considerati i due triangoli simili ABC e $A'B'C$ della fig. 43:

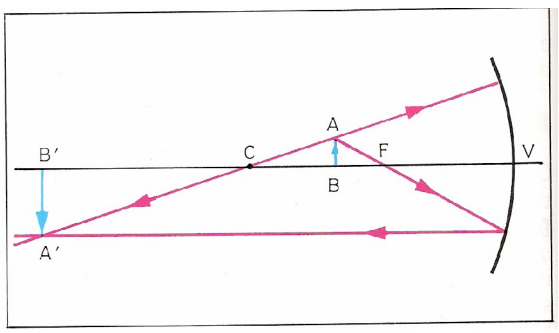


Fig. 43

Si ha $$\frac{y'}{y} = \left|\frac{q-R}{R-p}\right|.$$

L'equazione dei punti coniugati nella forma $\frac{p}{q} = \frac{p-R}{R-q}$ diviene $\frac{y'}{y} = \left|\frac{q}{p}\right|$, cioè $\frac{y'}{y} = \left|\frac{f}{p-f}\right|$.

Dal questa espressione si deduce che, fissata la distanza focale f dello specchio, l'ingrandimento lineare dipende unicamente dalla distanza p dell'oggetto dallo specchio.

Convenzionalmente, si assume G positivo se l'immagine è diritta rispetto all'oggetto e negativo se l'immagine è capovolta. Con questa convenzione l'ingrandimento lineare è:

$$G = -\frac{q}{p} = -\frac{f}{p-f}$$

A questo punto il docente stimola gli studenti ponendo tali quesiti:

1. "Quali sono le caratteristiche fisiche e geometriche di un oggetto disposto tra il fuoco e il vertice di uno specchio concavo?

2. Di che forma devono essere gli specchi che si trovano all'interno dei fanali delle automobili?

3.4.10 Diottro sferico

Il problema fondamentale che si presenta quando un fascio luminoso passa da un mezzo trasparente a un altro è quello di determinare, mediante le leggi della rifrazione, i raggi emergenti corrispondenti ai raggi che incidono sulla superficie di separazione fra i due mezzi. Vogliamo ora prendere in considerazione un diottro sferico, un sistema ottico costituito da due mezzi omogenei (di indice di rifrazione n_1 e n_2 diversi), trasparenti e isotropi, separati da una superficie sferica di raggio R. La retta passante per la sorgente O e per il centro C della superficie sferica e' detta asse ottico del diottro.

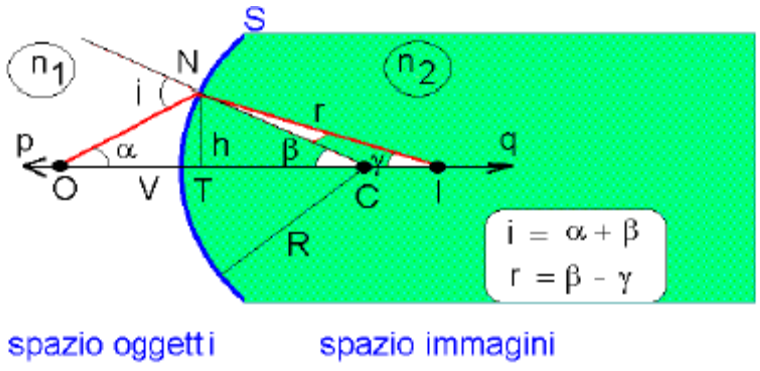


Fig. 44

Come si vede nella fig. 44, l'asse ottico interseca la superficie sferica nel punto V. Questo punto è preso come riferimento per la misura delle distanze, con la seguente **convenzione**:

• p (distanza dell'oggetto dal diottro): >0 (oggetto reale) per oggetti che si trovano, rispetto alla superficie di separazione del diottro, dalla parte da cui arriva la luce (spazio di incidenza o spazio oggetti); <0 (oggetto virtuale) per oggetti che si trovano, rispetto alla superficie di separazione del diottro, dalla parte opposta a quella da cui arriva la luce (spazio di trasmissione o spazio immagini);

• q (distanza dell'immagine dal diottro): >0 (immagine reale) per immagini nello spazio di trasmissione ("dietro" la superficie di separazione); <0 (immagine virtuale) per immagini nello spazio di incidenza ("davanti" alla superficie di separazione);

• raggio di curvatura R : >0 se il centro della superficie sferica e' nello spazio di trasmissione (diottro convesso: e' il caso della figura); <0 se il centro della superficie sferica e' nello spazio di incidenza (diottro concavo).

Nota didattica. Bisogna verificare se un diottro sferico fornisce un'immagine puntiforme di una sorgente puntiforme.
Osservazione didattica. Si fa riferimento alla figura precedente, in cui e' rappresentato un diottro sferico convesso, con il centro di curvatura nel punto C e indici di rifrazione dei due mezzi tali per cui $n_1 < n_2$.
Si consideri un generico raggio luminoso emesso dalla sorgente O con angolo α rispetto all'asse ottico; esso viene rifratto nel punto N e il raggio rifratto interseca l'asse ottico nel punto I.
Se I fosse l'immagine di O allora la posizione di I rispetto a V dovrebbe essere indipendente dall'angolo di emissione α. Per la verifica, applichiamo il teorema dei seni ai triangoli OCN e NCI:

$$\frac{\sin i}{p+R} = \frac{sen\beta}{ON} \qquad \frac{\sin r}{q-r} = \frac{\sin\beta}{NI}$$

Eliminando $\sin\beta$ dalle due espressioni si ha:

$$\frac{\sin i}{p+R} ON = \frac{\sin r}{q-R} NI$$

$$\frac{ON}{NI} = \frac{\sin r}{\sin i}\frac{p+R}{q-R} = \frac{n_1}{n_2}\frac{p+R}{q-R} \qquad [2\text{-}3]$$

In generale il rapporto a primo membro della [2-3] non e' costante al variare dell'angolo α e pertanto anche q e' funzione di α, dato che tutte le altre quantità che intervengono a secondo membro hanno valore fisso.
Si può concludere, quindi, che un diottro sferico trasforma in generale un fascio omocentrico in un fascio astigmatico.
Introduciamo ora l'approssimazione gaussiana di raggi parassiali e verifichiamo che, in questa ipotesi, il diottro sferico fornisce un'immagine puntiforme di un oggetto puntiforme.
Considereremo valide, nel seguito, le seguenti relazioni:

$$\tan\alpha \cong \sin\alpha \cong \alpha \Rightarrow p = OV \cong ON$$

$$\tan\gamma \cong \sin\gamma \cong \gamma \Rightarrow q = VI \cong NI$$

Sostituendo nella [2-3] si ha la relazione:

$$\frac{p}{q} = \frac{n_1}{n_2}\frac{p+R}{q-R}$$

che può essere riscritta nella forma:

$$\frac{n_1}{p}+\frac{n_2}{q}=\frac{n_2-n_1}{R} \qquad [2\text{-}4]$$

L'equazione [2-4] fornisce una relazione tra la posizione p della sorgente e la posizione q dell'immagine indipendentemente dal valore di α: si può quindi concludere che in approssimazione di Gauss il diottro trasforma fasci omocentrici in fasci rifratti omocentrici.

L'equazione [2-4] del diottro e' detta anche **equazione di Cartesio** e i punti di coordinate p e q che la soddisfano sono detti **punti coniugati** rispetto al diottro.

Se la posizione p della sorgente tende all'infinito, l'immagine si trova in un punto, posto a distanza f_2 dal diottro detto **secondo fuoco**; mentre se l'immagine si forma a distanza infinita, l'oggetto si trova in un punto, detto **primo fuoco,** a distanza f_1 dal diottro: i raggi uscenti da f_1 si rifrangono parallelamente all'asse ottico. Dalla [2-4] ponendo $p=f_1$ e facendo tendere q all'infinito si trova:

$$f_1=R\frac{n_1}{n_2-n_1} \qquad [2\text{-}5]$$

Poi, per $q=f_2$ e p all'infinito, si trova:

$$f_2=R\frac{n_2}{n_2-n_1} \qquad [2\text{-}5]$$

A partire dalle definizioni [2-4] e [2-5] per i fuochi, l'equazione di Cartesio si può scrivere come:

$$\frac{f_1}{p}+\frac{f_2}{q}=1 \qquad [2\text{-}6]$$

Dalla [2-6] si vede che se l'oggetto e' posto tra il primo punto focale e l'infinito, esso fornisce un'immagine reale, mentre fornisce un'immagine virtuale quando e' posta tra la superficie del diottro e il primo fuoco.

Si propone agli alunni il seguente problema.

Problema. Un pesce sta nuotando in uno stagno e si trova a una profondità p (fig. 45). Guardando da sopra, qual è la profondità apparente del pesce?

Risoluzione. La superficie dello stagno può essere assimilata alla superficie rifrangente di un diottro con raggio di curvatura infinito, cioè di un diottro piano. Ponendo allora $R\to\infty$ nell'equazione [2-4], otteniamo:

$$\frac{n_2}{q}=-\frac{n_1}{p}$$

da cui:

$$q=-\frac{n_2}{n_1}p.$$

La distanza dell'immagine q dalla superficie rappresenta la profondità apparente dell'oggetto. Il fatto che sia di segno negativo indica che si tratta di un'immagine virtuale.
Ponendo $n_1 = 1{,}33$ (indice di rifrazione dell'acqua) e $n_2 = 1{,}00$ (indice di rifrazione dell'aria), otteniamo:

$$q = -\frac{1{,}00}{1{,}33} p = -0{,}752 \ \ p$$

cioè la profondità apparente è circa tre quarti della profondità vera.
Il problema può essere anche risolto applicando la legge di Snell nell'approssimazione di piccoli angoli di incidenza e di rifrazione (raggi parassiali).

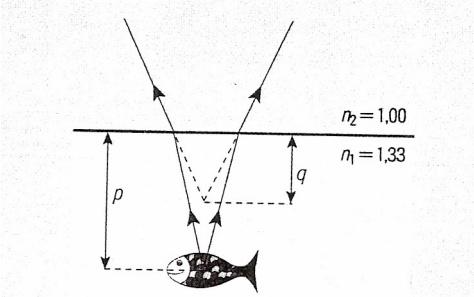
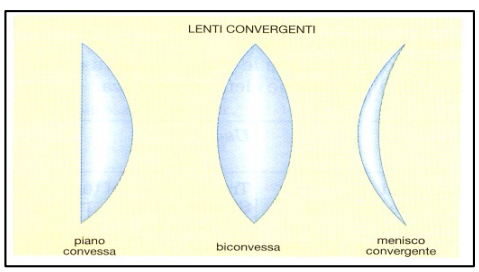


Fig. 45

Avendo ricavato l'equazione di Cartesio [2-4] trattando esplicitamente il caso di un diottro convesso il docente assegna per casa il compito seguente: "Dedurre da considerazioni geometriche la formula che governa il funzionamento del diottro concavo" .

3.4.11 Lenti sottili

Si definisce **lente** un sistema ottico formato da un mezzo trasparente delimitato da due superfici, delle quali almeno una di forma curva, generalmente sferica.
Si tratta di due diottri accoppiati, aventi i centri di curvatura sullo stesso asse.
Si definisce **lente sottile** una lente avente i centri di curvatura a distanza trascurabile l'uno dall'altro.
A seconda della curvatura delle superfici, le lenti si dividono in **convergenti** e **divergenti** (fig. 46): le prime sono più spesse al centro che ai bordi, le seconde, al contrario, sono più sottili al centro.



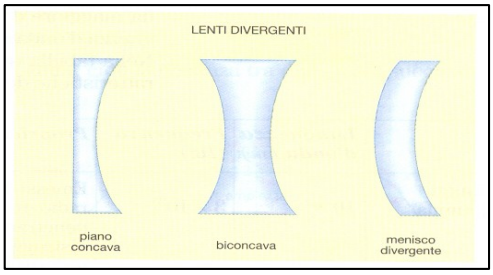


Fig. 46 - Classificazione delle lenti.

Questa regola ha senso solo se la lente è immersa in un materiale avente indice di rifrazione minore del materiale di cui la lente è fatta. La definizione ci sta bene in quanto solitamente le lenti sono fatte di vetro e sono immerse in aria ($n_{vetro}>n_{aria}$).
Le lenti possono essere classificate a seconda delle due superfici che sono poste a contatto nel modo seguente:

- ❖ Lenti Convergenti:

a. Biconvessa;
b. Piano convessa;
c. Menisco convergente;

- ❖ Lenti Divergenti:

a. Biconcava;
b. Piano concava;
c. Menisco divergente.

ELEMENTI CARATTERISTICI

Gli elementi caratteristici di una lente sono:
- i centri di curvatura C_1 e C_2 delle due calotte sferiche;
- il centro ottico O, che è il punto attraverso il quale i raggi passano senza mutare, in prima approssimazione, la propria direzione, essendo la lente di piccolo spessore;
- l'asse ottico principale, cioè la retta passante per C_1 e C_2;
- i fuochi principali F_1 e F_2;
- l'asse secondario, cioè qualsiasi retta passante per O;
- i fuochi secondari F_1' e F_2'.

La fig. 47 mette in evidenza le proprietà dei due fuochi di una lente convergente.
I raggi uscenti dal primo fuoco F_1, dopo essersi rifratti due volte sulle due facce della lente, escono dalla lente parallelamente all'asse ottico principale, come mostrato in fig. 47, immagine di sinistra, mentre quelli paralleli all'asse ottico principale, dopo essersi rifratti due volte sulle due facce della lente, escono convergenti nel secondo fuoco F_2, come mostrato in fig. 47, immagine di destra. I fuochi situati su un asse secondario godono di proprietà analoghe. E' da osservare che entrambi i fuochi sono reali.

Fig. 47

La fig. 48 illustra invece le proprietà dei due fuochi di una lente divergente. I raggi che incidono in direzione tale che i prolungamenti geometrici convergano nel primo fuoco F_1, dopo essersi rifratti due volte sulle due facce della lente, escono dalla lente parallelamente all'asse ottico principale (fig. 48 a sinistra); i raggi paralleli all'asse ottico, dopo essersi rifratti due volte sulle due facce della lente, escono in modo che i prolungamenti geometrici passino per F_2 (fig. 48 a destra).

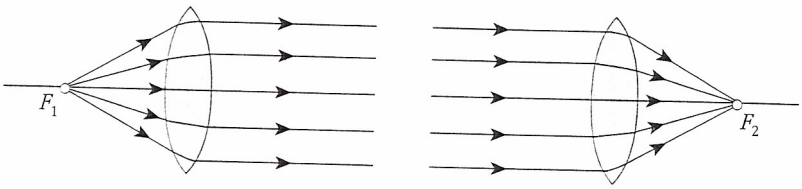


Fig. 48

I fuochi situati su un asse ottico secondario godono di proprietà analoghe, e sono anch'essi fuochi virtuali.

Per semplicità, le lenti si possono rappresentare mediante un segmento verticale passante per il centro ottico e avente agli estremi due frecce sagomate in modo da poter differenziare le lenti convergenti da quelle divergenti come in fig. 49.

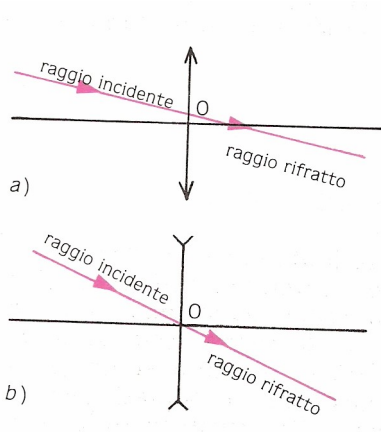


Fig. 49

PUNTI CONIUGATI

Le proprietà del centro ottico e dei fuochi delle lenti messe in evidenza, valgono solo per lenti sottili e nei limiti delle approssimazioni di Gauss, cioè per raggi parassiali e diottri di piccola apertura. E' inoltre necessario che i raggi luminosi siano monocromatici.

Sotto queste condizioni, al fascio di raggi uscenti da un punto oggetto P corrisponde, all'uscita della lente, un fascio di raggi convergenti o divergenti (ma comunque convergenti in un punto immagine) in un punto P'. Nel caso in cui il fascio sia convergente si dice che P' è **immagine reale** di P, mentre nel caso opposto si dice che P' è **immagine virtuale** di P.

Si dimostra, anche se noi non lo facciamo, che entro le approssimazioni di Gauss sussiste la seguente relazione:

$$\frac{1}{p}+\frac{1}{q}=(n-1)\left(\frac{1}{R_1}-\frac{1}{R_2}\right)$$

nota come **equazione dei punti coniugati** delle lenti sottili (o **equazione degli ottici**), in cui:

- n è l'indice di rifrazione della lente, immersa in un mezzo (l'aria) con indice di rifrazione unitario;
- p e q sono le distanze del punto oggetto e del punto immagine della lente;
- R_1 è il raggio di curvatura della prima calotta sferica, cioè quella di sinistra, mentre R_2 è il raggio della seconda calotta, ossia quella posta a destra.

Per quanto riguarda i segni delle quantità presenti occorre tenere presente che

- R_1 è il raggio di curvatura della prima faccia e quindi è positivo o negativo a seconda che il centro si trovi a destra o a sinistra della prima faccia, nell'ipotesi in cui la luce proviene da sinistra
- Analogamente R_2 è riferito alla seconda faccia, per cui è positivo o negativo a seconda che il centro si trovi a destra o a sinistra della seconda faccia, nell'ipotesi in cui la luce proviene da sinistra.

In base a queste convenzioni, tenendo conto della fig. 38, valgono le seguenti:

- $R_1>0$ e $R_2<0$ per una lente biconvessa;
- $R_1>0$ e $R_2>0$ con $R_1<R_2$ per una lente menisco convergente;
- $R_1<0$ e $R_2>0$ per una lente biconcava;
- $R_1\to\infty$ e $R_2>0$ per una lente piano-concava.

L'equazione dei punti coniugati permette per un'assegnata lente, della quale quindi sono noti i valori di n, R_1 e R_2, di determinare la distanza q dalla lente dell'immagine di un punto di cui si conosce la distanza p dalla lente stessa.

In particolare tenendo presente che il primo fuoco è il punto dell'asse ottico di cui il coniugato è il punto all'infinito e che il secondo fuoco è il punto coniugato del punto all'infinito dell'asse, possiamo ottenere le distanze focali f_1 e f_2 dei fuochi della lente dalla equazione dei punti coniugati nel seguente modo:

- ponendo $p=f_1$ e facendo tendere $q\to\infty$ per il primo fuoco;
- ponendo $q=f_2$ e facendo tendere $p\to\infty$ per il primo fuoco;

In entrambi i casi si trova:

$$\frac{1}{f_1}=\frac{1}{f_2}=(n-1)\left(\frac{1}{R_1}-\frac{1}{R_2}\right)$$

per cui l'equazione dei punti coniugati può essere espressa nella forma:

$$\frac{1}{p}+\frac{1}{q}=\frac{1}{f} \qquad [2\text{-}7]$$

con

$$\frac{1}{f} = (n-1)\left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right) \quad [2\text{-}8]$$

La distanza f di entrambi i fuochi della lente è nota come **distanza focale** della lente.
Tenendo conto dei segni già stabiliti per i raggi R_1 e R_2 si trova facilmente che la distanza focale f è positiva per le lenti convergenti e negativa per le lenti divergenti. Ne deriva che i fuochi sono reali per le lenti convergenti e virtuali per le lenti divergenti.
Nel caso in cui condizioni supposte non siano verificate (approssimazioni di Gauss e raggi monocromatici) i raggi provenienti da un oggetto puntiforme non convergono tutti in un unico punto, per cui ne risulta una certa confusione dell'immagine, chiamata **aberrazione**.
Per aberrazione si intende un insieme di difetti per la quale le immagini risultano piuttosto sfumate, confuse e persino distorte, tanto che la loro forma geometrica non corrisponde più a quella dell'oggetto.
Questi difetti sono indipendenti dai fenomeni di diffrazione e dalle imperfezioni tecniche e costruttive dei sistemi ottici, risultano essenzialmente connessi con la rifrazione della luce attraverso le superfici curve delle lenti. Le principali aberrazioni che si possono considerare sono:

- aberrazioni sferiche: fenomeno per il quale i raggi di luce che passano per zone diverse di una lente sono focalizzati in punti diversi. Esso è presente tanto nelle lenti sferiche come negli specchi sferici. E' possibile limitare l'effetto negativo usando lenti di piccolo diametro. In questo modo si limita anche la quantità di luce che può formare l'immagine;
- aberrazioni cromatiche: fenomeno per il quale non si ha un unico fuoco per raggi di colori diversi. Questo difetto delle lenti (non presente negli specchi) è dovuto al variare dell'indice di rifrazione con il colore della luce. Per limitarne l'effetto si deve ricorrere a combinazioni di lenti costruite con materiali differenti.

POTERE DIOTTRICO

Il potere diottrico D di una lente o anche **potenza di una lente** è definito come il reciproco della distanza focale:

$$D = \frac{1}{f}$$

ed è positivo per le lenti convergenti e negativo per le lenti divergenti. Il potere diottrico si esprime in **diottrie** se la distanza focale viene espressa in metri.
Per esempio, una lente convergente con distanza focale di 25 cm presenta un potere diottrico pari a 4,0 diottrie, mentre una lente divergente con distanza focale di -50 cm presenta un potere diottrico pari a -2,0 diottrie.
Se in luogo di una sola lente il sistema ottico è formato da più lenti a contatto, aventi tutte lo stesso asse principale il potere diottrico totale è pari alla somma dei poteri diottrici delle singole lenti che compongono il sistema.

3.4.12 Costruzione delle immagini prodotte da lenti sottili

La costruzione grafica dell'immagine di un oggetto di dimensioni finite si ottiene facilmente tenendo conto delle proprietà dei fuochi e del centro ottico.

Un esempio è mostrato nelle fig. 50, dove l'oggetto, per semplicità è strutturato da un segmento orientato normale all'asse.

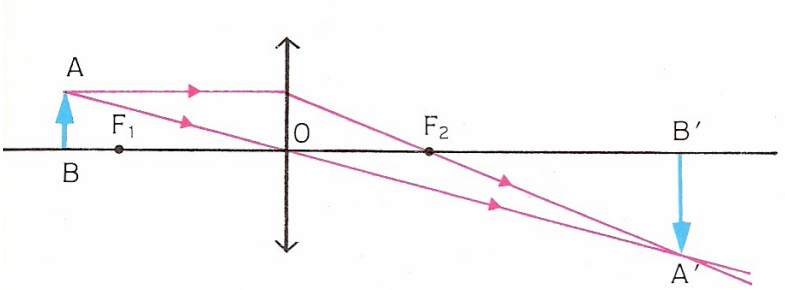


Fig. 50

Dalla figura si nota che le dimensioni lineari delle immagini sono diverse da quelle dell'oggetto. A tale proposito può essere introdotta una grandezza, chiamata **ingrandimento lineare o trasversale**, e comunemente indicata con la lettera G, che fornisce il rapporto tra la misura del segmento immagine e la misura del segmento oggetto. Se AB è il segmento che rappresenta l'oggetto e $A'B'$ è il segmento che rappresenta l'immagine, allora:

$$G = \frac{A'B'}{AB}$$

Se in particolare, considerando i due triangoli simili ABO e $A'B'O$ della fig. 50, l'ingrandimento può essere espresso mediante la relazione:

$$G = \frac{A'B'}{AB} = -\frac{q}{p} \quad [2\text{-}9]$$

con la convenzione, analoga a quella adottata per gli specchi sferici, di assumere l'ingrandimento negativo quando l'immagine è capovolta, come nella fig. 50.

Si propone alla classe il seguente problema.

Problema. Una lente biconvessa, i cui raggi di curvatura hanno entrambi valore assoluto $50{,}0\ cm$, ha indice di rifrazione $n = 1{,}50$. Calcolare la posizione dell'immagine di un oggetto che si trova alla distanza di $90{,}0\ cm$ dalla lente la dimensione trasversale dell'immagine se quella dell'oggetto è di $20{,}0\ cm$.

Risoluzione. Applicando l'equazione [2-8], si calcola dapprima la distanza focale f, tenendo presente che i raggi di curvatura sono $R_1 = -50{,}0\ cm$ e $R_2 = 50{,}0\ cm$. Si ha:

$$f = \frac{1}{(n-1)}\frac{R_1 R_2}{R_2 - R_1} = \frac{1}{(1{,}50-1)}\frac{(-50{,}0\ cm)}{(50{,}0\ cm + 50{,}0\ cm)} = -50{,}0\ cm$$

Dall'equazione dei punti coniugati, nella forma espressa dall'equazione [2-7], si ottiene, per la distanza q dell'immagine dalla lente:

$$q = \frac{f}{1-\frac{f}{p}} = \frac{(-50{,}0\ cm)}{1-\frac{(-50{,}0\ cm)}{(90{,}0\ cm)}} = -32{,}1\ cm$$

Pertanto l'ingrandimento lineare, per la [2-8], è:

$$G = -\frac{q}{p} = -\frac{(-3{,}21\ cm)}{(90{,}0\ cm)} = 0{,}357$$

Per definizione di ingrandimento lineare, ponendo $y = 20{,}0$ cm la lunghezza dell'oggetto y' dell'immagine è:

$$y' = G\ y = 0{,}357(20{,}0\ cm) = 7{,}14\ cm$$

L'immagine è virtuale ($q < 0$), diritta ($G > 0$) e rimpicciolita.

3.4.13 0ttica fisiologica

SCHEMATIZZAZIONE OTTICA DELL'OCCHIO

In riferimento alla fig. 51 nell'occhio umano si possono distinguere le seguenti strutture:

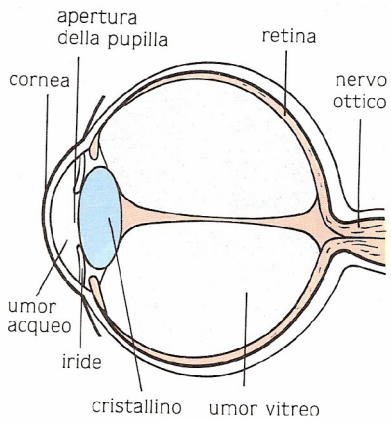


Fig. 51

- La **cornea** è una membrana trasparente, alquanto sporgente, avente un indice di rifrazione uguale a 1,34.
- L'**umore acqueo** è un liquido, costituito da acqua, sali e sostanze proteiche, che riempie la camera anteriore dell'occhio e il cui indice di rifrazione è uguale a quello della cornea.
- L'**iride** è un diaframma con al centro un foro a sezione variabile, la **pupilla**, che può allungarsi o restringersi secondo l'intensità della luce che penetra nell'occhio. In pieno giorno il diametro della pupilla è normalmente di circa 2 mm.

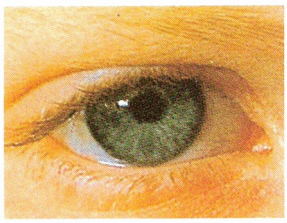
Attività sperimentale

Introduzione:

L'iride si dilata e si contrae per far entrare nell'occhio più o meno luce. Puoi verificarlo davanti a uno specchio, in una stanza quasi buia.

Svolgimento:

Se accendi una lampada e osservi le tue pupille allo specchio, ti accorgerai che si restringono, perché altrimenti la luce intensa della lampada potrebbe danneggiare l'occhio (fig. 52).



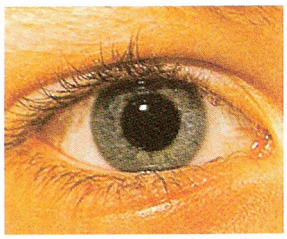


Fig. 52 - 53

Se ora spegni la lampada, le pupille si dilateranno visibilmente per far entrare la poca luce presente nella stanza (fig. 53).

- **Il cristallino** è un mezzo trasparente che fa convergere sulla retina i raggi luminosi giunti sull'occhio. E' assimilabile a una lente biconvessa, formata da una successione di strati concentrici di materia elastica deformabile, il cui indice di rifrazione medio è circa pari a 1,4. La curvatura del cristallino, e quindi le distanze focali, possono variare, entro certi limiti, per azione di un muscolo anulare detto **muscolo ciliare**.
- L'**umore vitreo** è una sostanza gelatinosa trasparente, avente all'incirca lo stesso indice di rifrazione dell'umore acqueo; esso riempie il volume del globo oculare davanti alla retina.
- La **retina** è una membrana, caratterizzata da una complessa struttura a strati, che ricopre la maggior parte della parete interna dell'occhio. La porzione sensibile è

ricoperta da numerose cellule, funzionanti da fotorecettori, che si possono considerare gli elementi terminali delle fibre del nervo ottico. Per la loro forma queste cellule sensoriali vengono chiamate **coni** e **bastoncelli**.
A questo punto il docente stimola gli studenti ponendo tale quesito: "Perché nelle fotografie con il flash a volte le persone hanno gli occhi rossi"? Dopo le loro risposte si procederà dicendo che le loro pupille sono dilatate perché l'ambiente è poco illuminato. L'improvvisa e intensa luce del flash viene così riflessa dai vasi sanguigni che irrorano la parte posteriore dell'occhio. Molte macchine fotografiche hanno un dispositivo "anti-occhi-rossi": prima del flash principale la macchina emette alcuni brevi lampi di luce, così che le pupille abbiano il tempo di contrarsi prima dello scatto.

PERCEZIONE VISIVA

I fenomeni riguardanti la visione sono piuttosto complessi: in sintesi, possono essere considerati come una successione di rapidi e coordinati processi di carattere chimico, fisico, fisiologico e psichico.
Un segnale luminoso origina un'immagine reale rimpicciolita e capovolta sulla retina, facendo scattare l'attività dei fotorecettori posti sulla retina. Questa attività genera un'alterazione dell'equilibrio elettrochimico, che si manifesta mediante un impulso che si propaga fino al cervello tramite il nervo ottico, il quale poi ricostruisce l'immagine.
Un oggetto, per essere visto in modo nitido deve formarsi sulla retina, della cornea, dove viene a cadere il secondo fuoco del sistema. In questo modo però possono essere visualizzati in modo nitido solo gli oggetti posti a distanza infinita. In realtà il nostro occhio riesce a vedere gli oggetti posti anche a distanza ravvicinata, modificando la geometria dei sistemi ottici che lo compongono. Questa proprietà è chiamata **processo di accomodamento**. Esso è regolato dai muscoli ciliari attraverso le variazioni della densità (quindi l'indice di rifrazione) e soprattutto della curvatura del cristallino. Grazie a questo processo, l'occhio è in grado di visualizzare gli oggetti posti nel punto remoto, cioè posto teoricamente all'infinito, fino alla distanza di circa $8\ cm$ dall'occhio (detto **punto prossimo**). Il processo di accomodamento è necessario per gli oggetti posti ad una distanza inferiore ai $25\ cm$ (detta **distanza della visione distinta**).

DIFETTI VISIVI

I difetti visivi, chiamati comunemente ametropie, derivano principalmente da un'anomala correlazione fra le varie parti del sistema ottico oculare. In condizioni di riposo, cioè quando i muscoli ciliari non esercitano alcuna azione meccanica per favorire il processo di accomodamento, un occhio normale focalizza sulla retina gli oggetti posti a distanza infinita.

L'occhio **miope** è un sistema ottico troppo convergente, nel quale le immagini nello stato di riposo si formano prima della retina (fig. 54a), così che soprattutto gli oggetti lontani appaiano piuttosto confusi e annebbiati e, nei casi più gravi non si vedano affatto. La miopia si corregge mediante l'uso di lenti divergenti di opportuna distanza

focale, grazie alla quale i raggi paralleli all'asse divergono di quel tanto che basta per permettere al sistema ottico complessivo di focalizzarli sulla retina (fig. 54b).

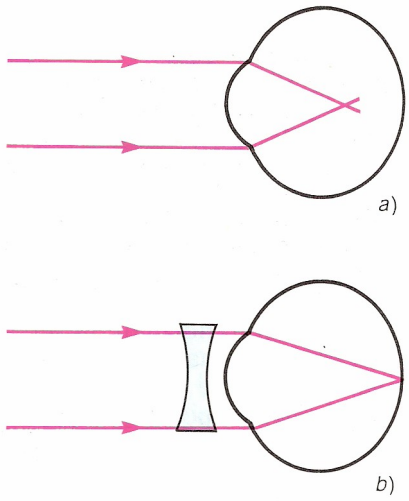


Fig. 54

Un secondo difetto della vista è l'**ipermetropia**, dovuta alla limitata convergenza del sistema oculare; allo stato di riposo, i raggi paralleli all'asse convergono posteriormente alla retina (fig. 55a). Mediante il processo di accomodamento, l'occhio ipermetrope riesce a mettere a fuoco le immagini di oggetti lontani, mentre, a causa dell'aumentata distanza del punto prossimo, non riesce a dare sufficiente convergenza ai raggi provenienti da oggetti vicini per poterli concentrare sulla retina. Per correggere tale difetto bisogna allontanare il punto di convergenza dell'occhio mediante opportune lenti convergenti (fig. 55b).

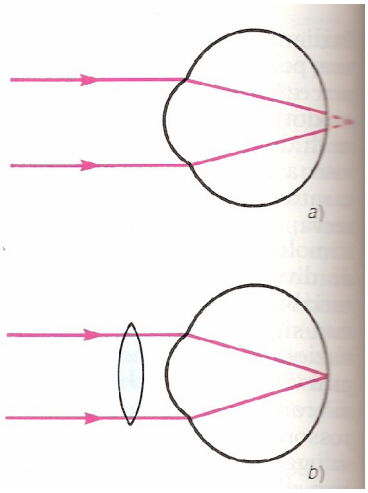


Fig. 55

L'**astigmatismo** è dovuto alla non perfetta sfericità della cornea; esso può essere corretto con speciali lenti aventi raggio di curvatura variabile da zona a zona

La **presbiopia** è dovuta ad un'anomalia del potere di accomodamento che appare con l'avanzare dell'età. Nell'occhio presbite, mentre si vedono chiaramente gli oggetti distanti, si rende difficile la visione da vicino (come la lettura), poiché il punto prossimo è più lontano del normale. La presbiopia si corregge mediante lenti convergenti.

Si propone alla classe il seguente problema.

Problema. Uno studente porta occhiali da -3 diottrie. Determinare la distanza del punto remoto, del punto della visione distinta e del punto prossimo del suo occhio non corretto da occhiali.

Risoluzione. Visto che il potere diottrico degli occhiali è negativo, lo studente è affetto da miopia. Il punto remoto del suo occhio, cioè il punto più lontano che l'occhio, senza l'ausilio della lente, riesce a focalizzare sulla retina grazie al processo di accomodamento, non si trova all'infinito, ma a una certa distanza finita q.
La funzione della lente è quella di "spostare" un oggetto che si trova all'infinito fino al punto remoto dell'occhio.
In altri termini, la lente, di distanza focale $f = -1/3\ m$, deve produrre nel punto a distanza q dalla lente (e quindi dall'occhio che si trova subito dietro la lente), l'immagine di un punto all'infinito. Ponendo $1/p = 0$ nell'equazione dei punti coniugati della lente, troviamo:

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{f} = -3\ m^{-1}$$

da cui $q = -0{,}333\ m = -33{,}3\ cm$. Il segno negativo sta a significare che il punto immagine prodotto dalla lente è virtuale.
La distanza del punto remoto dell'occhio non corretto da occhiali è dunque $33{,}3\ cm$.
Il punto della visione distinta, che per un occhio normale corrisponde alla distanza $p = 25\ cm$, viene "spostato" dalla lente a una distanza q, che rappresenta la distanza della visione distinta dell'occhio senza lente. Applicando l'equazione dei punti coniugati si ha:

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{f} = -\frac{1}{p} = -3\ m^{-1} - \frac{1}{(0{,}25\ m)} = -7m^{-1}$$

Calcolando il reciproco si ha $q = -0{,}143\ m = -14{,}3\ cm$, per cui il punto della visione distinta è a $14{,}3\ cm$ dall'occhio.
Analogamente il punto prossimo, che per un soggetto normale è alla distanza $p = 8\ cm$ dall'occhio, viene "avvicinato" dalla lente alla distanza q. Si ottiene:

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{f} - \frac{1}{p} = -3\ m^{-1} - \frac{1}{(0{,}08\ m)} = -15{,}5\ m^{-1}$$

e $q = -0{,}0645\ m = -6{,}45\ cm$. Il punto prossimo dell'occhio dello studente è dunque a $6{,}24\ cm$.

3.4.14 Strumenti ottici

Qualsiasi strumento ottico si compone essenzialmente di due elementi: l'**obiettivo** e l'**oculare**.
L'**obiettivo** è un sistema ottico a una o più lenti, destinato a fornire l'immagine di un oggetto.
L'**oculare** è anch'esso un sistema ottico a una o più lenti che permette l'osservazione dell'immagine fornita dall'obiettivo.

Gli strumenti ottici si distinguono in **strumenti ottici semplici** e **strumenti ottici composti.**

Gli **strumenti ottici semplici** sono costituiti o da un obiettivo o da un oculare. Ne sono esempi le lenti di ingrandimento e le macchine fotografiche.

Gli **strumenti ottici composti** sono dotati sia di obiettivo sia di oculare.

Ne sono esempi il microscopio, il cannocchiale, ecc.

Diamo qualche rapido cenno sulla struttura e sul funzionamento di alcuni strumenti.

MACCHINA FOTOGRAFICA

La macchina fotografica è un dispositivo che riproduce in forma ridotta su una pellicola un oggetto posto a distanza più o meno grande della macchina (fig. 56). Tale dispositivo è essenzialmente composto da una "scatola" detta **camera oscura**.

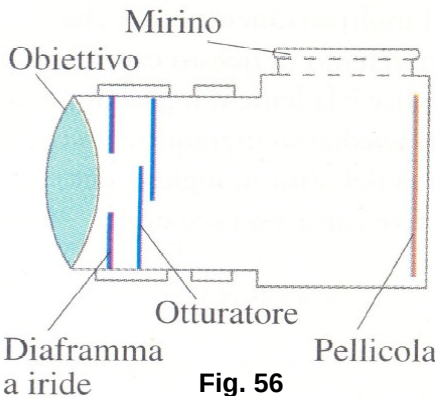


Fig. 56

Tale scatola reca nella parte frontale un obiettivo e sul fondo opposto una **lastra** o una **pellicola** sensibile alla luce. L'obiettivo, che comprende anche il diaframma e l'otturatore, è formato da una serie di lenti. Il **diaframma** limita il fascio di luce che colpisce la lente (cioè regola la quantità di luce che entra nella camera oscura). L'**otturatore** per un breve intervallo di tempo regolabile, premendo un pulsante o azionando una levetta. Durante tale intervallo di tempo (tempo di ammissione) la luce che entra va ad impressionare la pellicola. La distanza tra l'obiettivo e il materiale sensibile (lastra o pellicola) è regolabile per consentire all'immagine di formarsi nitida proprio su quest'ultimo. Una volta impressionata, la pellicola viene sottoposta ad una serie di manipolazioni, quali lo sviluppo, il fissaggio, la stampa; alla fine di tali operazioni si ha la fotografia.

PROIETTORE

E' un dispositivo atto a riprodurre su uno schermo l'immagine ingrandita di un piccolo oggetto. L'oggetto, fortemente illuminato da un'apposita sorgente, viene collocato vicino ad una lente convergente in modo da originare un'immagine ingrandita e situata a grande distanza dalla lente. La diapositiva da proiettare deve essere collocata in prossimità del primo fuoco, in particolare a meno di un centimetro oltre alla distanza focale della lente.

LENTE DI INGRANDIMENTO

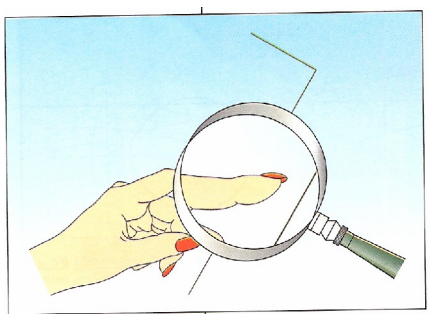


Fig. 57

La lente di ingrandimento (fig. 57) è costituita da una **lente convergente**. Essa fornisce un'immagine diritta e ingrandita di un oggetto. Perché ciò sia possibile, occorre porre l'oggetto tra il fuoco della lente e la lente stessa. L'occhio, posto al di là della lente, vede

un'immagine ingrandita e virtuale dell'oggetto. Ora, perché si verifica l'ingrandimento? Senza l'ausilio della lente, l'occhio nudo vede l'oggetto sotto un certo angolo α (detto angolo visuale), figura successiva, espresso approssimativamente dalla relazione:

$$\alpha = \frac{y_0}{d}.$$

Il massimo valore di α si ottiene per il minimo valore di d. Quest'ultimo, per l'occhio umano, è di circa $25\ cm$ (distanza della visione distinta).
Il tal caso si ha, pertanto:

$$\alpha = \frac{y_0}{25}$$

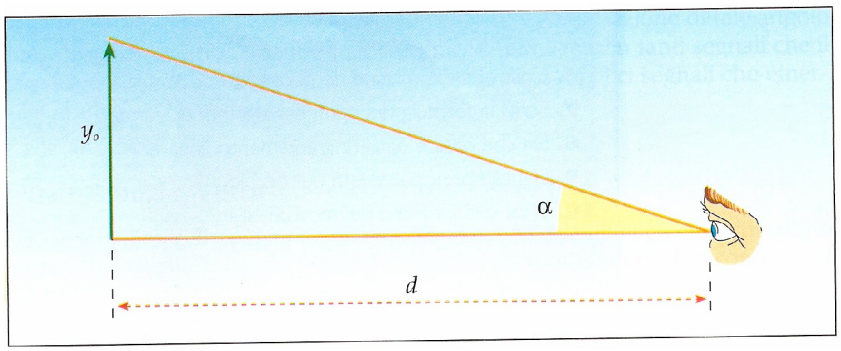


Fig. 58

La presenza della lente fa sì che tale angolo aumenti. Esso assume il valore α', (fig. 59) espresso dalla relazione:

$$\alpha' = \frac{y_i}{d'}$$

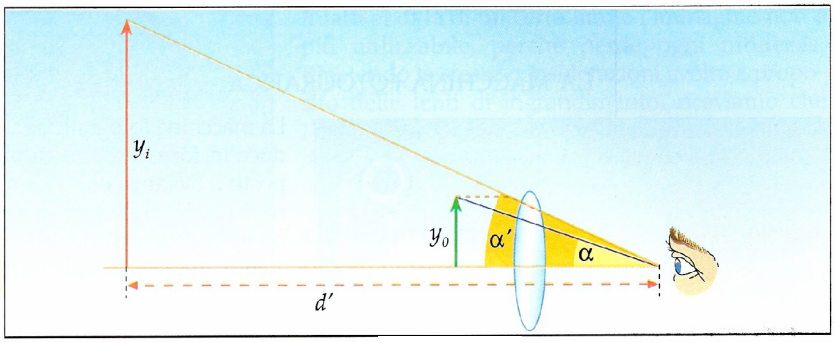


Fig. 59

dove d' indica la distanza dell'immagine dall'occhio. Se l'occhio è posto nell'immediata vicinanza della lente, possiamo anche porre $d' = q$ (fig. 60), per cui:

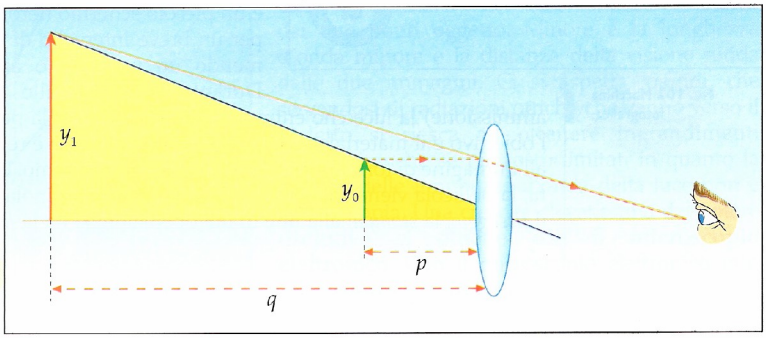


Fig. 60

$$\alpha' = \frac{y_i}{q}$$

Il rapporto $I_A = \frac{\alpha'}{\alpha}$ riceve il nome di ingrandimento angolare. Il suo valore, per quanto si è detto, è espresso dall'equazione:

$$I_A = \frac{y_i}{q} \cdot \frac{d}{y_0} \qquad [2\text{-}10]$$

Per la similitudine dei due triangoli colorati illustrati nell'ultima figura, si ha:

$$\frac{y_i}{y_0} = \frac{q}{p}$$

Da cui, effettuando l'opportuna sostituzione nella [2-10], si ricava:

$$I_A = \frac{d}{p}.$$

Poiché abitualmente l'oggetto è posto praticamente lungo il piano focale della lente, si ha $p = f$ e, quindi:

$$I_A = \frac{d}{f}.$$

Come mostra l'equazione l'ingrandimento I_A cresce al diminuire della distanza focale f della lente. Quest'ultima, comunque non può essere ridotta oltre un certo limite, se non a scapito della nitidezza dell'immagine. Con una lente del tipo descritto non si possono ottenere ingrandimenti superiori a 7- 8 volte.

Nota didattica. A questo punto gli studenti saranno portati in laboratorio, inteso come "ambiente" di simulazione, di stimolo e di apprendimento di concetti teorici propri della fisica. Esegue un'esperienza relativa alla **LENTE DI INGRANDIMENTO.**

Attività sperimentale

LENTE DI INGRANDIEMNTO

Introduzione: Una lente convergente fa convergere un fascio di raggi luminosi nel suo fuoco.

Obiettivo: Verificare quando detto nell'introduzione.

Materiali:
- Una lente di ingrandimento
- Un proiettore
- Un disco di cartone
- Uno schermo

Procedimento:
- Si applichi alla lente il disco di cartone ritagliato in modo da avere lo stesso diametro della lente dopo aver praticato in esso una serie di forellini disposti in cerchi concentri come nelle fig. 61-62.

Fig. 61

Fig. 62

- Si invii sulla lente un fascio di raggi luce paralleli e si osservi l'immagine dei fori sullo schermo.
- Si osservi che allontanando lo schermo dalla lente e accostandolo al suo fuoco i punti luminosi si avvicinano sempre più fino a formare un'unica macchia luminosa.

Il docente, ora suddivide la classe in gruppi di quattro studenti ciascuno.
Osservazione didattica. Il lavoro di gruppo rappresenta una risorsa ad alto potenziale, sia come strumento che consente l'emergere di aspetti emozionali, sia come veicolo che, facilitando lo scambio di idee ed esperienze induce un maggiore coinvolgimento e assunzione di impegno da parte degli alunni.
A ciascun gruppo assegna da svolgere una fra le seguenti relazione a scelta del docente:
1) relazione sul microscopio ottico, in particolare sul principio di funzionamento;
2) relazione sul cannocchiale e, in particolare, sul principio di funzionamento;
3) relazione sul telescopio rifrattore e, in particolare, sul principio di funzionamento;
4) relazione sullo spettrometro a prisma e, in particolare, sul principio di funzionamento.

3.4.15 Leggere di fisica: Nel buio, sapessi di Roberto Piumini Specchio di Salvatore Quasimodo

Nel buio, sapessi
di Roberto Piumini
Il poeta sa vedere anche nel buio. La sua immaginazione ricama con immagini colorate il nero della notte.

Nel buio, sapessi
c'è un uomo tutto bianco
che vende fiori.
Ne ha di rossi e di gialli
azzurri e arancione.
Ogni dieci che vende
regala uno specchietto
per abbagliare i pescatori sulle barche del lago.
Poiché non ha tasche
i soldi che guadagna
li tira piatti a saltare
sull'acqua chiara.
Rimbalzano e spruzzano
e scintillano
e prima che affondino
son presi nel becco
dalle anitre rosa.
L'uomo bianco, sapessi,
ha una sua fidanzata
con ali di farfalla
che lo saluta, appoggiata
all'arco del ponte.
Tutto questo è nel buio
e se buio non fosse
lo potresti vedere.

da R. Piumini, Quieto Patato, Nuove Edizioni Romane

Specchio
di Salvatore Quasimodo.

Ed ecco sul tronco
si rompono gemme:
un verde più nuovo dell'erba
che il cuore riposa:
il tronco pareva già morto,
piegato sul botro.

E tutto mi sa di miracolo;
e sono quell'acqua di nube
che oggi rispecchia nei fossi
più azzurro il suo pezzo di cielo,
quel verde che spacca la scorza
che pure stanotte non c'era.

da S. Quasimodo, Tutte le poesie, A. Mondadori

3.4.16 Tempi dell'intervento didattico

Per svolgere questa unità didattica si prevedono i seguenti tempi:

Accertamento dei prerequisiti:	1h
Lezioni frontali e svolgimento degli esercizi:	20h
Attività di laboratorio:	6h
Verifica sommativa:	2h
Consegna e correzione verifica sommativa:	1h

Per un totale di 20 ore che, tenuto conto delle 3 ore settimanali di fisica, equivalgono a circa 10 settimane di lavoro. La previsione è da intendersi elastica, perché occorre tener conto dell'andamento e dei processi di apprendimento della classe.

3.4.17 Verifica sommativa U.D. 1

1. Uno specchio concavo, avente distanza focale di 120 cm, viene sfruttato per formare l'immagine reale di un oggetto.
(a) Dove si trova l'oggetto, se la distanza dell'immagine e quella dell'oggetto sono identiche?
(b) L'oggetto e la sua immagine sono sovrapposti?
(c) Qual è l'ingrandimento?

2. Uno specchio concavo ha raggio di curvatura di 60 cm. Determinare la posizione di un oggetto, la cui immagine deve essere capovolta e avere dimensioni triple di quelle dell'oggetto.

3. Della luce va a incidere su una lastra di vetro piana ($n = 1{,}56$), formando un angolo di 48° rispetto alla normale alla superficie superiore.
(a) Qual è l'angolo di rifrazione all'interno della lastra di vetro?
(b) Quando il fascio esce dalla superficie inferiore della lastra, qual è l'angolo che esso forma rispetto al fascio iniziale, incidente sulla lastra?

4. L'immagine virtuale di un oggetto collocato a 40 cm da una lente si trova a 20 cm da essa.
(a) Qual è la distanza focale della lente?
(b) Si tratta di lente convergente o divergente?

Griglia di valutazione per la verifica sommativa (compilata nelle sue parti)

	CONOSCENZA		ABILITA'	
	TOTALE	OTTENUTI	TOTALE	OTTENUTI
ESERCIZIO 1	3		3	
ESERCIZIO 2	3		3	
ESERCIZIO 3	3		3	
ESERCIZIO 4	3		3	
TOTALE	12		12	

Capitolo 4 U.D.2 INTERFERENZA E DIFFRAZIONE DELLA LUCE

4.1 PREREQUISITI

Per lo svolgimento di questa unità didattica si ritiene necessaria la conoscenza dei contenuti dell'unità didattica 1.

4.2 OBIETTIVI SPECIFICI

CONOSCENZE

- Conoscere il fenomeno dell'interferenza da due fenditure.
- Conoscere il fenomeno dell'interferenza da lamine sottili.
- Conoscere il fenomeno della diffrazione.
- Conoscere il concetto del potere risolutivo.
- Conoscere il fenomeno della dispersione.

ABILITA'

- Saper spiegare il fenomeno dell'interferenza da due fenditure.
- Saper spiegare il fenomeno dell'interferenza da lamine sottili.
- Saper spiegare il fenomeno della diffrazione.
- Sapere spiegare il fenomeno della dispersione.
- Saper inquadrare i fenomeni di interferenza e diffrazione nel problema della natura corpuscolare - ondulatorio della luce.
- Saper descrivere immagini che riproducono risultati di esperimenti fatti in classe.
- Sapere interpretare le figure disegnate sul libro.
- Saper usare le conoscenza acquisite per risolvere problemi.

4.3 CONTENUTI

- L'interferenza della luce.
- La diffrazione.
- La diffrazione prodotta da una fenditura singola.
- La diffrazione e i limiti di risoluzione.
- La diffrazione prodotta da doppia fenditura.
- Reticolo di diffrazione.
- Dispersione della luce.

4.4 SVILUPPO DEI CONTENUTI

4.4.1 L'interferenza della luce

Nota didattica. Nella presente unità didattica si parlerà d'interferenza e di diffrazione delle onde luminose. Questi fenomeni fanno parte dell'ottica fisica (o ottica ondulatoria) e avvengono quando un'onda incontra ostacoli o aperture di dimensioni confrontabili con quella della lunghezze d'onda. A differenza del comportamento in presenza di specchi e lenti, descritto dall'ottica geometrica mediante la rappresentazione a raggi, i fenomeni dell'ottica fisica dipendono dalla natura ondulatoria della luce. E in effetti furono gli esperimenti su tali effetti a dare prova convincente che la luce è un'onda.

Se si hanno due sorgenti luminose qualunque come ad esempio due candele accese o due lampadine, non osserviamo fenomeni di interferenza. La mancanza di interferenza è dovuta al fatto che la differenza di fase tra le onde emesse dalle due sorgenti varia molto rapidamente nel tempo, perciò anche se le onde si sovrappongono in una data regione dello spazio, non si osserva nessuna frangia. Ciò comporta che se in un determinato istante in un punto si è formata una frangia costruttiva, in un istante immediatamente successivo si può avere una frangia distruttiva e, per il fenomeno della persistenza delle immagini sulla retina, il nostro occhio non riesce a captare tale discontinuità e di conseguenza percepisce una luminosità uniforme dell'ambiente dove sono poste le due sorgenti.
L'emissione delle radiazioni luminose si origina dalle sorgenti atomiche e molecolari. Ciascuno di questi sistemi elementari, una volta eccitato, emette per un tempo molto breve ($10^{-8} s$) e poi ritorna allo stato normale. Per avere una seconda emissione il sistema deve essere nuovamente eccitato e la radiazione prodotta in questo secondo processo ha in genere una fase diversa da quella precedente. Diciamo allora che due sorgenti naturali non sono coerenti tra loro.
Osservazione didattica. A questo possiamo imputare il fatto che non ci accorgiamo che la luce ha una natura ondulatoria.

DEFINIZIONE
Due sorgenti sono coerenti se la differenza di fase è costante nel tempo oppure varia molto lentamente rispetto al tempo di persistenza delle immagini sulla retina.

L'ESPERIMENTO DI YOUNG

I primi fenomeni di interferenza furono ottenuti già all'inizio dell'Ottocento: celebre, a tal proposito, è quello realizzato dall'inglese **Thomas Young** nel 1801, che riuscì a provare per la prima volta la natura ondulatoria della luce e a misurarne la lunghezza d'onda.
Nota storica. Thomas Young (1773 – 1829) studiò dapprima medicina. Il suo interesse per gli organi sensoriali e per la vista lo portò allo studio della fisica e in particolare

della luce. Tra gli altri suoi risultati scientifici vanno menzionati quelli sulla tensione superficiale e l'elasticità, per cui gli venne reso onore attribuendo al modulo di elasticità il nome di modulo di Young. Si distinse anche per i suoi interessi nei geroglifici, dando un contributo alla decifrazione della stele di Rosetta, che fornì la prima interpretazione dell'antico linguaggio egizio.

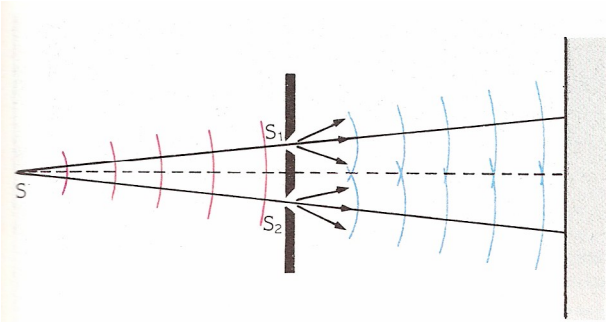


Fig. 63

Un'intensa sorgente monocromatica S illumina uno schermo munito di due strettissime fenditure S_1 e S_2 equidistanti da S e distanziati fra loro di alcuni millimetri (fig. 63). Per il principio di Huygens, le fenditure S_1 e S_2 si comportano come due sorgenti coerenti da cui si dipartono onde sferiche verso lo schermo. Tali onde interferiscono e sullo schermo, compaiono figure di interferenza composte da frange chiare e scure. Le frange chiare corrispondono a interferenza costruttiva, le frange scure a interferenza distruttiva. Ripetendo più volte l'esperienza usando luce monocromatica di diverso colore e quindi di diversa lunghezza d'onda e frequenza, Young osservò che variava la distanza tra frange: "più precisamente, all'aumentare della frequenza della radiazione ottica, la distanza tra le frange diminuisce" (fig. 64).

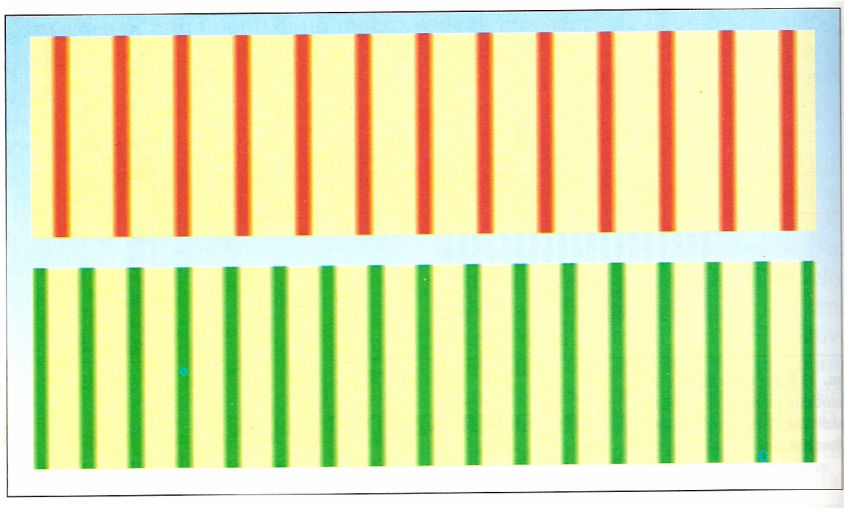


Fig. 64

Vogliamo ora descrivere il fenomeno dal punto di vista quantitativo. Poiché la distanza m fra le due fenditure (fig. 65) è molto piccola rispetto alla distanza d tra le fenditure e lo schermo, i raggi di lunghezza x_1 e x_2, che provengono da S_1 e S_2 e colpiscono il punto P_1 dello schermo, risultano approssimativamente paralleli alla congiungente condotta dal punto medio del segmento S_1S_2 al punto P_1.

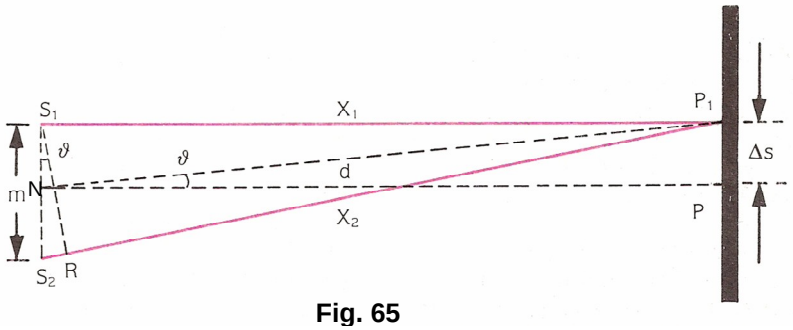


Fig. 65

Determiniamo allora un segmento $\overline{S_2R}$ su $\overline{S_2P_1}$, tracciando la perpendicolare da S_1 a $\overline{S_2P_1}$.

Indicando con ϑ gli angoli $P_1\hat{N}P$ e $R\hat{S}_1S_2$ (che possono considerarsi praticamente uguali poiché la distanza d tra le fenditure e lo schermo dalla sorgente è molto maggiore della distanza m tra le due fenditure) potremo scrivere:

$$\overline{S_1P_1} - \overline{S_2P_1} \cong \overline{S_2R} = m \sin\vartheta .$$

$\overline{NP} = d$, $\overline{P_1P} = d\tan\vartheta \cong d\sin\vartheta$.

Eliminando $\sin\vartheta$ dalle relazioni precedenti abbiamo

$$\overline{P_1P} = \frac{\overline{S_2R}}{m} d . \quad [3\text{-}1]$$

Nel punto P_1 si ha:

- **interferenza costruttiva** quando $\overline{S_1P_1} - \overline{S_2P_1} = k\ \lambda$, $k = 0,1,2,3,...$ [3-2]
- **interferenza distruttiva** quando $\overline{S_1P_1} - \overline{S_2P_1} = (2k+1)\frac{\lambda}{2}$, $k = 0,1,2,3,...$ [3-3]

Osservazione didattica. λ è la lunghezza d'onda della luce che si considera.

Inserendo nella [3-1] le espressioni [3-2] e [3-3] otteniamo allora i valori di $\overline{P_1P}$ che individuano i punti di interferenza costruttiva, le zone chiare e i punti di interferenza distruttiva, le zone scure.

I punti di **interferenza costruttiva** sono situati nella schermo secondo la relazione:

$$P_{1C,K} = \frac{d}{m} k\lambda ,$$

mentre quelli di **interferenza distruttiva**:

$$P_{1D,K} = \frac{d}{m}(2k+1)\frac{\lambda}{2},$$

$k = 0,1,2,3,....$

La distanza tra due massimi o **tra due minimi consecutivi** è costante ed è pari a $\frac{d}{m}\lambda$.

Osservazione didattica. Ascoltando un concerto in una chiesa (fig. 66) o in una palestra capita di non sentire bene perché ci si siede in un punto dove l'onda sonora diretta e quella riflessa dal soffitto interferiscono distruttivamente. Pochi posti più in là, dove l'interferenza è costruttiva, si sente benissimo.

Fig. 66

Perché si utilizza la luce **laser**?

Perché questo dispositivo produce una luce coerente, molto intensa e monocromatica. Mediante una sola sorgente è possibile ottenere due sorgenti fittizie, otticamente identiche, le cui onde sono sincrone e coerenti, in modo che la fase dell'una varia come varia la fase dell'altra.

E se la luce **non è monocromatica**? Se si utilizzano sorgenti di luce coerenti non monocromatiche, la configurazione delle strisce sullo schermo, ripresa mediante una pellicola fotografica a colori, presenta gli orli leggermente colorati a seguito dell'interazione delle diverse lunghezze d'onda presenti nella radiazione. Uno spettro interferenziale di questo tipo è quello riprodotto nella fig. 67.

Fig. 67

Alcuni caratteristici fenomeni interferenziali di facile osservazione si possono ottenere illuminando di luce bianca una sottile lamina trasparente. Esempi tipici sono la colorazione delle bolle di sapone e delle macchie d'olio, l'iridescenza delle perle o di alcuni minerali, e in particolare la tenue colorazione di molti sottili strati trasparenti.

LA LUNGHEZZA D'ONDA DELLA LUCE

Calcoliamo la lunghezza d'onda della luce monocromatica che origina la figura di interferenza.

Nella rappresentazione geometrica dell'esperimento di Young riportata in fig. 65, abbiamo indicato con Δs la distanza fra due massimi luminosi, con m la distanza tra le due fenditure e con d la distanza tra le fenditure e lo schermo.

Nell'ipotesi che d sia molto grande rispetto a Δs e ad m, con buona approssimazione risulta:

$$\Delta s = d \cdot \vartheta \quad \text{e} \quad \overline{S_1P_1} - \overline{S_2P_1} = \overline{S_2R} = m \ \sin\vartheta .$$

Se supponiamo che in P_1 sia localizzato il massimo luminoso del k-esimo ordine, si ha:

$$\overline{S_1P} - \overline{S_2P} = k\lambda = m\vartheta ,$$

da cui

$$\lambda = \frac{m\Delta s}{kd} . \quad [3\text{-}4]$$

Se $k = 1$ in P_1 abbiamo la prima striscia luminosa dopo quella centrale.

Si propone alla classe il seguente esempio.

Esempio. Un dispositivo di Young illuminato con luce monocromatica origina la prima frangia luminosa in P_1 distante 2 mm dal punto P, ove si forma il massimo luminoso centrale. Sapendo che la distanza S_1S_2 delle fenditure è pari a $0{,}8\ mm$ e che lo schermo è posto a distanza $d=2{,}2\ m$ dal piano delle fenditure, calcolare la lunghezza d'onda della luce adoperata.

Risoluzione. Sostituendo i valori numerici nella [3-4] e ponendo $k = 1$ si ha:

$$k = \frac{2\cdot 10^{-3}\cdot 8\cdot 10^{-4}}{2{,}2} m = 7{,}3\cdot 10^{-7} m = 0{,}73\ \mu m$$

Il risultato mostra che la luce monocromatica utilizzata è di colore rosso.

4.2 La diffrazione

La diffrazione è un fenomeno che caratterizza la propagazione della onde dopo che queste incontrano un oggetto o qualche ostacolo munito di un piccolo foro o di una stretta fenditura.

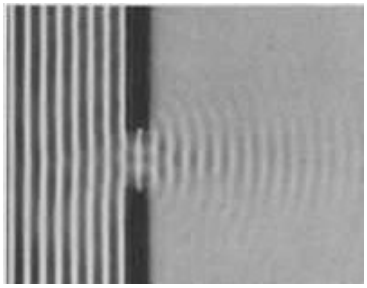
Solitamente l'ostacolo occupa una piccola parte del fronte d'onda ma talvolta può occuparne la maggior parte lasciando solo una fenditura per il passaggio, in entrambi i casi una volta superato l'ostacolo la forma geometrica dell'onda viene alterata.

Se per esempio consideriamo un treno di onde piane che attraversa un foro, le cui dimensioni sono paragonabili alla lunghezza d'onda del fascio, al di là del foro l'onda muta la sua configurazione: essa infatti tende ad assumere la caratteristica forma sferica come se fosse prodotta da una sorgente puntiforme posta nell'apertura stessa. Possiamo anche dire che quando l'onda colpisce uno sbarramento che contiene un foro le onde passano attraverso il foro e si sparpagliano al di là di esso andando a riempire l'intero spazio al di là dell'ostacolo.

Esempio. Figure di diffrazione prodotte da onde piane d'acqua che incontrano un foro in uno sbarramento.

$\lambda < a$

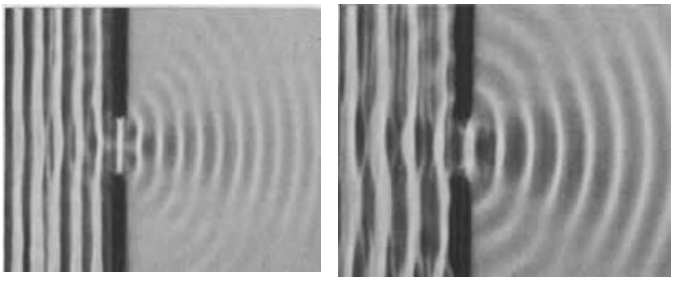
Direzione del moto dell'onda →



L'onda, al di là dell'apertura, si propaga in linea retta, nella zona centrale. Ai lati si osserva la deformazione del fronte d'onda tipica dei fenomeni di diffrazione.

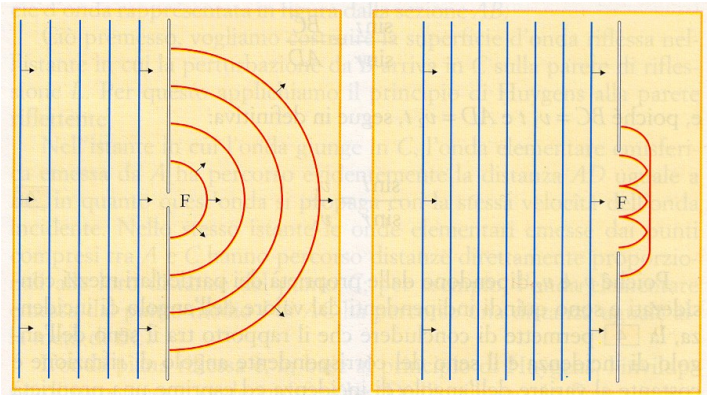
$\lambda > a$

Direzione del moto dell'onda →



L'onda, al di là dell'apertura, si propaga in tutte le direzioni (onda sferica).

I fenomeni connessi con la propagazione delle onde possono essere interpretati con il **principio di Huygens**. Ricordiamo che tale principio dice:
Ogni punto di un fronte d'onda può essere considerato come sorgente di nuove onde circolari, che si propagano in tutte le direzioni, a partire da quel punto, alla velocità caratteristica per le onde nel mezzo in esame.



Se il foro fosse puntiforme il fronte d'onda al di là dell'ostacolo sarebbe circolare in quanto F sarebbe centro di emissione di onde semicircolari. Se il foro avesse una dimensione confrontabile con la lunghezza d'onda della luce utilizzata, la situazione sarebbe la stessa, se invece il foro è grande rispetto alla lunghezza d'onda sarebbe quasi trascurabile il fenomeno della diffrazione perché i fronti d'onda rimarrebbero praticamente inalterati: essi mantengono la loro direzione rettilinea e la loro direzione di propagazione, tranne ai bordi dove l'apertura del foro assume una configurazione circolare.

4.3 La diffrazione prodotta da una fenditura singola

Consideriamo il fenomeno della diffrazione prodotto da una sottile fenditura di larghezza $AB=h$ e di lunghezza $l > h$, illuminata da un'onda piana monocromatica (fig. 68). Il dispositivo consta anche di uno schermo C e di una lente convergente L disposta tra la fenditura e lo schermo.

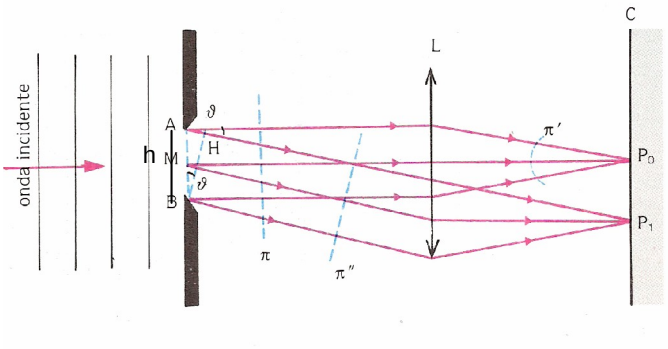


Fig. 68

Immaginiamo il fascio uscente dalla fenditura come diviso in strisce sottili e parallele. In altre parole è come se la fenditura, considerata come una superficie i cui centri di emissione presentano la stessa fase di vibrazione, fosse idealmente divisa in un certo numero di elementi diffondenti di area uguale.

Esaminiamo l'effetto prodotto sullo schermo C dalle onde elementari uscenti dalla fenditura nella direzione di incidenza. Applicando il principio di Huygens si ottiene che le onde sono in fase su qualsiasi piano π normale alla direzione considerata e che tali si mantengono su qualsiasi superficie sferica come π'. La lente infatti, senza introdurre differenza di cammino ottico nei singoli raggi, trasforma l'onda piana in un'onda sferica. I raggi pertanto giungono in P_0 (situato sulla perpendicolare condotta per il centro M ella fenditura) ancora in concordanza di fase in modo da interagire generando un massimo di illuminazione.

Vediamo ora che cosa accade in P_1, dove arrivano i raggi difratti formanti un angolo ϑ con l'asse MP_0 del sistema. Questi raggi giungono in P_1 senza modificare la differenza di fase che essi presentano in un piano π'', normale alla nuova direzione considerata. Su tale piano però tutti gli elementi diffondenti non hanno tutti la stessa fase poiché i raggi vi giungono avendo percorso cammini diversi. Per esempio se H è il piede della perpendicolare condotta da B al raggio uscente da A normale a π'', i raggi estremi presentano una differenza di cammino:

$$\Delta = AH = h\sin\vartheta .$$

Supponiamo che l'angolo ϑ sia tale da rendere la differenza di cammino Δ uguale alla lunghezza d'onda λ. Come si nota dalla figura 61, la differenza di cammino fra il raggio uscente da A e il raggio dal punto di mezzo M della fenditura è $\Delta/2 = \lambda/2$. Allora, sullo schermo, l'interferenza fra questi due raggi è distruttiva.

La stessa differenza di cammino si ha anche per un qualunque raggio uscente da un punto compreso nel tratto AM e il raggio uscente dal punto del tratto MB a distanza

$h/2$ dal primo. Facendo quindi corrispondere a ogni raggio uscente dalla prima metà della fenditura il raggio uscente, a distanza $h/2$, dalla seconda metà, ogni coppia giunge in P_1 in opposizione di fase, producendo una interferenza distruttiva e conseguentemente una frangia oscura.

Per spiegare il massimo successivo alla frangia oscura (del primo ordine), supponiamo di dividere la fenditura in tre parti uguali AB, BC e CD (fig. 69). A ogni raggio

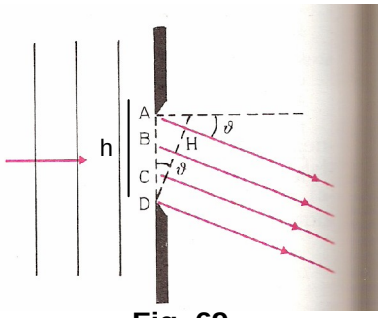


Fig. 69

emesso da un punto del tratto AB facciamo corrispondere il raggio emesso dal punto del segmento BC distante $h/3$ dal primo e il raggio emesso dal punto del segmento CD distante $h/3$ dal secondo. Se consideriamo quella direzione del fascio diffratto per cui i raggi estremi provenienti da A e D presentano una differenza di cammino

$$\Delta = AH = h\sin\vartheta = \frac{3}{2}\lambda$$

allora ogni raggio emesso dal tratto AB e il corrispondente raggio emesso dal tratto BC hanno fra di loro una differenza di cammino $\Delta/3 = \lambda/2$. Pertanto questi due raggi interferiscono distruttivamente sullo schermo. Solo i raggi uscenti da un terzo della fenditura, cioè, nel caso particolare preso come esempio, quelli uscenti dal tratto CD, vanno a illuminare lo schermo senza interferire distruttivamente.

Osservazione didattica. Naturalmente, poiché la luce proviene ora da un terzo della fenditura, l'intensità luminosa della corrispondente frangia è molto più bassa di quella del massimo centrale.

Generalizzando i massimi di illuminazione dopo quello centrale si trovano

$$\Delta = h\sin\vartheta = (2k+1)\frac{\lambda}{2},\ \text{k=1,2,3,..}$$ (ordine delle frange chiare),

e i minimi per:

$$\Delta = h\sin\vartheta = 2k\frac{\lambda}{2},\ \text{k=1,2,3,....}$$ (ordine delle frange scure).

Si propone alla classe il seguente esempio.

Esempio. Un'onda piana monocromatica relativa al campo del visibile attraversa una fenditura di larghezza $h = 48\cdot10^{-7}$. Sapendo che il massimo del primo ordine si forma per quei raggi diffratti formanti con l'asse della fenditura un angolo $\vartheta = 10°$, determinare la lunghezza dell'onda del fascio.

Risoluzione. Dalla relazione $h\sin\vartheta = (2k+1)\frac{\lambda}{2}$, che fornisce i massimi dopo quello centrale, si ha per k=1:

$$\lambda = \frac{2h\sin\vartheta}{3} = \frac{2\cdot 48\cdot 10^{-7}\cdot 0{,}174}{3} m = 0{,}56\mu m.$$

Nota didattica. La caratteristica più importante delle diffrazione da una fenditura singola è, per i nostri scopi, la posizione del primo minimo vicino al massimo centrale. Se chiamiamo con ϑ_c l'angolo tra il massimo centrale e il primo minimo, ricaviamo che:

$$\sin\vartheta_c = \frac{\lambda}{h} \quad [3\text{-}5]$$

4.4 La diffrazione e i limiti di risoluzione

La diffrazione limita la nostra capacità di riuscire a osservare dettagli estremamente minuti.

Supponiamo di considerare due sorgenti luminose, che inviano luce su di uno schermo attraverso una fenditura (fig. 70); se la fenditura è piuttosto piccola, le immagini prodotte sullo schermo sono accompagnate da parecchie frange di diffrazione; tali frange sono conseguenza del passaggio della luce attraverso la fenditura, la cui larghezza è h.

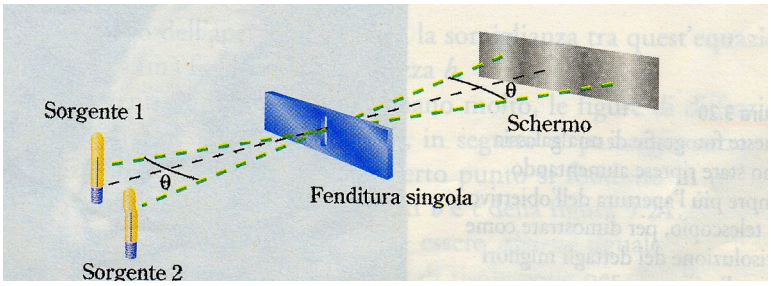


Fig. 70

Per comprendere gli svantaggi di questa situazione facciamo una osservazione: in prima approssimazione consideriamo la pupilla del nostro occhio come una fenditura, mentre le due linee che sono situate sull'oggetto sono le due sorgenti; la retina, invece, funge da schermo. Essendo l'immagine sulla retina sfocata, a causa degli effetti della diffrazione della fenditura (pupilla), l'occhio non riesce a percepire dettagli molto minuti nell'oggetto che sta guardando.

LA RISOLUZIONE MINIMA

Ritornando all'esempio di prima possiamo percepire le due immagini distinte sullo schermo soltanto quando l'angolo ϑ non è troppo piccolo. Le difficoltà sopraggiungono quando l' angolo ϑ è così piccolo che le figure di diffrazione si sovrappongono considerevolmente: le due sorgenti non possono più essere viste come entità separate (non possono più essere risolte), a partire dal momento in cui sono così vicine che il

massimo centrale di una figura di diffrazione va a coincidere con il primo minimo dell'altra figura.
In questa situazione, nota come **risoluzione minima**, l'angolo ϑ risulta uguale all'angolo ϑ_c, con ϑ_c definito dall'equazione [3-5]. Possiamo risolvere le sorgenti soltanto quando la loro separazione angolare ϑ è maggiore di ϑ_c.
Minore è la larghezza della fenditura h, maggiore risulta la distanza di separazione necessaria perché gli oggetti possano essere risolti, dal momento che la figura di interferenza si allarga al decrescere della fenditura.

DIFFRAZIONE DOVUTA AD APERTURE CIRCOLARI

Nel caso di una sorgente puntiforme di luce, la figura di diffrazione prodotta da un'apertura circolare è illustrata nella fig. 71.

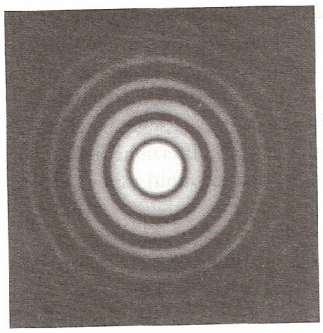


Fig. 71

Si può dimostrare che il diametro angolare del massimo centrale di questa figura è dato da:

$$\sin\vartheta = 1.22\frac{\lambda}{D}.$$

dove D è il diametro di apertura. Si osservi la somiglianza tra quest'equazione e la [3-5], relativa a una fenditura di larghezza h.
Osservazione didattica. Con il termine diametro angolare si intende l'angolo che il massimo centrale della figura di diffrazione sottende al centro dell'apertura. In altre parole, si tratta dell'angolo formato mediante le due rette tracciate a partire dal centro dell'apertura fino agli estremi opposti del diametro del massimo centrale.
Quando due sorgenti puntiformi si avvicinano molto, le figura di diffrazione prodotte dalle luci emesse da tali sorgenti, in seguito al passaggio attraverso l'apertura, iniziano a sovrapporsi e a un certo punto si fondono in un'unica figura: questo è quello che accede nelle figure 72 e 73.

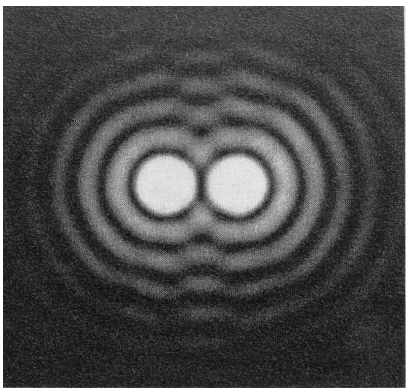


Fig. 72 - Figure di diffrazione di due sorgenti puntiformi.

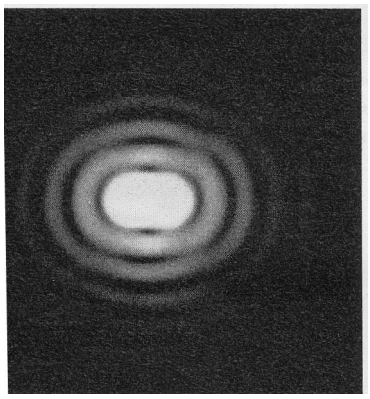


Fig. 73 - Figure di diffrazione di due sorgenti puntiformi vicine da essere a malapena risolte.

La separazione angolare tra i massimi centrali deve essere almeno uguale al diametro angolare do tali massimi: si tratta del limite di risoluzione per queste sorgenti. Di conseguenza, dobbiamo porre la condizione di seguito enunciata

L'**angolo limite** ϑ_c per la risoluzione di due sorgenti puntiformi osservate attraverso una apertura circolare di diametro D è quell'angolo tale che:

$$\sin \vartheta_c = 1.22 \frac{\lambda}{D}$$

4.5 La diffrazione prodotta da doppia fenditura

Attività sperimentale

DIFFRAZIONE ATTRAVERSO UNA DOPPIA FENDITURA

Obiettivo: Realizzare con due fenditure figure di interferenza ottenute a seguito del fenomeno di diffrazione della luce.

Materiale occorrente: Un proiettore a filamento rettilineo
Una doppia fenditura
Uno schermo

Procedimento:

- Si disponga il proiettore, la doppia fenditura come in figura 74 avendo l'accortezza che filamento della lampada e doppia fenditura siano allineati.

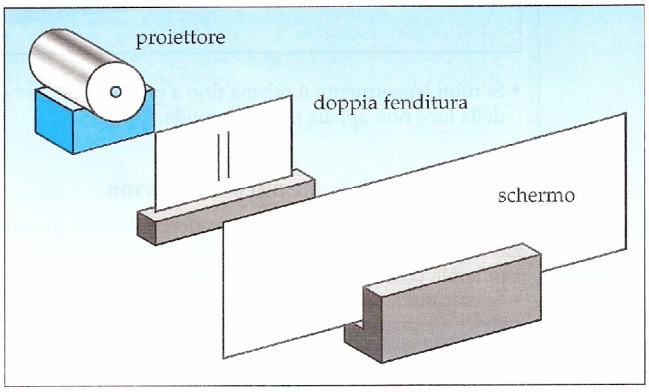
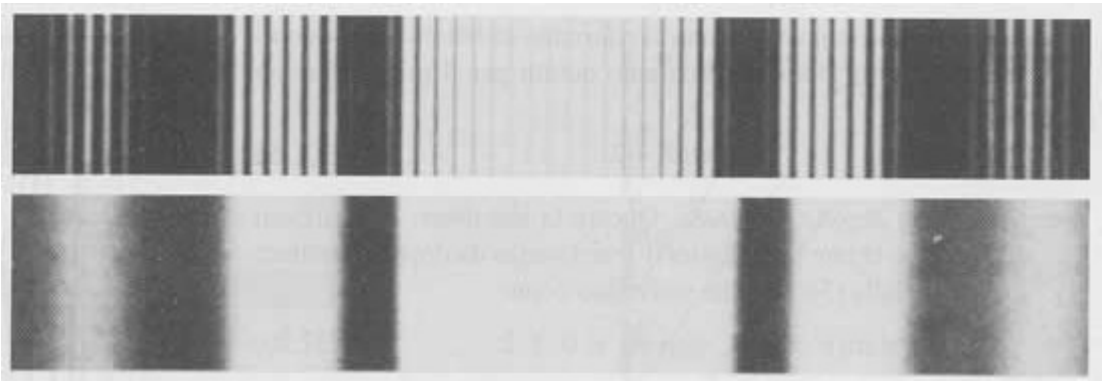


Fig. 74

- Si oscuri l'ambiente in cui si opera.
- Si osservano sullo schermo le frange di interferenza.

Supponiamo di produrre un effetto di interferenza con due fenditure la cui larghezza sia notevolmente più piccola rispetto alla distanza che le separa.
Considerata singolarmente una fenditura emette luce in modo da produrre una figura di diffrazione.
Poiché però le fenditure sono l'una in prossimità dell'altra e sono investite dalla medesima radiazione, la luce che da esse viene irraggiata dovrà produrre anche un effetto di interferenza.
La sovrapposizione dei due fenomeni provoca il formarsi dell'alternanza di zone di luce e ombra proprie dell'interferenza, ma tale che l'intensità delle zone di luce è modulata dall'effetto concomitante della diffrazione, come possiamo vedere dalle immagini. Le frange di interferenza vengono fortemente modulate in intensità dalla diminuzione di intensità dei massimi secondari della figura di diffrazione.



In alto: Immagine di diffrazione da doppia fenditura.
In basso: Immagine di diffrazione da fenditura singola.

4.6 Reticolo di diffrazione

Se facciamo passare un'onda piana attraverso uno schermo dotato, anziché di una sola fenditura, di due fenditure molto strette e vicine fra loro, le frange di interferenza tendono ad avvicinarsi e a diventare, specie nella zona centrale, più marcate (fig. 75).

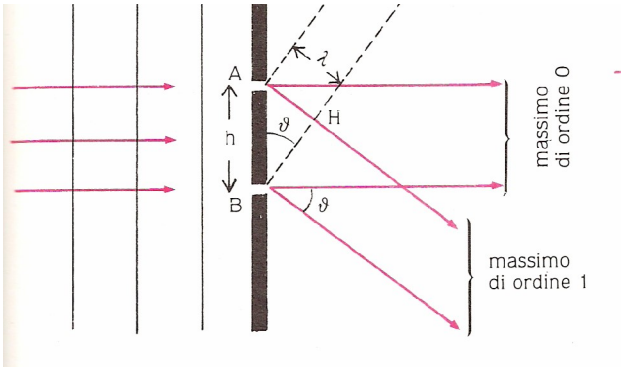


Fig. 75

Si possono ulteriormente accentuare queste caratteristiche della figura di diffrazione (fig. 76) utilizzando uno schermo con molte fenditure equidistanti, il più vicine possibile fra loro, in modo da realizzare un numero elevato di sorgenti elementari. Si ottiene così un **reticolo di diffrazione**, in cui la distanza d fra due fenditure adiacenti rappresenta il cosiddetto passo o costante reticolare.

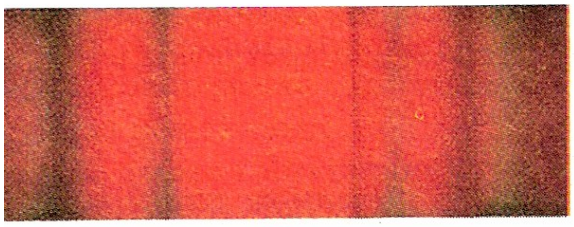


Fig. 76 - Sistema di frange ottenuto con un reticolo di diffrazione utilizzando luce monocromatica di colore rosso.

La figura di diffrazione che si ottiene illuminando perpendicolarmente un reticolo presenta massimi nelle direzioni per le quali la differenza di cammino fra i raggi uscenti da due fenditure successive è un multiplo intero della lunghezza d'onda (fig. 77). Possiamo dunque individuare nel modo seguente i massimi d'intensità:

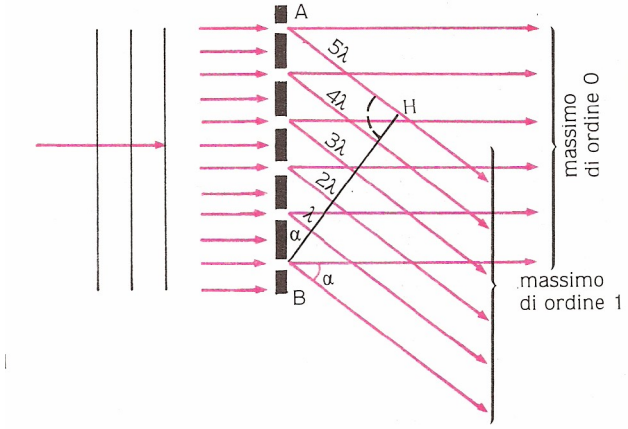


Fig. 77 - Schema di un reticolo di diffrazione.

Massimi d'intensità nella diffrazione da reticolo

La figura di diffrazione prodotta da un reticolo di passo d illuminato perpendicolarmente da luce di lunghezza d'onda λ presenta massimi d'intensità nelle direzioni che formano con la direzione d'incidenza angoli α tali che:

$$d \sin \alpha = k\lambda \quad [3\text{-}6]$$

dove $k = 0,1,2,\ldots$ è l'ordine della frangia.

I reticoli vengono costruiti incidendo su una lastra di vetro o di metallo dei solchi paralleli per mezzo di opportune macchine che utilizzano punte di diamante. Tali solchi vengono poi riempiti con una sostanza assorbente. Si parla di **reticoli di trasmissione** quando si considerano dei dispositivi nei quali la luce può attraversare le fenditure praticate, come nel caso dei reticoli ottenuti con lastrine di vetro; si parla, invece, di **reticoli di riflessione** quando la luce non attraversa le fenditure ma vi si riflette sopra, come nel caso dei reticoli incisi su lastre di metallo.

Si propone alla classe il seguente esempio.

Esempio 1. Un fascio di luce verde di lunghezza d'onda $0,540\mu m$ incide sopre un reticolo, caratterizzato da 2000 righe per centimetro, dando origina a una figura di diffrazione.

Calcoliamo l'angolo di inclinazione α del fascio diffratto corrispondente alla frangia luminosa del terzo ordine.

Qual è il numero totale di frange luminose prodotte dal reticolo?

Risoluzione. Il passo del reticolo è $d = (2000)^{-1} cm = 5,00 \cdot 10^{-4} cm$.

Ponendo $m=3$ nella [3-5] otteniamo che la frangia luminosa del terzo ordine è prodotta nella direzione che forma con la normale al reticolo l'angolo α tale che:

$$\sin \alpha = \frac{3\lambda}{d} = \frac{3(5,40 \cdot 10^{-5} cm)}{(5,00 \cdot 10^{-4} cm)} = 0,324$$

da cui $\alpha = 18,9°$.

Poiché deve essere $\sin \alpha \leq 1$, dalla [3-5] segue la condizione:

$$\frac{m\lambda}{d} \leq 1$$

cioè

$$m \leq \frac{d}{\lambda}$$

Nel caso considerato è:

$$m \leq \frac{(5,00 \cdot 10^{-4} cm)}{(5,40 \cdot 10^{-5} cm)} = 9,26$$

Dunque l'ordine m (che è un numero intero) dei massimi prodotti dal reticolo può andare da 0 a 9 compreso. Poiché la figura di diffrazione è simmetrica rispetto al massimo di ordine zero si avranno nove massimi da un lato e nove dall'altro, per un totale, compreso quello di ordine zero, di 19.

Attività sperimentale

IL COMPACT DISC COME RETICOLO DI DIFFRAZIONE

Introduzione:

Sulla superficie riflettente di un compact disc sono incise delle buche microscopiche che consentono di codificare, sotto forma di bit, suoni, dati e immagini.
Il compact disc riceve la luce che incide sulla sua superficie comportandosi come un reticolo di diffrazione. Misurando la distanza a cui sono separati i colori riflessi, possiamo stimare la lunghezza d'onda della luce visibile.

Materiale occorrente:

Compact disc
Cartoncino bianco, rigido, almeno 30x30 cm
Un piccolo specchio piano
Un righello
Una finestra da cui si vede il sole
Supporti per il cartoncino e per il compact disc

Preparazione:

- Usare lo specchio piano per mandare un fascio di luce solare nella parte in ombra della stanza.
- Ritagliare una fenditura di 1mm×20mm vicino al centro del cartoncino bianco e posizionare il cartoncino in modo tale che la fenditura faccia passare parte della luce riflessa dallo specchio e che il piano del cartoncino sia perpendicolare ai raggi solari.
- Posizionare il compact disc ad una distanza di 30 cm dal cartoncino in modo tale che anche il cd sia perpendicolare ai raggi che provengono dal sole. Il riflesso del fenditura si sovrappone alla fenditura stessa e così sopra e sotto alla fenditura si vedono alcune figure colorate.

Svolgimento:

- Misurare la distanza L tra schermo e cd.
- La luce che attraversa la fenditura viene riflessa dalla superficie riflettente del cd sulla fenditura stessa. Sopra e sotto la fenditura appaiono delle immagini colorate della fenditura stessa. Infatti oltre alla riflessione principale partono dal cd altri raggi

riflessi che si comportano diversamente a seconda della lunghezza d'onda. Prendere la regione in cui la regione colorata è piuttosto luminosa e in cui si vedono uno dopo l'altro i colori dell'arcobaleno.

- Misurare tante volte la distanza tra la fenditura e l'immagine colorata per diversi colori.
- Con i dati raccolti calcolare la lunghezza d'onda utilizzando la [3-6] con k=1,

$$\sin\alpha = \frac{x_1}{r_1} = \frac{\lambda}{d} \qquad [3\text{-}7]$$

d è caratteristico del cd stesso

- Usare il teorema di Pitagora, per calcolare $r_1 = \sqrt{x_1^2 + L^2}$
- Sostituendo nella [3-7]

$$\lambda = \frac{x_1}{\sqrt{x_1^2 + L^2}} d\,.$$

4.7 Dispersione della luce

Talvolta, appena spunta il Sole dopo un temporale, appare nel cielo l'arcobaleno, costituito da una gamma di toni cromatici fra i quali si considerano, per antica convenzione, i sette colori: rosso, arancione, giallo, verde, azzurro, indaco e violetto, detti colori fondamentali o colori dell'Iride.

Nota storica. Iride è il personaggio mitologico che personifica l'arcobaleno, con i sette, più o meno distinguibili, colori fondamentali. Il sette come il tre era spesso considerato dagli antichi un numero perfetto.

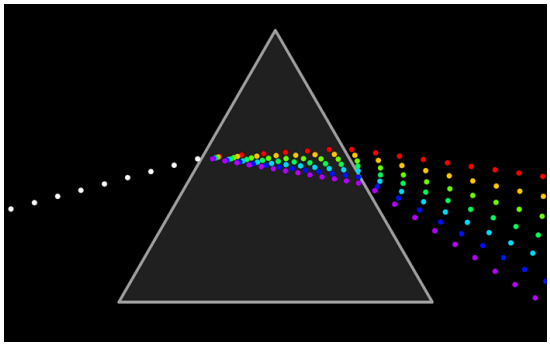


Fig. 78

La separazione dei colori che compongono la luce è indicata con il nome di dispersione e può essere semplicemente ottenuta inviando attraverso un prisma di vetro un sottile fascio di "luce bianca", così chiamata perché non sembra avere un colore proprio, proveniente per esempio dal Sole o da una lampadina tascabile. Come mostrato in figura 78, dal prisma emergono raggi di diverso colore, che rappresentano lo spettro della luce visibile. Ciascuna componente monocromatica dello spettro è deviata di un angolo diverso: il rosso subisce la minima deviazione e gli altri colori, nell'ordine in cui sono stati sopra elencati, subiscono deviazioni via via crescenti.

Il fenomeno della dispersione della luce fu studiato da Newton. Ecco come egli descrisse uno dei suoi esperimenti: "Nel 1966, anno nel quale mi applicai a tagliare vetri ottici di forma diversa dalla sferica, preparai un prisma triangolare allo scopo di sperimentare intorno ai famosi fenomeni del colore. Ed avendo a tale scopo fatto buio

nella mia stanza e praticato un foro nello sportello della finestra per lasciare passare una conveniente quantità di luce solare, collocai il mio prisma ove essa entrava, in modo che potesse venire rifratta sulla parete opposta. Fu per me una vera gioia il poter contemplare i vividi ed intensi colori ottenuti".

I colori dello spettro di dispersione, se ricombinati, danno nuovamente luogo alla luce bianca. Si può verificare con un semplice esperimento.

Attività sperimentale

IL DISCO DI NEWTON

Obiettivo: Costruire un disco di Newton e vedere gli effetti quando viene messo in rotazione.

Materiale occorrente:
Pennarelli colorati
Foglio di cartone
Biro
Goniometro
Spillo

Procedimento:

- Si costruisca un disco di cartone.

- Con l'aiuto del goniometro si divida il disco in sette settori corrispondenti ai colori dello spettro solare, segnando con la penna i vari settori e precisamente:
- un settore di 61° colorato di rosso;
- uno di 34° colorato di arancione;
- uno di 54°30′ colorato di giallo;
- uno di 61° colorato di verde;
- uno di 54°30′ colorato di azzurro;
- uno di 34° di colore indaco;
- uno di 61° di colore violetto.

• A questo punto si fa passare per il centro del disco uno spillo che faccia da asse. È possibile ora con l'altra mano imprimere al disco un rapido moto rotatorio e si osserva come la mescolanza dei colori, resa possibile dal fenomeno della persistenza delle immagini sulla retina, sembrerà di vederlo tutto bianco.

Mentre un raggio di luce bianca si può suddividere mediante un fenomeno di dispersione nelle componenti monocromatiche, i colori che si ottengono non sono ulteriormente scomponibili. Se facciamo uscire da una stretta fenditura un raggio monocromatico dello spettro, per esempio il giallo, e poniamo lungo il suo percorso un secondo prisma, come in figura 79, non si ottiene alcuna ulteriore scomposizione. La dispersione rappresenta quindi solo una proprietà della luce bianca e più in generale di un raggio di luce composto da più colori.

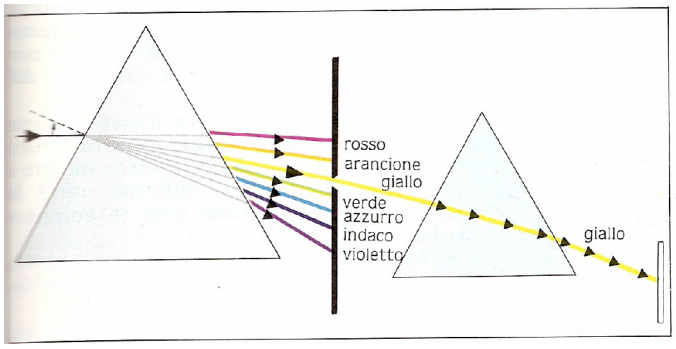


Fig. 79

Il fenomeno della dispersione si verifica perché, per una dato materiale, l'índice di rifrazione dipende dalla frequenza della luce che si propaga nel materiale. Essendo dunque l'indice di rifrazione una funzione della frequenza, la legge di Snell indica che i raggi di luce di frequenze diverse, quando incidono su un materiale rifrangente, vengono deviati di angoli differenti.

COLORE DEI CORPI

Esaminiamo ora l'aspetto cromatico degli oggetti che cadono sotto la nostra osservazione, siano essi trasparenti ovvero opachi.

Il colore dei corpi, trasparenti o opachi che siano, può essere ritenuto, una percezione sensoriale dovuta a un insieme di fattori oggettivi e soggettivi, connessi con la frequenza della radiazione luminosa emessa, con certe proprietà del materiale, con la natura delle sorgenti luminose, con gli effetti di contrasto, con la risposta fisiologica della nostra retina.

Consideriamo un corpo trasparente, per esempio il vetro di una finestra: se lo si lascia attraversare dalla luce bianca, non appare colorato. Un corpo, sempre trasparente, appare invece dotato di un certo colore, per esempio verde, se, colpito dalla luce bianca, si lascia attraversare solo dalla componente verde, mentre assorbe tutti gli

altri colori. Così, se interponiamo fra una sorgente di luce bianca e un prisma una lastra di vetro di colore verde (fig. 80), l'unico raggio che si forma sullo schermo è verde. Questo conferma che il colore della lastra trasparente corrisponde al colore della componente monocromatica della luce dalla quale si lascia attraversare.
Se un corpo è opaco, esso appare di un certo colore, per esempio rosso, se, colpito dalla luce bianca, assorbe tutte le componenti monocromatiche tranne quella corrispondente al rosso, che invece viene diffusa. In particolare, il corpo è nero se assorbe tutti i colori dello spettro, mentre è bianco se diffonde tutte le componenti che lo colpiscono. In ogni caso il nostro occhio percepisce solo la luce che viene diffusa.

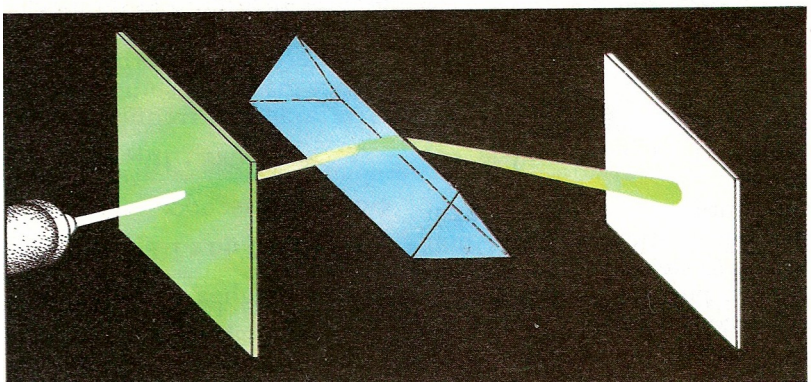


Fig. 80

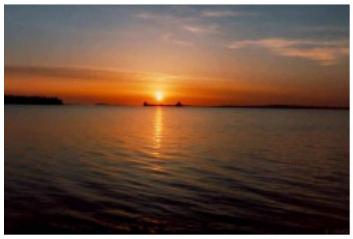
COLORI ATMOSFERICI: CIELO E TRAMONTO

Perché il cielo è azzurro se la luce del sole è bianca? Perché invece appare nero agli astronauti che viaggiano nello spazio? E, tornando sulla Terra, perché all'alba e al tramonto compaiono quelle tinte rosa, viola, arancione, che hanno suggerito tante celebri immagini ai pittori e tante delicate parole ai poeti di tutti i tempi?
Tutte queste domande trovano risposta in un unico fenomeno fisico, quello della **diffusione** della luce. La luce viaggia, in un dato mezzo, percorrendo cammini rettilinei. Per vederla occorre trovarsi con l'occhio sulla traiettoria del raggio. Essa tuttavia può divenire visibile anche a un osservatore posto a fianco del raggio se questo sul suo cammino incontra degli ostacoli che lo diffondono. L'effetto può essere dimostrato molto bene con un raggio laser, che, malgrado la sua grande potenza luminosa, è visibile lateralmente solo se si propaga in un ambiente fumoso. A tutti è capitato di osservare che un raggio di Sole che filtra in una camera buia attraverso un foro nelle serrande viene rivelato solo dalla luminosità del pulviscolo che incontra sul suo cammino. Ogni urto con una particella sospesa nell'aria fa sì che un po' di luce si sparpagli in tutte le direzioni. Questo è il fenomeno della diffusione della luce, studiato dal fisico inglese Lord Rayleigh. Bene, questo è esattamente quel che accade ai raggi del Sole nel loro viaggio verso la Terra. Arrivati a contatto con l'atmosfera, vengono diffusi dalle particelle che la costituiscono, in prevalenza molecole di ossigeno, azoto, vapore acqueo. Col risultato che la luce piove su di noi da ogni punto

della volta del cielo, che per il momento non diremo celeste, dato che non è ancora chiaro perché dovrebbe essere di questo colore. Possiamo dire invece con certezza che essa sarebbe nera se attorno a noi ci fosse il vuoto, com'è nello spazio interstellare, o anche sulla Luna. La legge stabilita da Rayleigh dice che, quando le particelle diffondenti sono estremamente piccole, come le molecole dell'atmosfera, la luce di piccola lunghezza d'onda (violetto) viene deviata per diffusione in modo più efficace di quella di grande lunghezza d'onda (rosso). La maggior parte dell'ultravioletto proveniente dal sole viene assorbito da uno strato protettivo di ozono gassoso nella parte superiore dell'atmosfera. Il restante ultravioletto viene diffuso dalle particelle e dalle molecole atmosferiche. Delle frequenze del visibile, il violetto viene diffuso al massimo, seguito dal blu e dagli altri colori, per ultimo il rosso. Il rosso viene diffuso 10 volte meno del violetto. Benché la luce violetta venga diffusa più del blu i nostri occhi non sono molto sensibili alla luce violetta ma più alla luce blu ed è proprio per questo motivo che il cielo ci appare blu. Il blu del cielo varia in differenti luoghi e in differenti situazioni. Dov'è c'è grande abbondanza di particelle di polveri e altre particelle, vengono diffuse maggiormente le più basse frequenze della luce. In questo caso il cielo è meno blu e assume un aspetto biancastro. Dopo una intensa precipitazione piovosa, quando le particelle sono state asportate, il cielo assume un colore blu più intenso. Man mano che si sale nell'atmosfera, diminuisce il numero di particelle per diffondere la luce e il cielo appare più scuro. Quando non ci sono più molecole, come sulla Luna per esempio, il cielo appare nero.

Le più basse frequenze della luce vengono diffuse in misura minore dalle molecole di azoto e di ossigeno e quindi la luce di colore rosso, arancio e gialla attraversa l'atmosfera più facilmente della luce di colore violetto e blu. La luce rossa, che viene diffusa in misura minima, attraversa una maggior quantità di atmosfera senza interagire con la materia. Perciò quando la luce attraversa una grande quantità di atmosfera, le frequenze più basse vengono trasmesse mentre quelle più alte vengono diffuse. Questo è ciò che accade per esempio all'alba e al tramonto quando la luce solare ci raggiunge dopo avere percorso un cammino più lungo attraverso l'atmosfera.

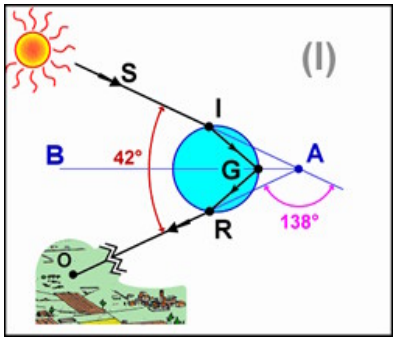
A mezzogiorno la luce solare attraversa la minima quantità di atmosfera per raggiungere la superficie della Terra e viene diffusa solo una piccola quantità di luce solare ad alta frequenza. Via via che il giorno trascorre il Sole si abbassa nel cielo, il cammino percorso dalla luce nell'atmosfera si allunga e aumenta.

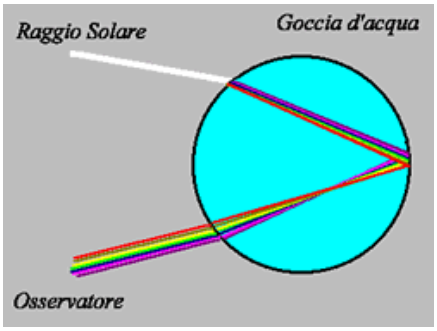


ARCOBALENO

Dopo un temporale, molto in alto nell'aria restano moltissime goccioline d'acqua e quando il sole è basso all'orizzonte, (tramonto o alba) si può verificare il fenomeno dell'arcobaleno.

Il raggio di luce solare subisce una rifrazione nell'attraversare, entrando, la superficie della goccia d'acqua, separandosi quindi nei colori dello spettro, e poi questi incidono, dall'interno, sulla seconda superficie con un angolo maggiore dell'angolo limite. Quindi si riflettono totalmente, per poi uscire di nuovo in aria all'indietro, dalla stessa parte cioè da cui è entrato il raggio originario. In questo modo si ottiene la separazione nei colori componenti del raggio di sole e si vede l'arcobaleno. Perché questo si verifichi, l'angolo tra il sole e il nostro occhio (passando per la goccia d'acqua) deve essere di circa 42°.





4.8 Tempi dell'intervento didattico

Per svolgere questa unità didattica si prevedono i seguenti tempi:

Lezioni frontali e svolgimento degli esercizi:	9h
Attività di laboratorio:	3h
Verifica sommativa:	2h
Consegna e correzione verifica sommativa:	1h

Per un totale di 15 ore che, tenuto conto delle 3 ore settimanali di fisica, equivalgono a circa 5 settimane di lavoro. La previsione è da intendersi elastica, perché occorre tener conto dell'andamento e dei processi di apprendimento della classe.

4.9 Verifica sommativa U.D. 2

1. Per quale motivo, nella vita quotidiana, osserviamo il suono aggirare gli ostacoli e la luce no?
(a) Perché il suono è un'onda elastica mentre la luce è un'onda elettromagnetica. Con le onde elettromagnetiche non è possibile avere la diffrazione.
(b) Perché il suono ha una lunghezza d'onda dell'ordine del metro mentre la luce ha una lunghezza d'onda dell'ordine del dodicimilionesimo di metro.
(c) Per avere il fenomeno della diffrazione, l'ostacolo deve avere dimensioni dell'ordine di grandezza della lunghezza d'onda dell'onda incidente.
Indica la risposta errata.

2. In quale caso si ha interferenza costruttiva della luce?
(a) Quando la differenza di cammino ottico è: $\frac{\lambda}{2},\ \lambda,\ \frac{3}{2}\lambda,\ 2\lambda,$ ecc...
(b) Quando la differenza di cammino ottico è: $\frac{\lambda}{2},\ \frac{3}{2}\lambda,\ \frac{5}{2}\lambda,$ ecc...
(c) Quando la differenza di cammino ottico è: $\lambda,\ 2\lambda,\ 3\lambda,$ ecc...

3. Della luce va a incidere su una lastra di vetro piana ($n = 1{,}56$), formando un angolo di 48° rispetto alla normale alla superficie superiore.
(a) Qual è l'angolo di rifrazione all'interno della lastra di vetro?
(b) Quando il fascio esce dalla superficie inferiore della lastra, qual è l'angolo che esso forma rispetto al fascio iniziale, incidente sulla lastra?

4. Una fenditura singola è illuminata con luce a $436\ nm$ e il suo minimo di diffrazione del primo ordine si trova a un angolo $18°$ rispetto al centro della figura di diffrazione. Qual è la larghezza della fenditura?

Griglia di valutazione per la verifica sommativa (compilata nelle sue parti)

	CONOSCENZA		ABILITA'	
	TOTALE	OTTENUTI	TOTALE	OTTENUTI
ESERCIZIO 1	2		2	
ESERCIZIO 2	2		2	
ESERCIZIO 3	4		4	
ESERCIZIO 4	4		4	
TOTALE	12		12	

BIBLIOGRAFIA

Testi scolastici di riferimento

- U. Amaldi, L'Amaldi Introduzione alla fisica 2, Zanichelli, 2004.

- U. Almaldi, La Fisica per i Licei Scientifici 2 quarta edizione, Zanichelli, 1998.

- U. Amaldi, Temi e immagini della fisica Laboratorio, Zanichelli, 1996.

Testo molto rigoroso ma allo stesso tempo chiaro.

- P. Alberico – R. Di Fiore, Fisica due per la classe 4ª del Liceo Scientifico, La Nuova Scuola, 2004.

E' un testo che propone la materia in un modo meno formale del solito ed è accattivante per lo studente. Molto ricco di figure e note storiche.

- F. Bueche – D.A. Jerde . - G. Bonzini, Corso di fisica 2 per il Liceo Scientifico, Etas, 2004.

Risulta utile per la stesura iniziale del modulo didattico poiché fornisce una prima idea di come impostare il lavoro: prerequisiti, obiettivi, contenuti; invece, per quanto riguarda lo sviluppo dei contenuti, si nota un'impostazione complessa.

- A. Caforio –A. Ferilli, Fisica 2, Le Monnier, 2007.

La teoria è sviluppata in modo molto accurato, presenti inoltre notevoli cenni storici che certamente fanno soffermare e incuriosire lo studente. Buono anche per gli esercizi proposti.

- Halliday- Resnick – Krane , Fisica 2 quinta edizione, Casa Editrice Ambrosiana, 2004.

Testi specialistici di riferimento

- Arnold B. Arons, Guida all'insegnamento della fisica, Zanichelli, 1992.

Ottimo testo, preciso e chiaro.

- D. M. Watts, Student Conception of Light: A Case Study, Physics Education, vol. 20 n. 4 pag. 183-187 luglio 1985

Sitogafia

Programmi di matematica di ordinamento per i licei
http://www.edscuola.it/archivio/norme/programmi/scientifico.html

Programmi di matematica del PNI
http://www.edscuola.it/archivio/norme/programmi/index.html

Programmi di fisica elaborati dalla Commissione Brocca

http://www.edscuola.it/archivio/norme/programmi/programmi_brocca.htm

http://www.to.infn.it/~marzari/pdf/otticageom.pdf

http://scienzapertutti.lnf.infn.it/P7/pag1.html

http://www.lucevirtuale.net/index.html

Si consiglia la consultazione sia a docenti che ad alunni.

This document was created with Win2PDF available at http://www.win2pdf.com.
The unregistered version of Win2PDF is for evaluation or non-commercial use only.
This page will not be added after purchasing Win2PDF.