

ALMA MATER STUDIORUM · UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

Scuola di Scienze
Dipartimento di Fisica e Astronomia
Corso di Laurea in Fisica

L'esperimento di Grimaldi e la storia della diffrazione

Relatore:
Prof. Eugenio Bertozzi

Presentata da:
Vanessa Merli

Anno Accademico 2017/2018

Abstract

Questa tesi ricostruisce il contributo di Francesco Maria Grimaldi alla comprensione del fenomeno di diffrazione, da lui sperimentalmente studiato per la prima volta nella seconda metà del Seicento. Il primo capitolo di questo elaborato vuole mostrare i contributi offerti da Grimaldi all'astronomia e alla geodesia in collaborazione con Riccioli, gesuita e astronomo bolognese, ed anche il rapporto tra scienza e fede, in particolare tra i Gesuiti e l'Università di Bologna. Il secondo capitolo è focalizzato sul *De lumine*, opera postuma di Grimaldi, e sui due esperimenti riguardanti la diffrazione ivi contenuti. Il terzo capitolo viene dedicato alla storia della diffrazione analizzando la trattazione che ne fecero gli scienziati dopo Grimaldi: si parte da Newton e dalla sua visione corpuscolare della luce per arrivare ad Huygens, Young e Fresnel e all'elaborazione della teoria ondulatoria, che permette di spiegare correttamente il fenomeno della diffrazione.

Indice

Introduzione	v
1 Francesco Maria Grimaldi e il suo tempo	1
1.1 Biografia	1
1.2 Grimaldi gesuita: fra scienza e fede	2
1.3 Riccioli e Grimaldi: contributo all’astronomia e alla geodesia	4
1.4 Tracce su Grimaldi	9
2 <i>De lumine</i>	15
2.1 Struttura	17
2.2 Esperimenti sulla diffrazione	20
2.2.1 Primo esperimento	21
2.2.2 Secondo esperimento	26
2.3 La luce e il colore secondo Grimaldi	27
3 Dopo Grimaldi: breve storia della diffrazione	31
3.1 Isaac Newton	31
3.2 Christiaan Huygens	34
3.3 Thomas Young	37
3.4 Augustin-Jean Fresnel	39
Conclusioni	50
Bibliografia	51

Introduzione

Il seguente elaborato, suddiviso in tre capitoli, è dedicato alla figura del gesuita Francesco Maria Grimaldi, fisico e astronomo bolognese, e al tempo in cui visse. Inizialmente, nel primo capitolo, viene presentata una breve biografia contenente i punti salienti della sua vita e della sua formazione avvenuta nei vari Collegi del territorio emiliano. In seguito, viene analizzato il rapporto tra scienza e fede partendo da come l'insegnamento entrò nella Compagnia di Gesù e come la matematica e le altre materie scientifiche divennero sempre più importanti all'interno dei Collegi anche grazie alle necessità della classe sociale medio-alta. La Compagnia iniziò a rivestire un ruolo molto importante nel territorio bolognese tant'è vero che nacque una sorta di rivalità con l'Università di Bologna che si sentì "minacciata" dall'educazione autosufficiente ed alternativa della Compagnia. Nonostante ciò tra i Gesuiti, l'Università e i nobili bolognesi ci fu una forte collaborazione ed uno scambio di dati ed idee. Segue un paragrafo dedicato alla collaborazione tra Grimaldi e Riccioli, anch'egli gesuita e astronomo bolognese; entrambi diedero un grande contributo all'astronomia e alla geodesia: verificarono la legge di Galileo mediante la caduta libera dei gravi dalla torre degli Asinelli e furono incaricati di determinare la linea meridiana in S. Petronio; inoltre Grimaldi fu in grado di disegnare accuratamente la mappa lunare con la rispettiva nomenclatura tuttora in uso. Il primo capitolo si conclude con l'analisi delle tracce su Grimaldi che si possono trovare principalmente a Bologna: la lapide commemorativa sulla sua casa natale in via San Felice, il ritratto situato a Palazzo Poggi, il cratere lunare a lui dedicato e la via che porta il suo nome in occasione del terzo centenario della morte. Il secondo capitolo è dedicato al *De lumine*, opera postuma di Grimaldi nota per i suoi esperimenti sulla diffrazione. Dapprima viene esaminata la struttura del trattato e vengono sottolineate le accortezze prese per favorire la pubblicazione dell'opera che andava contro la teoria aristotelica dell'accidentalità

della luce; in seguito vengono analizzati i due esperimenti sulla diffrazione ivi contenuti. Da essi Grimaldi capì che la luce non si propagava in linea retta in quanto "aggirava" gli ostacoli e che il fenomeno non era riconducibile né alla riflessione né alla rifrazione, per questo conìò il termine *diffrazione* ad indicare un nuovo modo di propagazione della luce interpretandola come un fluido a velocità altissima, ma non infinita quindi calcolabile. Il terzo capitolo ha lo scopo di mostrare come il fenomeno della diffrazione sia stato interpretato e spiegato da altri scienziati dopo Grimaldi. Innanzitutto va sottolineato che le sue scoperte furono dimenticate probabilmente a causa della fama che ebbe Newton tra Seicento e Settecento. Newton esaminò il fenomeno della diffrazione nel terzo libro dell'*Opticks*, ma non lo riuscì ad interpretare secondo la teoria corpuscolare e lo ricondusse ai fenomeni di rifrazione e riflessione che era riuscito a spiegare molto bene con la sua teoria. Nonostante la teoria corpuscolare newtoniana non sia riuscita a spiegare tutti i fenomeni della luce, prese piede grazie alla fama dello scienziato ed ebbe molti sostenitori per tutto il Settecento. Una voce fuori dal coro fu quella del fisico olandese Cristiaan Huygens che nel Seicento propose la teoria ondulatoria secondo la quale la luce, similmente al suono, era associata ad un'onda; questa teoria fu ripresa soltanto nell'Ottocento quando il fisico inglese Thomas Young dimostrò la natura ondulatoria della luce con l'esperimento della doppia fenditura. Infine Fresnel, all'oscuro delle teorie precedenti, ottenne gli stessi risultati di Young ed in più misurò la posizione delle frange chiare e scure che si presentavano all'interno e all'esterno dell'ombra dell'oggetto di diffrazione e ricavò le formule capaci di calcolare la loro posizione.

Questa tesi si propone di riportare alla luce gli esperimenti di diffrazione condotti da Grimaldi, il primo ad osservare questo fenomeno e a denominarlo, e di comprendere l'evoluzione del concetto di diffrazione nel corso della storia focalizzandosi sulla teoria ondulatoria.

Capitolo 1

Francesco Maria Grimaldi e il suo tempo

1.1 Biografia

Francesco Maria Grimaldi nacque a Bologna il 2 aprile 1618 da Paride Grimaldi, mercante di seta appartenente al ramo emiliano della casata ligure, e da Anna Cattani, di nobile famiglia bolognese. Grimaldi entrò nella Compagnia di Gesù nel noviziato di S. Ignazio¹, a Bologna, il 18 marzo 1632, all'età di 14 anni. Ed è proprio qui che probabilmente Grimaldi conobbe per la prima volta Riccioli², famoso astronomo e gesuita, il quale svolgeva il ruolo di coadiutore del maestro dei novizi. Il noviziato durò tre anni, l'ultimo dei quali fu trascorso a Novellara dove Grimaldi intraprese gli studi di retorica.

Nel 1635 si trasferì a Parma nel collegio di S. Rocco dove iniziò il primo dei tre anni del corso di filosofia seguendo le lezioni di logica. Qui incontrò nuovamente Riccioli che insegnava teologia. Nel 1636 si trasferì a Ferrara e frequentò le lezioni di fisica. I suoi primi studi in matematica potrebbero risalire all'anno precedente, quando a Parma incontrò per la seconda volta Riccioli, oppure ad un corso privato a Ferrara con Niccolò Cabeo³ che in

¹La Chiesa e il Collegio erano collocati in via Belle Arti, 54. Oggi vi sono situati l'Accademia di Belle Arti e la Pinacoteca Nazionale.

²Giovanni Battista Riccioli (Ferrara, 17 aprile 1598 - Bologna, 25 giugno 1671) fu un gesuita e astronomo. Sostenitore del geocentrismo, elaborò un proprio sistema, rifiutando quello tolemaico, copernicano e tychonico.

³Niccolò Cabeo (Ferrara, 26 febbraio 1586 - Genova, 30 giugno 1650) fu un gesuita, filosofo e matematico.

collegio ricopriva il ruolo di confessore. Nel 1637-38 ritornò a Bologna a S. Ignazio dove frequentò le lezioni di metafisica del suo terzo ed ultimo anno del corso di filosofia.

Nel 1638 fu assegnato al collegio di S. Lucia in via Castiglione 36 a Bologna dove risiedette per il resto della sua vita. Dal 1638 al 1642 Grimaldi ebbe l'incarico come lettore⁴ di discipline umanistiche. Ed è solo in seguito, dal 1642 al 1645, che iniziò a studiare teologia, avendo fra i maestri Riccioli. Alla fine degli studi, divenne sacerdote nel 1645. Negli anni 1646-47, dapprima ebbe nuovamente l'incarico come lettore di lettere umane, poi tenne un corso di filosofia in seguito al raggiungimento del dottorato nel 1647. Più tardi, dal 1648 fino alla sua morte, iniziò ad insegnare matematica⁵ in seguito alle sue condizioni di salute⁶ che necessitavano il trasferimento ad un compito meno impegnativo. In quegli anni Riccioli fu esentato dagli impegni didattici per dedicarsi alla stampa dell'*Almagestum novum*.

Durante gli anni 1640-1650 Grimaldi si occupò di astronomia collaborando con Riccioli.

Il 1 marzo 1651 pronunciò i quattro voti diventando così gesuita.

Dal 1655 al 1663 lavorò al *De lumine*, opera importantissima all'interno della quale espose le sue scoperte sulla diffrazione della luce a cui diede il nome. L'opera venne terminata poco prima della sua morte e venne pubblicata postuma.

Morì il 28 dicembre 1663 a Bologna.

1.2 Grimaldi gesuita: fra scienza e fede

Inizialmente all'interno della Compagnia non era previsto l'insegnamento. Fu proprio Ignazio di Loyola, fondatore della Compagnia di Gesù, a comprendere la necessità di aprire delle scuole pubbliche all'interno dei collegi. Nel 1599 venne così redatto un corso di studi unitario, indicato con il

⁴Il suo compito era quello di leggere e commentare i testi. Colui che oggi viene chiamato professore.

⁵L'insegnamento della matematica comprendeva sia le matematiche pure (aritmetica, geometria, algebra, analisi) sia quelle applicate o miste (astronomia, ottica, prospettiva, musica, meccanica, idraulica, topografia...).

⁶Nell'*Elogium perbreve*, scritto da Riccioli e posto in fondo al *De lumine*, egli scrive che Grimaldi, già indebolito dall'emottisi (malattia che colpisce le vie respiratorie), fu destinato dall'insegnamento della filosofia a quello della matematica.

nome di *Ratio studiorum*. La *Ratio studiorum* intendeva portare in Italia i modi, i programmi e i contenuti dei corsi ispirati all'Università di Parigi.

L'intero corso di studi durava tredici anni suddivisi in: sei anni di materie umanistiche (grammatica, retorica, latino...), tre anni di filosofia (comprendeva anche le lezioni di matematica, astronomia, fisica e chimica) e quattro di teologia per chi voleva entrare nell'ordine dei gesuiti.

Alla fine del Cinquecento la matematica era vista come qualcosa di indispensabile per la filosofia naturale, per questo nei collegi l'insegnamento della matematica aveva la stessa importanza di quello della filosofia. La *Ratio studiorum* prevedeva che la durata del corso di matematica fosse di un solo anno, però gli studenti più portati potevano frequentare dopo il corso lezioni private.

Con l'introduzione della *Ratio* si voleva favorire la crescita della Compagnia con nuovi membri ed avere la possibilità di penetrare nel territorio e nelle classi dirigenti. L'appoggio finanziario dei nobili e dei borghesi era indispensabile per il Collegio; in questo modo il laboratorio poteva essere dotato di attrezzature innovative. La Compagnia proponeva un'educazione autosufficiente e alternativa a quella dell'Università ed era rivolta principalmente alla classe sociale medio-alta che considerava la matematica uno *status symbol*. Proprio per questo tra i Gesuiti e l'Università nacque una sorta di rivalità⁷.

Gli scienziati dei collegi dell'Italia settentrionale del XVII secolo erano rinomati e apprezzati sia nell'ambiente ecclesiastico sia in quello universitario; tra questi nomi sono presenti quello di Grimaldi e di Riccioli. Simbolo di tale apprezzamento è il ritratto di Grimaldi che fu ammesso nella collezione dei ritratti degli studenti illustri dell'Università di Bologna.

Nel Seicento il rapporto fra scienza e fede si concretizza, anche con toni aspri, nel dibattito fra i Gesuiti e Galileo Galilei. Celebri divennero le critiche di metodo che Cristoforo Clavio⁸, considerato uno degli astronomi più autorevoli del XVII secolo, pose a Galileo Galilei nel 1661 sulle osservazioni effettuate da quest'ultimo. In astronomia i due abbracciavano infatti

⁷Cfr. Andrea Battistini, *La cultura scientifica nel collegio bolognese*, in *Dall'isola alla città. I gesuiti a Bologna*, p. 158.

⁸Cristoforo Clavio (Bamberga, 25 marzo 1538 - Roma, 12 febbraio 1612) fu un gesuita, matematico e astronomo. Noto soprattutto per aver contribuito alla definizione del calendario gregoriano.

teorie differenti: Clavio credeva nel geocentrismo, nonostante riconoscesse i problemi del sistema tolemaico, e Galileo nell'eliocentrismo.

Tuttavia, sebbene i Gesuiti abbracciassero il sistema tolemaico, erano aperti ad eventuali miglioramenti e disposti ad adottare nuovi metodi e nuovi strumenti come il telescopio; aperti alle novità, essi erano cauti nell'espone le loro teorie a differenza dei galileiani.

Nel Collegio erano presenti sia scienziati e matematici che simpatizzavano per Galileo e le sue teorie sia filosofi e teologi che si mantenevano distanti.

A Bologna il pensiero galileiano si diffuse grazie a Cesare Marsili, nobile bolognese ed amico di Galileo, e a Bonaventura Cavalieri, allievo di Galileo e lettore di matematica e astronomia all'Università.

I Gesuiti come i galileiani privilegiavano le scienze applicate. Essi si servivano della matematica e dell'astronomia per perfezionare la cartografia e per correggere gli errori del calendario giuliano, questo approccio oltre ad essere didatticamente utile era anche adatto ai nobili che scegliendo la carriera militare dovevano avere competenze in topografia, balistica, architettura e scienza delle costruzioni e fortificazioni. I Gesuiti volevano inserirsi nella società e per far questo guardavano anche le esigenze della classe nobile e borghese.

Con la nascita della nuova scienza, dalla fisica qualitativa aristotelica si passa alla fisica applicata e quantitativa. A Bologna, a differenza di altre sedi, non ci sono state forti contese tra i galileiani dell'Uniniversità e i Gesuiti di S. Lucia, ma piuttosto una collaborazione. Si assiste, infatti, ad un fitto scambio di dati e di opinioni tra gli scienziati gesuiti, universitari e nobili⁹.

1.3 Riccioli e Grimaldi: contributo all'astronomia e alla geodesia

Una volta tornato a Bologna, nel 1638, Grimaldi entrò nuovamente in contatto con Riccioli che si era stabilizzato in S. Lucia come lettore di teologia scolastica. Questo li portò a collaborare insieme fino al 1661. Grimaldi fu attivo in astronomia soprattutto negli anni 1640-1650. Già nel 1639 i due

⁹Cfr. A. Battistini, op. cit., p. 160.

iniziarono le osservazioni astronomiche e gli esperimenti che andarono a costituire le opere principali di Riccioli: l'*Almagestum novum astronomiam veterem novamque complectens* del 1651, la *Geographiae et hydrographiae reformatae* del 1661 e l'*Astronomia reformata* del 1665. Nei libri di Riccioli, i suoi collaboratori, tra cui Grimaldi in particolar modo, vengono menzionati in specifiche osservazioni, misurazioni o controlli sperimentali.

Grimaldi era considerato da Riccioli indispensabile al completamento dell'*Almagestum novum* perché oltre ad aiutarlo nelle misurazioni e nella tabulazioni dei dati, era abile anche ad ideare, costruire ed utilizzare nuovi strumenti di osservazione. Tra questi strumenti, l'unico che Riccioli menzionò e descrisse fu l'evoluzione del compasso galileiano¹⁰ nella *Geographiae et hydrographiae reformatae*. Riccioli riteneva che Grimaldi ne avesse fatto quasi uno strumento nuovo.

Nel saggio *Riccioli e Grimaldi*, Ugo Baldini ha suddiviso per anni le osservazioni, le misure e gli esperimenti che le opere di Riccioli attribuiscono a Grimaldi oppure ad entrambi. Riccioli attribuisce a Grimaldi il metodo per misurare l'altezza delle nubi e delle montagne lunari, la distanza terra-sole e la distanza terra-luna. Inoltre i due effettuarono numerosissime osservazioni sulla librazione lunare¹¹ e sui pianeti Saturno, Venere, Marte e Giove. In particolar modo si ricordano gli esperimenti della caduta dei gravi dalla torre degli Asinelli, la selenografia di Grimaldi e il calcolo della meridiana di San Petronio.

Nel 1640 Riccioli e i suoi collaboratori iniziarono gli esperimenti di caduta libera dei gravi per verificare la legge di Galileo. Prima di tutto venne costruito un pendolo con un periodo piccolissimo per poter avere misure più accurate: il semiperiodo era di 1/6 di secondo. Per tenere il conto delle oscillazioni, le decine erano numerate sulle dita, le singole oscillazioni erano numerate progressivamente usando il dialetto bolognese in cui il suono dei numeri è più breve ('un, du, tri, quatr, cinq, sei, sett, ott, nov, dies') e le centinaia ponendo dei sassolini in un'urna¹². Questo fu il loro strumento

¹⁰Si tratta del compasso di proporzione ideato e costruito da Galileo. Strumento di calcolo capace di eseguire svariate operazioni geometriche e aritmetiche.

¹¹Fenomeno dovuto al moto di rotazione e rivoluzione della Luna grazie al quale possiamo osservare un po' più della metà del suo emisfero (59%).

¹²Cfr. Maria Teresa Borgato, *Riccioli e la caduta dei gravi*, in Aa.Vv., *Giambattista Riccioli e il merito scientifico dei Gesuiti nell'età barocca*, p. 105.

per misurare il tempo nella caduta dei gravi. La torre degli Asinelli si rivelò particolarmente adatta a questo tipo di esperimenti perché è costituita da un tronco che poggia su una base cubica più larga e protetta da un parapetto. Le sfere di argilla da 8 onces ciascuna (all'incirca 226 grammi) venivano lasciate cadere dalle finestre G e D oppure dalla corona BC e cadevano sulla piattaforma YZ , in questo modo si poteva evitare di bloccare il passaggio dei pedoni vicino alla torre durante i lanci. A questi lanci parteciparono soprattutto Grimaldi e Cassiani che si posizionarono sulla corona con un pendolo, mentre Riccioli era posto sulla piattaforma con un altro pendolo di egual semiperiodo. In questo modo le misurazioni effettuate indipendentemente potevano essere confrontate. Venne trovata per tentativi a quale altezza la sferetta di argilla da 8 onces doveva essere lanciata per far sì che raggiungesse il suolo in 5 oscillazioni. Questa altezza era di 10 piedi (circa 3 metri). Secondo la legge di Galileo, per un tempo doppio cioè per 10 oscillazioni la stessa sfera avrebbe raggiunto $(10/5)^2 \cdot 10 = 40$ piedi, per 15 oscillazioni $(15/5)^2 \cdot 10 = 90$ piedi, per 20 oscillazioni 160 piedi e così via. Inoltre fu trovato che l'incremento di spazio procedeva secondo la proporzione di piedi 10, 30, 50 cioè con la successione di numeri dispari 1, 3, 5. Il gruppo di gesuiti ottenne i risultati attesi verificando la legge di Galileo la quale affermava che il quadrato del tempo è proporzionale alla distanza di caduta libera. Riccioli e Grimaldi si recarono da Bonaventura Cavalieri, professore dell'Università di Bologna, che a causa della sua salute non aveva potuto partecipare agli esperimenti, per esporgli i risultati ottenuti¹³.

¹³Cfr. *Ibid.*, pp. 107-108.

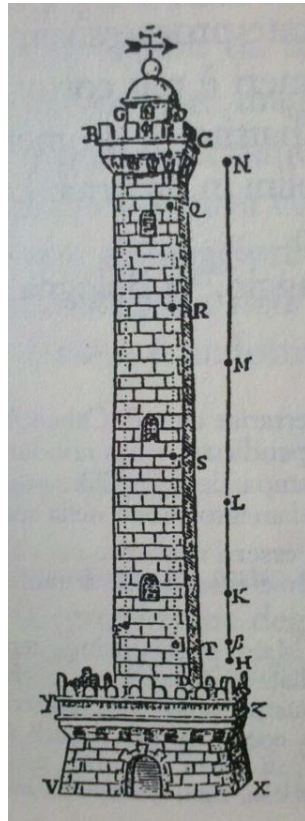


Figura 1.1: Schema dell'esperienza della caduta dei gravi dalla torre degli Asinelli

Riccioli e Grimaldi furono chiamati nel 1655, insieme ad altri professori di matematica, dallo stesso Cassini, incaricato di costruire la nuova meridiana della chiesa di S. Petronio, per determinare la linea meridiana. La precedente meridiana di Danti era diventata inutilizzabile a causa della chiesa in fase di completamento. La linea fu determinata nel solstizio d'estate di quello stesso anno. La nuova meridiana, dotata di una grande precisione, fu utilizzata in seguito da Riccioli per i suoi calcoli sugli equinozi, i solstizi, la declinazione e il diametro del Sole. Lui stesso giudicava questo orologio solare «il migliore d'Italia, per non dire d'Europa». I risultati di queste osservazioni sono riportati nella *Geographiae et hydrographiae reformatae* di Riccioli (1661).

Inoltre Grimaldi fu molto importante in astronomia perché in seguito alle sue osservazioni accurate poté disegnare la mappa lunare correggendo così quelle di Lansberg e di Hevelius. Grimaldi e Riccioli distinsero tre zone

sulla superficie lunare: i crateri, i mari e le terre. Ai crateri vennero assegnati i nomi di famosi astronomi. Questa nomenclatura conteneva circa 300 nomi, 200 dei quali sono ancora oggi in uso. A ciascuno dei due astronomi è stato dedicato un cratere lunare. Le mappe lunari sono presentate nell'*Almagestum novum* e sono ben due: la prima mostra la superficie lunare e le sue fasi, la seconda include la nomenclatura.

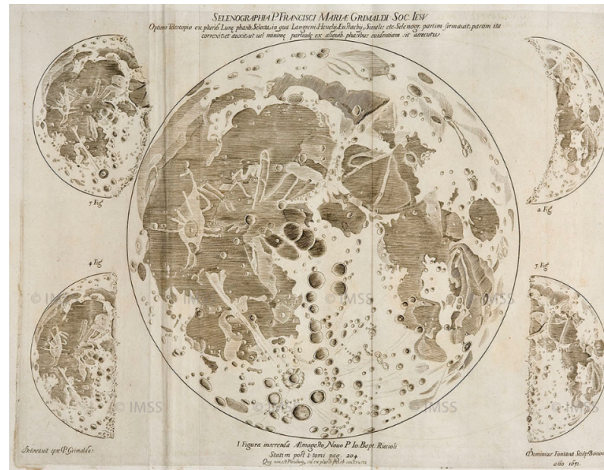


Figura 1.2: Selenografia di Grimaldi rappresentante la superficie lunare e le sue fasi

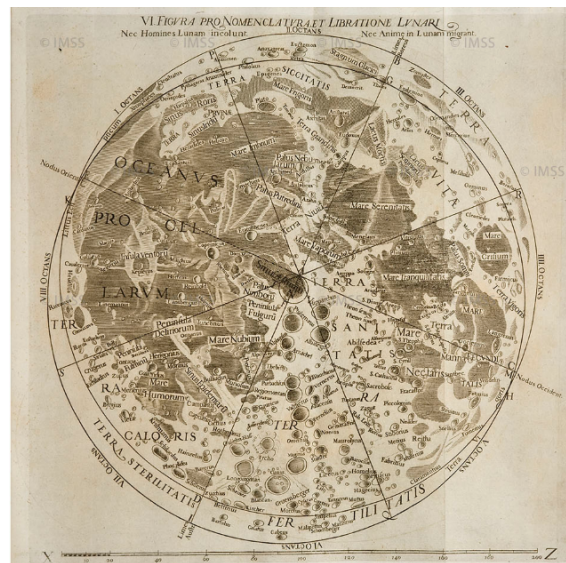


Figura 1.3: Selenografia di Grimaldi con la nomenclatura

1.4 Tracce su Grimaldi

Non sono presenti molte tracce su Francesco Maria Grimaldi. Le testimonianze sulla sua formazione e biografia ci sono date da Riccioli nell' *Elogium perbreve* posto in fondo al *De lumine*; mentre le informazioni sulla sua famiglia sono contenute nell' *Epitome genealogiae Grimaldae gentis* contenuta nell' *Almagestum*. La sua attività scientifica è per la maggior parte legata a quella di Riccioli come collaboratore. Soltanto verso la fine della sua vita lavorò ad un trattato sull'ottica tutto suo, il *De lumine*, che venne pubblicato postumo. La sua ricerca in ottica non ha alcuna documentazione a parte il trattato stesso. Grimaldi non tenne una propria corrispondenza scientifica; ma, a volte, compare in quella di Riccioli. A causa della sua breve vita e al suo ruolo come assistente di Riccioli, Grimaldi non ebbe modo di avere allievi degni di nota.

Oggi le tracce più note su Grimaldi risiedono a Bologna, città in cui nacque e visse per tutta la sua vita.

Grimaldi nacque a Bologna nel 1618 in via San Felice 26. Nel 1926 venne apposta una lapide sulla parete dell'abitazione voluta da Lavoro Amaduzzi e da Augusto Righi. Nel 1919 sul quotidiano bolognese *Avvenire d'Italia*, il Rev. Don Dido Marchesi scrisse che Francesco Maria Grimaldi dovesse essere onorato. Subito Lavoro Amaduzzi aderì all'idea di onorare Grimaldi e coinvolse Augusto Righi. In un primo momento l'idea venne messa da parte a causa della mancata adesione dell'Amministrazione comunale e della morte di Augusto Righi. Soltanto nel 1926, Amaduzzi tornò ad insistere presso l'Amministrazione comunale di Bologna e il sindaco Umberto Pupini. Lo stesso Sindaco rispose ad Amaduzzi con la lettera seguente datata 15 settembre 1926¹⁴:

Chiarissimo Professore,

Il 21 agosto u. s. la Giunta comunale ha deliberato, a seguito del Suo suggerimento, di collocare una lapide nella casa dove nacque Padre F. M. Grimaldi.

L'assessore avv. Simonini è stato incaricato di compilare l'epigrafe, di cui Le manderò la minuta per il Suo ulteriore consiglio.

Grazie del suo interessamento e ossequi distinti e cordiali.

¹⁴Cfr. Lavoro Amaduzzi, *Per la scienza e per tre suoi insigni cultori*, pp. 215-232

L'iscrizione presenta sinteticamente ogni campo d'interesse di Grimaldi, focalizzandosi sulla sua scoperta più nota: la diffrazione della luce. Il testo della lapide recita così:

*Maestro delle matematiche discipline
nella meccanica astronomica versatissimo
geniale indagatore dei fenomeni fisici
Francesco Maria Grimaldi
gesuita
acquistò a sé alla patria
gloria non peritura
primo osservando la diffrazione della luce
onde percorse di due secoli le scoperte dell'ottica ondulatoria
All'abito dello studioso
congiunse
illibati costumi - umiltà vera - carità profonda
Nacque in questa casa
nel 1618
visse 44 anni*



Figura 1.4: Lapide commemorativa di Francesco Maria Grimaldi posta sulla sua casa natale in via San Felice 26

Un'altra traccia ci è data dall'unico ritratto esistente di Francesco Maria collocato al museo di Palazzo Poggi.¹⁵ Il ritratto, il cui autore è sconosciuto, è stato dipinto postumo (risalente al XVIII sec.) e fu ammesso nella collezione dei ritratti degli studenti illustri dell'Università di Bologna. Nonostante la fama che Grimaldi acquisì grazie allo studio sui colori e sulla luce, nel quadro non sono presenti dettagli che rappresentino il suo interesse per la materia. Alla sua destra si può ammirare lo stemma della famiglia e il globo armillare¹⁶ che sta ad indicare la sua attività di astronomo e geodeta; mentre alla sua sinistra è presente una libreria contenente un tomo dal titolo "MOTUS". Grimaldi è ritratto con l'abito da sacerdote della Compagnia di Gesù. L'aspetto giovanile, l'abbigliamento, la sfera armillare ed il libro sul moto ritraggono Grimaldi tra il 1640 e gli inizi del 1650. Giusy Petruzzelli ne *La luce e i colori. Il caso Grimaldi tra scienza e fede* fa notare che nel dipinto non sono rappresentati simboli che indichino l'interesse di Grimaldi alla luce ed ai colori. La stessa autrice scrive: «L'unica ipotesi che si può avanzare è che, poichè si trattava di uno studioso bolognese, si sia voluta rimarcare la sua ricerca effettuata sul territorio, appunto quella sulla caduta dei gravi e le osservazioni astronomiche eseguite con i confratelli del collegio di S. Lucia, non riuscendo a percepire a distanza così ravvicinata a livello locale (in termini di vicinanza fisica e di anni) il rilievo ben maggiore che il Grimaldi fisico della luce e dei colori avrebbe ricevuto»¹⁷.

¹⁵Via Zamboni 33, Bologna.

¹⁶Strumento astronomico che rappresenta le orbite solide dei pianeti e del Sole mediante armille (anelli) impennate in un centro comune.

¹⁷Giusy Petruzzelli, *La luce e i colori. Il caso Grimaldi tra scienza e fede*, p. 91.



Figura 1.5: Ritratto di Francesco Maria Grimaldi al museo di Palazzo Poggi

Sappiamo per certo che non esiste un sepolcro di Francesco Maria Grimaldi da visitare. Probabilmente alla sua morte fu seppellito, come i suoi confratelli, sotto la pavimentazione della chiesa di Santa Lucia, situata accanto al Collegio dove Grimaldi si stabilì e visse fino alla sua morte¹⁸.

Alla fine degli anni '80, la chiesa fu trasformata in aula magna dell'Università di Bologna ed i resti ossei rinvenuti furono rimossi e posti nell'ossario comune del cimitero bolognese.

Inoltre a Grimaldi è stato dedicato un cratere lunare situato vicino al bordo occidentale della Luna. Il suo diametro è di 173 Km. A nordovest del cratere Grimaldi inoltre è possibile vedere anche il cratere Riccioli.

¹⁸Cfr. *Ibid.*, p. 89.



Figura 1.6: Cratere Grimaldi

A Grimaldi fu dedicata nel 1963 una via a Bologna in occasione del terzo centenario della morte: via Padre Francesco Maria Grimaldi.

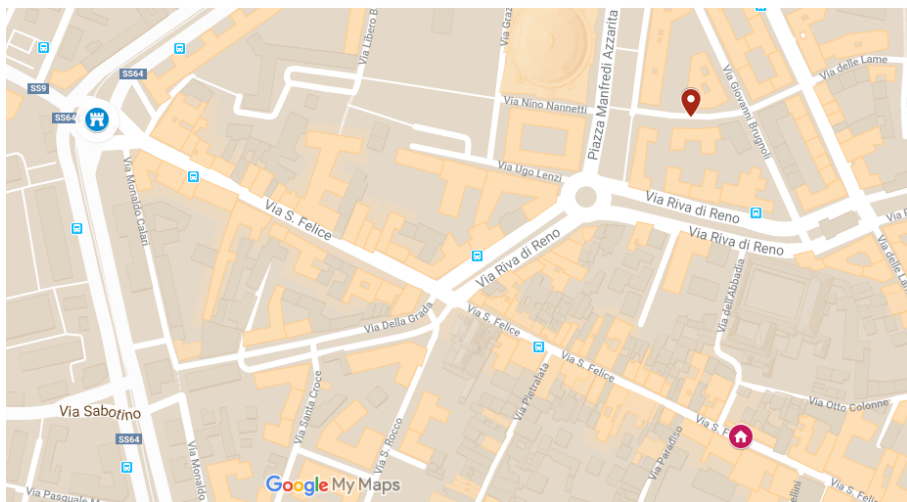


Figura 1.7: Via Padre Francesco Maria Grimaldi (indicatore bordeaux) nei pressi di via San Felice 26 (indicatore fucsia)

Capitolo 2

De lumine

Il *De lumine* è l'unica opera di Grimaldi ed è particolarmente rilevante perché per la prima volta si parla di diffrazione della luce, fenomeno a cui Grimaldi diede il nome. Il titolo completo è *Physico-mathesis de lumine, coloribus, et iride*. Inoltre può essere considerato il punto di partenza dell'ottica fisica ed è uno dei trattati di ottica più rilevanti prima di Newton; anche se nel Settecento la fama di Grimaldi verrà oscurata da quella di Newton. Probabilmente Grimaldi iniziò ad interessarsi all'ottica in seguito ai problemi di aberrazione cromatica¹ che si erano verificati nei telescopi; infatti sembra proprio che la ricerca di una soluzione a questo fenomeno lo abbia portato alla scoperta della diffrazione. Iniziò a lavorare alla sua opera già dal 1655 e la concluse poco prima della sua morte, avvenuta nel 1663. È un'opera postuma pubblicata a Bologna nel 1665 ed è lo stesso Riccioli che si impegnò per primo affinché l'opera fosse stampata. Il volume si chiude con l'*Elogium perbreve* di Riccioli che descrive il carattere, gli studi, gli interessi e gli ultimi anni di vita di Grimaldi. L'*Elogio* rimarca le virtù morali di Grimaldi probabilmente per allontanare le critiche e i dubbi di coloro che potevano non ritenere degna la pubblicazione del trattato a causa delle idee innovative nel campo dell'ottica, della luce e dei colori che sconvolgevano le dottrine in vigore. L'opera venne stampata nella tipografia degli eredi di Vittorio Benazzi a spese del bibliofilo bolognese Girolamo Bernia. Nell'antiporta, la pagina che precede il frontespizio, viene menzionato il titolo dell'opera ed è posto lo stemma e la dedica a Carlo Antonio di San Pietro,

¹Difetto nella formazione delle immagini attraverso le superfici delle lenti dovuto alla rifrazione della luce. La lente scompone la luce nei vari colori ed appare un alone intorno all'oggetto osservato.

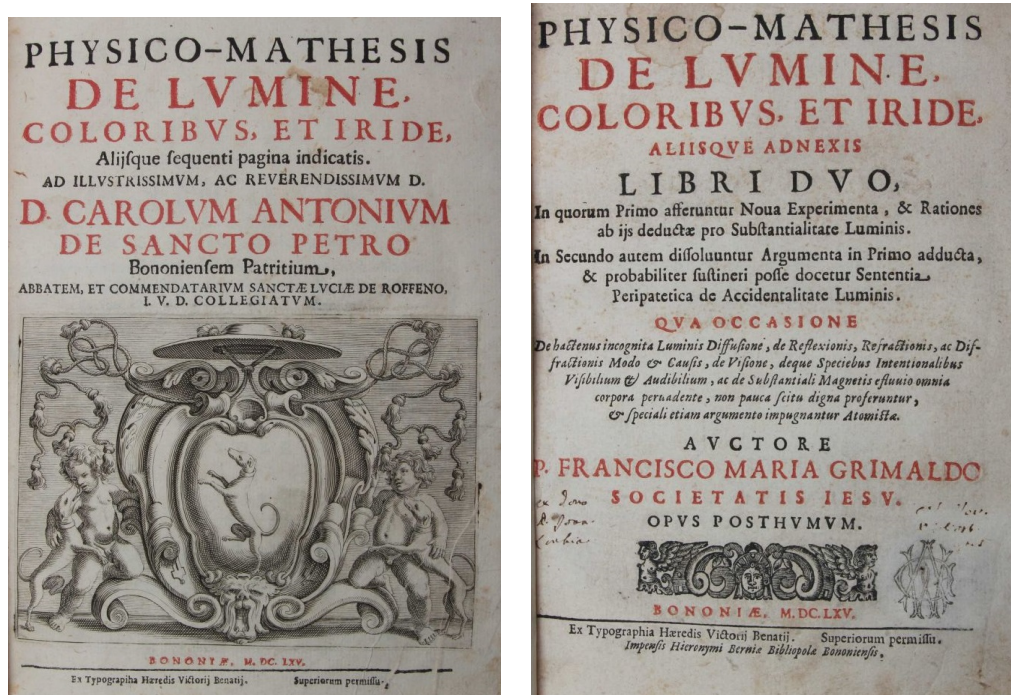


Figura 2.1: Antiporta e frontespizio del *De lumine*

nobile bolognese, a cui Bernia scrisse una dedica chiedendogli di farsi garante della pubblicazione. La dedica venne posta nel volume perché in molti temevano che l'opera di Grimaldi venisse respinta non essendo conforme alla dottrina. Questo venne evitato anche grazie all'approvazione, posta dopo la dedica di Bernia, di Giovan Paolo Oliva, Vicario Generale della Compagnia di Gesù, e del clero secolare tra cui l'Arcivescovo di Bologna e il Maggiore Inquisitore Generale di Bologna.

Il *De lumine* era un testo destinato soprattutto alle scuole gesuitiche, alla comunità scientifica della Compagnia e agli studiosi di ottica laici situati nel resto dell'Europa. L'opera di Grimaldi ha la struttura tipica del trattato didattico in cui si riprendono le lezioni già esposte arricchendole di esempi, osservazioni, e poi procedendo oltre aggiungendo altra materia su cui riflettere. L'opera è composta da due libri: il primo contiene 60 proposizioni e la descrizione degli esperimenti a favore della sostanzialità² della luce; mentre il secondo contiene 6 proposizioni a favore dell'accidentalità³ della

²La teoria della sostanzialità considera la luce come una sostanza autonoma dotata di sue proprietà. La sostanza ha una propria consistenza e sussistenza ed esiste in sé e per sé.

³La teoria di Aristotele sosteneva l'accidentalità della luce cioè la luce come proprietà di una sostanza trasparente (aria, acqua); dunque l'accidente non ha un'esistenza

luce: vengono confutati gli argomenti del primo e viene mostrato come si possa sostenere in modo credibile la tesi peripatetica sull'accidentalità della luce. Grimaldi fra due ipotesi possibili è propenso per una ovvero quella della sostanzialità della luce; ma come filosofo non può escludere l'altra con certezza per non contraddire l'autorità aristotelica. I libri I e II presentano opinioni contrastanti sulla natura della luce, ma concordano su altri punti; in entrambi Grimaldi si oppone a qualsiasi teoria corpuscolare della luce e si preoccupa di mostrare che il colore non è altro che una modifica interna della luce. Grimaldi pensava la luce come un fluido con velocità altissima, ma non infinita e quindi calcolabile. Nonostante rifiutasse la natura corpuscolare della luce non avanzò mai l'ipotesi ondulatoria che sarebbe stata sviluppata nel secolo successivo.

Né Newton né Hooke riuscirono ad interpretare correttamente gli esperimenti e i risultati ottenuti da Grimaldi. Hooke era venuto a conoscenza del trattato di Grimaldi direttamente, mentre Newton attraverso la copia dell'opera del gesuita Honorè Fabri, *Dialogi Physici contra Grimaldum de Luce et de Coloribus*. Per una giusta interpretazione del fenomeno si dovranno aspettare le spiegazioni sulla natura ondulatoria della luce di Huygens, Young e Fresnel.

2.1 Struttura

Il trattato è costituito all'incirca da 530 pagine: 470 costituiscono il primo libro formato da 60 proposizioni; mentre il secondo occupa 60 pagine ed è costituito da 6 proposizioni. La prima cosa che si può notare è l'enorme differenza in numero di pagine tra il primo e il secondo libro. Il *De lumine* è composto da due libri: nel primo vengono riportati nuovi esperimenti a favore della sostanzialità della luce e nel secondo vengono esposte argomentazioni che confutano quelli del primo a favore dell'accidentalità della luce. Oltre alla diffusione, riflessione, rifrazione e diffrazione della luce vengono analizzati anche fenomeni che presentano somiglianze con esse come il suono, il magnete e più in generale i fluidi. Veniamo informati di tutto questo dal frontespizio. Qui di seguito viene riportato in traduzione italiana:

indipendente e non è corporeo.

FISICO-MATEMATICA
 SULLA LUCE,
 I COLORI, E L'IRIDE,
 E SU ALTRI ARGOMENTI CONNESSI
 LIBRI DUE,

Nel Primo dei quali sono riportati Nuovi Esperimenti, &
 Ragionamenti
 dai quali sono dedotte tesi a favore della sostanzialità della luce.

Nel Secondo poi sono confutati gli Argomenti addotti nel Primo
 E si mostra come possa essere sostenuta in modo credibile la Tesi
 Peripatetica sull'Accidentalità della Luce

PER LA QUALE OCCASIONE

Sulla Diffusione finora sconosciuta della Luce, sulla Riflessione, sulla
 Rifrazione,
 e sul Modo e le Cause della Diffrazione, sulla Visione,
 indifferentemente
 sulla Specie Intenzionali
 delle Cose Visibili e delle Udibili, e sull'effluvio Sostanziale del
 Magnete tutti
 i corpi pervadente, non poche cose degne sono esposte con ordine,
 e anche con speciale argomento sono impugnate della tesi Atomista.

AUTORE

P. FRANCESCO MARIA GRIMALDI
 DELLA SOCIETÀ DI GESÙ.
 OPERA POSTUMA

Bologna, M.DC.LXV.

Dalla Tipografia degli eredi di Vittorio Benazzi. Con il permesso dei
 superiori.

Il titolo *De lumine, coloribus et iride* rispecchia la suddivisione del primo libro; infatti in esso si parla della luce, del colore ed infine dell'arcobaleno. Nel secondo libro troviamo molti rimandi agli esperimenti esposti nel primo libro; mentre nel primo libro non ci sono riferimenti al secondo. Il trattato si apre con il *Proemio ed intento dell'autore sulla distribuzione di quest'opera* in cui Grimaldi in prima persona ammette che «È molto difficile riuscire a comprendere la natura e l'essenza di un fenomeno come la luce

di cui per altro nessun non cieco può ignorare la presenza» e se la prende con molti filosofi che con grandi discorsi non fanno altro che confondere le idee. Ed afferma «Tuttavia non ritengo sia un segno di arroganza tentare di approfondire questi studi nei quali nonostante l'impegno finora profuso rimane ancora spazio di ricerca e di approfondimento». Dal *Proemio* possiamo capire il modo di procedere di Grimaldi che consiste nell'osservazione e nell'esame approfondito dei fenomeni luminosi. Secondo Grimaldi saranno i ragionamenti e gli esperimenti, facili da eseguire, a convincere i lettori. Grimaldi inoltre racconta: «Mentre mi affannavo su questo progetto mi è capitato di accorgermi di alcune cose che ritenevo non fossero mai state notate da nessuno e che, per come si presentavano, sembravano particolarmente adatte a dimostrare la sostanzialità della luce. Dunque poichè in una situazione così considerevole era importante procedere con estrema cautela, ho valutato a lungo quegli esperimenti temendo di essere trascinato per la novità della cosa a formulare un'ipotesi abbagliante più che ancorata alla verità. Argomenti numerosi già precedentemente mi sollecitavano a ritenere di poter asserire con buona sicurezza che la luce corporea fosse una sostanza, sottilissima e diffusa nei corpi diafani con un movimento impetuoso: spinto perciò successivamente da questi esperimenti a stento riuscivo a trattenermi dal pensare di aver raggiunto un grado di evidenza di quella mia asserzione e che l'avrebbero raggiunta facilmente anche coloro che fossero disposti a riconoscere con mente serena, come è necessario, la forza dimostrativa di tali esperimenti». Grimaldi inoltre ci spiega che non dobbiamo meravigliarci del fatto che il primo libro sia più ampio del secondo perché è più facile e veloce confutare che esporre le prove. Inoltre dichiara di aver deciso di utilizzare come forma di esposizione le proposizioni, rispetto ai discorsi o ai dialoghi (forma di comunicazione ampiamente usata da Galileo Galilei) perché questo gli avrebbe consentito di procedere più velocemente e ordinatamente. Ogni proposizione è costituita da una premessa in cui sinteticamente si espongono gli argomenti che verranno trattati, di seguito inizia l'argomentazione con ragionamenti e disegni che illustrano gli esperimenti. All'interno del trattato tra gli oggetti usati per osservazioni, esperimenti ed esperienze ci sono sia oggetti propri della scienza sia oggetti di uso quotidiano. Grimaldi era un attento osservatore, cercava di trovare nella vita quotidiana oggetti capaci di avvalorare la sua tesi; riuscendo così a spiegare meglio i passaggi più delicati e ad avvicinare il lettore agli argomenti af-

frontati. Gli argomenti contenuti nel trattato vengono studiati servendosi della geometria che grazie alla *Ratio Studiorum* aveva acquisito un ruolo molto importante nella Compagnia. È molto probabile che Grimaldi abbia davvero eseguito gli esperimenti contenuti nel *de Lumine* nella sua camera senza nessuno spettatore che fungesse da testimone oculare.

2.2 Esperimenti sulla diffrazione

Gli esperimenti sulla diffrazione sono esposti nel primo libro al fine di dimostrare la sostanzialità della luce. Il trattato inizia *in medias res* perché già dalla prima proposizione Grimaldi introduce le novità da lui scoperte in ottica; infatti nella premessa della prima proposizione contenuta nel primo libro compare la parola "*diffracte*" cioè diffrazione, termine da lui coniato. Questo termine è rimasto inalterato per secoli fino ai giorni nostri, nonostante Newton sia nei *Principia* sia nell'*Opticks* abbia provato a sostituire il termine con "inflexione". La proposizione si apre con la seguente premessa: «La luce si propaga o diffonde non solamente Direttamente, per Riflessione, e Rifrazione, ma anche in un altro quarto modo, per DIFFRAZIONE». La scoperta della diffrazione della luce è stata fatta per caso perché nessuno a quel tempo poteva prevedere con il ragionamento un fenomeno simile. Grimaldi è riuscito ad ottenere un risultato così strabiliante perché si è messo a sperimentare con fasci di luce sottilissimi. Sicuramente Grimaldi aveva una certa abilità sperimentale per essere riuscito a vedere i colori e le frange; infatti per poterle osservare sono necessarie delle accortezze che Grimaldi espone nell'opera stessa: una luce solare molto intensa ed un cielo completamente sereno in piena estate. Grimaldi esegue entrambi gli esperimenti in una camera oscura cioè una stanza completamente buia al cui interno è posto un oggetto opaco, di cui non si sa molto di più, illuminato da un raggio di luce fatto passare da un forellino (il cui diametro è di 4/5 mm) creato sull'imposta di una finestra. Le ombre e le frange vengono proiettate su una tavoletta candida o su un foglio di carta bianca posta sul pavimento ad almeno 3,5 m di distanza dall'oggetto. Nella prima proposizione sono contenuti i due esperimenti sulla diffrazione della luce: l'*Experimentum primum* e l'*Experimentum secundum*.

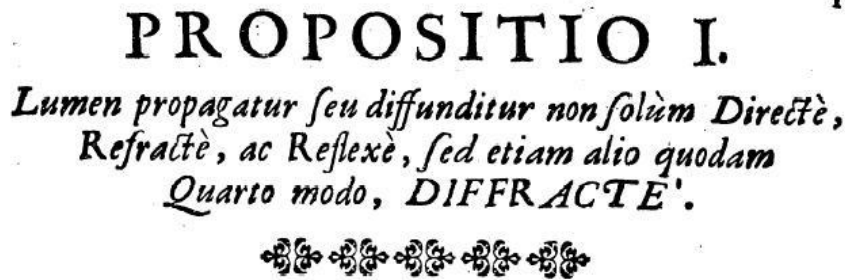


Figura 2.2: Prima proposizione del *De lumine* contenuta nel libro primo

Recentemente Alessandro Bettini in collaborazione con Sara Magrin e Roberto Temporin del Dipartimento di Fisica e Astronomia Galileo Galilei dell'Università di Padova, hanno cercato di riprodurre con metodi moderni entrambi gli esperimenti di Grimaldi sulla diffrazione⁴. È stato usato un LASER a HeNe ($\lambda \sim 632,8$ nm corrispondente alla parte rossa dello spettro visibile) allargando il fascio ad un diametro di 5 cm con l'aiuto di un collimatore con filtro spaziale per pulire il fronte d'onda ed una lente divergente di -40 D. Nel cono di luce sono stati inseriti diversi ostacoli e sono state scattate delle foto alle immagini raccolte da un foglio di carta bianca posto a circa un metro dall'ostacolo. Nel seguito, le immagini ricavate da Bettini e colleghi verranno riportate accanto alle rappresentazioni di Grimaldi per commentare i risultati da lui ottenuti.

2.2.1 Primo esperimento

Nel primo esperimento Grimaldi crea un piccolo forellino AB nell'imposta di una finestra per far passare «la luce del Sole in un cielo serenissimo» all'interno di una «stanza ben oscurata». La luce si diffonde a forma di cono $ACDB$ che può essere visto grazie alle polveri presenti nell'aria oppure alzando del fumo. Poi Grimaldi continua scrivendo: «Si intercetti questo cono con un qualche corpo opaco EF , ad una grande distanza dal foro, in modo che almeno un estremo del corpo opaco sia illuminato». Quindi all'interno del cono di luce viene posto un oggetto opaco di cui non si conosce l'entità, sappiamo soltanto che viene posto lontano dal foro. La base del cono di luce CD e l'ombra dell'oggetto GH vengono intercettati da un fo-

⁴Cfr. Alessandro Bettini, *Francesco Maria Grimaldi: la diffrazione della luce*, in «Il Nuovo Saggiatore», vol. 31, 2015, fasc. 1-2, p. 72.

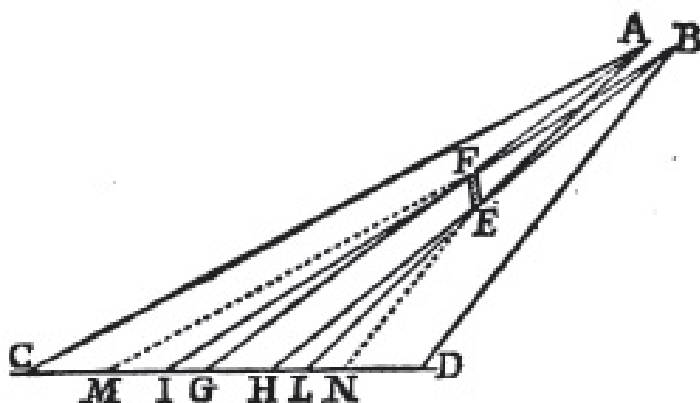


Figura 2.3: Rappresentazione dell'*Experimentum primum*

glio di carta bianca o da una tavoletta candida posta sul pavimento della stanza. Grimaldi fa notare che l'ombra non è esattamente quella prevista dalle leggi dell'ottica e nota che i suoi bordi non sono ben definiti e nitidi, ma presentano una sfumatura. Grimaldi spiega che «il confine dell'ombra sarà in qualche incerto presso una certa penombra, e con un sensibile decremento, o, come dicono, sfumatura, della luce tra l'ombra certa, e l'illuminamento nitido nello spazio IG da un lato della base predetta, e per lo spazio HL dall'altro lato». I tratti IG e HL sono tratti illuminati; mentre i tratti MI e LN sono tratti di penombra. L'ombra totale appare maggiore di quanto dovrebbe se si parte dal presupposto che la luce si propaghi in linea retta oppure se si fa una trattazione geometrica considerando i vari triangoli. L'ombra totale che ci si aspetta di vedere utilizzando una trattazione geometrica è IL ; mentre l'ombra totale che si osserva è MN . «Le frange appaiono quando la luce, entrando in una stanza buia attraverso un piccolo foro, lambisce gli ostacoli minuti e arriva sopra uno schermo bianco. Notoriamente in queste condizioni l'ombra non è nettamente separata dalla regione illuminata, né vi è una semplice penombra, come sarebbe giustificabile mediante le dimensioni non mai nulle della sorgente; ma si verificano dei fenomeni assai complessi, per cui la luce invade largamente la zona di ombra geometrica, mentre delle frange oscure, immerse nella luce della zona illuminata, ne seguono fedelmente l'orlo»⁵.

Le regioni CM e ND sono le parti luminose della base del cono. In queste zone si possono vedere le frange di luce colorata rappresentate in figura 2.4.

⁵Vasco Ronchi, *Storia della luce*, Roma-Bari, Laterza, 1983, pp. 148-149.

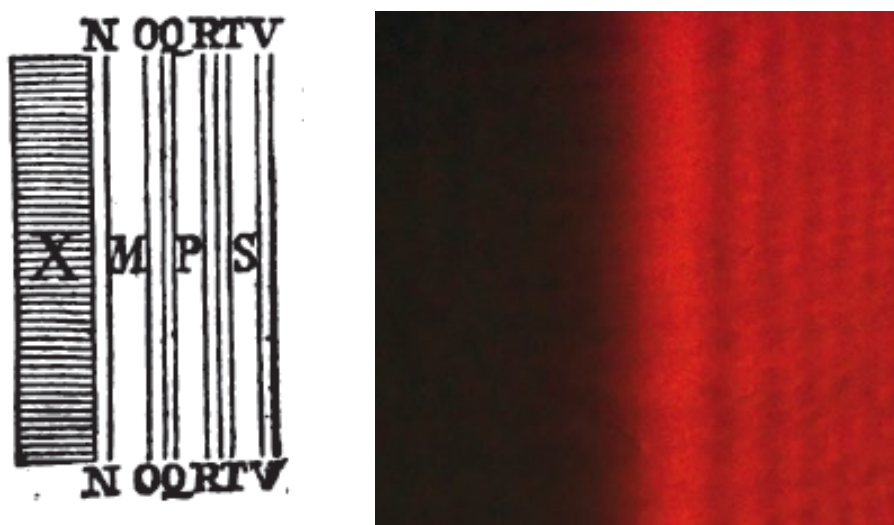


Figura 2.4: Rappresentazione delle frange. Ingrandimento della zona ND nella figura 2.3

Le frange si estendono da M verso C e da N verso D . Ogni frangia al centro ha una parte illuminata e agli estremi presenta i colori: blu all'estremo più vicino all'ombra X (che nella figura 2.3 è rappresentata dall'ombra MN) e rosso all'estremo più lontano. Grimaldi afferma che le frange possono dipendere dalle dimensioni del foro perché lui stesso ha notato che se il foro è più grande esse non compaiono. La prima frangia, cioè quella più vicina all'ombra, è più larga della seconda che è più larga della terza. Quindi la larghezza delle frange decresce con l'allontanarsi dall'ombra e la stessa cosa succede alla luminosità. Grimaldi nota che non si possono vedere più di tre frange. Le frange sono più larghe quanto più sono distanti dall'oggetto opaco e quanto più la tavoletta candida è inclinata rispetto alla radiazione solare. Ricapitolando le frange sono NMO , QPR e TSV . Per ogni frangia si ha una fascia luminosa non colorata o pura (nella prima M , nella seconda P e nella terza S); questi tratti sono più luminosi della restante base del cono. Le fasce colorate di blu sono N , Q e T ; mentre quelle rosse O , R e V . Grimaldi afferma che qualche osservatore potrebbe contraddirlo affermando, per mancata attenzione, che sulla base luminosa appaiano frange d'ombra invece che luminose perché vedrebbe le fasce OQ e RT come fasce uniche e scure non distinguendo i due colori. Grimaldi si focalizza molto su questo concetto e cerca di metterlo bene in chiaro chiamando le frange luminose *series lucidae*. L'unica cosa scura priva di luce è il tratto in comune tra i due colori.

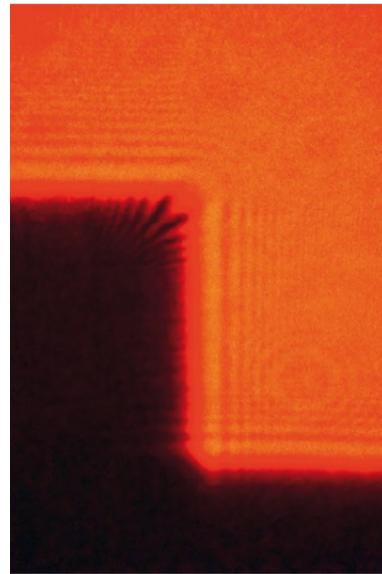
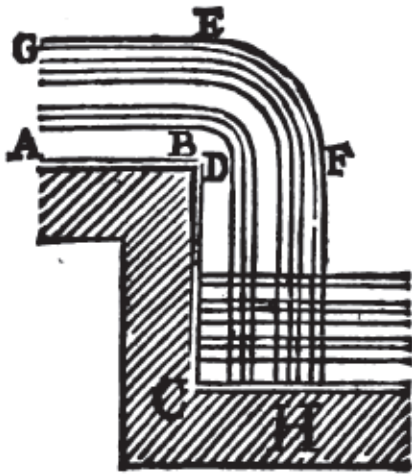


Figura 2.5: Rappresentazione della curvatura delle frange in prossimità di un'ombra angolosa

Inoltre Grimaldi afferma che le *series lucidae* rimangono invariate qualunque sia il corpo opaco posto nel cono di luce, sia liscio sia ruvido, sia denso sia non denso, sia duro sia molle. Questa affermazione è molto rilevante perché, contrariamente a quello che si pensava, il colore non dipende dalla sostanza della materia cioè non è una qualità dell'oggetto.

Grimaldi fa un passo avanti osservando che le frange sono sempre parallele all'ombra proiettata dall'ostacolo; infatti sono rette se retto è l'ostacolo e curve se è curvo. Se l'oggetto è angoloso anche le frange saranno angolose ovvero saranno rette vicino ai lati retti e curveranno intorno all'angolo dell'ombra. Nella figura 2.5 l'ombra ABC , angolosa in B e C , presenta le frange colorate parallele al lato AB che si estendono verso GE . La stessa cosa accade per il lato CD : le frange sono parallele a CD e giungono fino a HF . Le frange nel loro punto d'incontro non procedono più dritte, ma si curvano in prossimità dell'angolo dell'ombra ABC . Le frange curve partono da BD e si estendono fino a EF . In prossimità dell'angolo concavo dell'ombra DCH , angolosa in C , le frange non si curvano; ma si incrociano a vicenda formando una sorta di griglia. Nel punto di incontro delle frange i colori o aumentano di intensità o sono mescolati. Quindi in prossimità di angoli che contengono in sé l'ombra si verifica la curvatura delle frange; mentre in prossimità di angoli che contengono in sé la luce, le frange si intersecano.

Grimaldi osserva che a volte nell'ombra stessa compaiono le frange di

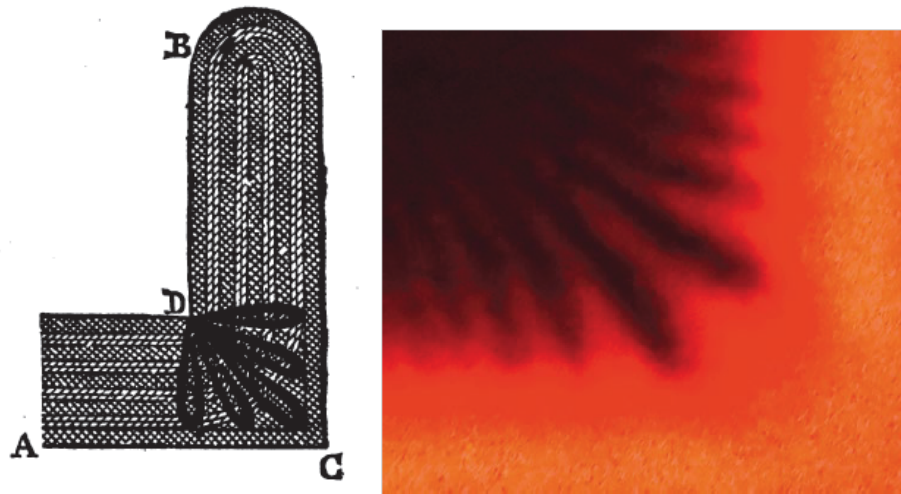


Figura 2.6: Rappresentazione delle frange interne all'ombra

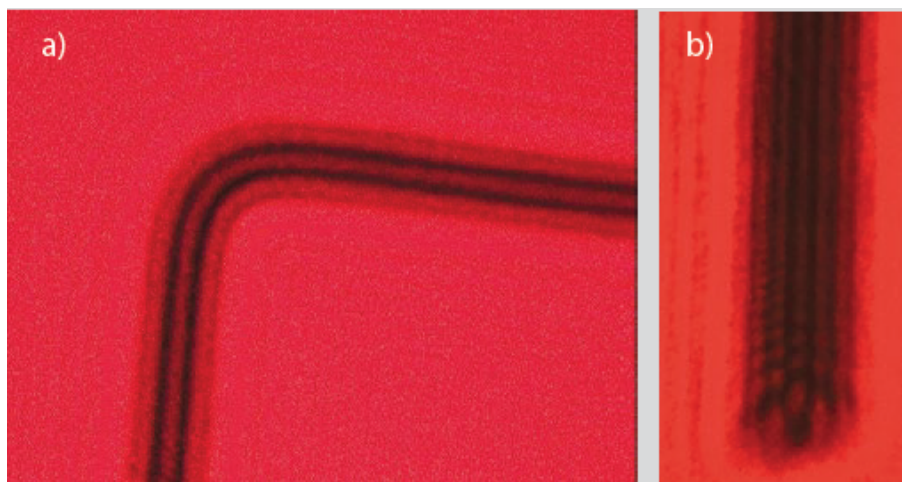


Figura 2.7: Rappresentazione delle frange interne all'ombra. Nella figura a) fili di diametro 0,47 mm e nella figura b) di diametro 0,9 mm

luce colorata. Per vederle «è necessario in primo luogo una luce del Sole fortissima; inoltre, l'ostacolo opaco inserito nel cono di luce e illuminato da entrambi i lati, deve essere piuttosto lungo, ma moderatamente largo, tuttavia la larghezza non troppo piccola, quanto le stesse prove insegnino». Più grande sarà la distanza dell'ombra dall'ostacolo più distintamente si osserveranno le frange dell'ombra, a patto che la luce per la troppa distanza non si indebolisca. Il numero di frange nell'ombra cresce al crescere della larghezza della lamina sempre in numero pari per un minimo di due, poi quattro ed infine sei. Le frange sono più larghe se sono in minor numero e più strette se sono in maggior numero. Le frange sono più chiare e distinte se sono raccolte su una tavola candida posta obliquamente ai raggi del Sole. Le frange luminose contenute nell'ombra sono parallele ai lati dell'ombra e, come detto precedentemente, saranno rette se l'ombra è retta e saranno curve se l'ombra è angolata. Oltre a queste, nell'angolo interno all'ombra, «appaiono frange luminose più brevi, anch'esse curve, ma simili alle nappe, che pendono in un galero». Nella figura 2.6 oltre alle quattro frange nell'ombra che da A vanno verso C e da B verso D e che curvano vicino all'angolo dell'ombra, si notano tra D e C frange luminose più brevi incurvate da una parte e dall'altra rispetto alla linea di mezzo DC , convergenti in D . Queste frange sono più brevi e più luminose ed appaiono anche se l'oggetto non è completamente inserito nel cono di luce. Il numero di frange dipende dalla larghezza della lamina.

Nel primo esperimento non vengono fornite le dimensioni del foro, solo nel secondo verranno precisate essere di $4/5$ mm, quindi deduciamo che nell'*Experimentum primum* il foro dovrebbe essere della stessa dimensione o di dimensioni inferiori rispetto a quello dell'*Experimentum secundum*.

2.2.2 Secondo esperimento

Nel secondo esperimento Grimaldi si serve sempre di una stanza ben oscurata e di un forellino sull'imposta della finestra. Prende una lamina sottile AB con un foro strettissimo CD , in modo che la luce passando per il forellino acquisti la forma di un cono la cui base è LM . Parallelamente e a grande distanza dalla prima lamina ne applica un'altra EF , il cui foro GH è sempre piccolo, ma più grande del primo in modo che il secondo foro sia completamente illuminato dalla luce. La luce che passa da questo

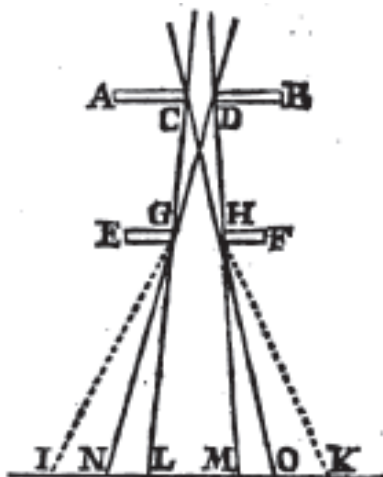


Figura 2.8: Raffigurazione dell'*Experimentum secundum*

secondo foro assumerà sempre la forma di un cono la cui base è IK che è più grande della base calcolata geometricamente NO se la luce si propagasse in modo rettilineo. Inoltre nelle zone IN e OK si verifica la penombra. Le basi dei coni possono essere viste grazie a una tavola candida posta sul pavimento. Lo stesso Grimaldi dà delle avvertenze: «Perché l'esperimento avvenga correttamente, si richiede una luce solare intensa» e ci dice che i fori devono essere sottili, particolarmente CD ed il piano candido deve distare molto dal foro GH . Proprio in questo esperimento ci fornisce delle misure, cosa che non aveva fatto nel primo esperimento. Grimaldi sostiene di aver utilizzato per CD un foro di $4/5$ mm e per GH uno di $25/30$ mm. Le distanze DG e GN devono essere almeno di 3,5 m. In questo esperimento Grimaldi descrive che «la base illuminata IK appare nel mezzo soffusa di luce pura e agli estremi di tale luce colorata da un lato di colore rosso, e dall'altro fortemente blu». Mentre nel primo esperimento Grimaldi osservò che la luce invadeva l'ombra geometrica; nel secondo esperimento è l'ombra ad invadere la luce.

2.3 La luce e il colore secondo Grimaldi

L'unione della trattazione della luce e dei colori, già anticipata nel titolo dell'opera, è un fatto molto importante. Infatti fino a quel momento la teoria della luce e quella dei colori erano discusse separatamente perché erano associate a due campi differenti: la prima appartenente alla scienza

ottica, studiata dai matematici, e la seconda alla filosofia naturale, studiata dai filosofi. Se il colore si origina dalla rifrazione e dalla diffrazione viene naturale associarlo alla luce e per questo nel *De Lumine* vengono trattate insieme. Secondo la teoria di Aristotele, comunemente accettata, una proprietà accidentale non ha qualità stabili, ma occasionali. Queste qualità sono la figura, il colore, il sapore, la solidità, la fluidità... A tal proposito, se la luce fosse un accidente non le si potrebbe attribuire stabilmente il processo del colore e dunque il colore non sarebbe una manifestazione della luce bensì, come appunto si riteneva, permanentemente legato ad alcuni corpi. Se la luce fosse un accidente non potrebbe spostarsi da un corpo ad un altro come accade nei fenomeni che implicano un passaggio di luce. Inoltre la luce, secondo Grimaldi, non può essere considerata accidentale perché nei fenomeni di riflessione e di rifrazione ciò che cambia non sono le caratteristiche della luce, ma le condizioni del mezzo attraversato dalla luce. Proprio nella Proposizione II Grimaldi paragona la luce ad un fluido velocissimo e cerca di spiegare il fenomeno della diffrazione dicendo che secondo lui come un sasso gettato nell'acqua genera delle onde intorno a sé così l'ostacolo nel cono di luce agisce come un sasso sull'acqua. Grimaldi afferma che almeno qualche volta la luce si propaga nei corpi trasparenti anche ondulatamente. Però assumendo la luce come una sostanza fluida si incorre in una difficoltà cioè quella della penetrazione dei corpi diafani. Nella Proposizione III Grimaldi dà la definizione di corpi diafani ovvero quei corpi che si lasciano attraversare dalla luce; in seguito afferma che questo è possibile solo ammettendo la porosità della materia dovuta a minutissimi granuli di forma sferica (Proposizione VI). Inoltre nella Proposizione XIX Grimaldi espone la globulosità del raggio luminoso che favorisce l'attraversamento da un mezzo ad un altro. Secondo Grimaldi la luce sarebbe formata da globuli e la trasformazione della luce in colore viene spiegata attraverso la rotazione di ciascun globulo.

Nella Proposizione XX definisce la luce non un raggio; ma una radiazione continua. La profusione della luce avviene attraverso un movimento a spirale; rappresentato da una linea retta al cui interno è raffigurato il movimento spiraliforme. Questa ondulazione arriva all'anima attraverso la retina. Nonostante Grimaldi parlasse dell'ondulazione della luce, nelle sue rappresentazioni non ha mai raffigurato il raggio ondulato; ma sempre come una linea retta. Il raggio luminoso ondulato viene paragonato ad una corda

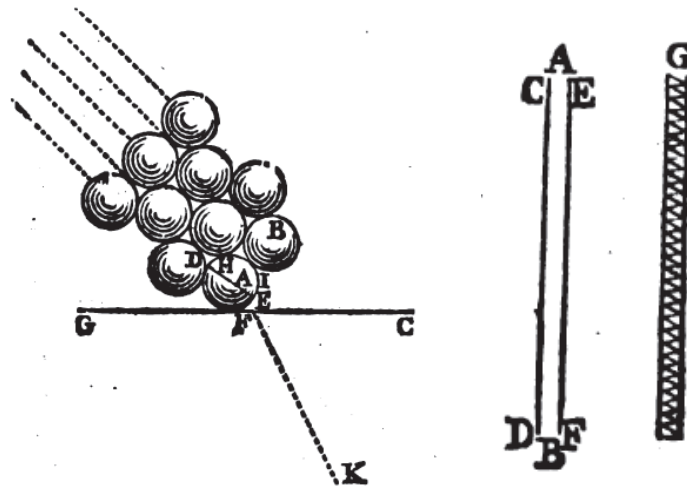


Figura 2.9: Rappresentazione della globulosità del raggio luminoso nella XIX Proposizione (a sinistra) e modello della diffusione della luce con movimento spiraliforme (a destra)

agitata più o meno velocemente. A seconda della sua diversa ondulazione si hanno i vari colori⁶. Grimaldi afferma che l'ondulazione che trasforma la luce in colore non si può vedere a occhio nudo. Nella Proposizione XXVIII Grimaldi si oppone alla distinzione tra colore vero e colore apparente che veniva fatta precedentemente, secondo lui «non si dà colore apparente che non sia anche colore vero». Secondo Grimaldi sarebbe piuttosto corretto distinguere fra colore permanente e non permanente: «Il colore è Permanente in quelle fonti luminose in cui è perenne, è Non permanente in quei corpi non luminosi che possono riflettere la luce». Grimaldi parlando di porosità della materia e di globulosità del raggio, sembra che sia d'accordo con la teoria degli Atomisti; invece lui stesso nella Proposizione VI del secondo libro scrive che è contrario a questa teoria perché trova assurdo che la materia sia indivisa nelle parti minime.

⁶Giusy Petruzzelli, op. cit., p. 59.

Capitolo 3

Dopo Grimaldi: breve storia della diffrazione

3.1 Isaac Newton

Isaac Newton¹ cercò in tutti i modi di riportare il fenomeno della diffrazione alla teoria corpuscolare. Le questioni sull'ottica si trovano nella sua opera *Opticks* del 1704, uscito quarant'anni dopo il *De lumine*. La data dell'opera è tarda perché contiene le idee e gli studi nella forma definitiva. L'*Opticks* è costituito da tre libri: il primo tratta la rifrazione, l'analisi e la sintesi dei colori, il secondo l'interferenza ed il terzo la diffrazione. Newton era sostenitore della teoria corpuscolare e nella prima Definizione scrisse: «Per raggi di luce intendo le sue parti minime, così quelle successive nelle medesime linee, come quelle contemporanee in linee diverse»; quindi per Newton i raggi non sono le traiettorie della luce, ma dei piccoli corpuscoli. Newton sottolinea che la luce non si propaga istantaneamente: «... siccome dalle equazioni dei tempi delle eclissi dei satelliti di Giove sembra doversi concludere che la luce si propaga in un certo intervallo di tempo, cosicchè impiega circa sette minuti a venire dal Sole alla Terra». Inoltre, grazie agli esperimenti coi prismi Newton capì che la luce era formata da raggi con diverso indice di rifrazione e ad ogni indice di rifrazione corrispondeva un diverso colore. Fino a quel momento si pensava che i colori fossero una modificazione della luce e che la luce fosse qualcosa di semplice e puro; Newton

¹Isaac Newton (Woolsthorpe, 25 dicembre 1642 - Londra, 20 marzo 1727) fu un fisico, matematico, astronomo, teologo e alchimista inglese. Noto soprattutto per la legge della gravitazione universale.

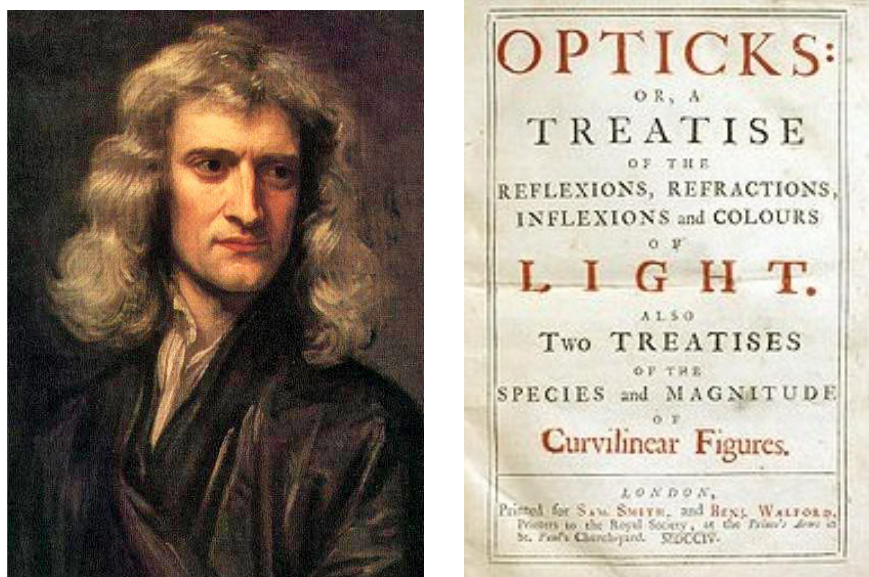


Figura 3.1: Ritratto di Newton (a sinistra) e frontespizio dell' *Opticks* del 1704 (a destra)

invece dimostrò che la luce bianca era complessa e che al suo interno erano già presenti i colori. Newton spiegò attraverso la teoria corpuscolare che la luce è costituita da particelle di massa diversa a seconda del colore: le particelle con massa maggiore sono associate al rosso; mentre quelle con massa minore al violetto. Newton riuscì a spiegare con la teoria corpuscolare la riflessione e la rifrazione; mentre non fu lo stesso per la diffrazione e l'interferenza che sarebbero stati spiegati con la teoria ondulatoria. La riflessione era spiegata con il rimbalzo delle particelle che urtavano su una superficie; mentre la rifrazione era dovuta alla forza che le molecole di una sostanza esercitavano sui corpuscoli luminosi deviandone la direzione. Il rosso a cui sono associate particelle con massa maggiore devia di meno; mentre il violetto con massa minore subisce una deviazione maggiore.

Il terzo libro dell' *Opticks* è dedicato alla diffrazione. Newton pensa di avere a che fare con dei fenomeni di riflessione come scrive nel titolo di questo libro: «Osservazioni circa le riflessioni dei raggi di luce, e i colori da ciò generati». Newton non accenna né al nome del fenomeno proposto da Grimaldi (*diffrazione*) né ai quattro modi di propagazione della luce. Se avesse ammesso ciò avrebbe dovuto pensare ad una nuova teoria per spiegare la diffrazione; invece preferì includerlo nei fenomeni di riflessione e rifrazione. Newton riprese le esperienze di Grimaldi completandole e arricchendole di misure. Eseguì gli esperimenti sia in luce bianca sia in luce monocromatica

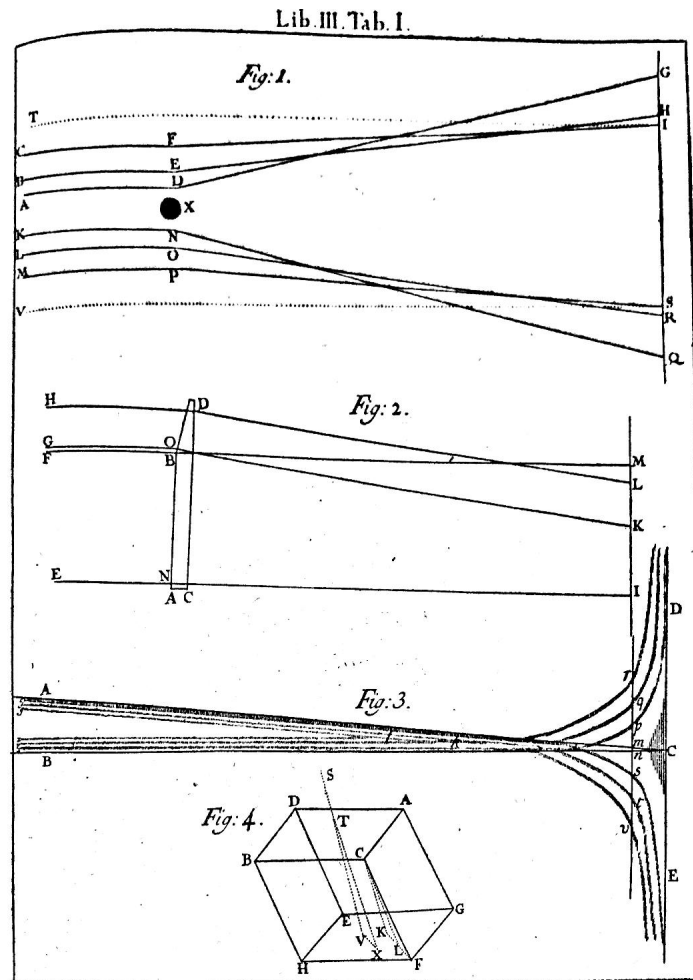


Figura 3.2: 1) Diffrazione con luce bianca; 2) Diffrazione con luce monocromatica ottenuta con un prisma; 3) Diffrazione con fessura ad orli inclinati

ottenuta grazie ad un prisma ed avvalendosi di una fessura regolabile; infine esegui l'esperienza con una fessura ad orli inclinati. Misurò la distanza fra le frange al variare della distanza tra l'ostacolo diffrangente e il piano di osservazione dimostrando che le frange appartenevano a superfici curve. Newton termina l'*Opticks* con "XXXI Quaestiones" ovvero argomenti lasciati in sospeso posti sotto forma di domande per i posteri. La III "Quaestio" tratta del fenomeno di diffrazione:

Non forse i raggi di luce nel passare vicino agli orli dei corpi, vengono riflessi rapidamente in qua e in là, con un qualche moto oscillante e sinuoso, a guisa di anguille? E le tre frange di luce sopra ricordate, non forse hanno origine da tre di tali inflessioni?²

²Vasco Ronchi, *Storia della luce*, p. 181.

3.2 Christiaan Huygens

Huygens³ espose la sua teoria ondulatoria della luce nel *Traité de la Lumière*, opera in lingua francese del 1690. L'opera venne tradotta e pubblicata in latino con il titolo *Tractatus de Lumine* nel 1728. Nella prefazione lo stesso Huygens ci informa che il trattato era stato scritto dodici anni prima, nel 1678, e che non ci sono state modificazioni sostanziali: aggiunte solo le idee sulla costituzione dello spato d'Islanda e la scoperta della birifrangenza del quarzo. Huyghens ci confida che si è trattenuto dal pubblicare l'opera perché era stata scritta in un pessimo francese e di volerla tradurre in latino, ma decise di pubblicarla così com'era perché temeva che andasse persa con la sua morte. Nella prefazione esprime la speranza che qualcun altro continui gli studi sull'argomento nella direzione da lui segnata perché egli non considera esaurito il campo di studio (ammette che alcuni argomenti sono ancora irrisolti) e perché lui non tratta i colori. Alla natura della luce sono dedicate solo una novantina di pagine di tutta la sua opera vastissima. In esse sono espresse dei concetti fondamentali che non ebbero seguito e non furono sviluppati per anni perché lo stesso Huygens non dedicò a queste teorie lo spazio di cui necessitavano. Un secolo più tardi trovarono spazio per essere sviluppate. Il *Tractatus de Lumine* è composto da sei capitoli: il primo dedicato alla propagazione della luce; il secondo alla riflessione; il terzo alla rifrazione; il quarto alla rifrazione atmosferica; il quinto alla rifrazione dello spato d'Islanda e il sesto alle questioni di ottica pratica. Huygens inizia il trattato affermando che le teorie precedenti sono insufficienti ed attaccando il concetto di traiettoria rettilinea della luce. Secondo la sua visione era impossibile che la luce corpuscolare penetrasse nella materia senza subire diffusioni e critica Cartesio, Grimaldi e Newton per la mancanza di modelli che possano giustificare tale comportamento. Sostiene che la luce dovesse essere moto affermando che «non vi può essere alcun dubbio che la luce consista nel movimento di una certa qual materia». Secondo Huygens una prova di questo è il fatto che per ottenere la visione è necessario stimolare i termini del nervo sul retro dell'occhio; questo concor-

³Christiaan Huygens (L'Aia, 14 aprile 1629 - L'Aia, 8 luglio 1695) fu un matematico, astronomo e fisico olandese. Noto soprattutto per la sua teoria sulla natura ondulatoria della luce. Nel 1666 si trasferì a Parigi dove entrò a far parte dell'Accademia delle Scienze come direttore e prese parte alla realizzazione dell'osservatorio astronomico parigino. Tornò a L'Aia nel 1681 a causa di una grave malattia e vi restò fino alla sua morte.



Figura 3.3: Ritratto di Huygens (a sinistra) e frontespizio della prima edizione del *Traité de la Lumière* (a destra)

da con l'idea che la luce sia movimento di materia fra l'oggetto e l'occhio. Huygens mette a confronto la propagazione della luce con quella del suono; questo paragone era stato ripreso anche da Grimaldi. Egli conclude affermando che «non vi è dubbio che anche la luce arrivi da un corpo luminoso a noi come moto impresso alla materia interposta; dal momento che, come abbiamo visto, ciò non può avvenire per mezzo di una qualche sostanza che si propaghi dall'oggetto luminoso fino a noi». Da qui inizia a discutere l'analogia tra luce e suono. Era stato dimostrato che il suono non si propaga nel vuoto; qui nasce il problema di trovare il mezzo in cui si propaga la luce. Huygens ammette l'esistenza di una sostanza chiamata etere estremamente sottile capace di compenetrare tutti i corpi e di riempire tutto lo spazio, dotato di un altissimo grado di elasticità e di durezza. Inoltre aggiunge: «Non è necessario che esaminiamo quale sia la causa di quella elasticità e di quella durezza perché ciò porterebbe troppo lontano dal nostro argomento». Huygens in seguito parla della propagazione delle onde nell'etere avendo l'idea geniale dell'inviluppo delle onde elementari. Porta come esempio una fiamma spiegando che ogni punto emana le sue onde per conto proprio che entrando nell'etere si propagano una indipendentemente dall'altra perché i singoli moti si comunicano alle varie particelle dell'etere indipendentemente gli uni dagli altri. Huygens fa notare che è straordinario pensare che delle



Figura 3.4: Propagazione delle onde luminose dai vari punti di una fiamma

onde così piccole emesse da sorgenti minuscole possano propagarsi a grandi distanze, come tra le stelle o il Sole e noi. Egli lo spiega dicendo che «Non ce ne meraviglieremo più se consideriamo che lontanissimo dal corpo luminoso un numero enorme di queste onde, sia pure emesso da tanti punti diversi di quel corpo, si uniscano fra loro, dando un'unica onda, capace di essere sentita».

Huygens, inoltre, amplia il concetto dell'involuppo delle onde elementari considerando il caso di una singola sorgente puntiforme. Ogni punto in cui arriva il moto diventa centro di nuove onde sferiche; ciascuna di queste onde sferiche elementari è estremamente debole e l'effetto sarà sensibile solo dove si forma un involuppo di queste onde elementari cioè dove si crea un nuovo fronte d'onda che ha il centro nella sorgente. Con questo metodo Huygens trovò un modo per spiegare la propagazione rettilinea nei mezzi omogenei, la riflessione e la rifrazione, trascurando il fenomeno della diffrazione che avrebbe potuto offrire alla sua teoria un valido appoggio. La sua teoria non ebbe seguaci immediati perché c'erano ancora tanti dubbi su cui si preferiva sorvolare. Huygens conclude dicendo: «E quindi i raggi della luce possono considerarsi come se fossero del tutto linee rette». Il collegamento tra onde elementari e diffrazione venne fatto più di cento anni dopo grazie a Young e a Fresnel.

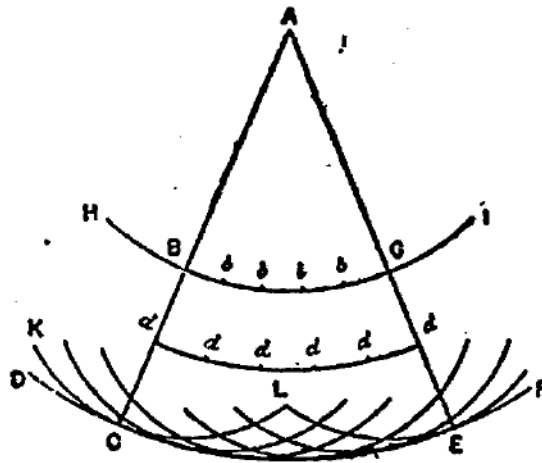


Figura 3.5: L'involuppo delle onde elementari schematizzato da Huygens nel *Tractatus De Lumine*

Nel Seicento si assiste ad un forte dibattito caratterizzato da toni aspri fra Newton e Huygens riguardante la natura della luce; infatti sia la teoria corpuscolare sia quella ondulatoria sono state sviluppate in quegli stessi anni.

3.3 Thomas Young



Figura 3.6: Ritratto di Young

Thomas Young⁴ fu molto importante per lo sviluppo della teoria ondulatoria. Probabilmente si interessò alla natura della luce perché studiando medicina si era imbattuto sull'argomento della visione. Oggi è noto soprattutto per l'esperimento di interferenza del 1801 che porta il suo nome. Francesco Maria Grimaldi 140 anni prima aveva fatto un esperimento simile, riportato nel *De lumine*, in cui prese due fasci di luce che entravano nella stanza buia da due fori praticati sull'imposta e vide che la zona di intersezione dei due coni di luce era più scura, contrariamente a quanto ci si aspettava. Questa osservazione è fatta sotto la Proposizione XXII il cui

⁴Thomas Young (Milverton, 13 giugno 1773 - Londra, 10 maggio 1829) fu un medico, fisico ed egittologo inglese. Noto in fisica soprattutto per gli studi sull'ottica.

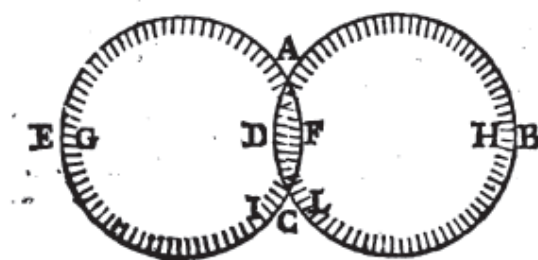


Figura 3.7: Schema dei due coni di luce che danno interferenza descritto da Grimaldi nel *De lumine*

titolo è: «La luce talvolta col suo intervento rende più oscura una superficie da altra parte e precedentemente illuminata». Young si servì di un dispositivo simile a quello di Grimaldi per dimostrare che "luce aggiunta a luce" oscura invece di illuminare di più. Young in una nota pubblicata sul *Philosophical Transactions*⁵ del 1802 intitolata *An Account of some cases of the Production of Colours, not hitherto described* scrisse di aver scoperto una legge capace di spiegare alcuni fenomeni e scrisse:

La legge è che quando due porzioni della stessa luce arrivano all'occhio per vie diverse, o esattamente o molto prossimamente nella medesima direzione, la luce viene intensa al massimo quando la differenza dei cammini è un multiplo di una certa lunghezza [interferenza costruttiva], e intensa al minimo nello stato intermedio delle porzioni interferenti [interferenza distruttiva]; e questa lunghezza è differente per luce di differenti colori⁶.

Young fece passare la luce di una sorgente puntiforme attraverso due forellini vicini *A* e *B* posti parallelamente che fungono da sorgenti di luce coerente generando su uno schermo lontano una figura di interferenza ovvero delle bande chiare e scure alternate. Le bande chiare appaiono dove si verifica interferenza costruttiva; mentre le bande scure dove abbiamo interferenza distruttiva.

Per quanto riguarda la diffrazione, Young propose un nuovo esperimento: oscurò uno dei due orli di un oggetto diffrangente posto nel cono di luce e vide che le frange interne all'ombra scomparivano, ne concluse che

⁵Rivista scientifica della Royal Society di Londra.

⁶Vasco Ronchi, op. cit., p. 237.

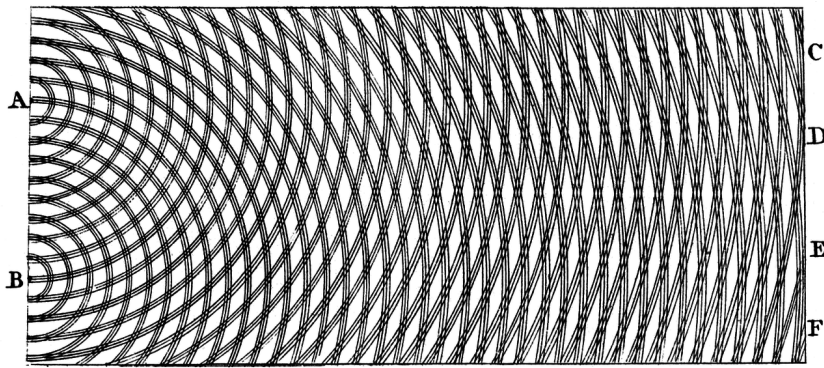


Figura 3.8: Schema di interferenza disegnato da Young. In prossimità di *C*, *D*, *E* ed *F* si hanno le bande scure

per creare le frange era necessario che la luce provenisse da entrambi gli orli dell'ostacolo (questa osservazione venne successivamente fatta anche da Fresnel). La propagazione rettilinea della luce, sostenuta dai newtoniani, non era quindi possibile perché nel fenomeno della diffrazione si vede la luce che aggira gli ostacoli.

3.4 Augustin-Jean Fresnel



Figura 3.9: Ritratto di Fresnel

Fresnel⁷ iniziò ad interessarsi all'ottica e alla natura della luce nel 1814, all'età di 26 anni. Questo interesse è testimoniato da una lettera inviata al fratello Léonor il 15 maggio 1814 in cui scrive: «Ho visto nel *Monitore* qualche mese fa che Biot aveva letto all'Istituto una memoria molto interessante sulla polarizzazione della luce. Non importa quanto mi rompa la testa, non indovino di cosa si tratta». Soltanto dal 1815 poté dedicarsi a tempo pieno ai suoi studi perché fu destituito dal suo impiego come ingegnere civile a causa del suo schieramento contro Napoleone. Iniziò uno

⁷Augustin-Jean Fresnel (Broglie, 10 maggio 1788 - Ville-d'Avray, 14 luglio 1827) è stato un ingegnere francese. Esegui importanti ricerche nel campo dell'ottica fisica.

scambio epistolare con Arago⁸ il quale il 12 luglio 1815, alla richiesta di Fresnel su quale materiale leggere per chiarire i suoi dubbi, gli rispose:

Non conosco nessun libro che contenga tutti gli esperimenti che i fisici stanno facendo sulla diffrazione della luce. Signor Fresnel sarà in grado di conoscere questa parte dell'ottica leggendo l'opera di Grimaldi, quella di Newton, il trattato inglese di Jordan, e le memorie di Brougham e Young che fanno parte della raccolta delle Trattazioni Filosofiche⁹.

Fresnel non lesse queste opere perché non sapeva l'inglese e probabilmente nemmeno il latino (ormai in decadenza come lingua scientifica):

Per quanto riguarda il lavoro di Young, . . . , avevo un forte desiderio di leggerlo, ma non conoscendo l'inglese, non riuscivo a comprenderlo senza l'aiuto di mio fratello [Fulgence] e, dopo averlo lasciato, il libro divenne incomprensibile per me.

Si mise a fare delle misurazioni ed il 15 ottobre 1815 inviò all'Accademia delle Scienze la sua prima memoria dal titolo "*La diffraction de la lumière*". La memoria ha lo scopo di demolire la teoria corpuscolare; infatti Fresnel si era convinto che la luce non potesse essere fatta di corpuscoli materiali e che dovesse essere trattata come un'onda. Va notato che Fresnel utilizza la parola "diffrazione" invece che "inflessione", quest'ultimo utilizzato da Newton. La teoria corpuscolare di Newton era ancora in voga nonostante le contraddizioni al suo interno; lo stesso Fresnel in una lettera del 15 ottobre 1815 al segretario dell'Accademia delle Scienze, Jean-Baptiste, scrive: «La teoria di Newton è ancora generalmente adottata. Non conosco alcun lavoro in cui sia attaccato direttamente, e dove si danno, come ho fatto io, le formule per calcolare la larghezza delle frange colorate delle ombre». La memoria inizia con una critica a Newton:

Descriverò brevemente le principali obiezioni che mi sono fatto sulla teoria newtoniana. Newton aveva ipotizzato in principio che le molecole di luce che colpiscono i nostri occhi, quando guardiamo il sole,

⁸François Arago (Estagel, 26 febbraio 1786 - Parigi, 2 ottobre 1853) fu un matematico, fisico, astronomo presso l'Osservatorio di Parigi, politico e membro dell'Accademia delle Scienze.

⁹Tutte le citazioni seguenti sono state tratte dall'articolo di Jean-Luis Basdevant, *Le Mémoire de Fresnel sur la diffraction de la lumière*, pp. 1-23.

lasciano che questo astro ci raggiunga, è stato costretto a supporre che la loro marcia non sia disturbata dalle molecole caloriche diffuse nello spazio.

Fresnel afferma che la luce e il calore devono essere della stessa natura perché un corpo nero illuminato si riscalda e un corpo caldissimo emette luce:

... Quando un corpo nero viene esposto all'azione della luce ... Non può assorbirla eternamente, e, dopo essere diventato saturo, dovrebbe ritornare quanto riceve. Cosa diventa dunque la luce? La rende stato calorico. È solo ammettendo l'identità delle molecole di luce e del calorico che il fenomeno può essere concepito.

Inoltre Fresnel non capisce come i corpuscoli di luce possano raggiungere la Terra senza subire modificazioni nella traiettoria e nella velocità:

Una molecola luminosa che attraversa l'atmosfera deve quindi continuamente subire repulsioni che ne ostacolano il movimento. Come può essere che tutte queste repulsioni non ne ostacolino la velocità e che dando movimento a così tanti miliardi di molecole non finisca per perdere la sua?

Per osservare i fenomeni luminosi tutti gli scienziati prima di Fresnel si servivano di un fascio di luce proveniente dal Sole creato con un foro praticato sull'imposta di una finestra di una stanza buia e raccogliendo il cono di luce su un foglio di carta bianca (come aveva fatto Grimaldi); Fresnel invece intercettò il raggio di luce che filtrava dalle imposte con una lente con forte curvatura posta dietro ad un piccolo foro di una lamina di metallo per ovviare al movimento del sole che spostava il fuoco. Egli osservò che avvicinando l'oggetto alla sorgente di luce le frange ai margini diventavano troppo vaghe per poterle misurare così utilizzò un globulo di miele depositato nel foro di un foglio di rame per creare un punto di luce più fino:

Dapprima mi sono servito, per ottenere un punto luminoso, di un piccolissimo foro fatto su un foglio di metallo ... Non avendo una lente più forte per ottenere un punto di luce più fine, ho usato un globulo di miele depositato su un piccolo foro fatto su un foglio di rame.

La goccia di miele funge da piccola lente con distanza focale minima. Fresnel in questo modo potè vedere nitidamente le frange dell'oggetto posto ad appena un centimetro. Con questo metodo ottenne una sorgente puntiforme con cui osservò un filo di ferro cioè una lamina sottile. Le ombre sono misurate ad una distanza variabile dal filo ($1,033 \div 5,267$ m) e il filo a sua volta è posto a distanza variabile dalla sorgente ($1,7$ cm \div $8,46$ m). Osservò le ombre e le frange su uno schermo fatto di cartoncino e vetro smerigliato e per misurare la posizione delle frange utilizzò un micrometro a fili costruito da lui stesso:

Ho costruito un micrometro con il quale posso misurare la larghezza delle ombre a meno di un quarantesimo di millimetro. È formato da due fili di seta che partono dallo stesso punto e finiscono a due punti distanti l'uno dall'altro di cinque millimetri . . . Un piccolo cartoncino in movimento mi serve per segnare il punto in cui la distanza dei fili è uguale alla larghezza dell'ombra. Il telaio che trasporta questi fili . . . è lungo 218 millimetri, quindi posso stimare la distanza tra i fili a meno di un quarantesimo di millimetro.

Nei primi esperimenti Fresnel utilizzò una sorgente R ed un filo di ferro AA' di lunghezza c inserito nel cono di luce ad una distanza a dalla sorgente e ad una distanza b dal piano FT' su cui vengono osservate le ombre e le frange. L'ombra geometrica TT' viene visualizzata sullo schermo. Fresnel osservò due tipi di frange: delle frange interne all'ombra geometrica e delle frange esterne. Fresnel notò che oscurando un estremo del filo le frange interne scomparivano:

Avevo più volte incollato un piccolo quadrato di carta nera su un lato del filo, . . . e avevo sempre visto scomparire le frange interne dell'ombra . . . Ho fatto sul campo tutte queste riflessioni: poichè intercettando la luce su un lato del filo, facciamo sparire le frange interne, il contributo dei raggi che arrivano da entrambi i lati è necessario alla loro produzione.

Quello che Fresnel chiama "contributo di raggi" non è altro che quella che verrà chiamata *interferenza*, termine utilizzato per la prima volta da Young. Fresnel spiega cosa sono le frange e come si formano:

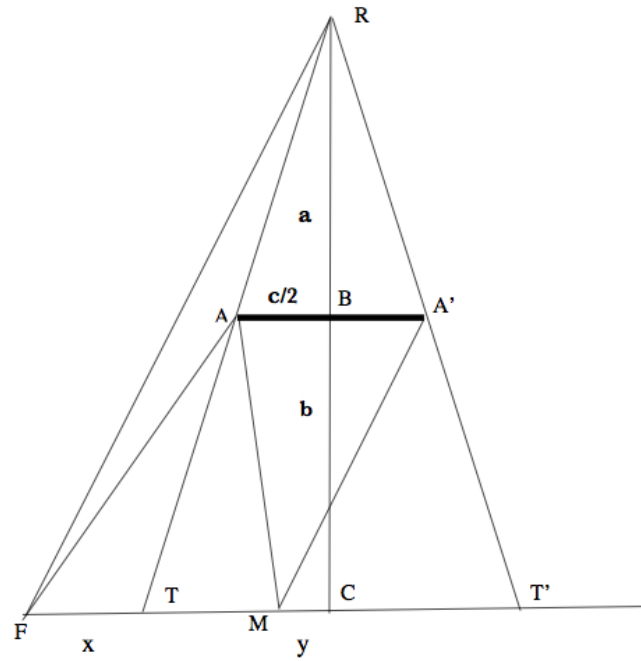


Figura 3.10: Schema del dispositivo dell'esperimento

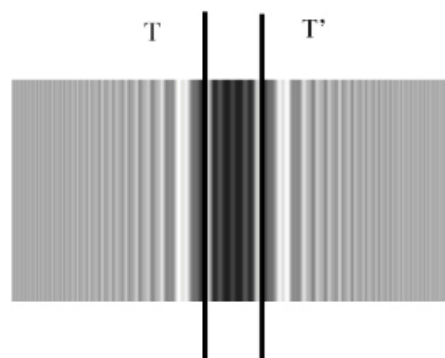


Figura 3.11: Frange interne e d esterne all'ombra geometrica osservate da Fresnel.
 TT' sono i bordi dell'ombra geometrica

È la confluenza, l'incrocio di questi raggi che producono le frange. Le vibrazioni dei raggi che si intersecano possono essere contrastate quando i ventri sono in opposizione e, al contrario, si fortificano reciprocamente quando le loro ondulazioni sono in armonia.

Fresnel fu il primo che si mise a misurare e a calcolare la posizione delle frange interne ed esterne e per farlo considerò solamente due raggi. Per le frange esterne considerò il raggio che va direttamente da R a F e quello proveniente dal bordo A ; mentre per quelle interne considerò i raggi provenienti dai bordi A e A' (figura 3.10). Fresnel osservò, variando le distanze a e b , che «la medesima frangia non si propaga in linea retta, ma secondo un'iperbole, di cui i fuochi sono il punto luminoso e uno degli orli del filo». La teoria di Fresnel incontrò la prima difficoltà perché le posizioni delle frange chiare e scure, calcolate con le formule, risultavano invertite e lo stesso Fresnel scrisse: «In generale, la posizione delle bande scure e luminose dedotte da questa formula è quasi esattamente l'opposto di quella osservata sperimentalmente». Inizialmente Fresnel cercò di rimediare a questa discrepanza aggiungendo metà lunghezza d'onda alla differenza dei cammini dei due raggi perché i raggi riflessi dall'orlo dell'ostacolo perdevano mezza lunghezza d'onda a causa della riflessione:

Questa è la prima difficoltà che questa teoria incontra. Per risolverlo, si deve supporre che i raggi riflessi sul bordo dello schermo abbiano un ritardo di mezza ondulazione; quindi dobbiamo aggiungere $\lambda/2$ alla differenza d dei cammini percorsi.

Fresnel mandò questa nota all'Accademia delle Scienze perché era consapevole che la sua teoria fosse in contrasto con quella corpuscolare, ma in ottimo accordo con quella ondulatoria. Fresnel qualche giorno dopo scrisse ad Arago chiedendogli un parere sulla memoria ed Arago rispose entusiasta: «... Ma ciò che né lui [Young], né alcun altro prima di voi ha mai visto, è che le bande colorate esterne non camminano in linea retta, quando ci si allontana dal corpo opaco. I risultati che voi avete ottenuto a questo proposito mi sembrano molto importanti; forse potranno servire a provare la verità del sistema ondulatorio». In realtà le frange esterne che non "camminano" in linea retta erano già state osservate da Grimaldi nel *De lumine*; evidentemente nemmeno Arago aveva letto la sua opera. Inoltre Fresnel parlava di riflessione sulla superficie dell'ostacolo diffrangente, ma Grimaldi nel suo *De*

lumine aveva già spiegato che nel fenomeno della diffrazione non è presente alcuna riflessione e che le frange non dipendevano dalla natura dell'ostacolo. Come detto precedentemente, Fresnel non sapeva né l'inglese né il latino; quindi non era a conoscenza dei risultati ottenuti da Grimaldi e per questo ideò un esperimento in cui l'oggetto di diffrazione era asimmetrico con un orlo più sottile dell'altro. Secondo quanto detto nella sua teoria, le frange esterne avrebbero dovuto essere appena percettibili dalla parte dell'orlo sottile e marcate dalla parte più spessa perché il diverso spessore deviava in modo differente i raggi; Fresnel utilizzò un rasoio e notò che le frange ai due lati erano identiche. Arago e Poincot, incaricati di esaminare la memoria di Fresnel, proposero il 25 marzo 1816 all'Accademia delle Scienze di pubblicare la memoria. Nonostante gli elogi e l'approvazione che la teoria di Fresnel ebbe dall'Accademia, Fresnel non era soddisfatto a causa dello scambio tra le frange chiare e quelle scure e delle frange identiche nonostante la diversità degli orli dell'oggetto diffrangente così dedicò altro tempo alla sua teoria per migliorarla e pubblicò una memoria nel 1818.

I newtoniani si sentirono minacciati dalla memoria pubblicata da Fresnel grazie alle quali si stava affermando la teoria ondulatoria e il 17 marzo 1817 fecero bandire dall'Accademia delle Scienze di Parigi un concorso a premio in cui si chiedeva di:

1. *Determinare con esperienze precise tutti gli effetti della diffrazione dei raggi luminosi diretti e riflessi, quando passano separatamente o simultaneamente vicino alle estremità di uno o più corpi di estensione sia limitata, sia indefinita, tenendo conto dell'interdistanza di questi corpi, così come la distanza dal fuoco luminoso donde emanano i raggi;*
2. *Concludere da queste esperienze, per mezzo di induzioni matematiche, i movimenti dei raggi nel loro passaggio vicino ai corpi.*

Al concorso parteciparono Fresnel e un altro candidato di cui non si sa il nome. Nessun newtoniano si presentò. Fresnel inviò all'Accademia una breve nota riassuntiva, sigillata, il 20 aprile 1818 ed una seconda nota, molto estesa, il 20 luglio in plico anonimo per partecipare al concorso. La commissione era composta da Biot, Laplace, Poisson (sostenitori della teoria corpuscolare), Gay Lussac e da Arago che fu nominato relatore. Nella seduta pubblica del 1819 il premio venne ufficialmente attribuito a Fresnel;

questo premio segnò la fine della teoria corpuscolare anche se i commissari mantennero le loro opinioni.

Fresnel nella memoria del 1818 esporrà in maniera completa il principio di Huygens che in seguito diventò il "principio di Huygens-Fresnel", chiamato così da Kirchhoff e da Bunsen nel 1870. Huygens aveva detto che ogni punto del fronte d'onda poteva essere considerato come centro di propagazione delle onde primarie, ma Fresnel aggiunse che queste onde interferiscono e generano i massimi e i minimi che vanno a creare le frange chiare e scure. Fresnel scrisse:

La teoria delle ondulazioni porta a una spiegazione completa dei fenomeni, per mezzo del principio di Huygens, che può essere dichiarato così: le vibrazioni di un'onda luminosa da ciascuno dei suoi punti sono uguali alla somma di tutte le ondulazioni elementari che inviate nello stesso tempo, agendo isolatamente, ogni piccola parte di questa onda considerata in una qualsiasi delle sue precedenti posizioni.

Fresnel capì che la discrepanza tra i calcoli e gli esperimenti sulla posizione delle frange era dovuto al fatto che inizialmente aveva considerato solo due raggi; questa discrepanza si risolse con quelli che oggi vengono chiamati *integrali di Fresnel*.

Poisson, oppositore di Fresnel, fece notare che secondo gli integrali utilizzati da Fresnel paradossalmente si sarebbe dovuto vedere un punto luminoso al centro di un'ombra circolare; oggi chiamato "punto di Poisson". Nella relazione di Arago si trova scritto:

Uno dei vostri Commissari, il Sign. Poisson, aveva dedotto dagli integrali riportati dall'Autore il risultato singolare che il centro dell'ombra di uno schermo circolare opaco doveva, quando i raggi vi penetravano con incidenze poco oblique, essere illuminato, come se lo schermo non esistesse¹⁰.

Gli esperimenti di Fresnel e di Arago verificarono la previsione di Poisson. Poisson era convinto che questo avrebbe smontato la teoria di Fresnel; invece la fortificò, ma nonostante ciò Poisson rimase sempre fermo sulle sue idee.

Il 12 maggio 1823 Fresnel fu eletto all'unanimità membro dell'Accademia delle Scienze e il 9 giugno 1825 divenne membro straniero della Royal Society

¹⁰Vasco Ronchi, op. cit., p. 253.

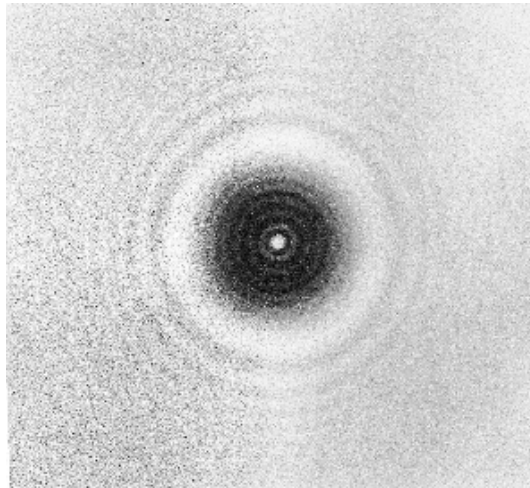


Figura 3.12: Il punto di Poisson al centro dell'ombra circolare

di Londra. A causa della sua salute fisica Fresnel cessò i suoi studi scientifici nel 1825 e si dedicò solo al lavoro di ingegnere. Una settimana prima della sua morte, nel 1827, gli venne assegnata dalla Royal Society di Londra la medaglia Rumford "Per il suo sviluppo della teoria ondulatoria applicata al fenomeno della luce polarizzata, e per le sue varie importanti scoperte nell'ottica fisica".

Conclusioni

Francesco Maria Grimaldi era un abile sperimentatore e riuscì ad osservare con alcune accortezze il fenomeno di diffrazione della luce avvalendosi di una stanza completamente buia al cui interno entrava un raggio di luce proveniente da un forellino praticato sull'imposta di una finestra e ponendo un oggetto all'interno del cono di luce. Grimaldi intercettò l'ombra dell'oggetto su un foglio di carta bianca posto sul pavimento della stanza; l'ombra osservata era maggiore di quella calcolata perché la luce la invadeva ed inoltre comparivano delle frange luminose agli estremi dell'ombra dell'oggetto diffrangente. Ogni frangia presentava la parte centrale illuminata e agli estremi i colori blu e rosso. Grimaldi diede il nome di *diffrazione* a questo nuovo fenomeno della luce capendo che non poteva essere ricondotto né alla riflessione né alla rifrazione. Questo modo di procedere nell'osservare il fenomeno di diffrazione venne utilizzato anche nei secoli successivi; in particolare, Fresnel si servì di una camera oscura apportando tali modifiche: il foro era praticato su una lastra di rame al cui interno era posta una goccia di miele per ottenere un punto di luce più fine, e il micrometro a fili utilizzato per misurare la posizione delle frange.

A causa della distanza temporale, della decadenza del latino come lingua scientifica e della fama che acquisì Newton, le osservazioni di Grimaldi sulla diffrazione non furono tenute in considerazione nei secoli successivi tant'è vero che vennero "riscoperte" in seguito. Grimaldi nel *De lumine* sottolineò che le frange non mutavano a seconda dell'oggetto opaco posto nel cono di luce; all'insaputa di ciò, Fresnel mise al suo interno un rasoio avente un orlo più sottile dell'altro e con grande sorpresa vide che le frange alle due estremità erano identiche. Inoltre Grimaldi aveva osservato che spostando l'oggetto diffrangente all'interno del cono di luce e variandone la distanza rispetto alla sorgente, le frange non si muovevano in linea retta; Newton e Fresnel ripresero tale questione e notarono che esse appartenevano

a superfici curve. Infine, Grimaldi aveva notato che, illuminando entrambi gli estremi dell'oggetto di diffrazione, comparivano anche delle frange interne all'ombra; Young ed in seguito Fresnel (che non era a conoscenza degli esperimenti svolti da Young a causa della non conoscenza dell'inglese) oscurarono uno dei due orli dell'oggetto diffrangente e videro che le frange nell'ombra scomparivano.

Questo lavoro ha mostrato come, oltre al successo delle teorie newtoniane, sono intervenute anche questioni linguistiche, come la non conoscenza del latino, nella comprensione del fenomeno di diffrazione. Questo permette di evidenziare il valore scientifico e pionieristico delle osservazioni di Grimaldi.

Bibliografia

- [1] Cesare Preti, s.v. *Grimaldi*, in *Dizionario biografico degli Italiani*, Roma, Treccani, 2002, pp. 511-513.
- [2] Aa.Vv., s.v. *Grimaldi, Francesco Maria*, in *Complete Dictionary of Scientific Biography*, Encyclopedia.com.
URL: <http://www.encyclopedia.com/science/dictionaries-thesauruses-pictures-and-press-releases/grimaldi-francesco-maria>
- [3] Ugo Baldini, *Riccioli e Grimaldi*, in Aa.Vv., *Giambattista Riccioli e il merito scientifico dei Gesuiti nell'età barocca*, a cura di Maria Teresa Borgato, Firenze, Olschki, 2002.
- [4] Andrea Battistini, *La cultura scientifica nel collegio bolognese*, in *Dall'isola alla città. I gesuiti a Bologna*, a cura di Gian Paolo Brizzi e Anna Maria Matteucci, Bologna, Nuova Alfa Editoriale, 1988.
- [5] Giusy Petruzzelli, *La luce e i colori. Il caso Grimaldi tra scienza e fede*, Bari, Progedit, 2012.
- [6] Vasco Ronchi, *Storia della luce*, Bologna, Zanichelli, 1952.
- [7] Lavoro Amaduzzi, *Per la scienza e per tre suoi insigni cultori (Grimaldi, Volta, Melloni)*, Bologna, Zanichelli, 1928.
- [8] Maria Teresa Borgato, *Riccioli e la caduta dei gravi*, in Aa.Vv., *Giambattista Riccioli e il merito scientifico dei Gesuiti nell'età barocca*, a cura di Maria Teresa Borgato, Firenze, Olschki, 2002.
- [9] Andrea Battistini, *La struttura del De lumine in F.M. Grimaldi e le forme della sua ricezione newtoniana*, in «Giornale di Fisica», XXX, 1989, fasc. 1-2, pp. 113-129.

- [10] Alessandro Bettini, *Francesco Maria Grimaldi: la diffrazione della luce*, in «Il Nuovo Saggiatore», vol. 31, 2015, fasc. 1-2, pp. 71-76.
- [11] John D. Bernal, *Storia della fisica. Dalla scoperta del fuoco all'età moderna*, Roma, Editori Riuniti University Press, 2014.
- [12] Vincenzo Palermo, *Newton, la mela e Dio. La nascita della fisica moderna*, Milano, Hoepli, 2016.
- [13] Robert P. Crease, *Il prisma e il pendolo. I dieci esperimenti più belli nella storia della scienza*, Milano, Longanesi, 2007.
- [14] Jean-Louis Basdevant, *Le Mémoire de Fresnel sur la diffraction de la lumière*, Bibnum online, Physique, 1 maggio 2009.
URL: <http://journals.openedition.org/bibnum/749>