

DIESSE FIRENZE
Didattica e Innovazione Scolastica
Centro per la formazione e l'aggiornamento

SCIENZA FIRENZE
SESTA EDIZIONE

Docenti e studenti a confronto su:

LA LUCE, GLI OCCHI, IL SIGNIFICATO

Aula Magna
Polo delle Scienze Sociali, Università di Firenze
Firenze, 22 – 23 aprile 2009

Menzione d'onore – Sezione Triennio

Titolo: *Arcobaleno: un ponte tra cielo e terra*

Di: Francesca Constantinescu, Lara Fuciarelli, Annamaria Serra, Valeria Spano

Scuola: Liceo Scientifico "Galilei" - Pescara

Docente: Giorgio Guidi

Motivazione: Originale e completo il lavoro fatto per riprodurre e studiare in condizioni controllate uno tra i più affascinanti fenomeni naturali, interrogare la Natura secondo il metodo scientifico per “guardare dentro la bellezza”.

Presentazione

Il presente lavoro ha diverse sfaccettature: l'arcobaleno nel mito, nella religione e nella letteratura, la storia dei tentativi scientifici di darne spiegazione e diverse osservazioni realizzate dagli studenti per metterne in evidenza alcuni aspetti. L'arcobaleno è fenomeno troppo splendido per non cercare di conoscerlo attraverso la scienza certo, ma senza perdere la carica evocativa che possiamo ritrovare testimoniata in testi più o meno antichi. E' entusiasmante ripercorrere le tappe susseguitesesi per oltre 2000 anni, attraverso le quali l'uomo ha dato una interpretazione scientifica della meteora. Queste due parti sono state svolte autonomamente dagli studenti attingendo a siti Internet ed a materiale cartaceo fornito dall'insegnante. Infine le osservazioni: sfortunatamente nessuna diretta, per non essersi mai verificato il fenomeno nel periodo di elaborazione della tesina, ma diverse "laboratoriali". Grazie a rapporti personali ed al grande entusiasmo dei pompieri volontari di un distaccamento locale abbiamo potuto osservare l'arcobaleno prodotto dalle goccioline nebulizzate da un idrante, nel cortile della caserma, utilizzando un apposito bastone da arcobaleno costruito dagli studenti con la collaborazione del sottoscritto e di un genitore. E' stato impressionante vedere formarsi l'arco primario e secondario, riuscire a vedere la banda di Alessandro, e un arco sovrannumerario. Poi è stata analizzata la differente rifrazione prodotta su due fasci monocromatici da una sfera di vetro. Da notare che l'angolo trovato non vuole essere una misura dell'angolo di semiapertura dell'arcobaleno (sebbene formato da gocce di vetro!), ma semplicemente un parametro che evidenzi il fenomeno suddetto. In questo esperimento come nella proiezione dell'arcobaleno su parete o schermo è stata utilizzata una sfera di vetro ottimamente lavorata, mentre la simulazione della goccia con un matraccio riempito d'acqua ha dato maggiori problemi a causa delle irregolarità della superficie del vetro. Infine il lavoro sia nella parte letteraria che storica che sperimentale offre spunti che facilmente posso essere introdotti nel lavoro in classe.

Il docente

ARCOBALENO: UN PONTE TRA CIELO E TERRA

L'arcobaleno è un fenomeno che ha fatto scrivere tantissime leggende e storie su di sé, catturando l'attenzione dei poeti e degli artisti, ma anche degli scienziati che hanno tentato di spiegarlo dall'antichità fino al secolo scorso.

LEGGENDA, RELIGIONE E MITO

Una leggenda narra che: "Quando nasce un bambino, Dio crea un ponte tra il cielo e la terra: l'arcobaleno, per perpetuare un patto d'amore con il mondo e l'umanità. Ogni bimbo è un dono di tenerezza dai colori dell'iride.

L'arco è un mezzo cerchio, una metà di bene regalata da Dio ad ogni fanciullo, il quale ha come compito, durante il percorso della vita, di completarlo in un unico insieme rotondo ed armonico. Il cerchio dell'esistenza è concluso da un ultimo punto, un atomo indissolubile che, alla fine della vita, con una scintilla divina ci unisce al Padre, per ritornare a Lui, tra le sue braccia.

(...)

Ad ogni bambino piccino, si racconta così la leggenda dell'arcobaleno, come figlio di Dio nel mondo, della natura umana, si sente persona nell'universo e con il cuore in mano va incontro al destino, al domani, fino ad arrivare a concludere il suo cerchio d'amore. Ogni tanto dalla tasca toglie il fazzoletto per asciugare le lacrime, ma quando alza gli occhi al cielo e vede l'arcobaleno, un sorriso gli si strappa dalle labbra, rammenta che Dio è vicino a lui e che lo sta tenendo per mano."

Un' altra storia narra invece di come si formarono i colori dell'arcobaleno.

"Tanto tempo fa i colori fecero una lite furibonda.

Tutti si proclamavano il migliore in assoluto, il più importante, il più utile, il favorito. Il VERDE disse: "Chiaramente sono io il più importante. Io sono stato scelto dall'erba, dagli alberi, dalle piante. Senza di me tutti gli animali morirebbero. Guardatevi intorno nella campagna e vedrete che io sono in maggioranza..."

Il BLU lo interruppe: "Tu pensi solo alla terra, ma non consideri il cielo ed il mare!!

E' l'acqua la base della vita che viene giù dalle nuvole nel profondo del mare. Il cielo dà spazio, pace e serenità. Senza di me voi non sareste niente..."

Il GIALLO rilanciò: " Voi siete tutti così seri! Io porto il sorriso, gioia e caldo nel mondo. Il sole è giallo, la luna è gialla, le stelle sono gialle. Quando fioriscono i girasoli, il mondo intero sembra sorridere. Senza di me non ci sarebbe allegria..."

L'ARANCIONE si fece largo: "Io sono il colore della salute e della forza. Posso essere scarso, ma prezioso perché io servo per il bisogno della vita umana. Io porto con me le più importanti vitamine. Pensate alle carote, zucche, arance, mango e papaia. Io non sono presente tutto il tempo, ma quando riempio il cielo nell'alba e nel tramonto, la mia bellezza è così impressionante che nessuno pensa più ad uno solo di voi..."

Il ROSSO poco distante urlò: " Io sono il re di tutti voi. Io sono il colore del sangue ed il sangue è vita, è il colore del pericolo e del coraggio. Io sono pronto a combattere per una causa, io metto il fuoco nel sangue, senza di me la terra sarebbe vuota come la luna. Io sono il colore della passione, dell'amore, la rosa rossa, il papavero..."

Il PORPORA si alzò in tutta la sua altezza.

Era molto alto e parlò con voce in pompa magna: "Io sono il colore dei regnanti e del potere. Re, capi e prelati hanno sempre scelto me perché sono il segno dell'autorità e della sapienza. Le persone non domandano...a me essi ascoltano ed obbediscono!..."

Infine parlò l'INDACO molto serenamente, ma con determinazione: "Pensate a me, io sono il colore del silenzio, voi difficilmente mi notate, ma senza di me diventate tutti superficiali. Io rappresento il pensiero e la riflessione, il crepuscolo e le acque profonde...Voi tutti avete bisogno di me per bilanciare e contrastare, per pregare ed inneggiare alla pace..."

E così i colori continuarono a discutere ognuno convinto di essere superiore agli altri.

Litigarono sempre più violentemente senza sentire ragioni.

Improvvisamente un lampo squarciò il cielo seguito da un rumore fortissimo.

Il tuono e la pioggia che seguì violenta li impaurì a tal punto che si strinsero tutti insieme per confortarsi...

Nel mezzo del clamore la PIOGGIA iniziò a parlare: "Voi sciocchi colori litigate tra di voi e ognuno cerca di dominare gli altri...Non sapete che ognuno di voi è stato fatto per un preciso scopo unico e differente? Tenetevi per mano e venite con me".

Dopo che ebbero fatto pace, essi si presero tutti per mano.

La PIOGGIA continuò: "D'ora in poi, quando pioverà ognuno di voi si distenderà attraverso il cielo in un grande arco di colori per ricordare che voi vivete tutti in pace.

L'arcobaleno è un segno di speranza e di Pace per il Domani..."

L'arcobaleno ha trovato posto nei testi sacri, nei miti e nelle leggende per la sua bellezza, allo stesso tempo queste narrazioni costituiscono anche tentativi di spiegazione del fenomeno. Alcuni esempi:

- Nella Bibbia così Dio si rivolge a Noè dopo il diluvio: "12 Dio disse: «Ecco il segno del patto che io faccio tra me e voi e tutti gli esseri viventi che sono con voi, per tutte le generazioni future. 13 Io pongo il mio arco nella nuvola e servirà di segno del patto fra me e la terra. 14 Avverrà che quando avrò raccolto delle nuvole al di sopra della terra, l'arco apparirà nelle nuvole; 15 io mi ricorderò del mio patto fra me e voi e ogni essere vivente di ogni specie, e le acque non diventeranno più un diluvio per distruggere ogni essere vivente. 16 L'arco dunque sarà nelle nuvole e io lo guarderò per ricordarmi del patto perpetuo fra Dio e ogni essere vivente, di qualunque specie che è sulla terra»" (Genesi 9, 12-16)
- Nella mitologia greca, si trattava del sentiero tracciato da Iride tra terra e cielo. Iride era figlia del titano Taumante e della ninfa Elettra. Come messaggera del dio [Zeus](#) e di sua moglie [Era](#), Iride lasciava l'[Olimpo](#) soltanto per trasmettere i voleri divini all'umanità, che la considerava una consigliera e una guida. Veloce come il vento, si spostava da un punto all'altro della Terra, in fondo al mare e nel mondo sotterraneo. Pur essendo sorella dei mostri alati, le [arpie](#), Iride veniva rappresentata come una fanciulla bellissima, con ali e vesti dai colori brillanti e un'aureola, che mentre ella attraversava il cielo si lasciava dietro un arcobaleno come scia.
- Il nascondiglio segreto del folletto Irlandese con il suo pentolone pieno d'oro è generalmente alla fine di un arcobaleno
- Nella mitologia cinese, l'arcobaleno era una spaccatura nel cielo sigillata dalla dea Nuwa con pietre di sette colori differenti.
- Nella mitologia Hindù, l'arcobaleno è chiamato Indradhanush-l'arco di Indra, il dio del fulmine e del tuono.
- Nella mitologia scandinava un arcobaleno chiamato il ponte bifrost collega le dimore di dei e umani.

Il mito più conosciuto sull'arcobaleno è sicuramente quello del folletto e del pentolone d'oro. Però, si può anche dire che, al di là di questo mito l'arcobaleno è sempre stato inteso come un ponte tra uomo e divino. Infatti da come si può constatare dai miti sopra riportati, in qualsiasi mitologia o religione, da quelle occidentali a quelle orientali, l'arcobaleno serve a ricordarci il legame che ci lega, appunto, a un'intelligenza superiore. Questo probabilmente perché ha costituito da sempre una realtà misteriosa del nostro mondo e per questo è stato oggetto di numerosi studi sin dall'antichità, che ne hanno rivelato la natura solo recentemente.

STORIA DEI TENTATIVI DI SPIEGAZIONE SCIENTIFICA DELL'ARCOBALENO

Aristotele

Nella sua *Meteorologia*, Aristotele dà una descrizione accurata dell'arcobaleno, della successione dei colori che per lui sono solo tre, e della loro intensità nell'arcobaleno primario e secondario, della posizione del Sole che permette la formazione della meteora.

"Quanto all'arcobaleno, non si forma mai un cerchio intero, né una sezione più grande di un semicerchio. Quando il sole tramonta e sorge è minimo il cerchio, massima la sezione; quando è più alto, il cerchio è più grande e minore la sezione; e dopo l'equinozio d'autunno, quando i giorni

sono più brevi, esso si forma a ogni ora del giorno, mentre d'estate non si forma a mezzogiorno. Non si formano più di due arcobaleni insieme, e di essi ciascuno è di tre colori, e i colori sono identici e dello stesso numero, più deboli nell'arcobaleno esterno e in posizione opposta. Infatti l'arcobaleno interno ha la prima, e maggiore, fascia della circonferenza rossa mentre quello esterno ha rossa la fascia più piccola e vicina a questa; ciò vale analogamente per le altre fasce. E sono questi pressoché gli unici colori che i pittori non possono produrre: mentre infatti essi ottengono alcuni colori per mescolanza, il rosso, il verde e il blu non si ottengono per mescolanza, mentre si trovano nell'arcobaleno. Il colore in mezzo tra il rosso e il verde appare spesso giallo-arancione[...]. (*Meteorologia*)

(Fig. 1.)

Ma perché appare l'arcobaleno? Perché quei colori, la loro disposizione, la loro inversione nel secondo arco rispetto al primo? A cosa si deve quella forma? Per Aristotele si trattava di un insolito tipo di riflessione della luce del Sole da parte delle nubi; la luce era riflessa secondo un angolo fisso, dando luogo ad un cono circolare di "raggi di arcobaleno". Capì dunque che non si trattava di un oggetto materiale quanto di un insieme di direzioni lungo le quali la luce viene fortemente diffusa verso gli occhi dell'osservatore.

(Fig. 2.)

Alessandro di Afrodisia

Alessandro di Afrodisia era un commentatore di Aristotele, (II-III sec. d.C.). Egli nota e descrive un fenomeno che nessuno prima di lui aveva evidenziato: lo spazio compreso fra i due arcobaleni è sempre più scuro rispetto al resto del cielo. A cosa è dovuta questa relativa oscurità? Perché questa "banda di Alessandro?"

(Fig. 3.)

Gli Arabi

La scienza araba apporterà un notevole contributo all'evoluzione delle conoscenze fino ad allora possedute sull'arcobaleno.

Aristotelico e neoplatonico, Ibn Sina studia l'arcobaleno e respinge il ruolo che il «Primo Maestro» attribuisce all'aria «densa e umida»: di Aristotele egli preferisce considerare solo l'idea delle goccioline di acqua disperse nell'aria quando cade la pioggia e di una riflessione sulla totalità di queste gocce. Successivamente al-Farisi riprende l'idea di Ibn Sina sulle goccioline tralasciando la riflessione e combinando le riflessioni e le rifrazioni della luce solare in ogni goccia della pioggia egli formulerà la dimostrazione del suo pensiero aiutandosi con degli specchi ustori. Le conclusioni che trae dalla sua dimostrazione sono le seguenti: la luce è più intensa sul bordo dei fasci; esiste una zona scura; i raggi che escono dalla sfera dopo due riflessioni lo fanno secondo un ordine invertito rispetto al caso di una sola riflessione.

Possedendo una spiegazione dell'arcobaleno al-Farisi realizza un dispositivo sperimentale costituito da una camera oscura (perfezionandola ed esponendone la teoria) nella quale colloca una sfera che riceve i raggi del sole. Ponendo il suo occhio in una certa direzione osserva un arco di circonferenza che riproduce i colori dell'arcobaleno. Egli annota questi colori, le loro variazioni e constata che questo caso sperimentale corrisponde a un'unica riflessione interna. Modificando la posizione dell'occhio può vedere in un'altra direzione, un altro arcobaleno i cui colori sono meno vivaci e disposti in modo inverso: essa corrisponde a due riflessioni interne. I colori osservati sono confusi. Con la costruzione delle immagini attraverso la geometria al-Farisi può passare da una sola goccia all'insieme delle gocce di pioggia distribuite nello spazio e dimostrare l'aspetto generale dell'arcobaleno: esso è composto da due archi in cui si produce l'accumulo luminoso dopo una o due riflessioni interne; il loro centro comune è sulla retta sole-occhio; superata una certa incidenza, non c'è più raggio emergente: lo spazio compreso tra i due archi è quindi più scuro: questo genera la banda di Alessandro; i colori del secondo arco sono invertiti e più pallidi rispetto a quelli del primo. Restano però da spiegare i colori. A tale scopo si ispira allora alla tradizione che descrive i colori come mescolanza di luce e oscurità: secondo la tradizione il rosso contenebbe più luce e meno oscurità del giallo, il giallo del verde, il verde del violetto. Dal momento

che in uno stesso punto di uscita convergono raggi associati a più incidenze differenti, che i diversi coni emergenti (ustori e opposti) si incrociano e si rafforzano, e producono una o due immagini a partire da uno stesso fascio incidente di raggi luminosi paralleli, al-Farisi può ipotizzare che i colori dell'arco sono differenti, ravvicinati, compresi fra il blu, il verde, il giallo e il rosso nerastro, e provengono dall'immagine di una fonte luminosa intensa che colpisce l'occhio per riflessioni e rifrazioni, o per una combinazione delle due. «Non è più la mescolanza di luce e oscurità a produrre il colore, ma l'avvicinamento e la sovrapposizione di due o più immagini».

Al Farisi vive in un periodo di declino della civiltà araba: con la costituzione dell'impero ottomano (1299) decadono le arti e le scienze; le sue scoperte non avranno seguito nel mondo arabo e non saranno conosciute in Occidente.

(Fig. 4.)

Grossatesta e Bacone

Nel Medioevo, sia la concezione aristotelica sia quella araba erano conosciute grazie alle traduzioni delle opere greche e arabe in latino. Il maestro di teologia Roberto Grossatesta fu il primo a fornire una base per le leggi ottiche della rifrazione e riflessione. Inoltre egli fornisce una spiegazione corretta dell'arcobaleno: egli analizza tre ipotesi possibili: che i raggi siano diretti dentro una nube concava in modo da illuminarla, che essi siano riflessi sulla convessità di una massa acquosa e che essi vengano rifratti attraverso strati della nube di densità crescente. Egli esclude le prime due ipotesi sulla base di osservazioni empiriche: se i raggi fossero diretti ci sarebbe nella nube un'illuminazione uniforme non secondo la forma di un arco ma secondo la forma dell'apertura della nube attraverso cui i raggi del sole vi entrano; se i raggi fossero riflessi accadrebbe che tanto più il sole è alto tanto più alto sarebbe l'arcobaleno, che è il contrario di ciò che si osserva. Di conseguenza resta solo l'ipotesi della rifrazione, nonostante la poca chiarezza della spiegazione di Grossatesta per giustificarla. Ruggero Bacone, grande studioso della seconda metà del 1200, fu il primo ad effettuare la misura dell'altezza massima del sole sull'orizzonte oltre la quale non appare l'arcobaleno, rilevata con l'uso di un astrolabio: 42° . Bacone tuttavia predilige la spiegazione aristotelica e attribuisce la formazione dell'arcobaleno alla riflessione dei raggi solari su un gruppo di goccioline che varia con la posizione dell'osservatore cioè: «è impossibile che due persone vedano lo stesso arcobaleno, tanti sono gli arcobaleni quanti gli osservatori».

Teodorico di Freiberg

Il tedesco Teodorico di Freiberg unifica le teorie di Grossatesta e di Bacone sostenendo che i raggi solari, nell'arcobaleno vengono riflessi e rifratti all'interno della stessa goccia di pioggia ed è anche conosciuto per aver dato una spiegazione teorica accurata di entrambi, il primario ed il secondario arcobaleno nel 1307. Egli spiegò l'arcobaleno primario, notando che "quando la luce solare cade sulle singole gocce di umidità, i raggi subiscono due rifrazioni (una all'ingresso ed una all'uscita) ed una riflessione (sul retro della goccia) prima di essere trasmessa all'occhio dell'osservatore". Spiegò l'arcobaleno secondario attraverso un'analisi simile che coinvolgeva due rifrazioni e due riflessioni. Egli inoltre fu il primo ad intuire che ciò che si osserva nelle bocce d'acqua, non è ciò che avviene nell'intera nuvola, ma nelle singole gocce. Osservando i raggi che attraversano una boccia riempita d'acqua, si accorge che per ogni posizione del globo possono essere visti raggi di un solo colore; ogni goccia nella nuvola è perciò responsabile di un solo colore e i diversi colori che raggiungono l'occhio provengono da gocce in diverse posizioni. Ciò che mancava a Teodorico e a tutti i medievali è la comprensione della formazione dei colori e del vero ruolo della rifrazione associata alla deviazione dei raggi, ma non alla loro dispersione, cioè alla deviazione dei colori ad angoli differenti.

(Figg. 5 e 6.)

Cartesio

Cartesio, nel 1637, migliorò ulteriormente questa spiegazione. Sapendo che la dimensione delle gocce di pioggia non sembrava interessare l'arcobaleno osservato, egli sperimentò il passaggio di raggi di luce attraverso una grande sfera di vetro riempita di acqua. Misurando gli angoli dei raggi

emergenti, anch'egli concluse che l'arco primario era causato da una singola riflessione interna all'interno della goccia e che il secondario poteva essere causato da due riflessioni interne. Mediante la sua legge della rifrazione calcolò correttamente gli angoli di entrambi gli archi. La sua spiegazione per i colori, tuttavia, era basata su una versione meccanica della teoria tradizionale la quale prevedeva che i colori erano prodotti da una modifica della luce bianca.

(Fig. 7.)

Isaac Newton

Newton fu il primo a dimostrare che la luce bianca era composta dalla luce di tutti i colori dell'arcobaleno, i quali potevano essere separati in uno spettro completo di colori da un prisma di vetro, respingendo la teoria che i colori erano prodotti da una modifica della luce bianca. Egli mostrò anche che la luce rossa veniva rifratta meno della luce blu, il che portò alla prima spiegazione scientifica delle maggiori caratteristiche dell'arcobaleno.

(Figg. 8 e 9.)

Young, Airy e Mie

La teoria corpuscolare della luce di Newton non fu in grado di spiegare gli arcobaleni soprannumerari, ed una spiegazione soddisfacente non fu trovata prima che Thomas Young non capì che la luce si comporta come un'onda sotto certe condizioni, e può interferire con se stessa. Il lavoro di Young fu rifinito nel 1820 da George Biddel Airy, che spiegò la dipendenza della intensità dei colori dell'arcobaleno dalla dimensione delle gocce di acqua. Le descrizioni fisiche moderne sono basate sullo scattering Mie, esposto in un lavoro pubblicato da Gustav Mie nel 1908. Spesso si afferma che la descrizione scientifica è semplicemente un problema di ottica geometrica risolto molto tempo fa; non è così: una teoria soddisfacente sull'arcobaleno è stata realizzata solo negli ultimi anni e non coinvolge solo l'ottica geometrica ma anche e in maniera rilevante tutto ciò che sappiamo sulla natura della luce.

L'uomo si cimenta con la spiegazione scientifica dell'arcobaleno da oltre duemila anni: questa storia ci insegna che ogni spiegazione scientifica non elimina quel residuo di inesplicabilità che da secoli colma di mistero i fenomeni naturali e suscita stupore in chi li osserva.

L'ARCOBALENO

Gli arcobaleni sono visibili durante o dopo i temporali, solo se il Sole ha un'elevazione inferiore a 42° , da ciò si deduce che mediamente non sono visibili da tre ore dopo l'alba, fino a tre ore prima del tramonto. L'arco luminoso e colorato che siamo soliti vedere in cielo dopo uno scroscio di pioggia è l'arcobaleno primario la cui caratteristica principale è sicuramente la varietà di colori. Questi possono variare per luminosità e nitidezza ma seguono sempre la stessa sequenza dall'interno verso l'esterno: violetto, blu, verde, giallo, arancio e rosso.

Le altre caratteristiche dell'arcobaleno passano molto spesso inosservate. Più in alto nel cielo rispetto all'arco primario vi è l'arco secondario nel quale, i colori si susseguono in ordine rovesciato. Inoltre una più attenta osservazione ci porterà a scorgere tra i due archi una regione di cielo più scura rispetto al cielo circostante; questa regione scura prende il nome di banda scura d'Alessandro (della scoperta del filosofo di Afrodizia si è già parlato nella parte storica).

La fascia generalmente appare più scura delle regioni esterne agli archi perché la luce in quella zona viene polarizzata dalle gocce d'acqua e convogliata verso le parti esterne.

Un'altra caratteristica che si osserva talvolta è una serie di bande deboli (solitamente rosa e verdi), chiamati archi soprannumerari, nel lato interno dell'arco primario che possono apparire più raramente anche nel lato esterno dell'arco secondario.

Per semplicità possiamo considerare che la loro origine sia dovuta alle riflessioni interne alle grosse gocce d'acqua quando queste contengono granuli di pollini, pulviscolo atmosferico, o semplicemente oscillano e cambiano forma nelle rotazioni veloci e casuali durante la precipitazione.

L'arcobaleno primario ha semiapertura da 38.72° a 42.86° (arco primario). I colori del primario si

formano per rifrazione e per la riflessione interna della luce solare nelle gocce d'acqua: quando il fascio di luce passa dentro una goccia viene rifratto, riflesso e quindi nuovamente rifratto proprio come accade in un prisma. Se nella goccia avvengono due riflessioni, invece di una sola, si forma un secondo arco (secondario) con i colori simmetrici rispetto al primo e con semiapertura variabile da 49.49° a 56.81° . In tal caso il secondo arco avrà uno spessore pari al doppio del primo, ma una luminosità ridotta del 43%. Si possono formare anche arcobaleni di ordine superiore al secondo, il cui numero d'ordine è determinato dal numero di riflessioni interne alla goccia d'acqua.

MISURATORE DI ARCOBALENI

La semiapertura del cono dell'arcobaleno è quindi di circa 42° ma, a causa della dispersione non la si può misurare con grande precisione. Per fare una misura bisogna avere un bastone da arcobaleno. Questo consiste in una bacchetta con un disco di cartone, attaccato a un manicotto che gli impedisce di inclinarsi, che può scorrere su e giù. Per effettuare la misura, bisogna tenere la bacchetta vicino all'occhio migliore e spostare il disco finché ricopre l'arco dell'arcobaleno. Si misura la distanza L.

L'angolo α si può ricavare da L ed R (che è il raggio del disco di cartone):

$$\alpha = \operatorname{artg}\left(\frac{R}{L}\right)$$

(Fig. 10.)

Abbiamo realizzato un bastone da arcobaleno utilizzando un tubo di alluminio del diametro di 1 cm circa, un disco di cartone usato dai pasticciere come supporto per le torte di 22 cm di diametro e due cilindri di teflon forati.

Il disco è stato forato al centro e collocato tra i due cilindri, in modo che il tubo di alluminio potesse entrare nel foro dei tre oggetti.

MISURE ED ESPERIMENTI

In un bel pomeriggio di sole ci siamo recati al distaccamento dei Vigili del Fuoco di un Comune confinante con quello dove si trova la nostra scuola. I pompieri hanno azionato un idrante nel cortile della caserma nebulizzando per quanto possibile l'acqua e determinando la formazione dell'arcobaleno.

Come si vede nelle foto l'arco non è completo per problemi di "buon vicinato": data la posizione del Sole si sarebbe dovuto inviare il getto d'acqua anche in una parte di proprietà privata confinante con il perimetro del distaccamento.

Tuttavia è possibile notare in diverse foto oltre all'arco primario, il secondario; in una di esse si scorge un arco soprannumerario.

Coprendoci bene ci siamo avventurati sotto la nube di goccioline create dal getto; in quella posizione, ruotando un po' gli occhi è possibile vedere un arcobaleno circolare; questa visione, così emozionante non è stato possibile fotografarla con i mezzi a nostra disposizione, se non "a pezzi", nella prima di queste foto è ben visibile la banda di Alessandro.

Infine, abbiamo utilizzato il nostro bastone da arcobaleno per misurare la semiapertura del primario:

- abbiamo cercato di far coincidere il bordo del disco dello strumento con la parte interna dall'arco primario in corrispondenza del violetto;
- quindi rilevato la lunghezza (L) che separava il disco dal nostro occhio;
- sapendo che la lunghezza del raggio (R) del disco era 11cm, ci siamo ricavati l'ampiezza dell'angolo, che corrisponde alla semiapertura dell'arcobaleno:

$$\alpha = \operatorname{artg}\left(\frac{R}{L}\right) = \operatorname{artg}\left(\frac{11\text{ cm}}{14\text{ cm}}\right) \cong 39^\circ$$

L'approssimazione utilizzata nelle misure è dovuta alla difficoltà incontrata nel posizionare precisamente il disco in corrispondenza dell'arco color violetto, abbiamo deciso di adottare un'incertezza per la misura di L pari ad 1 cm, di conseguenza anche l'angolo è stato scritto con due

cifre significative:

$$\alpha(39\pm 1)^\circ$$

Il risultato ottenuto risulta compatibile con la semiapertura interna dell'arco. L'uso dello strumento potrà essere più agevole sostituendo il disco di cartone attuale con uno di diametro maggiore in modo che lo si possa tenere più distante dall'occhio per effettuare la misura.

(Figg. 11, 12, 13, 14 e 15.)

ESPERIMENTO SUGLI ANGOLI DI RIFRAZIONE

Per mostrare che raggi di colore diverso sono diversamente diffusi da un mezzo trasparente abbiamo utilizzato due laser uno di colore rosso e uno di colore verde e una sfera di vetro a rappresentare la goccia d'acqua.

Nella prima fase dell'esperimento abbiamo posizionato il laser rosso ad una determinata altezza, in modo che il raggio passasse per la circonferenza massima orizzontale della sfera e successivamente collocato due schermi, uno davanti e l'altro dietro la sfera, alla stessa altezza.

Nella seconda fase abbiamo visto come il raggio del laser si rifrangeva entrando nella sfera, poi in parte si rifletteva e in parte si rifrangeva andando a colpire lo schermo di fronte questa e infine dopo una terza rifrazione usciva dalla sfera colpendo lo schermo dietro la medesima.

A questo punto, con un metro flessibile abbiamo misurato le distanze tra i punti di incidenza dei raggi

Utilizzando una proporzione abbiamo ricavato l'angolo al centro α che insiste sull'arco delimitato dal punto di ingresso del raggio e dal punto di uscita:

$$\alpha: 360^\circ = a : C$$

dove a è l'arco suddetto e C la circonferenza della sfera.

$$\alpha: 360^\circ = 12,78\text{cm} : 37,68\text{cm}$$

$$\alpha = (360^\circ * 12,78\text{cm}) / 37,68\text{cm} = 122,10^\circ$$

Utilizzando una ben nota proprietà degli angoli al centro e alla circonferenza, si ottiene:

$$\beta = \alpha/2 = 122,10^\circ/2 = 61,05^\circ$$

(Fig. 16.)

La stessa misura è stata fatta con il laser verde, ottenendo:

$$\alpha : 360^\circ = 8,18\text{cm} : 37,68\text{cm}$$

$$\alpha = (360^\circ * 8,18\text{cm}) / 37,68\text{cm} = 78,15^\circ$$

$$\beta = \alpha/2 = 78,15^\circ/2 = 39,08^\circ$$

Come si vede l'angolo β è minore per il verde rispetto al rosso è quindi la traiettoria dei raggi è diversa, il verde viene rifratto di più rispetto al rosso. Tale angolo però non è da confondersi con la semiapertura dell'arcobaleno, ma è solo un parametro che evidenzia la diversa rifrazione.

(Fig. 17.)

L'ARCOBALENO... IN UNA STANZA!

Infine abbiamo riprodotto l'arcobaleno su una parete utilizzando un proiettore di diapositive, la sfera di vetro o un matraccio pieno d'acqua per simulare il comportamento delle goccioline (fig. 18). Nella caso della sfera di vetro si può vedere nitidamente l'arco proiettato sul muro retrostante il proiettore; un arco secondario molto tenue viene proiettato sulle pareti laterali della stanza ed è impossibile da apprezzare nelle foto. L'abbiamo potuto visualizzare avvicinando uno schermo bianco alla sfera di vetro; è possibile notare la successione dei colori invertita e apprezzare la banda di Alessandro tra i due archi (fig. 19). Infine abbiamo proiettato l'arcobaleno con il matraccio pieno d'acqua con il collo in alto per evitare di doverlo chiudere in modo durevole. L'ampiezza dell'arco è molto maggiore, la sua nitidezza molto ridotta, accade infatti che la luce amplifichi le irregolarità del vetro (fig. 20). Dovremmo ripetere l'esperimento con un contenitore più finemente lavorato, ma si sa i matracci non servono a produrre gli arcobaleni! Comunque ci proveremo.

CONCLUSIONI

A conclusione di questa esperienza possiamo dire innanzitutto che i risultati ottenuti con il misuratore di arcobaleni sono stati più che soddisfacenti, dato che l'arcobaleno si può formare con una semiapertura minima di 38.72° e il nostro arcobaleno aveva una semiapertura di all'incirca 39° . Ricreare un arcobaleno al distaccamento dei pompieri con l'aiuto di un loro idrante è stata un'esperienza a dir poco coinvolgente; questo soprattutto quando ci siamo posizionati sotto il getto d'acqua e abbiamo avuto la prima e, speriamo non l'unica occasione di trovarci "dentro" l'arcobaleno, per non parlare poi della visione di tutte le bande colorate intorno a noi che è stata una cosa meravigliosa. Inoltre sugli angoli di rifrazione dei colori, e quindi anche sui rispettivi indici di rifrazione, c'è da dire che non possiamo confrontare i nostri risultati con quelli che di solito si trovano studiando l'arcobaleno perché abbiamo eseguito questo esperimento su un mezzo diverso dall'acqua (il vetro); però avendo lavorato in maniera analoga, cioè considerando la boccia come se fosse una goccia d'acqua, abbiamo constatato che la luce, viene diffusa in modo diverso in base al colore (infatti i due angoli hanno avuto un risultato diverso tra loro) come accade con le goccioline d'acqua. Inoltre quando abbiamo proiettato il raggio laser rosso sulla sfera di vetro abbiamo notato che esso era poco visibile al suo interno e ci aspettavamo che accadesse lo stesso anche per il raggio verde; invece proiettandolo siamo rimasti soddisfatti e nello stesso tempo stupiti nel vedere il suo tragitto molto più chiaramente. L'ultima osservazione realizzata con la sfera di vetro ed il matraccio per ottenere l'arcobaleno proiettato su una parete ci ha colpito molto perché mediante un semplice apparato possiamo ricreare arco primario e secondario e perfino la banda di Alessandro. Sicuramente varrà la pena trovare un contenitore migliore per realizzare l'esperimento con l'acqua.

Bibliografia

M.H. Nussenzveig, L'arcobaleno, in *Il colore*, quaderni de Le scienze, giugno 1994
Bernard Maitte, *Storia dell'arcobaleno*, Donzelli Editore
Colin Siddons, *Esperienze di fisica*, La fisica nella scuola, Quaderno 15, aprile-giugno 2004

FIGURE



Fig. 1. L'altezza dell'arcobaleno dipende dall'altezza del Sole come aveva già notato Aristotele.

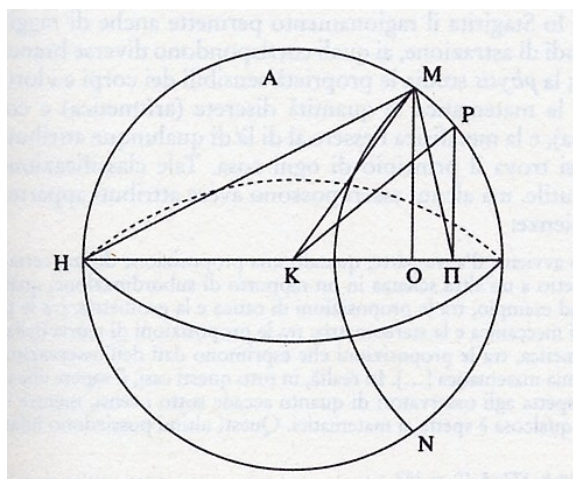


Fig. 2. La spiegazione di Aristotele dell'arcobaleno: H è il Sole all'orizzonte, K è la posizione dell'osservatore, M quella della nube.



Fig. 3. Si vedono nitidamente l'arco primario, il secondario con i colori invertiti, la fascia tra i due archi sensibilmente più scura, e accennato nella parte interna del primario un arco sovranumerario (più chiaro nella foto).

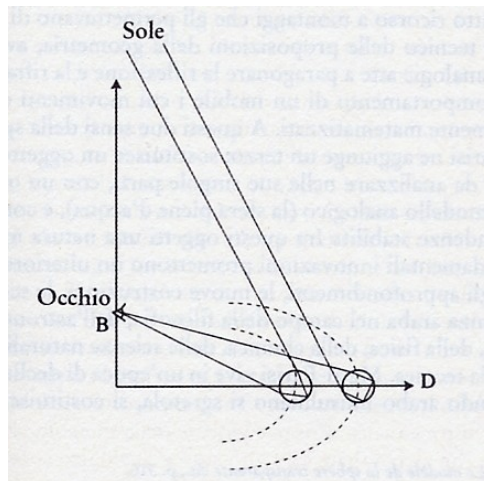


Fig. 4. L'interpretazione di Al-Farisi: si noti che una singola riflessione singola all'interno delle gocce determina l'arco primario mentre due riflessioni quello secondario.

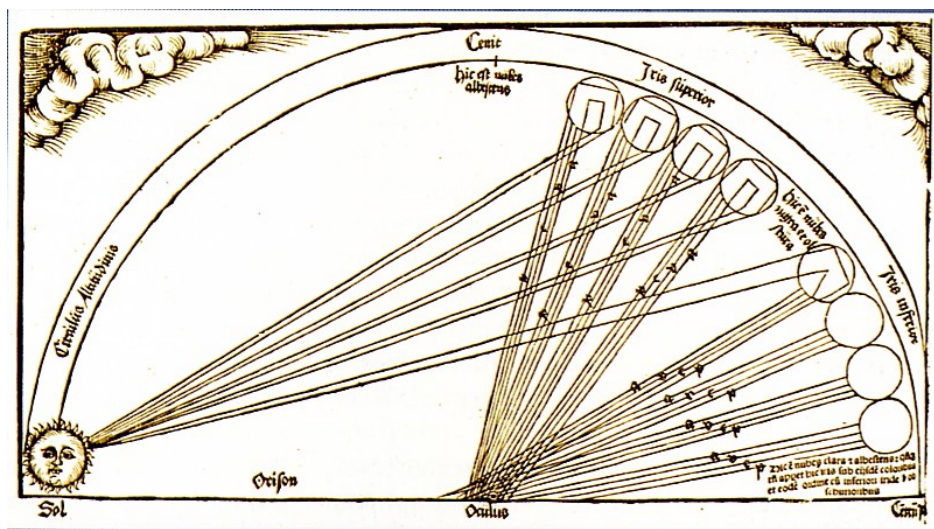


Fig. 5. Teodorico di Freiberg: spiegazione dell'arcobaleno secondario.

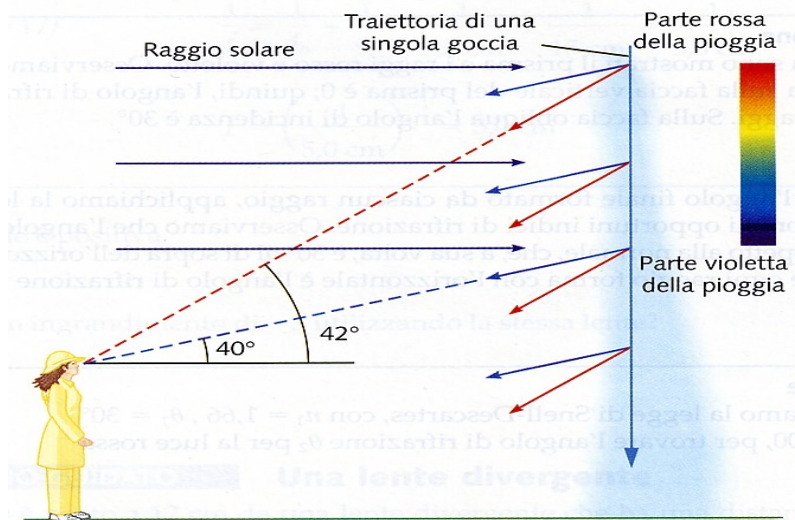


Fig. 6. Teodorico fu il primo a capire che una goccia è responsabile di un colore che giunge all'occhio dell'osservatore.

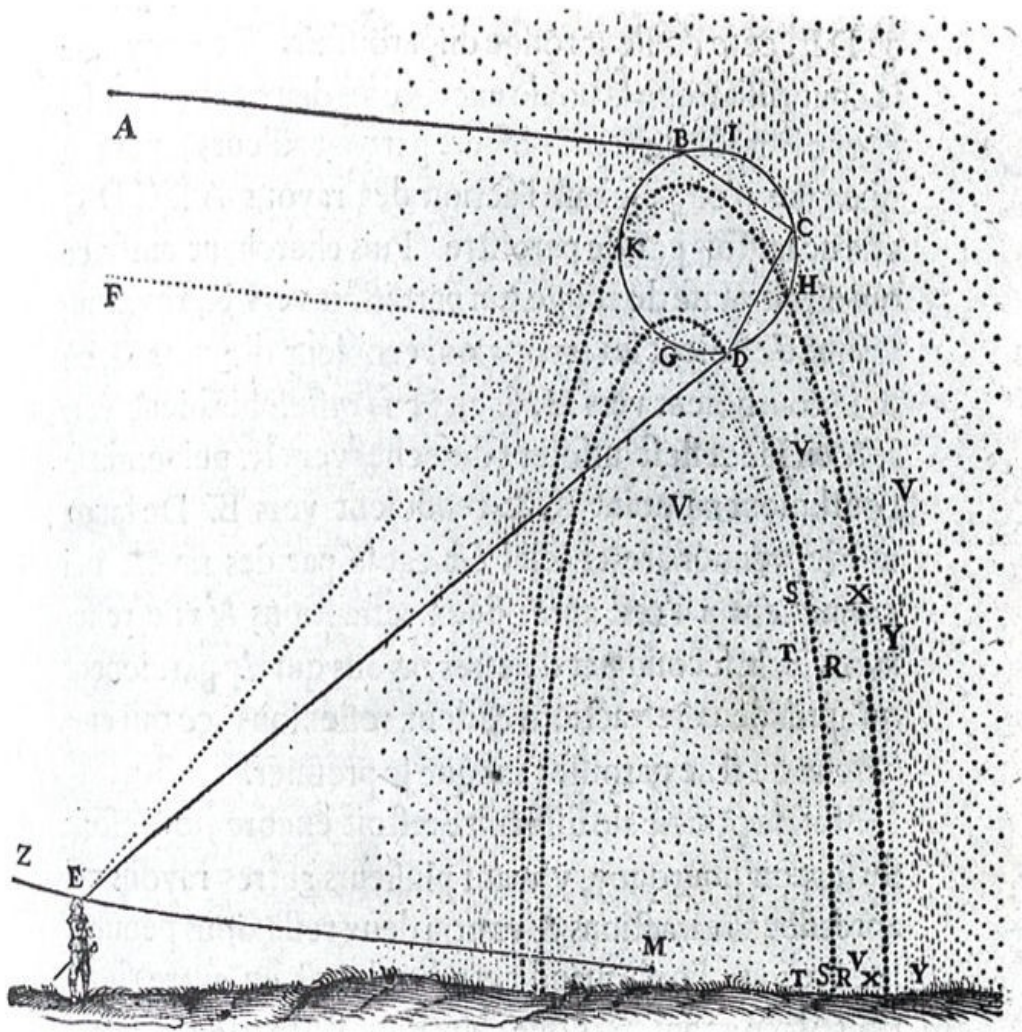


Fig. 7. Cartesio spiega gli arcobaleni primario e secondario.



Fig. 8. Arcobaleno sopra la casa di Newton a Woolsthorpe, dove lo scienziato si ritirò durante la peste del 1665-1666 e dove concepì la maggior parte delle sue scoperte.

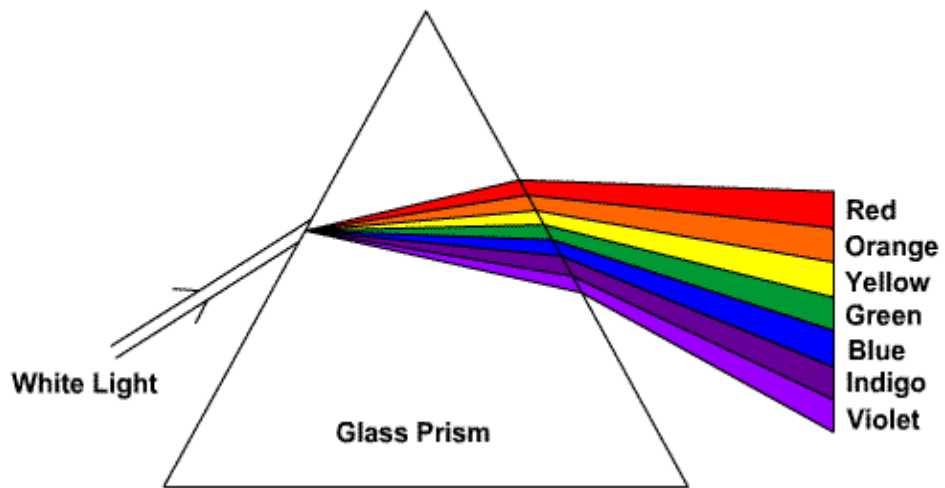


Fig. 9. Schema dispersione.



Fig. 10. Il nostro bastone da arcobaleno.



Fig. 11. Arcobaleno fotografato nel cortile del distaccamento dei pompieri: da sinistra si vede il getto d'acqua manovrato da un vigile del Fuoco, si osserva nitidamente l'arcobaleno primario e si scorge, sullo sfondo dell'asfalto, il secondario.



Fig. 12. Arcobaleno fotografato "bagnandosi": si deduce dalle ombre che il sole è alle spalle, a destra si vedono chiaramente gli archi primario e secondario e, tra i due, la banda di Alessandro.



Fig. 13. Si vedono ancora il primario, il secondario, la banda di Alessandro, mentre si sta realizzando una misura con il bastone da arcobaleno.



Fig. 14. Sul bordo interno dell'arco primario si scorge un arco sovranumerario (più chiaro).

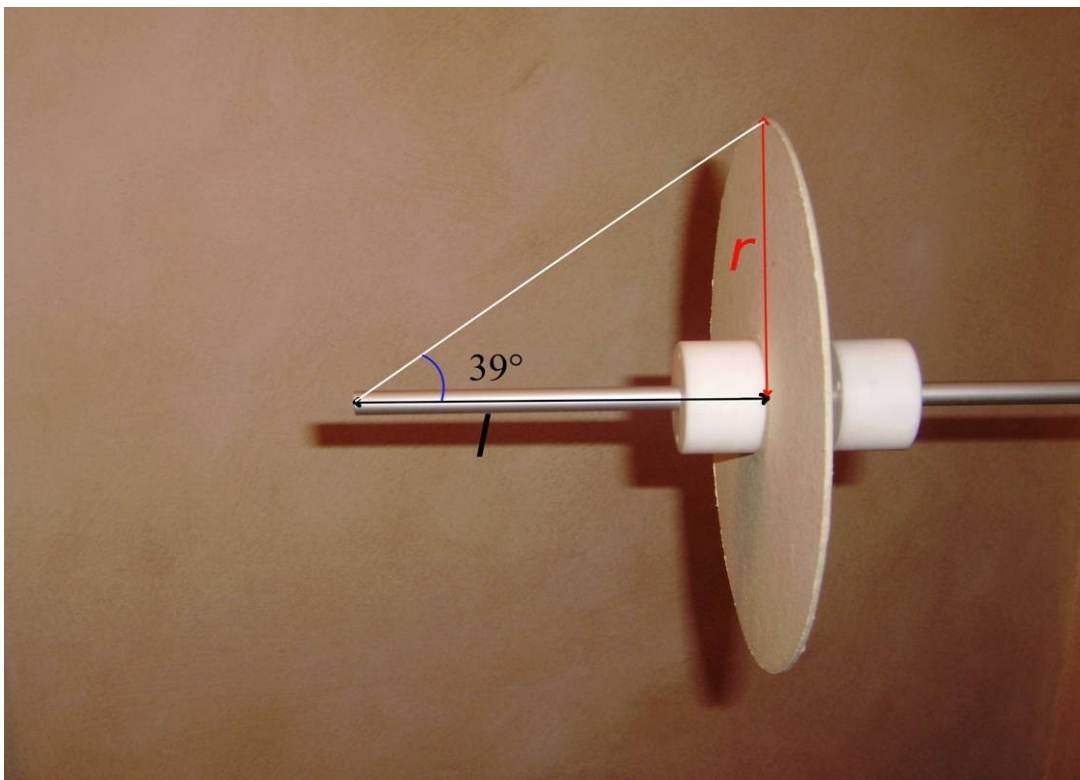


Fig. 15. Risultato sulla semiapertura dell'arcobaleno

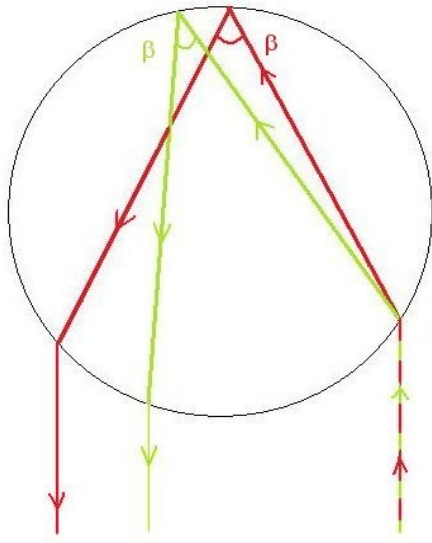


Fig. 16. Gli angoli nel nostro esperimento.

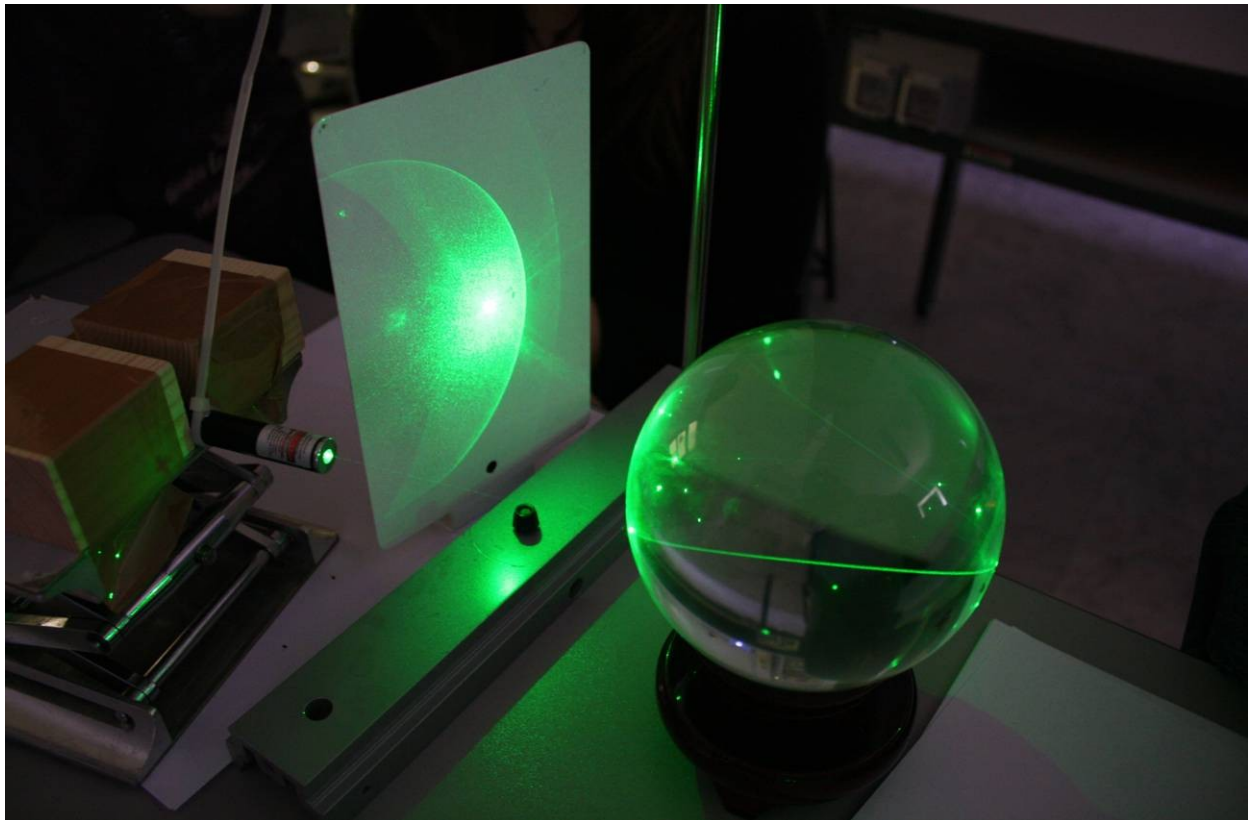


Fig. 17. Foto sul raggio laser verde che si riflette e si rifrange all'interno della boccia di vetro.



Fig. 18.

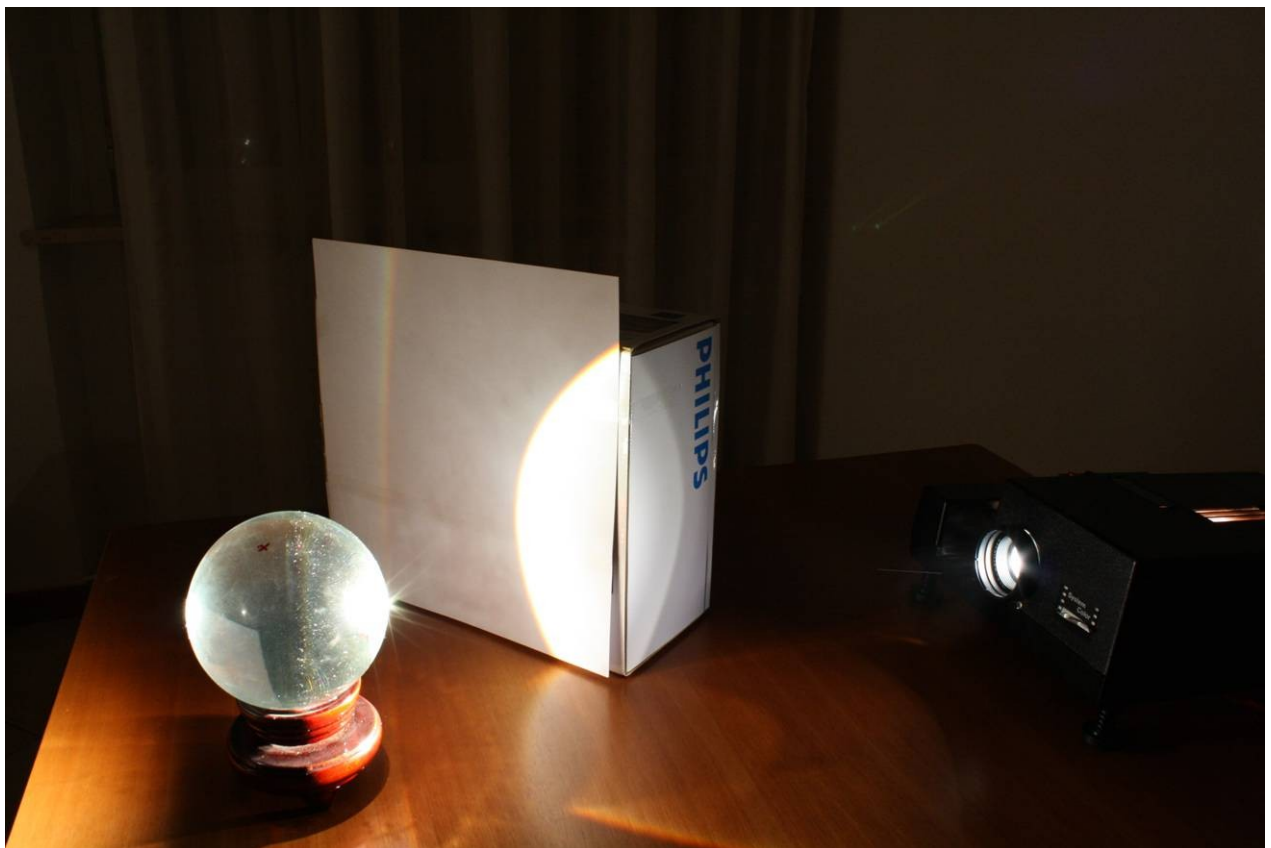


Fig. 19.



Fig. 20.