

ALMA MATER STUDIORUM · UNIVERSITY OF BOLOGNA

School of Science
Department of Physics and Astronomy
Master Degree in Physics

*«...sed etiam alio quodam Quarto modo,
DiffRACTe»*

Studio storico-sperimentale della
Physico-Mathesis de Lumine, Coloribus, et Iride
di Francesco Maria Grimaldi

Relatore:
Prof. Eugenio Bertozzi

Presentata da:
Giada Cacciapaglia

Anno Accademico
2025/2026

*“La natura della luce è un argomento
che non ha alcuna importante rilevanza
per le faccende della vita o per la pratica delle arti,
ma è per molti altri versi estremamente interessante,
specialmente perché porta a sostenere le nostre idee
sia sulla Natura, sia sui nostri sensi,
e in generale sulla struttura dell’universo”*

Thomas Young

Indice

Abstract	3
Introduzione	4
1 Quadro storiografico e metodologico	6
1.1 Stato dell'arte	6
1.2 La replica degli esperimenti storici come strumento d'indagine	10
1.3 Questo contributo	14
1.3.1 Obiettivi e aspetti di originalità	14
1.3.2 Metodologia di ricerca	16
2 Francesco Maria Grimaldi tra fede, scienza e cultura bolognese	18
2.1 Biografia	18
2.2 « <i>Homo rationalis</i> »: testimonianze coeve e tracce materiali	20
2.3 La scienza all'interno della Compagnia di Gesù	26
2.4 I gesuiti nel contesto scientifico bolognese della metà del Seicento	29
2.5 Grimaldi e Riccioli: una collaborazione senza eguali	35
2.6 Osservare, misurare, costruire: la scienza grimaldiana oltre l'ottica	39
2.6.1 Grimaldi osservatore e disegnatore della Luna	39
2.6.2 Grimaldi negli esperimenti riccioliani sulla caduta dei gravi	44
2.6.3 Grimaldi costruttore di strumenti scientifici	47
3 Interrogare la natura della luce: la <i>Physico-Mathesis de Lumine, Coloribus, et Iride</i>	49
3.1 Substantia aut accidens	49
3.2 La struttura	53
3.3 Il metodo	59
3.4 I contenuti	62
3.4.1 Una nuova modalità di propagazione della luce: la diffrazione	63
3.4.2 Propagazione nei corpi diafani	67
3.4.3 Riflessione e rifrazione della luce	68
3.4.4 Il colore	73
3.4.5 L'iride	76
3.4.6 « <i>Undosa fluitatio luminis</i> »: è davvero una teoria ondulatoria?	79
3.4.7 Una scoperta inaspettata: il caso del glutine	87

3.5	Censure e controversie attorno al secondo libro	87
4	Dal testo all'esperimento: che cosa ha realmente osservato Grimaldi?	91
4.1	Allestire la camera oscura	91
4.2	<i>Experimentum primum</i>	93
4.2.1	Osservazione delle frange esterne all'ombra	93
4.2.2	Osservazione delle frange interne all'ombra	102
4.3	<i>Experimentum secundum</i>	110
4.4	Imparare a vedere la diffrazione	114
4.5	Grimaldi alla prova della replica	115
4.6	Potenzialità didattiche	117
4.7	L'esperimento dei due fori: Grimaldi ha anticipato Young?	121
5	Radici ed eredità dell'ottica grimaldiana	125
5.1	I possibili riferimenti dell'ottica di Grimaldi	125
5.2	Le osservazioni di Leonardo da Vinci e Francesco Maurolico	129
5.3	Gli esperimenti di Grimaldi al vaglio dei suoi primi lettori	132
5.4	Newton e la mancata osservazione delle frange interne	137
5.5	Verso l'affermazione dell'ottica ondulatoria	142
5.5.1	Thomas Young: <i>Experiments and Calculations Relative to Physical Optics</i>	142
5.5.2	Augustin-Jean Fresnel: <i>Mémoire sur la diffraction de la lumière</i>	146
6	Conclusioni	157
	Bibliografia	162
	Ringraziamenti	171

Abstract

L'elaborato ricostruisce la figura e l'attività scientifica di Francesco Maria Grimaldi, gesuita bolognese che nella sua *Physico-Mathesis de Lumine, Coloribus, et Iride*, pubblicata postuma nel 1665, osservò e denominò per la prima volta la *diffrazione* della luce. Nonostante l'importanza che questo trattato ebbe per la nascita dell'ottica fisica, Grimaldi rimane ancora una figura poco studiata e il suo contributo viene interpretato soltanto in funzione degli sviluppi successivi.

Attraverso fonti primarie e secondarie, testimonianze dei contemporanei e tracce materiali ancora presenti a Bologna, il lavoro delinea il profilo biografico, religioso e scientifico dell'autore, con attenzione alla collaborazione con Giovanni Battista Riccioli e al contesto culturale bolognese della metà del Seicento. La *Physico-Mathesis* viene inoltre analizzata nei suoi aspetti strutturali, metodologici e contenutistici, per chiarire le concezioni di Grimaldi sulla natura della luce e sui colori.

All'indagine storico-testuale è stata affiancata una replica storicamente orientata di alcuni esperimenti sulla diffrazione, condotta con luce solare e apparati costruiti a partire dalle indicazioni del trattato. La replica ha confermato i fenomeni descritti da Grimaldi, evidenziando le difficoltà materiali, percettive e sperimentali legate alla loro osservazione. I risultati potranno costituire la base per future applicazioni didattiche.

La ricerca esamina infine i possibili riferimenti dell'ottica grimaldiana e interviene nel recente dibattito storiografico sulla proposta di retrodatare a Francesco Maurolico la scoperta della diffrazione. Viene inoltre ricostruita la ricezione degli esperimenti di Grimaldi, dai primi tentativi di Honoré Fabri fino alle ricerche di Newton, Young e Fresnel. Il confronto con la tradizione ottica successiva aiuta a comprendere perché anche attenti sperimentatori come Newton non riuscirono a riconoscere pienamente gli effetti descritti dal gesuita bolognese.

Keywords: *Francesco Maria Grimaldi; Physico-Mathesis de Lumine, Coloribus et Iride; Jesuit science; Giovanni Battista Riccioli; Nature of light; Substance–accident debate; Light diffraction; Experimental history of science; Historical experiment replication; Physical optics; Seventeenth-century Scientific Revolution; Isaac Newton.*

Introduzione

Francesco Maria Grimaldi (Bologna 1618 - ivi 1663) è noto alla storia per essere stato il primo scienziato ad aver osservato la diffrazione della luce, fenomeno al quale egli stesso attribuì per la prima volta un nome. Tale scoperta, di portata rivoluzionaria e destinata a porre le basi per lo sviluppo della successiva ottica ondulatoria, apre l'unica opera da lui scritta: la *Physico-Mathesis de Lumine, Coloribus, Et Iride*. Un trattato monumentale, con oltre 500 pagine scritte in latino, intriso di considerazioni teologiche e filosofiche, ma anche tante osservazioni scientifiche, spesso incredibilmente moderne, che mostrano le sue notevoli abilità da sperimentatore. Tuttavia, a distanza di quasi quattro secoli dalla sua pubblicazione, si può dire che l'opera di Grimaldi resta ancora una grande sconosciuta: basti pensare che, ad oggi, non sono state pubblicate né traduzioni né ristampe critiche del trattato. Difatti, il contributo scientifico di Grimaldi è stato offuscato da quello dei grandi della fisica successivi e le sue scoperte sono state quasi sempre lette in funzione di grandi scienziati come Newton. Eppure l'opera di Grimaldi, che può sancire a tutti gli effetti l'inizio dell'ottica fisica, è una vera e propria miniera d'oro non solo per gli studi sulla luce, ma in generale sulla fisica: non parla soltanto di luce, ma anche di tutti quei fenomeni che presentano per l'autore una qualche somiglianza con questa, come ad esempio il suono, i fluidi e i magneti.

Diversi studiosi, tra cui Augusto Righi, hanno più volte auspicato la realizzazione di uno studio approfondito e sistematico di Grimaldi e della sua opera, non soltanto per celebrare un conterraneo, ma soprattutto per comprenderne appieno e valorizzarne il reale contributo alla storia della scienza. Tuttavia, dalla storiografia grimaldiana emerge chiaramente come questa analisi non sia mai stata pienamente realizzata: a fronte della sua rilevanza per la storia delle teorie della luce e del colore, gli studi dedicati al gesuita bolognese risultano ancora piuttosto modesti e numerosi interrogativi restano tuttora aperti.

La presente ricerca intende proporre dunque una nuova monografia su Francesco Maria Grimaldi, integrando agli studi già esistenti un approccio finora ancora poco esplorato, ossia quello adottato dalla storia dalla scienza sperimentale. Attraverso la replica di alcuni degli esperimenti descritti nella sua opera, che vengono realizzati cercando di rimanere il più possibile fedeli al testo, emergono aspetti della pratica scientifica del gesuita che non risultano pienamente accessibili attraverso la sola analisi testuale.

Il lavoro si colloca inoltre all'interno di un recente dibattito storiografico che mette in discussione la tradizionale attribuzione della scoperta della diffrazione, proponendo

una retrodatazione a favore di Francesco Maurolico. La ricerca entra quindi nel merito di tale questione attraverso un'analisi critica delle possibili influenze che potrebbero aver condizionato gli apporti scientifici di Grimaldi sulla natura della luce e la stesura del suo trattato. Parallelamente, viene presa in esame la ricezione dell'opera nella tradizione ottica successiva, allo scopo di comprendere in che modo le osservazioni del gesuita bolognese siano state accolte, discusse e replicate nei decenni seguenti.

Il lavoro intende quindi restituire maggiore profondità storica e scientifica ad una figura che, a differenza di altri protagonisti della rivoluzione scientifica del XVII secolo, non ha ancora ricevuto il riconoscimento che indubbiamente merita.

Per farlo, la tesi si articola in cinque capitoli, la cui struttura è riportata di seguito.

Nel primo capitolo viene presentato il quadro storiografico e metodologico che orienta il lavoro: si propone uno stato dell'arte sulla storiografia grimaldiana e si illustrano il quadro teorico di riferimento, gli obiettivi di questo contributo e la metodologia adottata.

Il secondo capitolo è dedicato alla ricostruzione della figura di Francesco Maria Grimaldi e alla sua collocazione nel panorama scientifico bolognese della metà del Seicento. In primo luogo, viene delineato il profilo biografico dello studioso, sulla base delle fonti primarie e secondarie disponibili. Successivamente, si prendono in esame il suo rapporto con Giovanni Battista Riccioli, il suo inserimento nella cultura scientifica della Compagnia di Gesù e i suoi rapporti con le istanze della nuova scienza.

Il terzo capitolo è dedicato specificamente alla *Physico-Mathesis de Lumine, Coloribus, et Iride*, collocata nel contesto scientifico e filosofico del Seicento e analizzata nei suoi aspetti strutturali, metodologici e contenutistici. L'esame dell'opera consentirà di chiarire entro quali limiti sia possibile riconoscere nel pensiero di Grimaldi elementi di carattere ondulatorio e, più in generale, di restituire la complessità del suo contributo all'ottica, senza ridurlo alla sola scoperta della diffrazione.

Nel quarto capitolo si presentano i risultati delle repliche sperimentali di alcune delle osservazioni descritte nell'opera, con particolare attenzione ai primi esperimenti sulla diffrazione luminosa.

Infine, il quinto capitolo prende in esame, da un lato, le osservazioni dei possibili precursori di Grimaldi e le fonti che potrebbero aver contribuito alla formazione della sua ottica; dall'altro, ricostruisce la ricezione dei suoi esperimenti nella tradizione successiva. Il confronto con le diverse repliche consentirà di chiarire quali studiosi tentarono di riprodurre le esperienze descritte nella *Physico-Mathesis*, in quali condizioni operarono e quali difficoltà potrebbero aver contribuito ai frequenti insuccessi ottenuti.

Capitolo 1

Quadro storiografico e metodologico

1.1 Stato dell'arte

Sarebbe sufficiente consultare un qualsiasi trattato di Storia della Luce per constatare come il contributo scientifico di Francesco Maria Grimaldi rappresenti, tra gli studiosi italiani, uno dei pochi, se non l'unico, degno di nota. Non sorprende, dunque, che i suoi studi sulla natura della luce siano stati accostati a quelli di illustri scienziati come René Descartes, Christiaan Huygens o Isaac Newton (Tabarroni, 1964). Difatti, sebbene Grimaldi goda oggi di una popolarità decisamente meno diffusa presso il grande pubblico, Savelli (1951) ritiene che gli apporti scientifici del gesuita bolognese sulla radiazione luminosa superino di gran lunga quelli di Galileo Galilei, al quale va comunque riconosciuto il merito di aver intuito per primo il problema della velocità finita della luce.

Benché oggi un riferimento a Grimaldi appaia nella maggior parte dei manuali, persiste la tendenza a ridurre l'opera scientifica alla dimensione di un mero stadio precursore. Tale prospettiva deriva dal fatto che i suoi contributi sono quasi sempre stati letti in funzione degli sviluppi scientifici successivi, proiettandovi sopra le ombre dei giganti della fisica moderna. Ne è emerso il ritratto di un pre-newtoniano: un precursore quasi inconsapevole di fenomeni che avrebbero rivoluzionato il mondo della fisica due secoli più tardi. In tal senso, l'acceso dibattito sulla natura della luce e il successo di opere come l'*Opticks* di Newton (1704) hanno finito per offuscare l'originalità del pensiero grimaldiano, relegandolo ad una posizione pressoché marginale nella storia della fisica.

Nonostante la sua importanza, solo una cerchia ristretta di studiosi ha tentato di proporre degli studi capaci di mettere in risalto l'originalità del contributo del gesuita, andando ben oltre la pur fondamentale scoperta della diffrazione. Va detto che la ricostruzione della sua figura presenta non poche difficoltà, prima fra tutte la scarsità di testimonianze biografiche: di Grimaldi ci rimane ben poco oltre la sua *Physico-Mathesis de Lumine, Coloribus, Et Iride*. Difatti, sebbene i suoi studi sulla luce possano essere paragonati a quelli dei padri fondatori della fisica moderna, lo stesso non si può dire per quanto riguarda la fama tra i propri contemporanei. Egli condusse una vita ritirata e breve, scandita dagli impegni dell'insegnamento e della vita religiosa

all'interno della Compagnia di Gesù. Inoltre, se per i posteri la sua memoria è stata offuscata da quella di Newton, tra i suoi contemporanei rimase spesso nell'ombra di Giovanni Battista Riccioli, del quale fu stretto collaboratore. Non è un caso che le principali fonti a cui attingere per ricostruirne la vita si riducano all'*Elogium perbreve*, redatto dallo stesso Riccioli e inserito in appendice all'opera di Grimaldi, e all'*Epitome genealogiae Grimaldae gentis* contenuta nell'*Almagestum Novum* di Riccioli (1651). Questi documenti, pur nella loro brevità, costituiscono fonti primarie di inestimabile valore, data la stretta collaborazione e il legame di amicizia tra i due confratelli.

È proprio a partire da queste fonti e dall'analisi diretta della *Physico-Mathesis* che ha avuto inizio, nel secolo scorso, un processo di riscoperta dello scienziato. Tale rivalutazione affonda le sue radici nei primi anni del Novecento, grazie all'interesse di Lavoro Amaduzzi e Augusto Righi, che per primi tentarono di aprire la strada ad un'interpretazione più critica e approfondita dell'eredità scientifica del gesuita bolognese. In occasione del terzo centenario della nascita di Grimaldi, infatti, i due fisici si fecero promotori di iniziative che potessero onorare la memoria grimaldiana, anche grazie al sostegno dell'Amministrazione Comunale di Bologna. Non si trattava soltanto della celebrazione di un conterraneo, l'idea era quella di formare un Comitato che potesse onorare degnatamente Grimaldi, attraverso un esame coscienzioso della sua opera. Tuttavia, varie circostanze portarono i due ad abbandonare questo nobile proposito: la progressiva perdita di interesse da parte del Comune, la morte di Righi nel 1920 ed altre vicissitudini poco liete nella vita di Amaduzzi. Nonostante il mancato insediamento del Comitato, un successivo sollecito di Amaduzzi presso l'Amministrazione Comunale portò ad esiti positivi: nel 1926 fu apposta per la prima volta una lapide commemorativa sulla facciata della casa natale dello scienziato, situata in Via San Felice 26 a Bologna (Amaduzzi, 1928).

Ad ogni modo, l'analisi critica da loro auspicata riuscì ad avere una ripresa più considerevole più tardi, nella seconda metà del Novecento, in particolare grazie ai contributi di Savelli (1951) e Ronchi (1952).

Il primo, autore del saggio intitolato *Grimaldi e la rifrazione*, delinea con precisione i tratti distintivi dell'ottica grimaldiana, pur escludendo deliberatamente dalla propria analisi alcuni temi, come quelli della diffrazione e dell'interferenza. Se per la prima l'autore riteneva se ne fosse già parlato abbastanza, alla seconda dedica soltanto una nota di apprezzamento, riportando alla luce un interrogativo già sollevato da Amaduzzi (1928) e, più in precedenza, citato anche in trattati di ottica come quelli di Mascart (1889) e Wood (1911). La questione verte sulla possibilità che Grimaldi possa o meno aver osservato nella Propositio XXII della *Physico-Mathesis de Lumine, Coloribus, et Iride* un fenomeno di interferenza luminosa. Pur ritenendo improbabile che le condizio-

ni sperimentali di Grimaldi permettessero tale osservazione, l'autore sottolinea come questa consapevolezza non sia di per sé esaustiva in quanto «*c'è una storia naturale dell'errore e per essa bisognerebbe mostrare la via donde è venuto quel qualche cosa che poteva dargli l'idea del fatto enunciato*». In ultima analisi, egli sottolinea come ogni discussione in merito resterà inconcludente finché non si procederà ad una ricostruzione vera e propria dell'esperimento.

Anche Ronchi (1952), nella sua celebre *Storia della Luce*, inserisce Grimaldi tra gli scienziati che hanno contribuito in modo significativo all'evoluzione delle teorie ottiche dal nascere della civiltà greca fino ai giorni nostri. L'autore riconosce il valore delle numerose osservazioni sperimentali contenute nel trattato e ne evidenzia l'importanza sotto un duplice profilo: quello tecnico, per aver lasciato una visione della luce «*molto più definita di quella che aveva trovato*», e quello storico, in quanto l'opera documenta fedelmente il contesto culturale e le idee dominanti nella fisica del XVII secolo, fornendo il quadro teorico di riferimento per gli altri grandi scienziati che si sono occupati della natura della luce nei decenni successivi.

Ad oggi, questi due studi costituiscono le fonti secondarie più autorevoli a cui far riferimento per un'analisi critica dei contenuti nel trattato. Tuttavia, entrambi gli autori circoscrivono l'analisi alla dimensione puramente scientifica dell'opera, operando inevitabilmente una selezione delle proposizioni e trascurando, di conseguenza, la complessità degli altri aspetti che la compongono.

A questo nucleo fondamentale si sono aggiunti nel tempo ulteriori contributi, tra i quali si distinguono quelli di Tabarroni (1964, 1998) e Battistini (1988, 1989, 2000). Il primo, con l'intento di porre le basi necessarie per uno studio approfondito dell'opera grimaldiana, ha il merito di aver ricostruito al meglio le tappe biografiche e scientifiche di Grimaldi sulla base di accurate ricerche d'archivio. Battistini, di contro, ha orientato la propria ricerca principalmente verso la fortuna critica e la ricezione del trattato nel panorama scientifico europeo. Pur rappresentando riferimenti indispensabili, si tratta di interventi circoscritti che non si propongono di offrire una trattazione complessiva della figura di Grimaldi. Inoltre, essi non sviluppano un'analisi propriamente tecnico-scientifica dei contenuti fisici e sperimentali dell'opera, né si soffermano in modo sistematico sulla struttura degli esperimenti e sulle condizioni materiali della loro realizzazione.

Una dimensione soltanto in parte esplorata da questi autori, ma che risulta del tutto imprescindibile, è quella riguardante l'ambiente religioso entro cui Grimaldi operava. Non è infatti possibile prescindere dall'ambiente intellettuale in cui scoperte come la diffrazione maturarono, né dalle condizioni che ne orientarono lo sviluppo e la successiva ricezione. Nel caso specifico della Compagnia di Gesù, questa analisi diventa

ancor più fondamentale: le opere scientifiche e le vicende dei Gesuiti si intrecciano inevitabilmente con le sorti di Galileo, che morì quando Grimaldi aveva 23 anni. Un importante contributo alla rivalutazione e contestualizzazione della produzione scientifica dei Gesuiti del XVII secolo è stato offerto da Baldini (1992). All'interno del suo volume *Legem impone subactis*, Baldini riserva un breve paragrafo alla metafisica di Grimaldi, riportando due censure della *Physico-Mathesis* operate dai Revisori Generali. Il rilievo filosofico di tali ammonizioni appare proporzionalmente maggiore rispetto a quello delle censure rivolte ad altri confratelli, come Niccolò Cabeo, evidenziando la natura problematica delle tesi grimaldiane (Baldini, 1992). In linea con gli altri studiosi, anche Baldini sottolinea come la figura di Grimaldi necessita ancora di studi più approfonditi. Infatti, sebbene il suo nome compaia in altri suoi saggi come quello interamente dedicato alla collaborazione tra Grimaldi e Riccioli (Baldini, 2002) e in diversi altri scritti sui contributi scientifici dei gesuiti a Bologna e in Italia, non esiste uno studio sistematico di questo tipo interamente dedicato alla sua figura.

Un tentativo di analisi organica dell'opera, auspicato a lungo da molti, è rintracciabile in tempi più recenti nel lavoro di Petruzzelli (2012). Tale studio ha il merito di ricondurre entro un quadro unitario diversi aspetti della figura di Grimaldi, contribuendo a richiamare l'attenzione su un autore rimasto a lungo ai margini della storiografia. Presenta tuttavia alcuni limiti rispetto agli obiettivi della presente ricerca. L'analisi, infatti, privilegia soprattutto la dimensione storico-filosofica e interpretativa dell'opera, mentre resta meno sviluppata la ricostruzione fisica e sperimentale dei fenomeni descritti da Grimaldi. Ne consegue che alcune questioni già sollevate dalla letteratura precedente, come, ad esempio, il problema dell'interferenza e della possibilità di riconoscere tracce nelle osservazioni grimaldiane, non vengono trattate, lasciando aperto lo spazio per un'indagine più specificamente storico-sperimentale.

Ad oggi, infatti, l'unico esempio di analisi che integri la dimensione testuale con un'attenta ricostruzione sperimentale delle osservazioni di Grimaldi è ascrivibile a Bettini (2015) che, in collaborazione con Sara Magrin e Roberto Temporin presso il Dipartimento di Fisica e Astronomia dell'Università di Padova, ha tentato di riprodurre con metodi moderni i due esperimenti di Grimaldi sulla diffrazione descritti nella *Physico-Mathesis de Lumine, Coloribus, et Iride*.

Tuttavia, proprio la natura di tale scoperta è stata recentemente oggetto di un dibattito revisionista sollevato da Raynaud e Zanier (2025). Gli autori hanno proposto una significativa retrodatazione della scoperta della diffrazione a favore di Francesco Maurolico: l'analisi del trattato *Problemata ad perspectivam et iridem pertinentia* dello studioso messinese rivela infatti come questo fenomeno fosse già stato descritto nel 1567, quasi un secolo prima della pubblicazione dell'opera del gesuita. Il testo di

Maurolico potrebbe quindi essere stata una fonte diretta per Grimaldi che ne avrebbe replicato le osservazioni quasi letteralmente. Una simile ipotesi impone una profonda riconsiderazione del ruolo dello scienziato bolognese nella storia della scienza: egli non apparirebbe più come l'isolato scopritore della diffrazione, secondo una consolidata tradizione storiografica, bensì come una figura inserita in un articolato processo di ricezione, trasmissione e rielaborazione delle conoscenze sulla natura della luce e degli esperimenti nel campo dell'ottica.

L'emergere di tali questioni e l'assenza di studi più consistenti sul gesuita bolognese evidenzia come, nonostante la fama del suo nome, la produzione grimaldiana sia stata spesso citata in modo stereotipato più che effettivamente indagata. Infatti, sebbene l'opera di Grimaldi possa essere considerata almeno virtualmente l'inizio dell'ottica fisica, nonché un punto di svolta fondamentale nella storia della scienza, dall'analisi della sua storiografia si può senz'altro affermare che resta ancora una grande sconosciuta (Tabarroni, 1964). Tale vuoto è ulteriormente confermato dall'assenza di ristampe moderne o di traduzioni integrali del trattato, un fattore che ha sicuramente limitato la diffusione del testo ad una cerchia molto ristretta di esperti.

Oggi, tuttavia, l'analisi del contributo scientifico di Grimaldi può rappresentare un prezioso terreno di ricerca, da affrontare altresì con una rinnovata consapevolezza sulla natura della luce, tema che per secoli ha rappresentato una delle questioni più complesse e dibattute della storia della scienza. Tuttavia, per superare un approccio puramente storiografico e colmare le lacune emerse nell'analisi dello stato dell'arte, appare necessario integrare un approccio che metta alla prova il testo anche e soprattutto attraverso la replica degli esperimenti originali. È proprio in questa dimensione che si inserisce il presente lavoro, utilizzando la replica sperimentale come strumento d'indagine per comprendere maggiormente il contributo scientifico di Grimaldi nella storia della fisica.

1.2 La replica degli esperimenti storici come strumento d'indagine

Prima di analizzare il contributo scientifico di Grimaldi e la sua opera, è necessario delineare il quadro teorico entro cui si inserisce la presente ricerca. Nello specifico, la ricerca si colloca nell'ambito della cosiddetta *storia della scienza sperimentale*, un ambito di studio che indaga le pratiche scientifiche, la loro evoluzione, trasmissione e trasformazione, partendo dall'idea che il sapere scientifico non derivi soltanto da concetti teorici, ma anche dalle pratiche operative attraverso cui i fenomeni vengono indagati (Breidbach et al., 2010). Tale approccio si inserisce all'interno di una più

ampia trasformazione della storia della scienza, che negli ultimi decenni ha progressivamente spostato l'attenzione dagli studi quasi esclusivamente d'archivio all'analisi delle pratiche e della cultura materiale, viste come portatrici di valori e significati epistemici. In letteratura, si è parlato infatti di una vera e propria svolta pragmatica della storia della scienza (Taub, 2011).

In primo luogo, è interessante notare come nell'insegnamento scientifico, la storia della scienza venga quasi sempre ridotta ad una serie di aneddoti spesso scorrelati e privi di una reale utilità pedagogica. Nel caso di Grimaldi questo aspetto risulta particolarmente evidente, dal momento che il suo contributo nei manuali di fisica viene spesso ridotto ad un semplice riferimento nell'introduzione della diffrazione, che lo presenta come il solo scopritore del fenomeno. Tale approccio non restituisce un'immagine adeguata della disciplina, poiché presenta gli scienziati come geni isolati o figure apparentemente distanti dalla realtà quotidiana, descrivendo il progresso scientifico come una successione lineare di scoperte compiute soltanto da pochi individui (Heering, 2009; Heering & Wittje, 2012). D'altra parte, va anche detto che la pratica sperimentale, pur essendo il tratto distintivo del sapere scientifico moderno, non ha mai rappresentato uno strumento d'indagine standard per la storia o la filosofia della scienza, che generalmente privilegiano l'analisi dei testi alla replica sperimentale vera e propria (Fors et al., 2016).

La *storia della scienza sperimentale* può rappresentare un prezioso strumento metodologico capace di superare simili distorsioni, in particolare grazie alla riproduzione di esperimenti storici. Chang (2011) distingue tre tipologie di esperimenti storici: repliche storiche, repliche fisiche ed estensione. Se nella replica storica l'idea è quella di avvicinarsi il più possibile alle condizioni dell'esperimento originale, nella replica fisica l'obiettivo è quello di riprodurre i fenomeni fisici osservati in esperimenti del passato, anche attraverso l'utilizzo parziale o completo di strumentazione e metodi moderni. L'estensione, invece, che generalmente si presenta come il naturale sviluppo di una certa replica, permette di costruire delle varianti o degli esperimenti completamente diversi nati ad ogni modo da questioni sollevate dall'esperimento originale. Naturalmente, l'estensione non è sempre funzionale alla comprensione storica in senso stretto, ma può essere in ogni caso considerata una forma di sperimentazione storica nella misura in cui trae ispirazione dal passato. Difatti, soprattutto in ambito didattico, l'utilizzo di resoconti storici come strumento di partenza consente agli studenti di esplorare interessi personali e giungere a nuovi tipi di comprensioni (Cavicchi, 2009).

Al di là delle varie tipologie di esperimenti storici, si può senza dubbio affermare che questi contribuiscono a far progredire la nostra conoscenza della scienza del passato e, nell'ambito della ricerca strettamente storiografica, sono in grado di far emergere la

cosiddetta *tacit knowledge*.

Come sostiene Polanyi (1966) «*possiamo conoscere più di quanto sappiamo dire*»: esiste infatti un evidente divario tra la conoscenza esplicita, contenuta in testi, formule e disegni, e la conoscenza tacita, che emerge invece nella pratica, nell'abilità manuale e nella percezione sensoriale dello sperimentatore e che molto spesso non può essere neppure espressa a parole. È proprio dall'integrazione di queste due dimensioni che è possibile giungere ad una comprensione più completa dell'esperimento scientifico, che non può sicuramente esaurirsi nella sua semplice descrizione attraverso i testi.

Naturalmente, proprio perché una parte rilevante della conoscenza scientifica resta tacita, la replica sperimentale non può essere considerata una semplice riproduzione di un risultato già noto. Come osserva Pestre (1994), essa comporta inevitabilmente una serie di scelte e interpretazioni, soprattutto nei casi in cui le fonti non descrivono in modo completo i dettagli operativi dell'esperimento. In questo senso, la replica può essere paragonata ad una forma di rievocazione storica: così come nella realizzazione di un film storico è necessario colmare i vuoti lasciati dalle fonti con ipotesi plausibili su costumi, acconciature e registri linguistici, anche nella ricostruzione di un esperimento lo storico è chiamato ad elaborare delle ipotesi su ciò che i testi non esplicitano. Questa operazione rende evidente il rischio di anacronismo, ma allo stesso tempo permette di far emergere aspetti della pratica scientifica che resterebbero quasi del tutto invisibili in uno studio puramente d'archivio.

Ad esempio, un aspetto particolarmente rilevante e spesso trascurato nei testi riguarda la natura dei materiali impiegati negli esperimenti scientifici. Nelle dimostrazioni o nelle repliche didattiche degli esperimenti più celebri della storia della scienza si utilizzano molto spesso dispositivi moderni o semplificati, che si discostano da quelli originali, sia per ragioni pratiche legate alla reperibilità dei materiali, sia per ridurre le difficoltà operative dell'esperimento stesso. Se da un lato l'impiego di tali materiali semplifica notevolmente il lavoro, dall'altro, come sostiene Pestre (1995), non permette di rendere conto delle difficoltà incontrate nella fase di ricerca. Difatti, nella maggior parte dei casi, la riproduzione di un esperimento storico mostra come le cose siano molto più complicate di quanto si è portati a credere (Chang, 2011).

La questione dei materiali, che spesso richiede inevitabilmente il coinvolgimento di artigiani o esperti per la realizzazione dei vari componenti, rappresenta solo una delle dimensioni coinvolte in questo tipo di ricerca. Come sottolineato da Höttecke (2000), la replica sperimentale si articola in un processo multidimensionale, il cui punto di partenza consiste sicuramente nella raccolta e nell'analisi di una vasta gamma di fonti primarie, che spaziano dalle pubblicazioni originali ai taccuini di laboratorio, fino ai verbali degli incontri scientifici e alle monografie dell'epoca. La raccolta di queste

fonti è indispensabile per ricostruire con la massima precisione possibile l'apparato sperimentale, poiché fornisce dettagli fondamentali sul set-up, sui possibili materiali impiegati e sulla relazione dello sperimentatore con questi.

Per quanto concerne gli scopi di tali esperimenti, se ne possono individuare diversi. Oltre al far emergere la conoscenza tacita, la replica degli esperimenti storici consente di valutare le intenzioni che si celano dietro i testi degli scienziati, arrivando talvolta a metterne in discussione l'affidabilità, qualora l'esperimento fallisca nonostante i ripetuti sforzi (Chang, 2011). Inoltre, come sottolinea Sichau (2000) questo approccio contribuisce a migliorare le nostre concezioni sulla natura della scienza, in quanto rappresenta un modo per riflettere su cosa significhi produrre conoscenza nell'ambito scientifico. Infine, trattandosi di un processo che implica un continuo lavoro di autoriflessione nel rapporto dello sperimentatore con gli strumenti e con le fonti, la replica sperimentale permette di rileggere il materiale originale da prospettive completamente differenti (Heering, 2010), sollevando spesso nuovi interrogativi e aprendo potenzialmente nuove domande di ricerca.

Da un punto di vista storico, l'approccio storico-sperimentale non è stato subito accettato dagli storici: la loro principale difficoltà era infatti quella di riconoscere che i metodi scientifici, tra cui l'esperimento, non costituiscano strumenti universali e neutrali, ma siano anch'essi prodotti della cultura materiale e del contesto storico di riferimento (Sibum, 2022). L'interesse per questo ambito di ricerca è nato soprattutto grazie ad alcuni lavori pionieristici realizzati nel secolo scorso nell'ambito della storia della fisica. Tra i più celebri, è possibile citare quelli di Settle (1961), Drake (1970, 1973) e MacLachlan (1976) sulla meccanica galileiana. Successivamente, a partire dagli anni Novanta, la replica degli esperimenti storici ha iniziato ad acquisire sempre più successo, in particolare grazie alle ricerche sviluppate in ambito europeo e, più specificatamente, al lavoro del gruppo di Oldenburg guidato da Falk Riess, che ha posto particolare attenzione all'utilizzo degli esperimenti storici nella formazione degli insegnanti di scienze (Riess, 2000). Un esempio significativo dell'utilizzo di questo metodo all'interno delle scuole secondarie può essere rintracciato in uno dei tanti studi di Heering (2000).

Con il crescente interesse verso la replica sperimentale, sia in ambito didattico sia nella ricerca storiografica, l'utilizzo di questo approccio si è progressivamente esteso ad altri settori della fisica ma anche ad altre discipline, come la chimica e l'archeologia. Tra gli esempi più significativi si possono citare gli studi nell'ambito della termodinamica, come la ricostruzione dell'apparato a ruota a pale di James Joule per la determinazione dell'equivalente meccanico del calore, realizzata da Sibum (1995), che ha portato a conclusioni ampiamente dibattute riguardo la fattibilità dell'esperimento così come

descritto originariamente dallo scienziato, o quelli sulla legge dell'inverso del quadrato in elettrostatica (Heering, 1992). Analogamente, anche nel campo dell'elettromagnetismo, gli esperimenti di Michael Faraday sono stati oggetto di numerose repliche, tra cui quella realizzata da Höttecke (2000).

Nell'ambito dell'ottica, uno studio pionere di questo tipo è quello realizzato da Stuewer (1970) che ha realizzato una ricostruzione moderna degli esperimenti di diffrazione compiuti da Newton, con l'obiettivo di chiarire per quale motivo egli avesse mancato l'osservazione delle frange interne già descritte da Grimaldi e quale ruolo questa mancata osservazione avesse avuto nella sua adesione alla teoria corpuscolare della luce. In linea con il metodo adottato da questa tipologia di studi, il suo lavoro è riuscito a combinare una puntuale analisi dei testi ad una precisa ricostruzione sperimentale degli apparati newtoniani. Anche nel caso degli esperimenti storici sulla luce, nel tempo si sono aggiunti ulteriori contributi, dedicati soprattutto agli esperimenti più celebri della storia della fisica come l'esperimento della doppia fenditura di Thomas Young (Mercier, 2022) o l'*Experimentum crucis* di Isaac Newton (Grusche, 2015).

1.3 Questo contributo

1.3.1 Obiettivi e aspetti di originalità

La presente ricerca si propone di offrire una nuova proposta di monografia su Francesco Maria Grimaldi, integrando la dimensione della replica sperimentale all'interno degli studi che sono già stati condotti sul gesuita bolognese. Dall'analisi dello stato dell'arte emerge infatti con chiarezza come Grimaldi necessiti ancora di uno studio approfondito e sistematico, più volte auspicato dagli studiosi citati ma non ancora pienamente realizzato.

L'obiettivo principale è dunque quello di contribuire, almeno in parte, a colmare tale lacuna, con la convinzione che un approccio di tipo storico-sperimentale, precedentemente illustrato nel quadro teorico, possa mettere in luce aspetti della pratica scientifica grimaldiana difficilmente rivelabili soltanto attraverso le fonti scritte, consentendo così di comprendere nuovi elementi sul suo contributo. Infatti, più che nelle scoperte e nei risultati, il merito maggiore di Grimaldi risiede nel metodo che egli sperimenta all'interno dello «*spazio ordinato e tangibile del suo laboratorio*» (Battistini, 1988).

Questo intento si inserisce inoltre nel più recente dibattito storiografico sollevato da Raynaud e Zanier (2025), i quali ridimensionano il ruolo di Grimaldi nella scoperta della diffrazione, attribuendo tale primato a Francesco Maurolico. Dinanzi a tale prospettiva, poiché nessuno dei due studiosi è stato in grado di fornire una spiegazione corretta del

fenomeno osservato, vi è il rischio di relegare il contributo di Grimaldi ad una posizione ancora più marginale nella storia della fisica. La storiografia infatti ha spesso ridotto la sua figura a quella di semplice scopritore della diffrazione, trascurando altri aspetti quali il metodo o la pratica sperimentale.

Alla luce di queste considerazioni, questo contributo si articola attorno alla seguente domanda di ricerca: è possibile integrare l'indagine storica e la replica sperimentale in un'analisi complessiva che consenta di comprendere e ridefinire il contributo di Francesco Maria Grimaldi, anche alla luce degli studi precedenti e successivi?

A partire da questa, si cercherà di rispondere ad alcune domande di ricerca più specifiche. Quali influenze teoriche e osservazioni sperimentali precedenti potrebbero aver inciso sulle ricerche condotte da Grimaldi? È oggi possibile ricostruire i suoi esperimenti tenendo conto delle condizioni materiali e strumentali del XVII secolo? Quali difficoltà operative e percettive emergono dalla replica sperimentale e cosa rivelano circa la metodologia seguita da Grimaldi? Infine, come sono stati interpretati e rielaborati i fenomeni osservati da Grimaldi nella tradizione ottica successiva?

Per quanto riguarda le osservazioni sperimentali, l'attenzione sarà rivolta principalmente ai primi esperimenti sulla diffrazione della luce, che costituiscono il nucleo più originale del contributo grimaldiano. È infatti a partire da queste prove che Grimaldi riconosce una modalità di propagazione diversa da quelle tradizionalmente ammesse, osservando che la luce non procede soltanto in linea retta, per riflessione o per rifrazione, «... *sed etiam alio quodam Quarto modo, Diffracte*» (Grimaldi, 1665, *Propositio I*, p. 1), celebre espressione ripresa anche nel titolo di questa tesi. La replica sperimentale offrirà anche l'occasione per riprodurre l'osservazione descritta nella *Propositio XXII*, finora non sottoposta a una verifica sperimentale e spesso richiamata per la sua possibile vicinanza a un fenomeno di interferenza luminosa.

La scelta di concentrarsi soprattutto sugli esperimenti sulla diffrazione deriva dalla loro duplice importanza: da un lato, essi occupano una posizione centrale nella *Physico-Mathesis*, poiché Grimaldi li colloca all'inizio del trattato e li assume come punto di partenza per riflettere sulla natura della luce e sui colori; dall'altro, saranno proprio queste osservazioni a essere riprese e discusse da autori come Newton, Young e Fresnel.

Nel loro insieme, tutti gli interrogativi precedentemente sollevati mirano non solo a chiarire il contributo scientifico di Grimaldi all'interno della storia della fisica, ma anche a restituire la complessità storica e metodologica che caratterizza la sua figura. L'auspicio è che il presente contributo possa riunire i diversi fili della tradizione storiografica e proporre una narrazione più completa, capace di mettere finalmente in relazione i contributi precedenti, l'opera di Grimaldi e gli sviluppi successivi.

Inevitabilmente, anche in questa ricerca vengono compiute delle scelte soggettive e

per questo risulterà parziale. Nello specifico, questo contributo si concentra principalmente sulla *Physico-Mathesis de Lumine, Coloribus, et Iride*, che rappresenta l'unica opera scritta da Grimaldi e naturalmente costituisce la fonte principale per lo studio dei suoi apporti nell'ambito degli studi sulla luce. Tuttavia, come emergerà dall'analisi del suo profilo scientifico, Grimaldi fu per buona parte della sua carriera uno stretto collaboratore di Giovanni Battista Riccioli, con il quale collaborò ad importanti ricerche soprattutto nel campo astronomico. Tali contributi, che testimoniano l'ampiezza dei suoi interessi scientifici e il ruolo chiave che ha avuto nella produzione scientifica della scuola gesuitica bolognese del XVII secolo, verranno menzionati nel capitolo dedicato alla biografia di Grimaldi e contestualizzati nella sua presenza all'interno della Compagnia di Gesù, ma non saranno oggetto di particolare approfondimento scientifico. Senza dubbio, in futuro meriterebbero di essere inclusi in uno studio ancora più ampio e complessivo.

1.3.2 Metodologia di ricerca

La metodologia adottata nel presente lavoro si fonda su un approccio integrato di tipo storico-sperimentale. Essa combina l'analisi di fonti primarie e secondarie, la loro triangolazione e messa in relazione critica, nonché lo studio sperimentale delle fonti primarie ai fini della conduzione delle osservazioni.

Per quanto concerne l'analisi dei contributi di Francesco Maria Grimaldi allo studio della natura della luce, la fonte primaria di riferimento è naturalmente la sua *Physico-Mathesis de Lumine, Coloribus, et Iride*, della quale, come già evidenziato in precedenza, non esistono traduzioni moderne né ristampe critiche. Pertanto, la lettura dell'opera viene affiancata dal confronto con la letteratura secondaria, in particolare con i lavori di Savelli (1951) e Ronchi (1952) che, come evidenziato nello stato dell'arte, rappresentano le uniche analisi dell'opera che vanno oltre i soli esperimenti della diffrazione. Per i passi del trattato di Grimaldi e di quelli di Riccioli dei quali non sono disponibili traduzioni precedentemente elaborate, ci si avvale del supporto critico di strumenti di intelligenza artificiale.

All'analisi storiografica viene poi affiancata una dimensione di tipo sperimentale, consistente nella replica di alcune delle esperienze descritte da Grimaldi. Tale scelta si inserisce in un approccio ormai consolidato negli studi di storia della scienza, che considera la ricostruzione degli esperimenti non come semplice riproduzione dimostrativa, ma come un prezioso strumento per indagare le condizioni materiali, operative e percettive della pratica scientifica del passato. In linea con la classificazione proposta da Chang (2011) e con la metodologia adottata da Heering (Heering, 1992, 2000, 2009, 2010) e dal gruppo di Oldenburg, sono state privilegiate repliche di tipo stori-

co, volte a mantenere la maggiore fedeltà possibile alle descrizioni originali contenute nella *Physico-Mathesis*. I dettagli relativi all'apparato sperimentale utilizzato saranno discussi nel dettaglio all'interno del Capitolo 4.

La replica sperimentale viene naturalmente condotta nella consapevolezza dei limiti intrinseci di questo approccio, legati sia alla difficoltà di ricostruire fedelmente materiali e condizioni originarie, sia al rischio di introdurre elementi anacronistici nella pratica e nella sua interpretazione. Tali limiti non rappresentano tuttavia un ostacolo, ma costituiscono parte integrante del processo di analisi e dell'approccio adottato dalla *storia della scienza sperimentale*.

Capitolo 2

Francesco Maria Grimaldi tra fede, scienza e cultura bolognese

2.1 Biografia

Le fonti primarie utili alla ricostruzione della vita di Francesco Maria Grimaldi sono relativamente limitate e consistono principalmente nell'*Elogium perbreve*, redatto da Giovanni Battista Riccioli e inserito in appendice alla *Physico-Mathesis*, nonché nell'*Epitome genealogiae Grimaldae gentis* contenuta nell'*Almagestum Novum*, l'imponente *summa* del sapere astronomico redatta dal celebre gesuita ferrarese. La storiografia successiva ha rielaborato criticamente tali testimonianze, integrandole ad ulteriori indagini d'archivio. Tra i contributi più significativi, si distinguono per particolare completezza quelli di Tabarroni (1964, 1998), che ha anche consentito di risolvere alcune incongruenze relative alla data di morte del gesuita bolognese, e di Baldini (2002). Sulla base di queste fonti, primarie e secondarie, viene ricostruita la vita, straordinariamente modesta e priva di eventi di particolare rilievo, dello studioso bolognese.

Francesco Maria Grimaldi nacque a Bologna il 2 aprile 1618, in una casa situata in via San Felice, di fronte alla chiesa di San Nicolò, allora sede parrocchiale. La famiglia, nobile e ricca, discendeva dal medesimo ceppo genovese da cui ebbe origine anche il ramo dei principi di Monaco. Suo padre, Paride Grimaldi, si era trasferito a Bologna nel 1589, dove pare esercitasse l'attività di mercante di seta, settore di primaria importanza nel commercio bolognese del tempo. Rimasto vedovo della sua prima moglie nel 1609, contrasse un secondo matrimonio nel 1614 con Anna Cattani, giovane bolognese anch'essa di nobile origine. Dal matrimonio nacquero almeno sei figli maschi, cinque dei quali sopravvissero ¹. Francesco Maria, terzogenito, entrò nella

¹Riccioli (1651), nell'*Epitome*, ricorda in ordine sparso i fratelli di Grimaldi: Antonio Maria, morto prematuramente all'età di ventidue anni; Vincenzo Maria, entrato nella Compagnia di Gesù e docente di Matematica nel Collegio di Mantova; Giuseppe Maria, insignito del titolo di marchese e sposato con Sulpizia, figlia di Alessio Orsi, senatore di Bologna e conte di San

Compagnia di Gesù il 18 marzo 1632 assieme al fratello Vincenzo Maria, di poco maggiore (Riccioli, 1651).

I primi due anni di formazione dello studioso si svolsero presso la casa di noviziato in Borgo della Paglia ², aperta nel 1627, per poi spostarsi nel vecchio noviziato gesuitico di Novellara per ragioni non note. Si trattava degli anni del processo a Galileo Galilei, evento che influenzò in maniera significativa il rapporto tra la Compagnia di Gesù, cui Grimaldi era da poco entrato, e la nuova scienza. Nel 1635, si trasferì a Parma per il triennio di studi preparatori all'Università. Qui si dedicò allo studio della filosofia e della teologia scolastica, ma ebbe anche modo di entrare in contatto con padre Giovanni Battista Riccioli, allora già quasi interamente impegnato nella preparazione del suo *Almagestum Novum*. Dopo la chiusura della scuola parmense, dovuta a difficoltà politiche ed economiche, gli studi di Grimaldi proseguirono tra Ferrara e Bologna: nel 1636 frequentò infatti i corsi a Ferrara e l'anno successivo fece definitivamente ritorno a Bologna, presso il collegio di Santa Lucia, per completare il terzo anno del corso. Da quel momento, non si allontanò più dalla sua città natale, se non in occasione delle campagne geodetiche e topografiche condotte assieme a Riccioli (Tabarroni, 1998).

Tornato a Bologna, Grimaldi intraprese l'attività di insegnamento presso Santa Lucia dove, dal 1638 al 1641, tenne corsi di *Umanità e Retorica*. Nello stesso periodo, iniziò gradualmente ad avvicinarsi anche alla fisica sperimentale e alla scuola galileiana, grazie soprattutto alla collaborazione con Riccioli, con il quale realizzò gli esperimenti sul moto di caduta dei gravi dalla torre degli Asinelli, confermando la legge quadratica suggerita da Galileo. Più tardi, si dedicò allo studio della teologia e conseguì il titolo di dottore in Filosofia nel 1647 (Tabarroni, 1964).

Negli anni immediatamente successivi alla laurea iniziò il magistero in Filosofia, incarico ritenuto particolarmente faticoso, che contribuiva a compromettere ulteriormente la sua salute già abbastanza fragile ³. Per tale ragione, nel 1648, fu indirizzato all'insegnamento delle Scienze Matematiche, compito considerato meno impegnativo anche in ragione del numero più limitato di ore di lezione, dovuto al maggiore spazio riservato alle discipline umanistiche. In questo contesto ebbe modo di approfondire

Quintino; e Paride Maria, che per un bimestre fu comunque annoverato tra gli Anziani preposti al governo della città di Bologna.

²L'attuale via Belle Arti corrisponde all'area in cui sorgeva il noviziato, la cui sede coincide oggi con quella dell'Accademia delle Belle Arti e della Pinacoteca.

³Francesco Maria Grimaldi e il fratello Vincenzo Maria, entrambi di mente brillante ma di salute molto cagionevole, furono probabilmente indirizzati alla Compagnia di Gesù anche in ragione di tale condizione (Tabarroni, 1998).

numerosi settori, tra cui la geometria, l'ottica, la gnomonica, la statica, la geografia e l'astronomia, con particolare attenzione alla meccanica celeste, contribuendo al contempo alle ricerche contenute nell'*Almagestum Novum* di Riccioli, pubblicato nel 1651. Nello stesso anno, il 1 maggio, all'età di trentatré anni, pronunciò i voti solenni (Baldini, 2002).

A questi ultimi interessi lo studioso si dedicò per circa quindici anni, sostanzialmente fino alla sua morte: un periodo relativamente breve ma estremamente produttivo, che comprende, come già accennato, la stretta collaborazione con il maestro Riccioli, le numerose esperienze di ottica confluite nella *Physico-Mathesis de Lumine, Coloribus, et Iride* e, naturalmente, la stesura dell'opera che lo renderà noto ai posteri.

Morì a Bologna il 28 dicembre 1663, all'età di quarantacinque anni ⁴, a causa di una malattia, *sputum sanguinis* ⁵, che ne aveva progressivamente compromesso le condizioni fisiche (Riccioli, 1651).

2.2 «*Homo rationalis*»: testimonianze coeve e tracce materiali

Al di là dei dati biografici, che nel caso di padre Grimaldi risultano non solo scarsi ma anche relativamente poco significativi, limitandosi per lo più ad un elenco di date relative alla sua formazione, la ricostruzione della sua personalità presenta ulteriori difficoltà. Basti pensare alla brevità della sua vita, all'appartenenza alla Compagnia di Gesù, all'attività svolta in un contesto sostanzialmente circoscritto, quello bolognese, alla frequente riduzione del suo ruolo a mero collaboratore di Giovanni Battista Riccioli e alla scarsità di documentazione epistolare. Ciononostante, alcuni tratti del profilo e del carattere dello studioso possono essere ricostruiti a partire dalle testimonianze dei confratelli e dalle poche tracce materiali ancora presenti nella sua città natale.

La testimonianza più rilevante è sicuramente quella dell'amico e maestro Riccioli che, nell'*Elogium perbreve*, oltre a riportare alcuni dati biografici essenziali, lo descrive come un uomo «*ab ambitione remotus, a voluptatibus alienus, disciplinae religiosae observantissimus, prudens in consiliis, ingeniosus in excogitandis, diligens in exsequen-*

⁴Riccioli (1651) attribuisce a Grimaldi, al momento della morte, un'età inferiore di un anno rispetto a quella qui riportata. Anche l'epigrafe apposta alla sua abitazione riporta l'età di quarantaquattro anni. Tabarroni (1964) ha esaminato attentamente tale incongruenza attraverso il confronto di diverse testimonianze, concludendo che essa sia da attribuire ad una svista del Riccioli nella stesura dell'*Elogium perbreve*.

⁵Verosimilmente riconducibile a tubercolosi (Tabarroni, 1998).

dis»⁶. L'insistenza su qualità quali la modestia, la disciplina, la prudenza e l'operosità riflette un insieme di virtù che non solo qualificano lo studioso, ma rinviano anche a un modello ideale pienamente coerente con i valori promossi all'interno della Compagnia di Gesù. La stessa fonte si sofferma anche sugli ultimi momenti della vita di Grimaldi, insistendo ancora una volta sulla sua pietà e sulla serenità con cui avrebbe affrontato la morte. Quando comprese che la sua vita era ormai in pericolo, egli volle ricevere i sacramenti e, stringendo tra le mani un'immagine di san Francesco Saverio, verso il quale nutriva una particolare devozione, la baciava bagnandola di lacrime. Dopo la morte, il suo volto sarebbe apparso sul feretro così sereno da sembrare quasi sorridente, suscitando meraviglia non solo tra i confratelli, ma anche tra i laici presenti, che lo definirono, ironia della sorte, un «*figliuol di luce*». Tale giudizio, pur inserendosi in un contesto encomiastico, non appare certo isolato: almeno sul piano caratteriale e morale, infatti, esso risulta del tutto condiviso all'interno dell'ordine. Difatti, Riccioli riporta, nello stesso scritto, anche la valutazione dei superiori, sintetizzata nella formula «*vixit inter nos sine querela*»⁷, espressione che allude ad una condotta esemplare e priva di rilievi, e che contribuisce ad attribuirgli un atteggiamento chiaramente improntato alla disciplina e alla riservatezza (Riccioli, 1651).

Anche Patrignani, nel suo *Menologio di pie memorie d'alcuni religiosi della Compagnia di Gesù distribuito per quei giorni dell'anno, ne' quali morirono, dall'anno 1538 all'anno 1728*, dopo aver riportato il contenuto dell'*Elogium perbreve* di Riccioli, presenta un'ulteriore testimonianza sul profilo grimaldiano. In essa, la pazienza nell'insegnamento e la prudenza del giudizio vengono ricondotte a una razionalità costante, tanto da meritargli l'appellativo di «*Homo rationalis*» (Patrignani, 1730, p. 230):

Era, dice, il Padre Grimaldi nell'insegnare a' Nostri Giovani pazientissimo. In ogni cosa con tal prudenza si diportava, che dal Padre Alessandro Simonetta, uomo dottissimo insieme, e piissimo era chiamato Homo rationalis. E voleva dire, che quanto diceva, faceva, o tralasciava di fare, tutto era animato dalla ragione. E per questo tutti andavano a consigliarsi con lui, come all'Angelo del Consiglio.

A confermare la sua straordinaria modestia si può richiamare anche il fatto che,

⁶«lontano dall'ambizione, estraneo ai piaceri, osservantissimo della disciplina religiosa, prudente nei consigli, ingegnoso nell'ideare, diligente nell'eseguire» [Traduzione a cura dell'autrice, realizzata con il supporto di strumenti di intelligenza artificiale]

⁷«visse in mezzo a noi senza accusa» [Traduzione a cura dell'autrice, realizzata con il supporto di strumenti di intelligenza artificiale]

nel corso della sua vita, Grimaldi non fece ricorso né alla propria origine nobiliare né alle relazioni familiari per favorire il proprio avanzamento all'interno della Compagnia, mostrando anzi una certa ritrosia nei confronti di incarichi di maggiore rilievo. In questo senso, Baldini (2002) segnala un episodio particolarmente significativo: in una lettera, il generale Giovanni Paolo Oliva designa Grimaldi ad un incarico di governo, verosimilmente il rettorato di una sede. Nonostante le ripetute sollecitazioni, egli rifiutò la nomina. Più tardi, rivolgendosi a Riccioli ed esprimendo il proprio cordoglio per la morte di Grimaldi, lo stesso generale richiamò tale episodio, provando ad attribuire il rifiuto di Grimaldi a possibili fattori esterni: *«forse, se gli lasciavano accettare il governo, che io gli destinai, non sarebbe morto»*.

Anche grazie alla sua riservatezza, la figura di Grimaldi rimase sempre in parte defilata trovando pieno riconoscimento, tanto sul piano morale quanto su quello scientifico, soltanto da coloro che ebbero un accesso diretto alla sua produzione scientifica. Dei suoi rapporti con il panorama scientifico bolognese della metà del Seicento si dirà più ampiamente in seguito, ma sicuramente Riccioli non era il solo a riconoscere le qualità del gesuita bolognese. Geminiano Montanari, per esempio, parla di Grimaldi come di un uomo *«di grandissimo intelletto, e d'un sincerissimo amore della verità»*⁸; Honoré Fabri lo descrive come *«vir doctissimus et ingeniosissimus»*⁸; Giovanni Domenico Cassini, infine, lo ricorda come *«mihi, dum viveret, amicissimus»*⁹ (Baldini, 2002).

È interessante notare come, anche quando viene esplicitamente menzionato, Grimaldi appare nelle testimonianze coeve soprattutto in relazione alla collaborazione con Giovanni Battista Riccioli e agli studi condotti insieme al maestro, soprattutto in ambito astronomico. Le ricerche ottiche, che nei decenni successivi avrebbero rappresentato l'aspetto più significativo e duraturo della sua produzione scientifica, ricevettero invece un'attenzione assai limitata, se non del tutto marginale.

Questa scarsa visibilità non riguarda soltanto la ricezione delle sue ricerche ottiche, ma più in generale la memoria della sua figura al di fuori dell'ambiente gesuitico e scientifico bolognese. Pur essendo stato stimato dai confratelli per le sue qualità personali e dagli studiosi locali per le sue capacità di osservatore e sperimentatore, Grimaldi sembra essere rimasto quasi inosservato nel resto della città. Anche la sua morte prematura, nonostante l'appartenenza a una delle famiglie più nobili di Bologna, non pare aver lasciato tracce significative nella memoria cittadina. È indicativo, in questo senso,

⁸«uomo dottissimo e ingegnoso» [Traduzione a cura dell'autrice, realizzata con il supporto di strumenti di intelligenza artificiale]

⁹«a me, finché visse, carissimo amico» [Traduzione a cura dell'autrice, realizzata con il supporto di strumenti di intelligenza artificiale]

che opere attente a registrare le personalità più rilevanti di Bologna, soprattutto in ambito religioso, come la *Bologna perlustrata* di Masini e le *Cose notabili della città di Bologna* di Guidicini, non gli riservino praticamente alcuna menzione (Tabarroni, 1964).

Se le testimonianze coeve offrono dunque pochi elementi per ricostruire la figura di Grimaldi, nella città di Bologna, dove egli nacque e trascorse gran parte della propria vita, è tuttavia ancora possibile individuare alcune tracce materiali e documentarie della sua presenza. Una prima traccia, particolarmente significativa per ricostruire almeno la fisionomia di Grimaldi, è costituita dal suo ritratto, l'unico attualmente noto e conservato presso Palazzo Poggi¹⁰. Il dipinto, presumibilmente postumo, ritrae lo studioso a mezzo busto con il tipico abbigliamento da sacerdote della Compagnia di Gesù: la berretta nera a tre canti che lascia scoperta la fronte, l'ampio mantello e l'abito talare in lana, completato dal collarino bianco, il tutto rigorosamente di colore nero (Petruzzelli, 2012).



Figura 2.1: Ritratto di Francesco Maria Grimaldi, olio su tela, sec. XVII, conservato presso Palazzo Poggi, Bologna.

A delineare il suo profilo sociale e intellettuale concorrono invece alcuni elementi simbolici: lo stemma della famiglia Grimaldi in alto a sinistra, una sfera armillare che rimanda ai suoi studi astronomici, una libreria a destra che potrebbe essere un

¹⁰Palazzo Poggi fu acquistato dal Senato bolognese nel 1711 per ospitare l'Istituto delle Scienze e delle Arti, promosso da Luigi Ferdinando Marsili. Oggi l'edificio è sede del Rettorato dell'Università di Bologna e conserva importanti collezioni storico-scientifiche dell'Ateneo.

riferimento alle letture del gesuita o, più in generale, alla vastità dei suoi interessi. Tra i volumi raffigurati, soltanto uno reca un titolo leggibile, «*Motus*», che richiama esplicitamente gli studi sul moto condotti insieme al maestro Riccioli, in particolare quelli relativi alla verifica della legge galileiana di caduta dei gravi. Particolarmente significativa appare, inoltre, l'assenza di riferimenti iconografici alla luce e ai colori, ambito nel quale, come già detto, Grimaldi avrebbe raggiunto i risultati più rilevanti e destinati ad ottenere maggiore fortuna.

Secondo Petruzzelli (2012), trattandosi di uno studioso bolognese, si sono volute enfatizzare le sue ricerche effettuate sul territorio, in particolare gli esperimenti sulla caduta dei gravi e le osservazioni astronomiche condotte con i suoi confratelli, senza percepire, a così breve distanza temporale e spaziale, la più ampia portata che l'opera di Grimaldi avrebbe assunto nel campo della fisica della luce e dei colori. Come si vedrà più avanti, infatti, fu necessario attendere quasi mezzo secolo prima che i contributi di Grimaldi in questo ambito iniziassero a ricevere un riconoscimento più ampio in Europa: ciò avvenne soprattutto dopo che Isaac Newton ne citò più volte il nome nella sua *Opticks* (Newton, 1704).

Un'altra ipotesi potrebbe ricondurre tale esclusione a ragioni di ordine politico o ideologico. Questa interpretazione, tuttavia, viene respinta da Petruzzelli (2012), dal momento che, nella raccolta di dipinti messa insieme da Filippo Maria Monti ¹¹, Grimaldi compare accanto non solo a figure canoniche della tradizione cristiana, come san Tommaso e Duns Scoto, ma anche a filosofi e scienziati le cui idee non godevano di un'accettazione pacifica negli ambienti ecclesiastici, tra cui Descartes, Malebranche, Locke, Bacon, Galileo e Boyle.

La questione, tuttavia, potrebbe apparire più sfumata di quanto sembrerebbe a prima vista. Ad esempio, in passato si è ipotizzato che Riccioli, mosso anche dall'affetto e dalla stima per il confratello, possa aver favorito il percorso del manoscritto fino alla pubblicazione, senza per questo dividerne pienamente le tesi in esso contenute. Le riserve nei confronti dell'opera potevano essere legate non solo alla novità dell'interpretazione proposta da Grimaldi, ma anche alle condizioni di salute ormai compromesse in cui egli si trovava durante la fase finale della stesura: circostanza che poteva alimentare il dubbio, agli occhi dei contemporanei, che alcune osservazioni fossero state

¹¹Il cardinale Filippo Maria Monti (1675–1754), dietro sollecitazione di Benedetto XIV, lasciò in eredità all'Istituto delle Scienze bolognese una ricchissima collezione libraria e una raccolta di 403 dipinti. Tale raccolta si configurava come una galleria di teologi, filosofi, letterati, filologi e scienziati, volta a rappresentare i protagonisti della cultura moderna. Al suo interno trovava posto anche il ritratto di Francesco Maria Grimaldi.

interpretate con eccessiva fiducia (Tabarroni, 1998).

Un atteggiamento di esplicita diffidenza emerge, del resto, anche nella posizione di Geminiano Montanari, che respinse con decisione l'interpretazione dei fenomeni proposta da Grimaldi. Il dato è particolarmente importante perché, come si mostrerà nel Capitolo 3, alcuni aspetti della spiegazione grimaldiana sembrano avvicinarsi a temi che diventeranno centrali nelle successive teorie ondulatorie della luce. Tale rifiuto dovette pesare non poco sulla ricezione locale dell'opera, poiché il giudizio di Montanari poteva orientare l'opinione di una parte significativa dell'ambiente scientifico bolognese. Inoltre, è plausibile ritenere che l'ambiente dell'Istituto delle Scienze si allineasse, almeno in parte, al giudizio dell'autorevole maestro (Tabarroni, 1998). Da questo punto di vista, l'assenza di riferimenti alla luce nei dipinti non appare dunque casuale né sorprendente, ma può essere interpretata come il riflesso di una ricezione ancora incerta, se non apertamente diffidente, delle ricerche ottiche grimaldiane.

Un ulteriore elemento cui si sarebbe potuto fare riferimento sarebbe stata l'eventuale presenza di un'epigrafe tombale, ma in questo caso non vi è un sepolcro da poter visitare. Verosimilmente Grimaldi è stato sepolto assieme ai suoi confratelli sotto la pavimentazione della Chiesa di Santa Lucia¹², annessa al Collegio dove visse e svolse la sua attività di insegnamento. Tuttavia, in seguito agli interventi di restauro che, alla fine degli anni Ottanta del Novecento, interessarono l'edificio, i resti ossei collettivi furono sistemati altrove, rendendo oggi del tutto impossibile l'individuazione del suo sepolcro (Petrizzelli, 2012).

Dinanzi all'assenza di un sepolcro e alla pressoché totale mancanza di tracce materiali o di una memoria consolidata dello studioso nella sua città natale, all'inizio del Novecento prese avvio un processo di riscoperta della figura di Grimaldi.

Nel 1919, infatti, il reverendo don Dido Marchesi, in un articolo che venne pubblicato sull'*Avvenire d'Italia*, quotidiano bolognese d'ispirazione cattolica, accennò all'opportunità che il nome di Grimaldi fosse degnamente onorato. A tale suggerimento aderì Lavoro Amaduzzi che, con una lettera indirizzata al direttore dello stesso giornale, manifestò il proprio consenso all'iniziativa, di cui diventò il principale promotore. Ritenendola particolarmente complessa, egli decise di coinvolgere Augusto Righi, che

¹²L'antica chiesa di Santa Lucia, situata in via Castiglione e risalente al V secolo, passò nel XVI secolo, insieme al vicino convento, sotto il controllo dei Gesuiti. Dopo la soppressione della Compagnia di Gesù, nel 1775 fu affidata per breve tempo ai Barnabiti, per poi essere chiusa al culto in età napoleonica. In seguito all'Unità d'Italia l'edificio conobbe diverse destinazioni d'uso; restaurato, venne infine inaugurato nel 1988 come Aula Magna dell'Università di Bologna.

in quel periodo si trovava a Montese, avviando con lui uno scambio epistolare volto a discutere le modalità concrete dell'avvio dell'ambizioso progetto. Diverse circostanze contribuirono tuttavia ad abbandonare lo studio tanto auspicato: il graduale mancato sostegno dell'Amministrazione comunale di Bologna, la morte dello stesso Augusto Righi e alcune vicende personali poco liete nella vita di Amaduzzi. Solo nel 1926 quest'ultimo tornò a sollecitare l'Amministrazione comunale, ricevendo dal sindaco Umberto Puppini finalmente l'approvazione per la collocazione di una lapide sulla facciata della casa natale del gesuita in via San Felice 26 (Amaduzzi, 1928).

L'iscrizione scelta richiama in forma sintetica i principali ambiti di interesse dello studioso bolognese, ponendo tuttavia particolare attenzione alla scoperta alla quale il suo nome è rimasto maggiormente legato: la diffrazione della luce. Questo dato appare particolarmente significativo se confrontato con il ritratto precedentemente analizzato, nel quale mancava qualsiasi riferimento esplicito agli studi sulla luce e sui colori. A distanza di tre secoli dalla nascita di Grimaldi, la memoria pubblica dello studioso sembra dunque essersi ridefinita proprio attorno a quel contributo che, nelle testimonianze coeve, era rimasto quasi del tutto marginale. Il testo della lapide così recita:

*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*

2.3 La scienza all'interno della Compagnia di Gesù

Prima di ricostruire il contesto bolognese in cui Grimaldi operava e il suo rapporto con il maestro Riccioli, è necessario fare qualche breve accenno al ruolo assunto dalla

scienza all'interno della Compagnia di Gesù. La figura di Grimaldi, infatti, non può essere compresa soltanto come espressione di un talento individuale, né le sue ricerche possono essere isolate dal quadro istituzionale, culturale ed epistemologico entro cui presero forma.

Come ricorda Baldini (1992), considerati singolarmente, il contributo di Grimaldi all'ottica fisica o, ad esempio, quello di Cristoforo Clavio alle formule di prostaferesi potrebbero apparire come episodi tra loro disgiunti nella storia della fisica e della matematica, accomunati soltanto dall'appartenenza dei loro autori alla Compagnia di Gesù. Un'analisi più ravvicinata rivela invece l'esistenza di premesse concettuali condivise, di consuetudini epistemologiche consolidate e di vincoli relativi tanto ai contenuti quanto ai metodi, che permettono di riconoscere una struttura di pensiero coerente e indicabile, con le dovute cautele, come *scienza gesuitica*.

Il rapporto tra la Compagnia di Gesù e la nuova scienza fu infatti, fin dalle origini, tutt'altro che lineare. L'Ordine, fondato da Ignazio di Loyola nel 1540, nacque pochi anni prima della pubblicazione del *De revolutionibus* di Copernico, in una fase in cui il quadro cosmologico e filosofico tradizionale iniziava ad essere profondamente ridefinito. Sebbene già Ignazio avesse riconosciuto l'opportunità di includere l'insegnamento delle matematiche nelle scuole gesuitiche, fu soprattutto grazie all'opera di Cristoforo Clavio, professore di matematica al Collegio Romano dal 1565 al 1612, che queste furono effettivamente introdotte nell'insegnamento e assunsero un ruolo più importante all'interno del curriculum della Compagnia, orientandone la successiva tradizione (Dear, 1995).

Il riferimento principale dei Gesuiti restava tuttavia Aristotele e, tale impostazione, trovò ampiamente conferma nella *Ratio studiorum* del 1599, documento fondamentale per la formalizzazione del sistema educativo gesuitico, nel quale venivano ribaditi sia la centralità della tradizione aristotelica sia il costante riferimento all'autorità scolastica di Tommaso d'Aquino. Questa fedeltà alla tradizione non deve però essere intesa come un vincolo assoluto o privo di margini. La cultura gesuitica ammetteva la possibilità di discostarsi da alcune posizioni consolidate qualora vi fossero ragioni sufficienti per farlo, purché tale distacco avvenisse con prudenza e con il dovuto rispetto nei confronti delle autorità riconosciute (Marcacci, 2019).

Difatti, in alcune sedi della Compagnia, che nel corso del Seicento ormai disponeva di una rete di collegi di livello superiore paragonabile a quella universitaria, si avviò una prudente revisione delle tesi di filosofia naturale, nel tentativo di confrontarle con le nuove scoperte senza mettere radicalmente in discussione l'impianto della *Ratio studiorum*.

Un caso particolarmente significativo è rappresentato dal Collegio di San Rocco di

Parma, dove, anche grazie alla protezione dei Farnese, si sviluppò una scuola fisico-matematica di notevole livello, al punto da poter essere accostata a quella galileiana. Come osserva Borgato (2015), tale ambiente si distinse soprattutto in quei settori sperimentali meno direttamente coinvolti nelle questioni cosmologiche: si pensi, ad esempio, alla meteorologia, all'idraulica, all'elettricità o al magnetismo.

Figura centrale di questa tradizione fu il bolognese Giuseppe Biancani, docente a Parma per circa un ventennio e formatosi in un contesto segnato dal confronto con il coetaneo Galileo e con la scuola matematica di Clavio. Da quest'ultima egli ereditò il riconoscimento del valore epistemologico della matematica, che seppe tuttavia orientare verso una dimensione più sperimentale, contribuendo a predisporre quell'alleanza tra metodi matematici e contenuti fisici che avrebbe trovato piena espressione nella *physico-mathesis*, termine non a caso ricorrente in numerose opere scientifiche del Seicento, compresa quella grimaldiana. Sotto la sua guida si formarono figure come Niccolò Cabeo e Giovanni Battista Riccioli, attraverso il quale tale tradizione giunse successivamente proprio a Bologna (Battistini, 2000).

All'interno della stessa Compagnia, tuttavia, non mancavano orientamenti diversi e talora rivali. Un caso significativo è quello di Mario Bettini, docente di filosofia prima a San Rocco e poi a Bologna, che tendeva a privilegiare una concezione più contemplativa e teoretica della matematica, intesa come via di astrazione verso la teologia. La sua diffidenza nei confronti del sensorio umano e degli strumenti ottici lo portava inoltre a ridimensionare lo statuto conoscitivo dell'astronomia. Pur presentando nelle sue opere sezioni di evidente impronta sperimentale, il neoplatonismo pitagorico cui si ispirava alimentò una polemica con Riccioli, che nell'*Almagestum Novum* ne criticò i metodi di ricerca (Aricò, 2002).

Come spesso accade nella storia della scienza, anche la questione della scienza gesuitica si rivela dunque più complessa di quanto una narrazione lineare possa suggerire. Come hanno ampiamente mostrato gli studi degli ultimi decenni sul tema, in particolare quelli di Baldini (1992), ai quali si rimanda per una trattazione più sistematica dell'argomento, il rapporto tra la Compagnia di Gesù, Galileo e la nuova scienza non può essere ridotto alla semplice opposizione tra una Chiesa cattolica rigidamente antiscientifica e una scienza moderna ad essa esterna.

Inoltre, come osserva anche Dinis (2003), una lettura puramente normativa dei documenti della Compagnia rischia di restituire un'immagine troppo rigida della scienza gesuitica, poiché va a trascurare lo scarto tra gli appelli ufficiali all'ortodossia e le pratiche intellettuali effettivamente adottate dai singoli studiosi.

Si trattò, piuttosto, di un processo molto articolato, che coinvolse luoghi, figure e ambiti disciplinari diversi secondo tempi e modalità. A partire da questa consapevolezza-

za, nel paragrafo successivo si prenderà in esame un contesto molto specifico, nel quale tali tensioni assunsero una fisionomia significativa: la Bologna della metà del Seicento, all'interno della quale visse e operò proprio Francesco Maria Grimaldi.

2.4 I gesuiti nel contesto scientifico bolognese della metà del Seicento

Sebbene i gesuiti fossero presenti a Bologna già dalla metà del Cinquecento, con i primi insediamenti attestati a partire dal 1546, il loro ruolo nella cultura scientifica cittadina assunse un nuovo rilievo soltanto a partire dagli anni 1635-1636. In quel periodo, infatti, vennero istituiti corsi superiori completi di filosofia e teologia, nei quali trovava spazio anche l'insegnamento delle matematiche. Questo fu reso possibile grazie al trasferimento a Bologna della sede parmense di San Rocco, costretta a chiudere sia per il venir meno dei sussidi dei Farnese, sia per il clima di agitazione che si era creato a Parma (Tabarroni, 1964). Fu in seguito a questo trasferimento, infatti, che Riccioli giunse a Bologna nel 1636 come professore di teologia scolastica e, dopo alcuni successivi spostamenti tra Parma e Bologna, vi si stabilì definitivamente nel 1647 con l'incarico di insegnare matematica. Poco più tardi, egli venne esonerato dall'insegnamento per potersi dedicare esclusivamente ai suoi studi e alla pubblicazione delle sue opere, e il compito passò così a Grimaldi (Aricò, 2002).

Difatti, come evidenzia Battistini (1988), i gesuiti di Bologna seppero cogliere l'occasione favorevole dell'arrivo di Riccioli, sostenendo attivamente le sue osservazioni scientifiche e contribuendo a farne, nel giro di pochi anni, una delle autorità più ascoltate negli ambienti contro-riformistici e più temute dai «*novatores*». Tuttavia, la vastità della produzione scientifica di Riccioli e del suo gruppo va ricondotta non solo all'appartenenza ad un ordine religioso ben strutturato e capace di sostenere il lavoro dei propri membri, ma anche ad una trasformazione più ampia delle pratiche scientifiche seicentesche. Alla figura rinascimentale del sapiente isolato nel proprio laboratorio si era ormai progressivamente sostituito un modello di ricerca più collettivo, fondato sulla collaborazione e sulla circolazione delle idee, tanto all'interno della Compagnia di Gesù quanto nei rapporti con gli ambienti esterni al Collegio. Non a caso, Riccioli e i suoi collaboratori intrattenevano una fitta rete di scambi epistolari con alcuni dei più importanti scienziati del tempo. Ciò emerge chiaramente dalle pagine dell'*Almagestum novum*, ricche di riferimenti a dati astronomici, osservazioni e notizie scientifiche provenienti da diverse parti d'Europa (Riccioli, 1651).

La Bologna della metà del Seicento rappresenta al meglio l'affermazione di questo nuovo modo di fare scienza: come osserva Battistini (1988), almeno sul piano operativo

e istituzionale si assiste infatti ad una crescente collaborazione tra luoghi e protagonisti diversi della cultura scientifica, senza che questo comporti un improvviso superamento delle «*insanabili divergenze di metodo e finalità*» che continuavano inevitabilmente a separarli e a creare, in certi casi, momenti di tensione.

Le memorie di Giovan Domenico Cassini, giunto in città nel 1649, appena ventiquattrenne, restituiscono un quadro piuttosto chiaro della scena culturale del tempo, individuando in poche righe i tre principali poli attorno ai quali si sviluppavano la ricerca matematica, astronomica e naturalistica bolognese. Da un lato vi era lo Studio cittadino che, con i suoi docenti, continuava a rappresentare il riferimento tradizionale dell'insegnamento superiore; dall'altro, il Collegio gesuitico, progressivamente affermatosi come centro didattico e scientifico dotato di una propria autonomia. A questi due poli si aggiungeva poi l'ambiente dei sodalizi culturali e dei nobili bolognesi cultori di scienze, la cui importanza non era soltanto intellettuale, ma soprattutto sociale e materiale: essi, infatti, erano in grado di offrire strumenti, luoghi di osservazione e reti di patronage essenziali per la circolazione e la produzione del sapere scientifico (Cassini, 1810). Anche la gratuità delle scuole gesuitiche va compresa all'interno di questo più ampio sistema di relazioni e risorse: esse si reggevano grazie a numerosi lasciti e sussidi privati, che ne favorirono l'affermazione, suscitando tuttavia anche le gelosie di ordini religiosi più antichi, come quello domenicano, tradizionalmente beneficiario di analoghe elargizioni (Tabarroni, 1998).

La ricostruzione dei rapporti tra questi diversi protagonisti si rivela essenziale per interpretare la Rivoluzione Scientifica non come una semplice contrapposizione tra innovazione e conservazione, ma come un processo molto più complesso. La storiografia più recente ha infatti problematizzato il ruolo dei principali ambienti di produzione del sapere, rivalutando il contributo delle accademie e dei mecenati aristocratici, ridimensionando l'immagine delle università come istituzioni esclusivamente refrattarie all'affermazione della nuova scienza e, infine, riconoscendo ai gesuiti non solo un rigido controllo dottrinale, ma anche una certa apertura verso le istanze della nuova scienza (Cavazza, 2006).

Infatti, come evidenziano gli studi di Baldini (1992), la scuola gesuitica non fu semplicemente un ambiente antiscientifico contrapposto alla tradizione galileiana: soprattutto nell'area emiliana, i matematici della Compagnia contribuirono agli sviluppi dell'astronomia, della meccanica e dell'ottica, mostrando un rapporto con l'esperienza e con la matematizzazione della fisica molto più moderno e aperto di quanto suggerisca l'immagine di un rigido aristotelismo scolastico. Queste considerazioni invitano a ricostruire più da vicino le relazioni che il Collegio gesuitico intratteneva con gli altri luoghi della cultura scientifica bolognese, procedendo attraverso l'esame dei diversi

protagonisti che animavano tale contesto e con i quali Francesco Maria Grimaldi poté entrare in contatto nel corso della sua attività. È dunque all'interno di questa fitta rete di relazioni, segnata al tempo stesso da collaborazione e competizione, da cautele dottrinali e da pratiche osservative e sperimentali, che si sviluppò l'attività scientifica di Riccioli e Grimaldi. In questo contesto maturò anche il loro rapporto di collaborazione, che sarà esaminato più nel dettaglio nel paragrafo successivo.

Per quanto riguarda lo Studio cittadino, l'attività dei Gesuiti a Bologna fu inevitabilmente segnata da tensioni con l'istituzione universitaria. Lo Studio, già indebolito dalla crescente burocratizzazione e da una certa carenza di infrastrutture, guardava infatti al Collegio come a un potenziale rivale nel campo dell'insegnamento superiore. Fin dall'inizio, infatti, a Bologna si temette che lo Scolasticato gesuitico potesse attrarre a sé una parte degli studenti dell'Università, soprattutto per il carattere gratuito dell'insegnamento offerto dalla Compagnia (Tabarroni, 1964). Non a caso, tra l'arrivo di Riccioli a Bologna e il 1671, anno della sua morte, furono più volte inoltrate a Roma richieste di soppressione dell'istituzione gesuitica, che però non ottennero esito favorevole. Per comprendere al meglio la natura di tale rivalità, va tuttavia rivelato che nella prima metà del Seicento, la politica culturale dell'Università bolognese appariva ormai assai diversa da quella che, nel secolo precedente, aveva contribuito a formare studenti e docenti di grande prestigio (Aricò, 2002).

Un momento particolarmente significativo, in questo senso, fu il 1647, anno della prematura morte di Bonaventura Cavalieri, discepolo di Galileo e docente dello studio. La ritardata riassegnazione della sua cattedra di Matematica e Astronomia mostra infatti come, nello Studio bolognese, le posizioni più tradizionaliste avessero ripreso vigore proprio in una fase di debolezza della scuola galileiana. La cattedra venne negata sia a Tommaso Cornelio, vicino alle istanze della nuova filosofia naturale, sia a Stefano degli Angeli, allievo dello stesso Cavalieri. Pur di evitare la chiamata di studiosi sospettati di simpatie galileiane o copernicane, la cattedra fu assegnata stabilmente soltanto nel 1651 a Giovanni Domenico Cassini. L'ambiente universitario bolognese appariva dunque, almeno in questa fase, poco favorevole agli innovatori, eccetto per quanto riguarda l'ambito medico, all'interno del quale si assisteva ad un crescente interesse per una pratica scientifica di marca sperimentale (Cavazza, 2006).

Tuttavia, proprio attorno a figure come Cassini e Pietro Mengoli, chiamato nel 1650 alla nuova lettura di Meccanica, iniziarono ad aprirsi maggiori spazi di confronto con la nuova filosofia sperimentale anche nel campo delle discipline matematiche. Cassini, ad esempio, racconta di aver organizzato negli anni bolognesi diverse osservazioni ed esperimenti all'interno della sua stessa casa, con la partecipazione di colleghi medici e matematici dello Studio, gli studiosi della Compagnia di Gesù e figure come Geminiano

Montanari che, dopo la sua chiamata a Bologna sulla cattedra di Matematica nel 1664, sarebbe diventato il vero leader del partito dei moderni (Cavazza, 2006).

Accanto ai rapporti con i docenti dello Studio, i gesuiti seppero inserirsi con abilità anche nel tessuto sociale e culturale cittadino, stabilendo legami stretti con la classe dirigente locale. Quest'ultima mostrava un interesse marcato per le scienze matematiche, considerate ormai non solo come ambito di sapere specialistico, ma anche come uno *status symbol* per una nobiltà colta e attivamente partecipe alla vita culturale della città. Tra i nobili, in questo senso, si distingueva il conte Cesare Marsili, accademico linceo, astronomo, ingegnere e amico personale di Galileo. Un ruolo importante ebbe anche il marchese Cornelio Malvasia, che disponeva nel proprio palazzo di una ricca biblioteca e di un osservatorio astronomico: egli se ne serviva personalmente, ma ne concesse l'uso anche ai professori dello Studio, in particolare a Cassini e Montanari. Questi ultimi erano impegnati in una serie di rilevamenti astronomici condotti in parallelo con quelli di Riccioli, il quale, a sua volta, si serviva dello gnomone approntato nella chiesa di Santa Lucia, allora ancora in costruzione. La trama di questi rapporti si articolò ulteriormente con la figura di Carlo Antonio Manzini, amico di Malvasia e partecipe dell'ambiente scientifico bolognese. Dopo essere stato tra i fondatori dell'Accademia dei Vespertini, si interessò in modo particolare alla costruzione di strumenti ottici, occupandosi di lenti, occhiali, microscopi e telescopi. A lui si deve anche l'*Occhiale all'occhio*, un'opera seicentesca che può essere vista come una piccola enciclopedia del sapere artigianale per la costruzione delle lenti¹³. Nell'*Almagestum novum*, Riccioli riferisce infatti alcune osservazioni compiute mediante un cannocchiale prestatogli dallo stesso Manzini (Battistini, 1988).

Nonostante i diversi presupposti epistemologici e le rivalità esistenti tra queste realtà, i gesuiti cercarono sempre di prestare attenzione alla costruzione di rapporti di buon vicinato, promuovendo iniziative capaci di inserirsi attivamente nella vita culturale cittadina. Un esempio significativo è certamente rappresentato dalle discussioni pubbliche delle *theses*, che spesso assumevano il carattere di veri e propri eventi mondani: per l'occasione la chiesa veniva addobbata e il pubblico poteva assistere anche a intermezzi musicali. Oltre a costituire il momento conclusivo nella formazione della futura classe dirigente, una volta pubblicate in agili opuscoli destinati a essere donati alle personalità eminenti presenti, le *theses* diventavano anche strumenti di propaganda e di intervento nel dibattito scientifico dell'epoca (Aricò, 2002).

¹³Per un approfondimento su Carlo Antonio Manzini, sulla sua *Dioptrica pratica* e sulla collezione di lenti conservata presso il Museo di Palazzo Poggi e il Museo della Specola dell'Università di Bologna, si veda la Tesi di Laurea Magistrale di Burani (2023).

Un altro episodio emblematico della partecipazione attiva dei gesuiti al dibattito scientifico contemporaneo riguarda l'osservazione della cometa del 1653. Le conclusioni dei padri furono comunicate a Leopoldo di Toscana con soli due giorni di ritardo rispetto a quelle del gruppo laico raccolto attorno a Cassini e Malvasia, distinguendosi tuttavia per una maggiore precisione. Lo stesso Cassini, nell'opuscolo inviato a Leopoldo insieme a una lettera di accompagnamento, sottolineava come la rapidità con cui aveva dato alle stampe le proprie osservazioni rispondesse all'esigenza di non lasciarsi precedere dai gesuiti (Battistini, 1988).

Risulta dunque evidente come i principali protagonisti del panorama scientifico bolognese fossero pienamente consapevoli del ruolo assunto dai gesuiti in quegli anni. Malvasia, ad esempio, non tardò a riconoscere che i padri di Santa Lucia conducevano le proprie ricerche «*con accuratezza da pochi pareggiabile*»; proprio per questo, l'emulazione tra i diversi gruppi attivi in città poté ben presto tradursi in forme di proficua collaborazione (Aricò, 2002).

Secondo Battistini (1988), tuttavia, tale collaborazione dovette essere accettata, almeno in parte, con una certa rassegnazione, soprattutto da parte dei professori dello Studio, consapevoli della posizione di debolezza in cui l'istituzione universitaria si trovava al tempo. Emblematica, in questo senso, è la posizione di Montanari, che in una lettera privata definiva i gesuiti «*una setta troppo potente*» e metteva in guardia dal rischio di far «*cadere lo Studio in mano a' preti*». D'altro canto, anche da parte gesuitica non mancarono forme di pressione. Nell'*Almagestum novum*, accanto alle prove fisiche contro il copernicanesimo, Riccioli non esitò infatti ad inserire il monito del 1616 rivolto a Galileo, la sentenza di condanna del 1633 e l'atto di abiura. Il gesto non passò inosservato negli ambienti galileiani, anche perché era la prima volta che quei testi venivano dati alla stampa: poco prima di morire, Torricelli inviò a Vincenzo Renieri il frontespizio dell'opera di Riccioli, allora prossima alla pubblicazione, commentando amaramente: «*Ecco qua questa razza sfrondata che ci vuol far restar tutti coglioni in ogni sorte di professione. Vostra paternità legga l'incluso frontespicio e poi abbandoni affatto l'astronomia*» (Matteoli, 2023). Anche Vincenzo Viviani, pur riconoscendo i meriti scientifici del gesuita ferrarese, avrebbe poi osservato in una lettera a Montanari che «*non era già necessario, né anco decente alla condizione d'un religioso vecchio, per altro venerando, il dimostrar così più avversione contro l'uomo che contro i di lui asserti*» (Battistini, 1988).

In un ambiente ancora sottoposto alla vigilanza del Sant'Uffizio, ogni discussione cosmologica esplicitamente compromettente doveva tuttavia essere evitata, almeno sul piano pubblico (Matteoli, 2023). Un caso significativo fu la polemica del 1665, che vide coinvolti Riccioli, Borelli e Stefano degli Angeli. Nell'*Astronomia reformata*, riprenden-

do una posizione già formulata nell'*Almagestum Novum*, Riccioli sostenne che la legge galileiana della caduta dei gravi fosse incompatibile con il moto terrestre. In questo modo, il gesuita condusse la discussione su un terreno particolarmente insidioso, mettendo in tensione due riferimenti centrali della nuova scienza: Galileo e Copernico. La difesa di Borelli fu estremamente cauta, mentre altri studiosi attivi a Bologna, come Cassini, Montanari e Mengoli, preferirono non intervenire pubblicamente. La stessa prudenza emerge da una testimonianza privata di Montanari, che lamentava l'impossibilità, nel contesto bolognese, di esprimersi liberamente anche su questioni apparentemente non problematiche (Battistini, 1988).

In questa fase, per salvaguardare la propria attività di ricerca, molti studiosi preferirono quindi adottare un atteggiamento prudente, evitando prese di posizione troppo esposte. Questa cautela favorì, sul piano della pratica quotidiana, forme di convergenza e collaborazione che rispondevano anche a esigenze molto concrete. La ricerca scientifica della metà del Seicento richiedeva infatti tempi molto lunghi, la partecipazione di più osservatori e sperimentatori, nonché la disponibilità di strumenti e risorse materiali spesso costosi. La questione era particolarmente rilevante nel contesto universitario bolognese, dove gli amministratori dello Studio pretendevano che i professori si procurassero autonomamente gli strumenti necessari alle osservazioni. Fu, anche per questo, che alcuni tra i migliori scienziati attivi nello Studio, come Cassini e Montanari, finirono per spostarsi in contesti più favorevoli, come Parigi e, soprattutto, la vicina Padova (Battistini, 2000).

D'altra parte, non bisogna però ridurre Riccioli alla sola immagine di oppositore di Galileo. Se è vero che nell'*Almagestum Novum* assunse una posizione esplicitamente anticopernicana, è altrettanto necessario considerare la complessità della sua figura scientifica. Come osserva Marcacci (2018), egli tentò piuttosto di elaborare soluzioni autonome all'interno di uno scenario scientifico ancora instabile, nel quale diverse ipotesi cosmologiche e fisiche convivevano senza che fosse possibile giungere a una soluzione definitiva. Riccioli stesso assunse spesso posizioni indipendenti e talvolta scomode anche rispetto alla stessa Compagnia di Gesù, con la quale dovette confrontarsi più volte in merito all'esame e alla pubblicazione delle proprie tesi. Le sue posizioni epistemologiche, secondo Dinis (2003), non possono essere ricondotte né a quelle di un aristotelico dogmatico, incapace di comprendere la nuova scienza, né a quelle di un galileiano nascosto e costretto a dissimulare le proprie convinzioni.

Tale precisazione è essenziale anche per comprendere la posizione di Grimaldi. Difatti, per ragioni legate tanto all'organizzazione gerarchica della Compagnia quanto alla particolare situazione del Collegio bolognese, il progetto scientifico di Riccioli coinvolse a tempo pieno tutti i suoi collaboratori, i quali poterono sviluppare la propria attività

scientifica soprattutto all'interno delle linee tematiche ed epistemologiche del maestro. Questo vale in modo particolare per Grimaldi che entrò nel programma di ricerca riccioliano poco più che ventenne e vi rimase praticamente legato fino alla sua morte (Baldini, 2002).

Considerata la centralità di questa collaborazione per comprendere il profilo scientifico di Grimaldi, il rapporto con Riccioli verrà indagato più nel dettaglio nel paragrafo successivo.

2.5 Grimaldi e Riccioli: una collaborazione senza eguali

Un segno evidente della stima e del prezioso legame che univa Grimaldi al suo maestro emerge, oltre che dai passi già più volte richiamati, anche dalle parole con cui quest'ultimo ricorda il suo fedele collaboratore nella *Chronologia reformata*, l'ultima grande opera enciclopedica da lui pubblicata. In essa, infatti, Riccioli (1669) inserisce un elenco di *Personae Insigniores post Christum*, ossia figure storiche da lui ritenute illustri, tra le quali compare lo stesso Grimaldi (Riccioli, 1669, p. 228):

*Franciscus Maria Grimaldus Bononiensis, Societatis Iesu, natus est 2 Aprilis anno 1618. Oriente Sole ingressus est Societatem Iesu anno 1632, die 18 Martii; obdormivit in Domino die 28 Decembris sub auroram anno 1663, de cuius ingenio, et insigni probitate vitae, ac titulis, quibus illi plurimum debeo, pauca dixi ad calcem operis ipsius posthumi de Lumine, Coloribus et Iride: plura dicturus, si dolor amissi tam chari capitis permisisset.*¹⁴

Il passo, intriso di commozione per la perdita dell'allievo avvenuta soltanto qualche anno prima, restituisce in poche righe non solo lo straordinario valore umano e intellettuale di Grimaldi, ma anche il riconoscimento esplicito dei meriti scientifici da parte del suo maestro, il quale sostiene, con evidente rammarico, di non essere riuscito ad elogiarlo a sufficienza all'interno dell'*Elogium perbreve*.

Del resto, la vicinanza tra i due dovette essere molto stretta già durante gli anni della formazione di Grimaldi a Parma. Come ricorda Baldini (1996), il generale della

¹⁴«Francesco Maria Grimaldi, bolognese, della Compagnia di Gesù, nacque il 2 aprile dell'anno 1618. Entrò nella Compagnia di Gesù nell'anno 1632, il giorno 18 marzo, al sorgere del Sole; si addormentò nel Signore il 28 dicembre, verso l'aurora, nell'anno 1663. Del suo ingegno, dell'insigne probità della sua vita e dei titoli per i quali gli devo moltissimo, ho detto poche cose in calce alla sua opera postuma *De Lumine, Coloribus et Iride*: ne avrei dette di più, se il dolore per la perdita di una persona tanto cara lo avesse permesso» [Traduzione a cura dell'autrice, realizzata con il supporto di strumenti di intelligenza artificiale]

Compagnia Muzio Vitelleschi, in una lettera allo studioso ferrarese, aveva giudicato in modo sfavorevole il fatto che Riccioli si intrattenesse frequentemente nella propria camera con il giovane Francesco Maria Grimaldi, anche quando gli altri erano già andati a letto, con una familiarità spintasi fino a «*acconciar la barba, e far la chierica*».

La ricostruzione del legame profondo tra Grimaldi e Riccioli dipende, tuttavia, in larga misura da fonti prodotte dallo stesso Riccioli, documenti di straordinario interesse, ma inevitabilmente unilaterali. Se da un lato essi permettono di cogliere con chiarezza la posizione di rilievo occupata da Grimaldi all'interno del gruppo bolognese, dall'altro non consentono sempre di definire con precisione il grado della sua autonomia scientifica, né di distinguere nettamente il suo apporto da quello del maestro nelle diverse imprese comuni.

La difficoltà è aggravata dal fatto che, come ha sottolineato Baldini (2002), le lettere indirizzate a Grimaldi risultano perdute, così come il resto delle sue carte. Nella Compagnia di Gesù non era infrequente che gli scritti dei membri defunti venissero distrutti, ad eccezione delle opere compiute o di materiali ritenuti, per qualche motivo, degni di conservazione. Una sorte analoga toccò, come ricorda lo stesso autore, anche alla documentazione di altri studiosi gesuiti, tra cui Christoph Grienberger, Giovanni Girolamo Saccheri e lo stesso Riccioli. Nel caso di Grimaldi, tuttavia, tale perdita pesa in modo particolare, poiché la sua corrispondenza dovette essere già in origine assai più ridotta rispetto a quella del maestro, il quale intrattenne rapporti epistolari intensi sia in Italia sia all'estero e del quale si riesce a conservare pertanto un carteggio ben più ampio.

Un'ulteriore difficoltà nella ricostruzione delle dinamiche collaborative riguarda il fatto che, ad eccezione di Grimaldi, nessuno degli allievi che operarono accanto a Riccioli pubblicò opere scientifiche autonome né risulta noto per ricerche indipendenti (Baldini, 1992). Nella maggior parte dei casi, le informazioni sui collaboratori di Riccioli provengono quasi esclusivamente dalle sue opere e riguardano soprattutto il loro contributo operativo o sperimentale. Riccioli, infatti, menziona spesso i nomi di coloro che presero parte a osservazioni, misurazioni o verifiche, ma non chiarisce fino a che punto essi fossero coinvolti anche nella formulazione delle ipotesi, nella progettazione delle ricerche o nell'interpretazione dei risultati.

Nonostante la scarsità di fonti utili ad una ricostruzione davvero completa, è comunque possibile, e doveroso, avanzare alcune riflessioni sulla natura di tali collaborazioni, che dunque appare verosimilmente molto più complessa di quanto possa emergere dalle letture delle sole opere. Su questo specifico punto si è soffermato Baldini (2002), interrogandosi sulla possibilità che lo scopritore della diffrazione abbia avuto un ruolo più ampio all'interno degli studi riccioliani rispetto a quello, pur importante, di semplice

collaboratore esecutivo. Sarebbe infatti difficile immaginare che una mente così scientificamente dotata del Seicento, abbia svolto per tutta la durata della collaborazione con Riccioli un ruolo del tutto subordinato. Allo stesso modo, non sembra plausibile che Riccioli che, come visto, era più che consapevole delle capacità del suo allievo, lo abbia confinato a compiti di semplice collaborazione esecutiva. Diventa quindi legittimo chiedersi se, almeno per alcuni aspetti, non sia più opportuno parlare di un programma Riccioli-Grimaldi o se i due studiosi condividessero sempre le medesime posizioni anche sui punti teoricamente più rilevanti.

Il rapporto tra i due studiosi, infatti, si configurò come una collaborazione stretta e continuativa, consolidandosi negli anni della formazione e dell'attività di insegnamento tra Parma e Bologna, fino a trovare nel Collegio di Santa Lucia il suo principale centro operativo. Grimaldi, che divenne progressivamente il collaboratore più vicino e più affidabile del maestro, fu coinvolto in un numero considerevole di ricerche, la maggior parte delle quali confluirono nelle opere di Riccioli. L'insieme delle osservazioni effettuate tra il 1641 e il 1661 e attribuite dall'*Almagestum Novum*, dalla *Geographia reformata* e dall'*Astronomia reformata* ora congiuntamente a Riccioli e Grimaldi, ora al solo allievo, non ebbe in Italia confronti paragonabili fino alla nascita degli osservatori professionali nel XVIII secolo. In ambito europeo, prima dell'istituzione degli osservatori di Parigi e Greenwich, un paragone può essere individuato forse soltanto nelle attività di Tycho Brahe e Johannes Hevelius (Baldini, 2002).

Un primo elemento che invita a riconsiderare il ruolo di Grimaldi all'interno del progetto riccioliano riguarda la distribuzione stessa delle osservazioni. Come osserva Baldini (2002), quelle attribuite al solo Grimaldi risultano quantitativamente più numerose di quelle assegnate al solo Riccioli e non inferiori a quelle indicate come frutto di una collaborazione tra i due. Tale ripartizione, inoltre, non sembra dipendere da ragioni di minore difficoltà o importanza: al contrario, alcuni tra i contributi più significativi dell'astronomia osservativa solitamente ricondotta a Riccioli furono dovuti proprio a Grimaldi.

Tra questi rientrano gruppi di osservazioni particolarmente complessi per l'epoca, sia dal punto di vista metodologico sia da quello esecutivo, come le misure del diametro solare nella camera oscura, le osservazioni della librazione lunare e quelle relative alla posizione delle macchie sul disco della Luna. In questi casi, il contributo di Grimaldi sembra essere stato determinante non soltanto nella fase pratica dell'osservazione, ma probabilmente anche nell'elaborazione delle procedure sperimentali. Ciò è attestato in modo esplicito per la mappa lunare, ma trova un riscontro significativo anche nell'*Astronomia reformata*, dove Riccioli, discutendo alcune misure del diametro solare effettuate nel 1658 e rese difficili dall'indeterminatezza del bordo dell'immagine, collega

tale fenomeno alle ricerche di Grimaldi sulla luce e sui colori (Baldini, 2002).

Riccioli osserva infatti che la causa della penombra, visibile al margine dell'immagine solare e fino ad allora non adeguatamente spiegata, era stata individuata da Grimaldi dopo alcuni anni di osservazioni sulla luce e sui colori. Proprio a partire da tali osservazioni, Grimaldi avrebbe riconosciuto l'esistenza di un nuovo e quarto modo di propagazione della luce, diverso dalla propagazione diretta, riflessa e rifratta: la propagazione per raggio diffratto. Riccioli aggiunge inoltre di essere stato presente a molti degli esperimenti condotti dal confratello e di ritenere che essi non potessero essere spiegati altrimenti (Riccioli, 1665).

È significativo, a questo proposito, che nelle opere riccioliane Grimaldi non compaia soltanto come esecutore di osservazioni o misure, ma venga associato anche all'elaborazione di metodi, soluzioni e interpretazioni originali. A partire da tali opere, Tabarroni (1998) e Baldini (2002) hanno ricostruito i principali ambiti nei quali Riccioli riconobbe esplicitamente il contributo del confratello. Grimaldi risulta coinvolto in ambiti molto diversi: dalle misure geodetiche alla determinazione dell'altezza delle nubi, dalla distanza Terra-Sole e Sole-Luna alla parallasse delle comete, fino all'osservazione del Sole in camera oscura e alla misura dei diametri apparenti delle stelle. A questi contributi si aggiungono una prova fisica contro il moto della Terra, la critica a un argomento di Scheiner sulla rotazione terrestre, le indagini sugli scostamenti del pendolo dalla verticale, una spiegazione ottica della forma della coda delle comete e le prove relative all'origine delle macchie lunari.

Come ha osservato Baldini (2002), la maggior parte di questi apporti resta interna alle concezioni allora vigenti e non implica, di per sé, un superamento del quadro teorico di riferimento. Tuttavia, proprio la loro varietà e continuità suggeriscono che il ruolo di Grimaldi non fosse affatto marginale. Fa eccezione, per il suo maggiore rilievo teorico, la questione delle prove contro la rotazione terrestre, che contribuisce a proiettare non solo su Riccioli, ma anche su Grimaldi, l'immagine di difensore del sistema geo-eliocentrico e avversario del copernicanesimo.

Come evidenziato da Baldini (2002), se ci si basasse su una lettura superficiale delle testimonianze offerte dalle opere di Riccioli, si potrebbe concludere che Grimaldi fosse dotato di straordinaria dedizione alla ricerca e di solida competenza tecnica, ma privo di reale autonomia intellettuale e di particolare capacità intuitiva. Tale immagine risulta tuttavia paradossale, poiché egli dimostra qualità ben diverse nel suo lavoro in ottica, sebbene limitato per oggetto e durata. Parte della storiografia gesuitica ha infatti attribuito ai collaboratori riccioliani la sola accuratezza esecutiva, riservando al maestro l'intuizione e l'elaborazione teorica, con la conseguenza di ricondurre il lavoro del gruppo a un prodotto sostanzialmente individuale. Ciò è dovuto anche al fatto che,

nelle relazioni epistolari, Riccioli si presentava come unico interlocutore del gruppo bolognese, pur potendo veicolare un'elaborazione in parte collettiva, espressione di una vera e propria scuola, per ampiezza e durata comparabile, se non superiore, a quella dell'Accademia del Cimento.

Infatti, Battistini (1988) sostiene che, assai più che la voce del squillante genio, di cui non possiede neanche le qualità, Riccioli impersona il rappresentante di un gruppo laborioso, impegnato nel quotidiano. In tale contesto, il ruolo di Grimaldi fu tutt'altro che marginale: lo conferma lo stesso maestro nell'*Elogium perbreve*, quando riconosce che non avrebbe potuto condurre a compimento le proprie opere senza l'aiuto prezioso del suo confratello.

2.6 Osservare, misurare, costruire: la scienza grimaldiana oltre l'ottica

In questa sezione si prenderanno in esame alcuni tra i più significativi contributi scientifici di Francesco Maria Grimaldi, con particolare attenzione alla selenografia, agli esperimenti sulla caduta dei gravi e alla costruzione di strumenti scientifici.

Non si intende offrire un quadro esaustivo della produzione scientifica di Grimaldi, la cui ampiezza e varietà richiederebbero approfondimenti specifici, ma esclusivamente mettere in evidenza alcuni ambiti nei quali emergono tratti caratteristici del suo profilo scientifico. L'osservazione accurata dei fenomeni, la ricerca di procedure di misura affidabili e l'attenzione alla dimensione strumentale costituiscono infatti tre aspetti ricorrenti dell'attività di Grimaldi, già pienamente visibili nella collaborazione con Riccioli, e destinati a trovare ulteriore sviluppo nelle successive ricerche ottiche.

2.6.1 Grimaldi osservatore e disegnatore della Luna

Il primo ambito che si considera è quello della selenografia, nel quale la collaborazione tra Riccioli e Grimaldi produsse uno dei risultati più duraturi nella tradizione astronomica successiva. Nell'*Almagestum Novum* del 1651 venne infatti pubblicata una carta lunare alla cui realizzazione Grimaldi contribuì in modo determinante e la cui nomenclatura si sarebbe imposta, nei secoli successivi, come standard di riferimento per l'intera comunità astronomica (Zanini, 2022).

Se infatti la fortuna della carta lunare viene associata soprattutto al nome di Riccioli e alla nomenclatura da lui elaborata, non va dimenticato che le due tavole inserite nell'opera, una muta e una corredata dai toponimi, sono presentate dallo stesso maestro come il risultato del meticoloso lavoro osservativo e illustrativo di Grimaldi. La stessa intestazione della tavola attribuisce infatti a lui la *Selenographia*, ottenuta mediante

un «*ottimo telescopio*» ed elaborata anche attraverso il confronto con le più importanti carte precedenti, da van Langren a Hevelius (Riccioli, 1651).

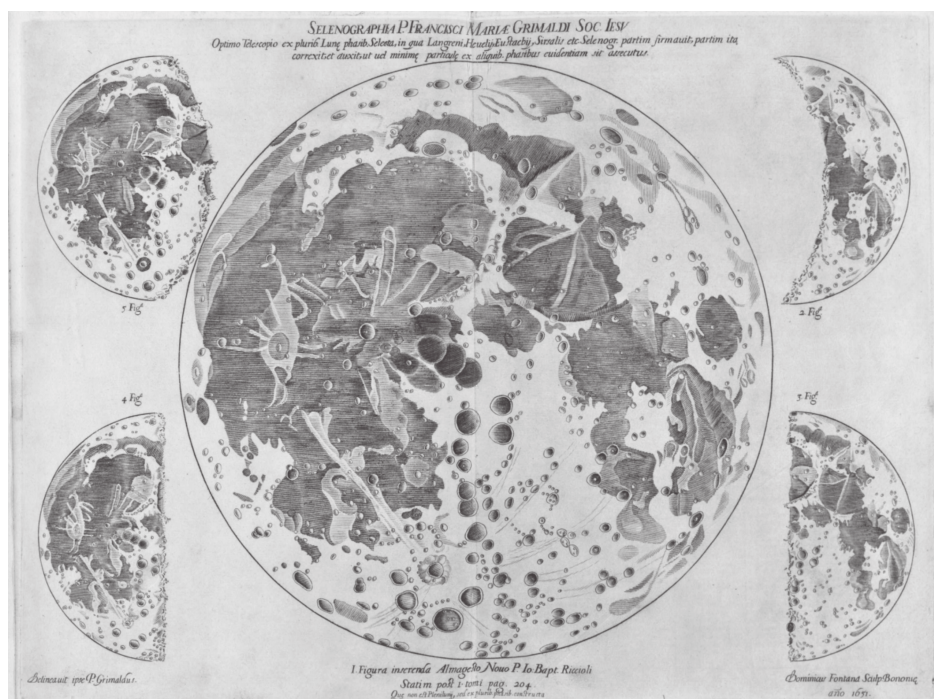


Figura 2.2: Carta selenografica detta Riccioli-Grimaldi, disegnata da Francesco Maria Grimaldi e pubblicata nell'*Almagestum novum* di Giovanni Battista Riccioli (Riccioli, 1651, vol. 1, pp. 204–205). Digitalizzazione: ETH-Bibliothek Zürich, e-rara, Rar 9471.

Per comprendere il significato di questo contributo è necessario richiamare, sia pur brevemente, il contesto entro cui esso si colloca. Sebbene la Luna fosse già stata rappresentata in modo relativamente realistico tra tardo Medioevo e Rinascimento, è con l'introduzione del telescopio che il suo studio da parte degli astronomi cambiò radicalmente approccio. Le prime rappresentazioni propriamente scientifiche del satellite emergono infatti con Galileo Galilei, alle quali si affianca, poco più tardi, il contributo di Thomas Harriot. Nei suoi disegni del 1611, quest'ultimo identificò per la prima volta le principali conformazioni della superficie lunare mediante l'uso di lettere e numeri, realizzando così uno dei primi tentativi di mappatura del satellite mediante l'utilizzo del telescopio. È opportuno sottolineare come, in realtà, parte della storiografia attribuisca un precoce tentativo di mappatura, ancora precedente all'uso del telescopio, allo scienziato inglese William Gilbert. Il suo studio, contenuto nel *De mundo nostro sub-lunari philosophia nova*, era infatti corredato da una rappresentazione della superficie lunare, che tuttavia fu pubblicata soltanto nel 1651 (Zanini & Gargano, 2021).

Ad ogni modo, nel corso della prima metà del Seicento, la selenografia si sviluppò lungo due principali direttrici. Da un lato, si affermò un indirizzo di carattere topogra-

fico, volto a dimostrare la natura irregolare e montuosa della superficie lunare e, più in generale, la sua analogia con quella terrestre, nella quale studiosi di orientamento copernicano, come Galileo, ravvisavano un elemento di conferma delle proprie posizioni cosmologiche. Dall'altro, già a partire dagli anni Trenta del XVII secolo, prese forma un secondo e più ambizioso programma di tipo cartografico, che mirava a rappresentare le caratteristiche della Luna con la precisione bidimensionale necessaria a utilizzare le mappe durante le eclissi lunari per la determinazione delle longitudini (Pumfrey, 2011).

Tra i principali contributi a quest'ultimo programma selenografico si distinguono soprattutto le opere di Michiel Florent van Langren e di Johannes Hevelius. Il primo elaborò una nomenclatura che assegnava le principali configurazioni lunari a personaggi della nobiltà cattolica, in particolare legati alla corte spagnola, inserendo così la rappresentazione della Luna entro una precisa logica di patronage politico. Il secondo, invece, sviluppò nella *Selenographia* del 1647, una descrizione sistematica della superficie lunare destinata a diventare un punto di riferimento imprescindibile per gli studi successivi, diffondendosi rapidamente soprattutto nei contesti luterani e protestanti (Zanini & Gargano, 2021).

Nel 1651, quando Riccioli pubblicò il suo *Almagestum Novum*, a sei anni di distanza dalla mappa di van Langren, la selenografia si era dunque ormai configurata come un settore di ricerca già relativamente maturo. In tale contesto, il contributo dei due gesuiti riuscì a distinguersi dagli altri per il sistematico lavoro di raccolta, revisione e sintesi di tutti i risultati precedenti, che Grimaldi sottopose ad un attento processo di correzione e ampliamento, condotto con quella accuratezza osservativa per la quale era già apprezzato e riconosciuto dai contemporanei.

Secondo quanto dichiarato dallo stesso Riccioli, la scelta di elaborare una nuova toponomastica lunare nasceva da una duplice esigenza. Da un lato, egli rifiutava l'impostazione di Hevelius, fondata sull'assimilazione della superficie lunare a quella terrestre, poiché tale scelta presupponeva un'analogia tra Luna e Terra che Riccioli non era disposto ad accettare. D'altra parte, pur riconoscendo l'originalità della proposta di van Langren, ne giudicava insoddisfacente la distribuzione dei nomi, ritenuta troppo eterogenea e sostanzialmente priva di un criterio rigoroso. Per questo motivo, Riccioli adottò una nomenclatura svincolata dalle logiche di patronage cortigiano e basata esclusivamente su figure sapienti, antiche e moderne, attraverso la selezione di studiosi che, come astronomi o astrologi, avessero offerto un contributo effettivo alla tradizione scientifica da cui egli stesso attingeva per la redazione dell'opera. Al tempo stesso, egli prende esplicitamente le distanze dalle implicazioni teologiche dell'analogia tra Terra e Luna, come dichiara anche l'iscrizione posta a capo della carta: «*Nec*

homines Lunam incolunt. Nec animae in Lunam migrant»¹⁵ (Pineda de Ávila, 2024).



Figura 2.3: Carta lunare Riccioli-Grimaldi con nomenclatura, pubblicata nell'*Almagestum novum* di Giovanni Battista Riccioli (Riccioli, 1651, vol. 1, pp. 204-205). Digitalizzazione: ETH-Bibliothek Zürich, e-rara, Rar 9471; immagine consultata tramite Wikimedia Commons.

Quanto al criterio di distribuzione dei nomi, il disco lunare è organizzato secondo una chiara scansione storico-cronologica: nella metà superiore sono collocati i personaggi più antichi, mentre in quella inferiore trovano posto gli autori più recenti. A questa struttura generale si affianca inoltre un principio distributivo fondato su relazioni di affinità temporale, dottrinale o intellettuale. La superficie lunare è infatti suddivisa in otto settori: nei primi due prevalgono i fisico-astronomi dell'antichità; nel

¹⁵ «Né gli uomini abitano la Luna. Né le anime migrano sulla Luna» [Traduzione a cura dell'autrice, realizzata con il supporto di strumenti di intelligenza artificiale]

terzo, nel quarto e nelle zone interne del quinto e del sesto sono disposti gli altri sapienti antichi; il sesto, il settimo e l'ottavo ottante sono invece riservati agli autori più recenti, tra i quali figurano numerosi gesuiti. Anche Grimaldi e Riccioli si collocano nell'ottavo quadrante, coerentemente con la presenza in questo settore di altri studiosi più recenti, come Galileo Galilei. Inoltre, la nomenclatura è organizzata seguendo una rete di relazioni interne. Ad esempio, Timeo e Archita sono accostati a Platone in quanto a lui strettamente legati sul piano intellettuale, mentre Aristotele è posto poco distante. La distribuzione dei nomi risponde dunque a una precisa logica erudita, che trasforma la carta lunare in una sorta di mappa storica del sapere, in particolar modo quello astronomico (Riccioli, 1651).

Una presenza particolarmente significativa nella nomenclatura riccioliana è quella di Ipazia, insieme a Santa Caterina unica figura femminile della carta, la cui inclusione contraddice l'idea più moderna di una sua totale rimozione dalla memoria culturale fino alla sua riscoperta in età illuministica. L'opera del gesuita testimonia infatti che, nel Seicento, la filosofa alessandrina continuava ad occupare un posto rilevante nella tradizione storico-astronomica: Riccioli non solo le dedica un cratere, ma la colloca tra i protagonisti della scuola di Alessandria, accanto ad Aristillo, Timocari, Eratostene e Teone. Ne emerge così la notevole considerazione che il gesuita riservava alla sua figura intellettuale (Zanini, 2022).

Particolarmente rilevante è anche il trattamento riservato ai sostenitori del sistema eliocentrico: Copernico e gli altri esponenti della sua scuola copernicana vengono collocati nell'*Oceanus Procellarum*, così da apparire metaforicamente come isole galleggianti, piuttosto che stabili, in allusione all'instabilità della Terra da loro sostenuta (Riccioli, 1651). Eppure, è curioso notare come proprio a Copernico venga assegnato uno dei crateri più ampi e prestigiosi della mappa, proprio quello che van Langren aveva dedicato a Filippo IV di Spagna, segno di un evidente riconoscimento della sua statura scientifica che convive, in Riccioli e Grimaldi, con una netta presa di distanza sul piano cosmologico (Zanini, 2022). In realtà, secondo alcuni studiosi, tali elementi potrebbero essere interpretati come possibili indizi di una forma di adesione, mai esplicitamente dichiarata, da parte di Riccioli e Grimaldi, nei confronti della dottrina copernicana (Di Teodoro et al., 2010).

Ad ogni modo, il sistema riccioliano-grimaldiano si impose gradualmente non solo perché facilmente estendibile a nuove strutture lunari, ma probabilmente anche per una certa forma di autocompiacimento degli astronomi, attratti dalla possibilità di vedere il proprio nome consegnato alla memoria sulla superficie della Luna. Decisiva fu, in questo senso, la promozione esercitata da Gian Domenico Cassini, legato ai due gesuiti da una profonda stima, che ne favorì la diffusione in Francia. Più tardi, attraverso le carte di

Schröter, Beer e Mädler, la nomenclatura riccioliana finì per prevalere definitivamente su quella di Hevelius, sino ad essere in larga parte recepita dalla standardizzazione moderna dell'Unione Astronomica Internazionale (Zanini & Gargano, 2021).

Se l'elaborazione della nomenclatura spetta soprattutto a Riccioli, circostanza del tutto comprensibile, trattandosi del maestro, dell'autore dell'opera e del principale referente intellettuale della rete di rapporti eruditi richiamata nei paragrafi precedenti, il lavoro più propriamente operativo ricade in larga misura su Grimaldi, che nella realizzazione della carta selenografica mette in luce non solo il suo notevole talento nel campo illustrativo, ma anche le sue eccezionali capacità osservative, oltre che una profonda conoscenza della tradizione selenografica precedente. Si tengano a mente tutti questi aspetti in vista della successiva trattazione delle ricerche ottiche dello studioso, all'interno della quale verranno appunto richiamati.

2.6.2 Grimaldi negli esperimenti riccioliani sulla caduta dei gravi

Un secondo ambito nel quale Grimaldi ebbe un ruolo rilevante, e che vale la pena qui brevemente richiamare, fu quello degli esperimenti sulla caduta dei gravi. Non è casuale, del resto, che proprio a tali ricerche rimandi l'unico riferimento esplicitamente leggibile nel suo ritratto, già descritto nel paragrafo 2.2.

Riccioli dedicò alla caduta dei gravi un programma sperimentale ampio e articolato¹⁶, avviato nel 1634 e proseguito, con diverse riprese, fino al 1650, tra Ferrara e Bologna. Le prove coinvolsero un elevato numero di capaci collaboratori, tra i quali spicca in particolar modo la figura di Grimaldi, che assistette il maestro in quasi tutte le sue osservazioni (Borgato, 2002).

Gli esperimenti più rilevanti in questo ambito furono condotti a Bologna nel decennio 1640-1650 e portarono a una conferma sperimentale della legge galileiana dei numeri dispari. La difficoltà principale era legata alla rapidità della caduta verticale, che rendeva necessario disporre di uno strumento di misura del tempo sufficientemente preciso. Per questo Riccioli e i suoi collaboratori ricorsero a un pendolo di periodo molto breve, messo a punto dopo una serie di esperienze sull'isocronia. Lo strumento, rappresentato in Fig. 2.4, era costituito da una piccola sfera di bronzo sospesa a una catenella di ferro e ogni singola oscillazione corrispondeva a un sesto di secondo.

¹⁶Per un approfondimento sul tema, la cui ampiezza non consente qui una trattazione dettagliata, si rimanda a Borgato (2002), che ha ricostruito il contributo di Riccioli alla sperimentazione sulla caduta dei gravi, riprendendo la notevole storiografia precedente sull'argomento.

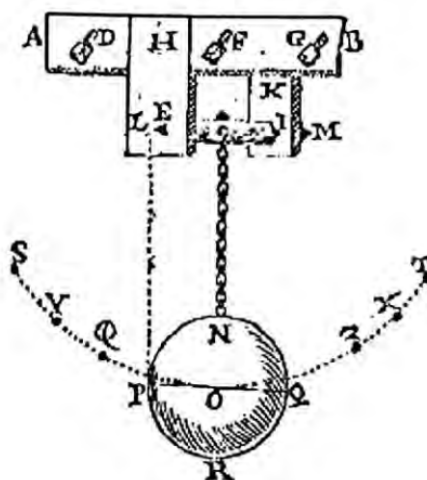


Figura 2.4: Schema del pendolo descritto da Giovanni Battista Riccioli nell'*Almagestum Novum* (Riccioli, 1651, vol. 1, p. 84). Immagine riprodotta da Borgato (2002).

Il problema, tuttavia, non consisteva soltanto nel disporre di un pendolo sufficientemente rapido, ma anche nel riuscire a contarne correttamente le frequentissime oscillazioni. Per ridurre il rischio di errore, Riccioli adottò un sistema di conteggio particolarmente ingegnoso: i numeri venivano pronunciati nella forma breve del dialetto bolognese, «*un, du, tri, quatr, cinq, sei, set, ot, nov, dies*», più adatta a seguire il ritmo serrato delle oscillazioni; le decine erano poi segnate con le dita della mano, mentre le centinaia venivano registrate depositando sassolini all'interno di un vaso.

I lanci furono ripetuti molte volte, utilizzando principalmente globi di argilla. Riccioli sfruttò diverse alture della città, tra cui finestre e aperture del Collegio dei gesuiti e campanili di chiese bolognesi, come San Francesco, San Giacomo, San Petronio e San Pietro. Tuttavia, il luogo più adatto si rivelò la Torre degli Asinelli, alla quale Riccioli attribuiva condizioni quasi ideali per questo genere di esperienze. La torre, infatti, offriva non solo un'altezza superiore a quella degli altri edifici cittadini, ma anche una base più ampia, protetta da un parapetto in pietra, che consentiva di effettuare i lanci senza pericolo per i passanti (Riccioli, 1651). L'immagine della torre riportata da Riccioli è riprodotta in Fig. 2.5.

La procedura adottata prevedeva una precisa divisione dei compiti. Francesco Maria Grimaldi e Giorgio Cassiani si collocavano sulla sommità della torre, portando con sé un pendolo, mentre Riccioli rimaneva alla base con un secondo pendolo analogo. Durante la caduta del grave, ciascuno annotava separatamente il numero delle oscillazioni trascorse, così da poter confrontare in seguito i risultati. Riccioli sottolinea che, nonostante la ripetizione di numerose prove, lo scarto tra le misure non raggiunse mai un'intera oscillazione.

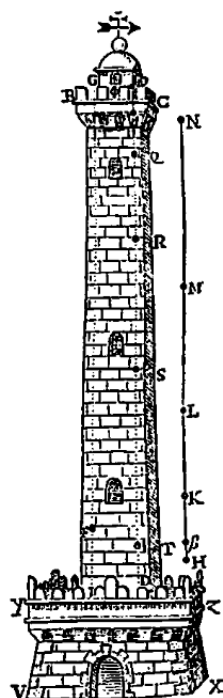


Figura 2.5: Schema degli esperimenti sulla caduta dei gravi condotti dalla Torre degli Asinelli, contenuto nell'*Almagestum Novum* di Giovanni Battista Riccioli (Riccioli, 1651, vol. 2, p. 385). Immagine riprodotta da Borgato (2002).

Le misure ottenute confermarono la legge galileiana dei numeri dispari. Riccioli trovò infatti che un globo lasciato cadere percorreva circa 10 piedi nei primi cinque colpi del pendolo, 40 piedi in dieci, 90 in quindici, 160 in venti e 250 in venticinque. Considerando gli spazi percorsi in intervalli uguali di tempo, si otteneva dunque la successione 10, 30, 50, 70, 90, corrispondente alla progressione 1, 3, 5, 7, 9 prevista da Galileo. Il dato è particolarmente significativo, anche perché Riccioli non partiva da una piena adesione alla fisica galileiana: al contrario, egli sospettava che negli esperimenti di Galileo vi fossero imprecisioni, soprattutto per quanto riguarda la misura del tempo.

Ciononostante, una volta ottenuti risultati concordi con la legge galileiana, ne riconobbe la validità e decise di comunicare la notizia a qualcuno che, secondo lui, l'avrebbe particolarmente apprezzata: Bonaventura Cavalieri. Riccioli riferisce di essersi recato dal seguace di Galileo proprio insieme a Grimaldi: il fatto che Cavalieri venga descritto in uno stato di grave infermità, sebbene fosse da tempo affetto da gotta, lascia supporre che l'episodio possa collocarsi in una fase molto vicina alla sua morte, avvenuta il 27 dicembre 1647 (Borgato, 2002).

Come osserva Graney (2015), il resoconto riccioliano degli esperimenti sulla caduta dei gravi lascia emergere alcuni tratti fondamentali del suo modo di fare scienza: la creatività, la cura estrema per il dettaglio e l'accuratezza, la capacità di organizzare

un lavoro collettivo e l'attenzione a fornire indicazioni sufficienti affinché le esperienze potessero essere ripetute e verificate. Sebbene tale giudizio riguardi anzitutto Riccioli, esso permette in parte anche di apprezzare il ruolo di Grimaldi, che fu evidentemente rilevante, in una serie di misure particolarmente delicate e tutt'altro che banali.

2.6.3 Grimaldi costruttore di strumenti scientifici

L'ultima dimensione che viene qui esplorata riguarda la progettazione e la costruzione di strumenti scientifici. Sembrerebbe non trattarsi di un aspetto secondario dell'attività di Grimaldi dal momento che Riccioli, nell'*Elogium perbreve*, insiste sulle abilità tecniche del confratello, ricordando come egli fosse solito realizzare con le proprie mani strumenti nuovi, adatti alle osservazioni, e come sapesse servirsene con circospezione (Grimaldi, 1665).

Un esempio particolarmente rilevante è infatti dato dagli strumenti utilizzati nel programma di misure geodetiche: Riccioli attribuisce a Grimaldi non soltanto gran parte delle operazioni osservative ma anche, quasi per intero, la costruzione degli strumenti necessari alla realizzazione del programma (Baldini, 2002).

La qualità dei suoi strumenti sembra, del resto, essere stata riconosciuta anche al di fuori del rapporto diretto con Riccioli: come ricorda Battistini (1988), Cassini avrebbe infatti ammirato gli strumenti realizzati da Grimaldi per l'elevata perizia della loro fattura.

Tuttavia, ad oggi, resta difficile ricostruire con precisione la natura degli strumenti da lui costruiti. L'unico strumento grimaldiano che Riccioli descrive nel dettaglio è il compasso di proporzione, una versione migliorata di quello galileiano, riportato in Fig.2.1, che il maestro considerava tanto importante da concepire come uno strumento distinto (Riccioli, 1661). A eccezione di questo specifico caso, non si dispone di descrizioni puntuali degli apparati realizzati da Grimaldi né, più in generale, degli strumenti impiegati presso il Collegio di Santa Lucia. Si tratta di una lacuna rilevante, soprattutto se si considera che il maestro vantò più volte il livello degli strumenti a disposizione del suo gruppo (Baldini, 2002).

Tale difficoltà dipende probabilmente anche dal fatto che, tanto nell'*Almagestum novum* quanto nell'*Astronomia reformata*, Riccioli tende raramente a fornire descrizioni tecniche degli strumenti impiegati, in particolare di quelli astronomici, anche perché queste secondo il gesuita ferrarese sarebbero dovute confluire in un'opera distinta, il *Liber Organicus*, che tuttavia non fu mai scritta. Dai testi riccioliani sappiamo però che in campo astronomico il gruppo utilizzò cannocchiali provenienti dall'esterno, nello specifico forniti da Torricelli, Manzini, dallo stesso Galileo e da Fontana. Tra questi ci fu anche uno fornito da Giuseppe Maria Grimaldi, fratello del suo allievo Grimaldi. Come

ipotizza Bònoli (2002), l'evidente carenza di descrizione degli strumenti può però anche essere ricondotta alla mancanza, all'epoca, di un lessico tecnico pienamente condiviso, capace di restituire in modo sintetico ed efficace le caratteristiche degli apparati e la qualità delle nuove osservazioni rese possibili dal loro impiego.

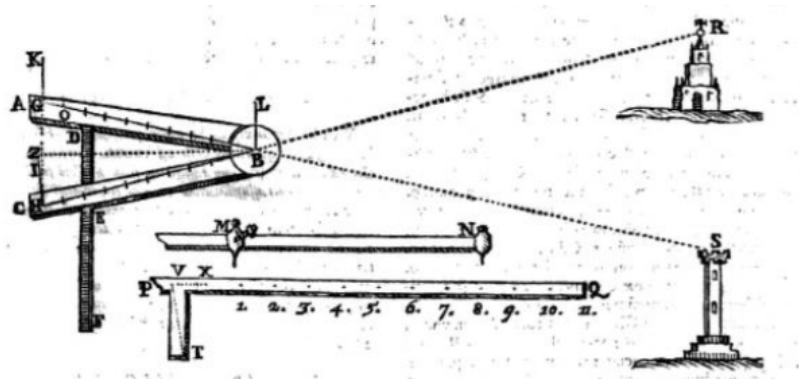


Figura 2.6: Compasso di proporzione ideato da Grimaldi e descritto nella *Geographiae et Hydrographiae reformatae* di Giovanni Battista Riccioli (Riccioli, 1661, p. 111). Digitalizzazione: Internet Archive.

Ciononostante, va detto che Riccioli e Grimaldi non sembrano aver preso parte allo sviluppo delle principali innovazioni strumentali maturate tra il 1630 e il 1680, a partire dal micrometro e dal telescopio astronomico a riflessione. Alla luce di questa evidenza, e nella consapevolezza che non è possibile ricostruire con chiarezza la natura e il livello tecnico degli strumenti effettivamente realizzati da Grimaldi, la conclusione proposta da Baldini (2002) appare la più moderata: l'ingegnosità e la manualità del gesuita bolognese ebbero certamente un ruolo importante nella pratica scientifica del gruppo riccioliano, ma si esercitarono entro margini relativamente ristretti, determinati dalla disponibilità di risorse e dalla distanza del Collegio bolognese rispetto ai principali centri di innovazione strumentale del tempo.

Ciò che maggiormente interessa, ai fini di questa trattazione, è tuttavia la capacità da parte di Grimaldi di progettare autonomamente strumenti e servirsene con acclamata perizia, ulteriore punto da tenere a mente prima di analizzare le sue ricerche in ottica.

Capitolo 3

Interrogare la natura della luce: la *Physico-Mathesis de Lumine, Coloribus, et Iride*

3.1 Substantia aut accidens

Tra i numerosi dibattiti che hanno attraversato la storia del pensiero scientifico, quello riguardante la natura della luce si distingue senz'altro per durata, complessità e carattere interdisciplinare. Si tratta infatti di un tema che, sotto forme diverse, è riemerso anche in epoche molto distanti tra loro e che, quasi inevitabilmente, si è intrecciato con il pensiero filosofico, con la fede religiosa e con altre discipline tra cui, ovviamente, l'arte. Questo non dovrebbe certo sorprendere: la luce rende possibile la visione, scandisce i ritmi quotidiani ed è al tempo stesso uno dei fenomeni naturali più sfuggenti e difficili da interpretare. Fin dalle origini, ha esercitato un certo fascino sull'uomo e molti autori ne hanno raccontato la storia, o meglio, le storie, ordinando ciò che è stato detto nel tempo e presentando resoconti di natura scientifica, speculativa, spirituale e metafisica.

È facile rendersi conto come all'interno della maggior parte dei testi mitologici e religiosi la luce assuma un ruolo particolarmente significativo. Per citare un esempio, basti pensare alla Genesi contenuta nell'Antico Testamento, all'interno della quale essa possiede un chiaro valore iniziatico, dal momento che viene presentata come il primo elemento naturale creato da Dio, prima ancora del Sole e degli altri corpi celesti, creati soltanto nel quarto giorno (*La Sacra Bibbia. Versione CEI 2008*, 2008, Genesi 1, 1–5):

¹In principio Dio creò il cielo e la terra. ²La terra era informe e deserta e le tenebre ricoprivano l'abisso e lo spirito di Dio aleggiava sulle acque. ³Dio disse: «Sia la luce!». E la luce fu. ⁴Dio vide che la luce era cosa buona e Dio separò la luce dalle tenebre. ⁵Dio chiamò la luce giorno, mentre chiamò le tenebre notte. E fu sera e fu mattina: giorno primo.

Come osserva Ronchi (1952), è interessante notare come in queste parole sia già implicita una teoria sulla natura della luce, tutt'altro che ovvia: nella tradizione biblica, questa sembra esistere indipendentemente da chi la emette o da chi la vede.

Le Tavole dell'Antico Testamento affondano le proprie radici nella civiltà orientale, che solo con l'avvento del Cristianesimo esercitò un'influenza nell'Europa occidentale. Purtroppo, non si dispone di fonti sufficienti per poter studiare e ricostruire interamente i risultati a cui giunsero tutti i centri culturali delle antiche civiltà che, probabilmente, avevano già sviluppato una qualche concezione sulla natura di tale fenomeno.

Tuttavia, è possibile ricostruire almeno in buona parte quanto avvenne nella civiltà greca che, tra le varie culture antiche, si distingue sia per l'aver assimilato le influenze provenienti dalle tradizioni egizie e mesopotamiche, sia per l'importante influenza che ha avuto nel mondo occidentale in tutti i secoli successivi. Fu proprio nella Ionia del VI secolo a.C. che iniziò infatti a prendere forma una nuova modalità di interrogarsi sul mondo circostante: la nascita del pensiero filosofico e scientifico segnò il progressivo passaggio da spiegazioni di carattere mitologico o religioso a un'indagine fondata sulla ricerca di principi e cause naturali. La comprensione delle leggi che regolano la natura divenne così ben presto il centro dell'attività di numerosi pensatori, i quali dedicarono a tale ricerca una parte essenziale, e talvolta l'intera durata, della propria esistenza.

Non stupisce che, tra le numerose questioni affrontate dai filosofi dell'epoca, ci fossero anche quelle relative ad un fenomeno tanto affascinante quanto misterioso come la luce. Tuttavia, nel considerare tali interrogativi, è importante non proiettarvi domande tipiche della scienza moderna. Che cos'è la luce? Da dove proviene? Che cos'è un'immagine? Tutte queste domande, secondo Park (1997), racchiudono già, al loro interno, venticinque secoli di pensiero scientifico. In quel periodo storico, invece, la domanda a cui fondamentalmente si cercava di trovare una risposta convincente era la seguente: quale meccanismo rende possibile la visione?

I filosofi greci elaborarono diverse teorie sulla luce, anche se sarebbe appunto più corretto parlare di teorie della visione poiché, come suggerisce anche Ronchi (1952), l'interesse dei filosofi greci non era rivolto tanto alla natura della luce in sé, ma al problema del collegamento tra l'occhio e l'oggetto osservato.

Quel collegamento, che oggi tutti identificherebbero facilmente con la luce, non era affatto concepito in modo univoco. Si poteva infatti ipotizzare un processo che partiva dall'occhio verso l'oggetto, come sostenuto dalla Scuola Pitagorica, oppure un flusso che dall'oggetto giungeva fino all'occhio, secondo la visione della Scuola Democritea. Altre teorie, come quella di Empedocle, ammettevano una combinazione di entrambi i processi, mentre alcune spiegazioni, tra cui quella di Aristotele, escludevano del tutto l'esistenza di un "quid" materiale, interpretando la visione come una modificazione del

mezzo interposto tra osservatore e oggetto osservato.

Non rientra negli obiettivi del presente paragrafo entrare nel merito delle singole teorie, tuttavia è indispensabile comprendere le radici dell'atmosfera peripateticatomistica che Grimaldi respirava quando scrisse il suo trattato ed entro la quale, eccetto qualche trasgressione contenuta nell'opera, doveva ad ogni modo muoversi (Savelli, 1951).

Va detto che il pensiero aristotelico relativo alla luce, alla visione e al colore si fonda su alcuni concetti chiave della sua metafisica. Se, infatti, Platone privilegiava il rigore delle matematiche e mostrava una certa diffidenza verso l'esperienza sensibile, Aristotele adottava un approccio essenzialmente empirico, orientato non solo all'osservazione dei fenomeni sensibili, ma anche alla loro spiegazione a partire da cause immanenti alla stessa realtà (Jori, 2020).

Nella sua filosofia, i temi della luce e della visione, illustrati nel secondo libro del trattato *De anima*, sono strettamente connessi, poiché egli sosteneva che la visione può avvenire soltanto in presenza della luce. Quest'ultima, tuttavia, non veniva intesa come un corpo materiale, né come un'emissione proveniente dall'occhio o dagli oggetti. Aristotele respingeva infatti teorie atomistiche come quella degli *eidola*, secondo cui dagli oggetti si distaccherebbero immagini sottili capaci di raggiungere l'occhio. Al centro della sua spiegazione si trova invece il cosiddetto *diafano*, presente in misura diversa nell'aria e negli altri corpi trasparenti, vale a dire quei corpi attraverso i quali l'immagine di un oggetto risulta distinguibile alla vista. Tale nozione si lega direttamente alla distinzione aristotelica tra potenza e atto. Il *diafano*, infatti, è trasparente per natura, ma può esserlo in potenza, quando non è attualizzato da alcuna sorgente luminosa, e in atto, quando viene reso effettivamente trasparente dalla presenza del Sole, del fuoco o di un altro corpo luminoso. Nel primo caso si ottiene oscurità, mentre nel secondo si ha la luce. Quest'ultima, dunque, viene concepita come l'attualizzazione del mezzo trasparente: essa è, stando alla definizione del filosofo, «*l'atto del diafano in quanto diafano*». Per quanto concerne il colore, invece, egli lo riconduce al diverso grado di diafanità dei corpi: quanto più questa è elevata, tanto più il colore tende al bianco, quanto più è ridotta, tanto più si avvicina al nero (Darrigol, 2012).

Da queste definizioni derivano alcune conseguenze fondamentali: in primo luogo, la luce per Aristotele non è una sostanza né un corpo in senso proprio, come accadeva invece in alcune teorie precedenti fondate sull'idea di emanazioni o effluvi materiali, ma è un accidente, ovvero una proprietà accidentale del mezzo trasparente. Nella prospettiva aristotelica, infatti, ogni ente è riconducibile o alla sostanza, cioè a ciò che esiste in sé, oppure all'accidente, ossia a una proprietà che non sussiste autonomamente, ma solo in quanto inerisce a una determinata sostanza.

In secondo luogo, il passaggio del mezzo dalla trasparenza in potenza alla trasparenza in atto è concepito da Aristotele come immediato. Da questo punto di vista, la teoria aristotelica esclude l'idea di una velocità finita della luce, sostenuta invece da Empedocle, poiché tale ipotesi appariva al filosofo contraria tanto al ragionamento quanto all'evidenza sensibile.

Infine, la luce non costituisce propriamente l'oggetto della visione. A essere visto è infatti il colore degli oggetti, mentre la luce rappresenta la condizione che rende possibile la visibilità del colore attraverso il mezzo trasparente. Essa, dunque, non si vede in sé, ma consente di vedere ciò che si trova nel mezzo illuminato.

Tale concezione della luce esercitò un'influenza profonda e duratura, imponendosi come riferimento negli studi in ottica per quasi due millenni. Tuttavia, proprio la definizione della luce come atto del diafano in quanto diafano, poteva lasciare spazio a varie interpretazioni: nel corso del Medioevo e dell'età moderna essa fu infatti ampiamente commentata, dando luogo a posizioni non sempre concordi, soprattutto in Italia, che nella prima metà del Seicento, si presentava come un «*autentico caleidoscopio di dottrine differenti*» (Guidi, 2018).

Tuttavia, nella prima metà del Seicento, quando Grimaldi si affacciava allo studio dell'ottica, diversi aspetti del fenomeno luminoso apparivano molto più definiti rispetto ai secoli precedenti. Ormai si ammetteva l'esistenza di un *lumen* emesso dalle sorgenti luminose, propagato per raggi rettilinei in tutte le direzioni, assorbito dai corpi opachi, riflesso da quelli lucidi, diffuso dalle superfici ruvide e trasmesso dai corpi trasparenti. Si riteneva inoltre che esso potesse trasportare calore e che, penetrando nell'occhio, venisse concentrato sulla retina, dove avrebbe prodotto l'impressione responsabile della visione. Rimanevano naturalmente ancora aperte diverse questioni, prima fra tutte quella relativa alla natura stessa di questo *lumen* e, ancor più, del colore. Su tali problemi continuavano infatti a confrontarsi interpretazioni diverse, più o meno ancorate alla tradizione dei filosofi, che oscillavano spesso tra la concezione della luce come accidente e quella della luce come sostanza (Ronchi, 1952).

Del resto, non si può ignorare il punto di rottura rappresentato dalla pubblicazione, nel 1610, del *Sidereus Nuncius*. Secondo Ronchi (1952), quell'anno segnò una vera e propria catastrofe per l'ottica antica, poiché Galileo contribuì a modificare profondamente l'atteggiamento degli studiosi nei confronti dell'occhio, della visione e degli strumenti ottici. Grazie a lui, l'ottica, fino ad allora coltivata da un numero relativamente ristretto di studiosi, assunse progressivamente un ruolo centrale nel dibattito filosofico e scientifico.

In quegli anni infatti la discussione su questi temi era particolarmente accesa e, in molti casi, le nuove esigenze della filosofia naturale venivano ancora lette e discusse

attraverso le categorie della tradizione, nel tentativo di costruire una sintesi dottrinale forse destinata a rimanere irrisolta (Guidi, 2018).

Grimaldi decide di prendere parte al dibattito mostrando, all'interno della sua opera, di conoscere bene la tradizione interpretativa precedente. Nel trattato, egli osserva infatti come alcuni autori avessero letto le parole di Aristotele nel senso della sostanzialità della luce ma, a suo giudizio, la posizione propriamente aristotelica conduceva piuttosto a considerarla come accidente (Grimaldi, 1665, Propositio I, pp. 475–479).

È proprio attorno a questa duplice interpretazione che Grimaldi costruisce la sua trattazione, presentandola come un confronto tra due diverse concezioni: da un lato la luce come sostanza, dall'altro la luce come accidente. Tale impostazione, come si vedrà poco più avanti, si riflette direttamente nella struttura del trattato. Resta tuttavia da chiarire se essa risponda a una scelta pienamente consapevole dell'autore o anche ad altre esigenze, questione che sarà discussa nel paragrafo 3.5, dopo l'analisi dell'opera.

La *Physico-Mathesis de Lumine, Coloribus, et Iride* può dunque essere letta come un'opera costruita attorno alla seguente domanda «*Substantia aut accidens?*»¹: una tensione interpretativa che in passato ha portato Savelli a definire metaforicamente il gesuita bolognese l'«*Amleto della luce*» (Savelli, 1951).

3.2 La struttura

La *Physico-Mathesis de Lumine, Coloribus, et Iride* si presenta come un'opera ampia e piuttosto articolata: il corpo principale della trattazione consta di 535 pagine in lingua latina, alle quali si aggiungono diversi elementi paratestuali posti sia in apertura sia in chiusura del volume.

L'opera si apre infatti con l'antiporta, che precede il frontespizio, nella quale compaiono il titolo e la dedica all'Illustrissimo e Reverendissimo D. Carlo Antonio di San Pietro, patrizio bolognese, abate e commendatario del Collegio di Santa Lucia di Roffeno. Nella stessa pagina è inoltre raffigurato, mediante un'incisione a stampa, lo stemma del dedicatario, come si può osservare in Figura 3.1.

¹Questo interrogativo in realtà attraversa, in forme diverse, gran parte della storia delle teorie sulla luce. Proprio per questo, Park (1997) lo riprende come uno dei fili conduttori della sua ricostruzione storica, seguendo l'evoluzione delle diverse concezioni della luce dall'antichità all'età moderna. Per un approfondimento sull'evoluzione dei concetti di ottica e sulla natura della luce si rimanda al suo lavoro o a quelli di Ronchi (1952) e Sabra (1981).

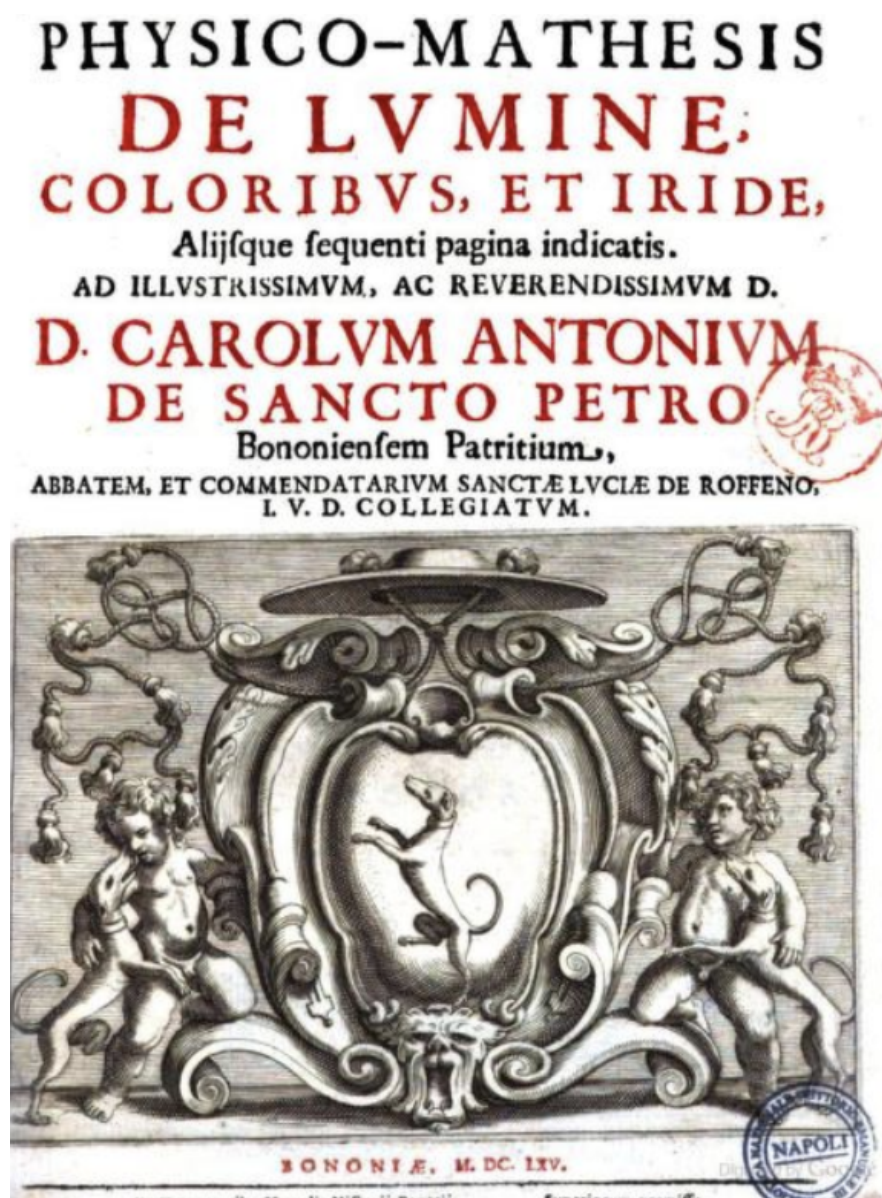


Figura 3.1: Antiporta della *Physico-Mathesis de Lumine, Coloribus, et Iride*, con dedica a Carlo Antonio di San Pietro e incisione dello stemma del dedicatario (Grimaldi, 1665). Digitalizzazione: Internet Archive.

Segue poi il frontespizio, riportato in Figura 3.2, che offre un'indicazione chiara del progetto complessivo dell'opera. Da esso emerge infatti che il trattato non è dedicato esclusivamente ai fenomeni fisici della luce, ma comprende anche quei fenomeni che, per analogia, vengono accostati ad essa, come il suono o il magnetismo. Il frontespizio precisa inoltre che l'opera è composta da due libri: nel primo vengono presentati esperimenti e ragionamenti a sostegno della sostanzialità della luce; nel secondo, invece, tali argomenti vengono discussi e sciolti a favore della posizione peripatetica, secondo la quale la luce deve essere intesa non come sostanza, bensì come accidente. L'opera viene presentata come un'indagine ampia, nella quale vengono annunciate non poche

cose degne di essere conosciute. Tra queste occupa un posto centrale un nuovo modo di propagazione della luce, fino ad allora sconosciuto, che sarà definito da Grimaldi diffrazione. Si specifica, infine, che l'autore del trattato è padre Francesco Maria Grimaldi, della Compagnia di Gesù, e che il volume viene pubblicato come opera postuma.



Figura 3.2: Frontespizio della *Physico-Mathesis de Lumine, Coloribus et Iride*, nel quale sono indicati il titolo completo dell'opera, la divisione in due libri e la pubblicazione postuma a nome di Francesco Maria Grimaldi (Grimaldi, 1665).

Digitalizzazione: Internet Archive.

Al frontespizio segue la lettera di dedica a D. Carlo Antonio di San Pietro, redatta da Gerolamo Bernia, finanziatore della stampa dell'opera.

Subito dopo, compaiono le autorizzazioni necessarie alla pubblicazione. La prima è il nulla osta di Giovan Paolo Oliva, Vicario Generale della Compagnia di Gesù,

sottoscritto a Roma il 12 maggio 1664; la seconda riporta invece l'*imprimatur* del clero secolare bolognese, con i nomi di Carlo Gorano, barnabita e metropolita di Bologna, del cardinale Gerolamo Boncompagni, arcivescovo della città, e di fra' Giovan Vincenzo Paolino da Garexio, Maggiore Inquisitore Generale a Bologna.

Prima dell'avvio vero e proprio del primo libro si incontra il *Proemium et Intentio Auctoris In huius Operis distributione*, una sezione di particolare rilievo perché consente di comprendere sia le intenzioni che guidano Grimaldi nella stesura del trattato, sia l'approccio che intende adottare nello studio dei fenomeni luminosi. In queste pagine, l'autore giustifica innanzitutto la scelta di tornare a indagare un tema già ampiamente discusso, come quello della natura della luce, sostenendo che, anche in un ambito nel quale molto è stato già scritto, rimane ancora spazio per ulteriori ricerche e approfondimenti. Tale affermazione è tuttavia accompagnata da un atteggiamento di evidente prudenza: Grimaldi si dichiara infatti molto consapevole delle difficoltà che si incontrano nel confrontarsi con una tradizione filosofica consolidata, sostenuta da argomenti autorevoli e generalmente considerata degna della massima attendibilità.

L'autore si presenta dunque come un profondo conoscitore della tradizione filosofica precedente, aspetto che sicuramente non sorprende se si considera la sua formazione gesuitica, il suo ruolo di professore di matematica e la collaborazione con Riccioli, nelle cui opere Grimaldi aveva già dato prova di competenze estese su diversi ambiti del sapere. Fin dall'introduzione emerge inoltre la tensione tra due modi differenti di intendere lo studio della natura: da un lato quello dei filosofi più tradizionali, dall'altro quello di una figura nuova di studioso, sempre più vicina al fisico e allo sperimentatore, che non si limita a osservare i fenomeni, ma li interroga attraverso esperienze costruite e controllate.

La via attraverso cui Grimaldi intende condurre questa indagine sulla luce è infatti proprio quella dell'esperimento, al quale attribuisce un ruolo decisivo nell'accrescimento della conoscenza dei fenomeni fisici. Le esperienze, infatti, possono rivelare aspetti della natura rimasti fino ad allora nascosti e, proprio per questo, mettere in discussione costruzioni teoriche fondate su basi che secondo l'autore non sono sempre solide.

Grimaldi afferma di essersi proposto di investigare la luce attraverso esperienze capaci di renderne più manifesta la sua natura e dichiara di essersi imbattuto, nel corso di tale ricerca, in fenomeni che riteneva non fossero mai stati osservati prima. Proprio questi fenomeni gli erano apparsi particolarmente adatti a sostenere la tesi della sostanzialità della luce, intesa come una sostanza sottilissima, diffusa nei corpi diafani con movimento impetuoso. Tuttavia, la novità stessa delle osservazioni imponeva, secondo l'autore, un atteggiamento di estrema cautela: Grimaldi dichiara infatti di temere che il fascino della scoperta potesse indurlo a formulare un'ipotesi più abbagliante che

realmente fondata sulla verità.

Questo spiega la scelta di non presentare gli esperimenti come prove definitive e univoche, ma di sottoporli a un confronto critico con la dottrina peripatetica. Grimaldi riconosce infatti che, anche qualora le esperienze fossero state condotte con la massima cura, descritte fedelmente e vagliate con attenzione, gli argomenti fondati su di esse avrebbero potuto essere confutati. Sembra derivare proprio da qui la decisione di dividere l'opera in due libri distinti: nel primo vengono esposti gli esperimenti e le ragioni che sembrano sostenere la teoria della sostanzialità della luce; nel secondo, invece, vengono considerate le obiezioni e le difficoltà che consentono di difendere la posizione peripatetica, secondo la quale la luce deve essere intesa come accidente.

Il *Proemium* si chiude infine con un esplicito invito al lettore a prendere parte a tale discussione. Grimaldi lascia aperta la possibilità che alcuni giudichino gli esperimenti sufficientemente forti da confermare la sostanzialità della luce, mentre altri possano ritenerli incapaci di sostenere tale conclusione. In entrambi i casi, ciò che conta è il confronto delle ragioni, condotto in nome di quella libertà dello studio attraverso la quale, secondo l'autore, è possibile davvero avvicinarsi alla verità.

Prima di ciascuno dei due libri sono collocati gli indici delle proposizioni in essi contenute, che permettono di seguire l'articolazione interna dell'argomentazione. Alla fine del volume si trova invece un più ampio indice alfabetico degli argomenti più rilevanti trattati nell'opera. In esso, quando non viene specificato diversamente, il riferimento è da intendersi al primo libro, mentre solo nei casi relativi al secondo libro tale appartenenza viene esplicitata. Secondo Petruzzelli (2012), questo elemento costituisce un indizio indiretto del fatto che il secondo libro possa essere stato composto per necessità e aggiunto in un momento successivo: essendo infatti molto più ridotto per estensione, le poche occorrenze che rimandano ad argomenti in esso trattati vengono segnalate in modo esplicito.

Il volume si chiude infine con l'*Elogium perbreve* dedicato a Grimaldi e composto dal suo maestro e amico Giovanni Battista Riccioli. Il preziosissimo testo, riprodotto nelle due facciate riportate nelle Figure 3.3 e 3.4, è indirizzato al lettore e presenta un tono fortemente celebrativo. Riccioli vi si sofferma soprattutto sulle qualità morali e religiose dell'autore, oltre che su alcuni tratti essenziali, utili a ricostruire la sua biografia. Come già ampiamente osservato nel paragrafo 2.2, l'immagine che ne emerge è quella di un uomo modesto e profondamente devoto, stimato e ammirato da tutti i suoi confratelli.

Colpisce, in questo senso, lo squilibrio tra lo spazio riservato alla descrizione delle virtù personali di Grimaldi e quello dedicato alla sua attività scientifica, richiamata piuttosto rapidamente. Secondo Petruzzelli (2012), tale scelta può essere interpretata

anche come una forma di *captatio benevolentiae*: insistendo sulla rettitudine morale e religiosa dell'autore, l'*Elogium* contribuiva infatti a presentare Grimaldi come una figura pienamente affidabile e degna di fiducia. In questo modo, Riccioli poteva attenuare il possibile sospetto suscitato da un'opera che introduceva elementi di forte novità rispetto alle dottrine tradizionali sulla natura della luce.

La formula conclusiva «*Laus Deo*», posta in evidenza al centro dell'ultima pagina, iscrive infine l'intera opera entro una cornice esplicitamente religiosa, confermando ancora una volta il profilo di Grimaldi come autore profondamente devoto.

IO. BAPTISTA RICCIOLIVS
SOCIETATIS IESV
Ad Lectorem de Operis huius Authorem:
Elogium perbreue.



VIX Opus hoc optimæ Vir recordationis P. Franciscus Maria Grimaldus ad umbilicum perduxerat, quando illum à visibili Mundi huius luce, ad Gloriam suam lumen, lucemque, inaccessibilem contemplandam, Pater Luminum euocauit, sicut morali quadam certitudine, quotquot eum norant, æstimauerunt. Fuit in illo eximia indoles animi, excelsa mens, nobile ingenium, acre iudicium, profunda sagacitas, solertia singularis, sedata & patientissima veritatis inquisitio: Quemadmodum videre est, tum in hoc posthumo Opere, tum multis in locis nostri Almagesti Noui, nec non in duobus Reformatæ Geographiæ, atque Astronomiæ voluminibus, vbi crebrius fecimus mentionem obseruationum, Theorematum, ac Problematum, quæ ipse partim per se, partim nobiscum peregit. Nam ex quo R. P. Franciscus Piccolhominiens Provincialis, illum ex spūto sanguinis debilitatum, à Philosophiæ Magisterio, cui se accinxerat, ad Mathesim docendam, in qua iam altas radices egerat, deputauit, ita se huic facultati addixit, vt omnes propemodum eius partes percelluerit, Geometriam præsertim, Opticam, Gnomonicam, Staticam, Geographiam, Astronomiam, & Mechanicam potissimum Astronomicam, suis ipse manibus solitus novæ Organa obseruationibus peridonea perficere, & summa dexteritate, ac circumspectione tractare. Ita Diuina Providentia mihi, licet indignissimo, tale adiutorium præparauit, sine quo nunquam prænomina opera perfecissem. Neque fanè vllis exprimere verbis possem, quantum illi debeam, propter labores pro me exantlato, inuicta constantia, & fide inuiolabili. Profecto expectus sum in illo, quod Ecclesiastici 6. affectus: *Amicus fidelis protectio fortis, qui autem inuenit illum, inuenit thesaurum: Amicus fideli nulla est comparatio, & non est digna ponderatio auri, & argenti, contra bonitatem fides illius.* Sed ab Angelico, si fas est dicere, ingenio ad mores eius Angelicos transeamus.

Quanta in illo, bone Deus! elucebat oris modestia? quàm hilari granitas? quàm affabilis mansuetudo? quantus candor, ac sinceritas in agendo, vsq; ad horrorem simulationis? quanta ex intimo sensu demissio? quam non fucata pietas, & solida in Deum, Diuolque religio? quanta frugalitas in victu, neglectus in vestitu, contemptus in corporis commodis aspernantes, nihil non laudabile in illo deprehendere valuerunt. Non nemo assererat, venisse se libentissimè ad Collegium hoc Bononiense, vt conuersione ipsius religiosissima fieri posset. Denique ipsius Præsides, siue Provinciales, siue Rectores in illud elogium, quod multis panegyricis æquiualeat, conspirauerunt: P. FRANCISCVS MARIA GRIMALDVVS VIXIT INTER NOS SINE QVERELA. Ergo maturus iam calo, & vitæ huius peritus P. Petrus Hieronymum Bonifilium mox proximum enixè rogauit, vt quando non dubitabat quin visurus esset bona Domini in terra viuendum, adiuuaret se quoque, vt quam primum, ex hac miseriarum valle ad meliorem vitam migraret. Post sequentem voti compos factus, & febr

aiden.

Figura 3.3: Prima facciata dell'*Elogium perbreue* dedicato a Francesco Maria Grimaldi e composto da Giovanni Battista Riccioli (Grimaldi, 1665).
 Digitalizzazione: Internet Archive.

ardentissima, cum cephalalgia correptus, admonitusque de vitæ periculo extremo, statim
 nihil commotus, muniti voluit Sanctis. Ecclesiæ Sacramentis. Inde imaginem S. Francisci
 Xaverij, cui erat addictissimus crebro per me oblatam cum lacrymis osculabatur: Horranti,
 ut magna fiducia totum se Deo committeret, à quo tot pignora benignitatis acceperat, re-
 spondit: *Pæ mibi, nisi in Domino considerem*, & paululo post: *Quàm bonus Israel Deus his,*
qui diligunt illum? Cumque adderem nihil iam superesse, nisi ut animam suam traderet la-
 uandam in sanguine Agni; subiunxit. *Ita est, nimirum ille potest animam meam mundare, &*
remundare, vel pulchritudinem prout ipsi placuerit. His, & paucis alijs similibus humillimè in-
 Deum fiduciæ argumentis, post brevissimam agoniam capite in dexteram placidè inclinato,
 obdormiuit in Domino, ipsa in aurora, in qua paucis natus fuerat, die à decubitu 8. & SS. In-
 nocentibus sacra, annos natus 44. menses 8. & dies 16. Natus quippe est Anno Salutis 1618.
 Aprilis d. 2. Oriente Sole. Ingressus est Societatem Anno 1632. d. 18. Martij; Professionem
 solemnem 4. Votorum edidit Anno 1651. Kalendis Maii, obiit Anno 1663. Decemb. 18.
 Expositus in feretro tanta amœnitate renidebat in vultu, ut subridere propemodum vi-
 deretur, id non modò nostris, sed & secularibus aliquot demerantibus, indeque
 autumantibus eum filium lucis fuisse. Nos demum illi cum lacrymis,
 sed minime amaris, & iucundo penè dolore parentauimus, quem
 ad beatæ æternitatis porrum appulisse, & ibi pro nobis
 Deo supplicare, non temerè
 opinati sumus.

L A V S D E O.



Figura 3.4: Seconda facciata dell'*Elogium perbreve* dedicato a Francesco Maria Grimaldi e composto da Giovanni Battista Riccioli (Grimaldi, 1665).
 Digitalizzazione: Internet Archive.

3.3 Il metodo

Fin dal *Proemium* Grimaldi dichiara di voler affrontare lo studio della luce senza affi-
 darsi semplicemente all'autorità dei maestri, ma attraverso la conduzione di esperimenti
 e ragionamenti. Come osserva Ronchi (1952), nell'opera si avverte già l'influenza del
 nuovo clima culturale inaugurato da Galileo sebbene, come si vedrà anche dall'analisi
 dei contenuti dell'opera, non venga del tutto abbandonata una certa eredità della
 tradizione scolastica.

Questa duplice natura emerge con chiarezza dalla stessa struttura argomentativa
 adottata dall'autore. Le proposizioni, sessanta nel primo libro e soltanto sei nel secondo,
 sono infatti costruite seguendo una forma fortemente dialettica: alla presentazione delle
 tesi seguono le dimostrazioni, le obiezioni, le risposte alle obiezioni e, in alcuni casi,

ulteriori repliche e controrepliche. Secondo Ronchi (1952), la sensazione percepita dal lettore è quasi quella di ritrovarsi dinanzi ai verbali di un vero e proprio processo. Grimaldi infatti non si limita mai ad esporre un risultato, ma lo difende, lo sottopone più volte a verifica, lo riprende in punti diversi dell'opera e ne valuta la solidità rispetto alle possibili critiche.

Proprio questa impostazione conferisce alla sua opera un tono talvolta apertamente polemico². L'autore torna infatti più volte sulle posizioni dei suoi avversari, utilizzando espressioni provocatorie o persino ironiche: Goethe (2013) fa notare come, poco tempo prima, l'utilizzo di una simile forma aveva portato Galileo, nei *Dialoghi*, a ricevere attacchi da parte dei Gesuiti, mentre in questo caso è proprio un gesuita a servirsene.

L'impiego di toni tanti aspri non può che sorprendere, soprattutto se confrontato con il profilo di Grimaldi delineato nel paragrafo 2.2, dal quale emerge la figura di un uomo modesto e profondamente devoto. Tuttavia, all'epoca, il dibattito sulla natura della luce dovette essere tanto acceso da coinvolgere con simili atteggiamenti anche una personalità mite come quella di Grimaldi. Evidentemente, come suggerisce Savelli (1951), alcune affermazioni peripatetico-tomistiche come «*illuminatio non est motus localis*» o «*lux dicitur esse sine numero, pondere et mensura*»³, per il gesuita erano sin troppo difficili da digerire, proprio perché in contrasto con l'esperienza.

Un altro tratto caratteristico del metodo grimaldiano è il continuo riferimento a oggetti, situazioni e fenomeni osservati nella vita quotidiana. Come osserva Battistini (1988), per Grimaldi tutto diventa potenzialmente uno strumento di indagine: una spazzola da vestiti, una finestra di vetro, un filo d'erba, una pagliuzza, un aquilone, piccoli insetti, una tela di ragno, il burro, il talco e persino il cane dell'autore osservato durante il sonno. Il mondo domestico si trasforma così in un vero e proprio laboratorio, nel quale ogni fenomeno, anche il più comune, può essere interrogato e utilizzato per ricavare prove a favore della propria opinione.

Accanto a queste esperienze domestiche, Grimaldi ricorre naturalmente anche a

²Il registro polemico di Grimaldi emerge in più punti del trattato, dove l'autore non risparmia insulti nei confronti dei propri avversari. Ronchi (1952) richiama, a titolo d'esempio, il passo in cui Grimaldi riferisce di essersi dovuto difendere dall'accusa, mossagli da alcuni filosofi, di voler ridurre la visione a una operazione di tatto. Ricorda anche il caso di un uomo che, alla presenza di Serenissimi Principi, avrebbe dato prova di saper distinguere i colori mediante il tatto, pur avendo gli occhi bendati o la testa rivolta altrove; dell'episodio, aggiunge Grimaldi, sarebbe stato redatto anche un atto ufficiale.

³Rispettivamente: «l'illuminazione non è un moto locale» e «si dice che la luce sia senza numero, peso e misura» [Traduzione a cura dell'autrice, realizzata con il supporto di strumenti di intelligenza artificiale]

strumenti più tradizionali dello scienziato moderno, che gli permettono di costruire più propriamente degli esperimenti: camere oscure, lenti ben terse, prismi, specchi, acqua, alambicchi, tubi metallici, polvere pirica, selenite e altri materiali di questo tipo. Si tratta di strumenti con cui egli aveva certamente una notevole familiarità, forse anche perché in parte costruiti o adattati personalmente, come già mostrato nel paragrafo 2.6.3.

A tutto ciò si affianca un uso significativo delle rappresentazioni grafiche, che conferma le abilità di Grimaldi come disegnatore, già richiamate nel paragrafo 2.6.1. Il testo contiene cinquantotto figure, non distribuite uniformemente nel trattato, ma nella maggior parte dei casi costituite da schemi strettamente fisico-matematici, alcuni dei quali si incontreranno più avanti, che aiutano il lettore a visualizzare il contenuto delle proposizioni. Fanno eccezione soltanto due rappresentazioni più realistiche: la riproduzione di un'ampolla collegata ad un tubicino e a una fiala, utilizzata per un esperimento e visibile in Fig.3.5, e lo schema della proiezione ingrandita e capovolta dell'immagine di una candela mediante una lente interposta, riportata in Fig.3.6.

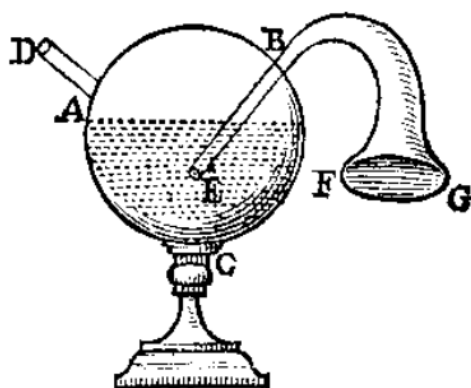


Figura 3.5: Riproduzione dell'apparato sperimentale impiegato da Grimaldi per discutere la porosità dell'aria e dell'acqua: un'ampolla collegata a una fiala e a un sottile tubicino (Grimaldi, 1665, *Propositio VI*, p. 54). Immagine ripresa da Petruzzelli (2012)

Secondo Petruzzelli (2012), la presenza delle illustrazioni per Grimaldi non ha soltanto una funzione esplicativa, ma serve anche a richiamare l'attenzione del lettore sui passaggi teoricamente più rilevanti. Da esperto delle *humanae litterae*, egli doveva infatti conoscere piuttosto bene il valore retorico delle immagini e degli schemi.

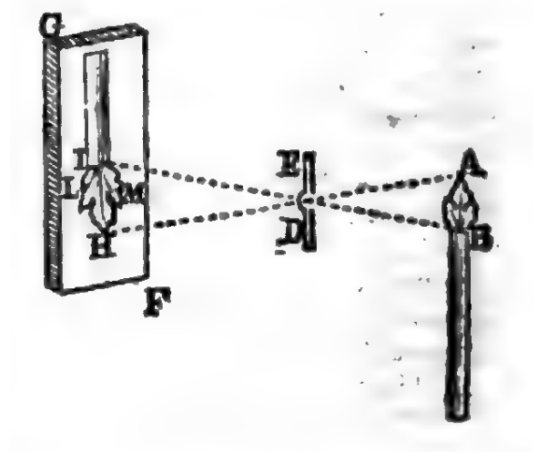


Figura 3.6: Proiezione dell'immagine di una candela accesa attraverso una lente (Grimaldi, 1665, Propositio XXV, p. 214). Digitalizzazione: Internet Archive.

Il talento di osservatore, apprezzato anche da Goethe (2013), le abilità grafiche, l'uso accurato degli strumenti, la solida conoscenza della tradizione precedente e, al tempo stesso, la vicinanza alle istanze della nuova scienza costituiscono dunque tratti centrali della scienza grimaldiana. Come si è visto, sono aspetti già riconoscibili nella collaborazione con Riccioli e che riemergono con evidenza anche nell'ambito dell'ottica. Accanto a questi elementi, tuttavia, nella sua opera emergono elementi più propriamente legati alla sua fisionomia di autore: la sottigliezza dell'argomentazione dialettica, il registro polemico, nonché alcune contraddizioni nei ragionamenti che saranno messe in luce nei prossimi paragrafi attraverso l'analisi dei contenuti dell'opera.

3.4 I contenuti

Nei paragrafi seguenti si entrerà nel vivo dell'ottica grimaldiana, seguendo lo stesso ordine con cui gli argomenti vengono presentati nel primo libro della *Physico-Mathesis*.⁴ Tale ordine, tuttavia, non corrisponde a una scansione storica dello sviluppo dell'ottica. Se si seguisse un criterio storico-tematico, si dovrebbe infatti partire dalle questioni più tradizionali, relative alla natura e alla propagazione della luce, alla visione, alla riflessione e alla rifrazione, per poi passare al colore e all'iride. Soltanto in seguito troverebbe spazio la diffrazione della luce, cioè l'elemento originale della trattazione grimaldiana.

⁴Salvo diversa indicazione, le immagini riprodotte in questo capitolo e nel prossimo sono tratte dalla digitalizzazione della *Physico-Mathesis de Lumine, Coloribus, et Iride* disponibile su Internet Archive.

Grimaldi compie invece una scelta diversa e fortemente significativa: pone proprio la diffrazione all'inizio dell'opera e attorno a questa organizza l'intera trattazione. Nel corso del primo libro essa verrà infatti ripresa più volte, in particolare nella parte finale, dove Grimaldi la utilizzerà per formulare la propria spiegazione della natura del colore. Questa disposizione rivela dunque come l'autore fosse pienamente consapevole della novità nonché dell'importanza della sua scoperta e di come intendesse farne uno dei cardini della propria indagine.

Seguendo l'impostazione dell'autore, la presente analisi prenderà pertanto avvio dalla diffrazione della luce, per poi passare alla propagazione nei corpi diafani, alle teorie della riflessione e della rifrazione, al colore e infine alla spiegazione dell'iride. Gli ultimi due paragrafi saranno invece dedicati, da un lato, a comprendere in che termini nel caso di Grimaldi si possa parlare di un'ottica ondulatoria e, dall'altro, ad analizzare una scoperta sorprendente, ma poco ricordata, contenuta nella sua opera.

Poiché nell'ultimo libro Grimaldi non presenta né esperimenti né osservazioni, si è ritenuto più opportuno concentrare l'attenzione sulle controversie che lo riguardano. A questo tema, assieme a quello delle censure più recentemente rinvenute, è dedicato il paragrafo conclusivo di questo capitolo.

3.4.1 Una nuova modalità di propagazione della luce: la diffrazione

Il primo libro si apre con l'esposizione di quella che Grimaldi presenta come una nuova modalità di propagazione della luce: la *diffrazione*. Il termine, coniato dallo stesso autore, si sarebbe imposto nella tradizione scientifica successiva, nonostante Newton, alcuni decenni più tardi, preferì parlare di *inflessione*.

A partire dalle proprie osservazioni sperimentali, Grimaldi sostiene infatti che la luce non si diffonde soltanto secondo le tre modalità tradizionalmente riconosciute, ovvero per propagazione diretta, per rifrazione e per riflessione, ma anche secondo un quarto e nuovo modo (Grimaldi, 1665, Propositio I, p. 1):

*Lumen propagatur seu diffunditur non solum Directe, Refracte, ac Reflexe, sed etiam alio quodam Quarto modo, DIFFRACTE*⁵.

⁵«La luce si propaga o si diffonde non soltanto direttamente, per rifrazione e per riflessione, **ma anche secondo un certo quarto modo, per diffrazione**» [Traduzione a cura dell'autrice, realizzata con il supporto di strumenti di intelligenza artificiale]

A questa enunciazione segue la descrizione delle esperienze fondamentali attraverso cui egli giunge a riconoscere il nuovo fenomeno. In particolare, l'autore osserva ciò che accade quando un fascio di luce solare, introdotto in una stanza oscurata attraverso un piccolo foro praticato su una finestra, incontra ostacoli opachi o aperture molto sottili.

Le esperienze condotte da Grimaldi possono essere ricondotte a due gruppi principali.

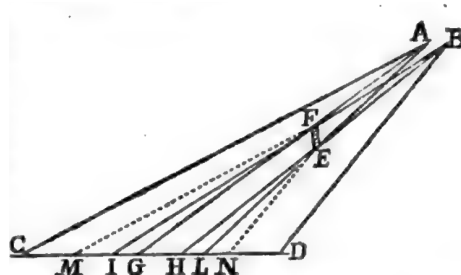


Figura 3.7: Schema del primo esperimento sulla diffrazione (Grimaldi, 1665, Propositio I, p. 2).

Nel primo esperimento, egli interpone alcuni ostacoli entro il cono di luce e ne osserva l'ombra proiettata su uno schermo bianco. Lo schema di tale apparato è riportato in Fig.3.7.

Nel corso dell'esperimento, Grimaldi osserva che la regione d'ombra non corrisponde pienamente alle previsioni dell'ottica geometrica in quanto appare più dilatata di quello che dovrebbe essere. Nota inoltre che lungo i suoi margini compaiono tre *series lucidae*, vale a dire sottili strisce luminose e colorate, azzurrognole verso l'interno dell'ombra e rossastre verso l'esterno, la cui intensità e larghezza diminuiscono progressivamente con l'aumentare della distanza dal bordo. Queste frange seguono con precisione il profilo dell'ostacolo, anche quando presenta bordi irregolari. Tuttavia, il fenomeno appare ancora più problematico quando, in particolari condizioni, analoghe serie luminose compaiono all'interno della regione d'ombra. In quest'ultimo caso, egli afferma che le frange nell'ombra seguono leggi assai complesse, variando facilmente in termini di numero e caratteristiche (Grimaldi, 1665, Propositio I, pp. 1-11).

Nel secondo esperimento, invece, inserisce nel cono luminoso uno schermo opaco munito di un piccolo foro e osserva la figura risultante su un secondo schermo bianco, come mostrato dallo schema dell'apparato sperimentale riportato in Fig. 3.8.

Egli rileva ancora una volta che la figura osservata non corrisponde a quella prevista dalla propagazione rettilinea dei raggi luminosi, ma appare più grande. La parte centrale della traccia sullo schermo è bianca, mentre gli orli sono colorati in rosso e in azzurro.

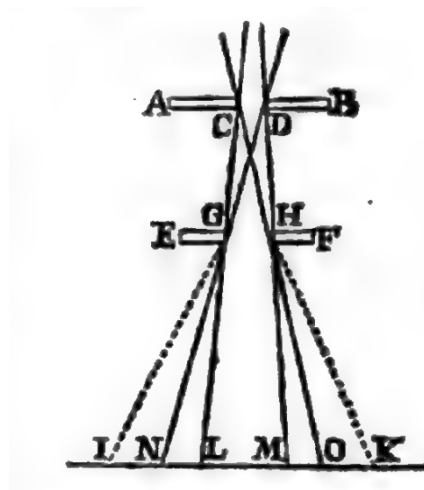


Figura 3.8: Schema del secondo esperimento sulla diffrazione (Grimaldi, 1665, Propositio I, p. 9).

I dettagli sperimentali di questi esperimenti saranno approfonditi nel capitolo successivo, dedicato alla loro replica. In questa sezione si prenderà invece in esame l'interpretazione che Grimaldi propone del fenomeno appena introdotto. Come osserva Ronchi (1952), la scoperta della diffrazione non poteva che rappresentare, nel quadro culturale della prima metà del Seicento, un problema per chiunque intendesse interrogarsi sulla natura della luce. Il fenomeno sembrava infatti mettere in discussione il principio della propagazione rettilinea e, al tempo stesso, introduceva nuovi elementi difficilmente conciliabili con le teorie precedentemente avanzate.

È nella seconda proposizione che Grimaldi tenta di offrire una propria spiegazione. Tuttavia, proprio qui, emerge con maggiore evidenza la complessità del problema: l'autore riconosce subito il carattere oscuro e non immediatamente intelligibile del fenomeno, ma si rende conto che questo può essere spiegato interpretando la luce come un fluido che procede molto rapidamente e che è capace, almeno in determinate circostanze, di propagarsi secondo una modalità di tipo ondulatorio (Grimaldi, 1665, Propositio II, p. 12):

*Lumen videtur esse quid fluidum, perquam celerrimè, et saltem aliquando etiam undulativè fuscum per corpora diaphana*⁶.

⁶«La luce sembra essere qualcosa di fluido, diffuso attraverso i corpi diafani con grandissima rapidità e, almeno talvolta, anche in modo ondulatorio» [Traduzione a cura dell'autrice, realizzata con il supporto di strumenti di intelligenza artificiale]

Quanto alla sua natura, in questa parte del trattato Grimaldi sospende provvisoriamente il giudizio sulla questione se essa debba essere considerata una sostanza o un accidente. Egli intende infatti dimostrare soltanto che alla luce competono le proprietà della *fluiditas*, osservando come, anche alcuni tra gli autori che la considerano un accidente, in realtà sono disposti ad ammettere che essa possa diffondersi mediante moto locale (Grimaldi, 1665, Propositio II, p. 12).

Nel caso della luce, tuttavia, una simile proprietà non può essere osservata direttamente: a causa della sua estrema velocità e sottigliezza, non è infatti possibile percepire con i sensi tale moto. Anche per questo, la fluidità viene argomentata a partire dal confronto con alcune proprietà caratteristiche dei fluidi che, secondo l'autore, sembrano convenire anche alla luce.

Tra i vari fluidi, Grimaldi ricorre in particolare all'analogia con l'acqua. Come un sasso gettato in uno stagno genera onde concentriche attorno al punto d'impatto, così l'ostacolo collocato nel cono luminoso sembra provocare nella luce un'analogia perturbazione, dalla quale derivano le *series lucidae* osservate attorno all'ombra. Il paragone, tuttavia, non resta generico: Grimaldi lo sviluppa in modo articolato, soffermandosi anche su distinzioni più sottili, come quella tra le onde prodotte in acqua stagnante e quelle che si formano in un fiume. Nel primo caso i cerchi concentrici rimangono più integri, mentre nel secondo appaiono più irregolari perché vengono trascinati via dalla corrente (Grimaldi, 1665, Propositio II, p. 18).

Queste analogie servono a Grimaldi non solo per rendere più comprensibile il fenomeno, ma anche per rafforzare la propria spiegazione e rispondere a tutte le possibili obiezioni. Egli cerca infatti di non trascurare alcun dettaglio e spiega anche il motivo per cui le serie luminose non siano più visibili quando si aumenta la dimensione del foro della camera oscura. In quest'ultimo caso, secondo Grimaldi, l'apporto di nuova luce tende a smorzare la fluttuazione prodotta dalla diffrazione. Come una corrente trascina e disperde le onde generate da una perturbazione locale, così il nuovo afflusso luminoso attenua l'ondulazione del fascio e rende meno evidenti le *series lucidae*. Ciò non significa, tuttavia, che le serie luminose scompaiano realmente: esse diventano piuttosto inosservabili, perché la nuova luce prevale sui loro contorni colorati, impedendo all'occhio di distinguerli. L'esempio richiamato dall'autore è quello di una candela accesa durante il giorno in una stanza illuminata dal Sole: in tali condizioni, il corpo da essa colpito non proietta un'ombra visibile, mentre la medesima ombra compare immediatamente quando l'ambiente viene adeguatamente oscurato (Grimaldi, 1665, Propositio II, p. 22).

Tra gli avversari, qualcuno avrebbe potuto avanzare un'altra obiezione: se la luce fosse davvero soggetta a una fluttuazione ondosa, si potrebbe infatti pensare che la

propagazione rettilinea richiesta dall'ottica venga compromessa, soprattutto nel caso della visione di oggetti lontani e quindi l'utilizzo di strumenti come i telescopi. Grimaldi risponde negando e sostenendo che l'ondulazione della luce è talmente minuta da non compromettere, sul piano fisico e osservativo, la rettilineità dei raggi né il funzionamento dei telescopi (Grimaldi, 1665, Propositio II, p. 18).

In questo modo Grimaldi tenta quindi di conciliare due esigenze: da un lato, salvare la validità dell'ottica geometrica e della propagazione rettilinea, dall'altro riconoscere nella diffrazione un comportamento nuovo, spiegabile attraverso la sua *fluiditas*.

Proprio questa interpretazione apre però un ulteriore problema: se la luce è fluida, in che modo può attraversare i mezzi trasparenti? È a questa domanda che Grimaldi cerca di rispondere affrontando, come si vedrà nel paragrafo successivo, la questione della propagazione dei corpi diafani.

3.4.2 Propagazione nei corpi diafani

Dopo aver introdotto, nelle prime proposizioni, la diffrazione come nuova modalità di propagazione della luce, Grimaldi affronta il problema della sua trasmissione attraverso i mezzi diafani, ossia i corpi trasparenti. La questione non è secondaria: se infatti la luce viene concepita come qualcosa di fluidissimo, sottilissimo e capace di muoversi con estrema rapidità, occorre spiegare in che modo essa possa penetrare nei corpi trasparenti senza che ciò comporti una vera e propria compenetrazione tra corpi, difficilmente ammissibile sul piano fisico e metafisico.

Per farlo, Grimaldi ricorre alla nozione di porosità della materia: la trasparenza dei corpi diafani dipenderebbe, secondo l'autore, dalla presenza di pori, minuti e frequentissimi, attraverso cui il *lumen* può insinuarsi. La luce, dunque, non occuperebbe tutto il corpo trasparente in modo uniforme, ma si propagherebbe attraverso quei pori che rendono possibile il suo passaggio. Grimaldi precisa inoltre quali siano i corpi da considerare diafani: il vetro, il cristallo, il diamante, l'aria, tutte le acque, naturali e artificiali, le gemme, gli oli, i liquidi trasparenti, le membrane e gli umori oculari degli animali. In generale, si riferisce a tutti quei corpi che non impediscono il passaggio della luce (Grimaldi, 1665, Propositio III, pp. 24–25).

Su queste basi, la distinzione tra diafanità e opacità viene ricondotta alla diversa struttura della materia. Un corpo risulta trasparente quando possiede pori sufficientemente adatti al passaggio della luce, mentre appare opaco quando prevalgono parti solide che interrompono la propagazione del *lumen* (Grimaldi, 1665, Propositio IV, p. 43).

Egli sostiene che la luce non attraversa la materia diafana in maniera diretta, ma lo fa in modo indiretto e, a sostegno di questa tesi, richiama numerose analogie: il vino

che si diffonde nell'acqua, il vento che, entrando dalla finestra di un edificio, mantiene la propria direzione nonostante la presenza delle pareti o l'acqua che attraversa i pori di una spugna (Grimaldi, 1665, *Propositio IV*, pp. 36–43).

Inoltre, secondo Grimaldi, non esistono corpi perfettamente diafani o perfettamente opachi, ma si passa con continuità da uno all'altro: anche i corpi maggiormente opachi, infatti, possono lasciarsi attraversare dalla luce quando sono ridotti a strati sufficientemente sottili. Pur richiamando la possibilità di servirsi di un *microscopium egregium*, egli fonda la propria argomentazione soprattutto sull'esperienza. Inizia così a portare esempi tratti dal suo laboratorio domestico: le materie grasse, come le particelle oleose, che possono separarsi dalle sostanze in cui sono immerse; il nutrimento delle piante, che presuppone il passaggio di umori dal terreno attraverso le loro parti; la distribuzione dei fluidi nelle membra degli animali; e ancora i processi di emulsione e macerazione, nei quali una sostanza immersa nell'acqua lascia emergere la propria struttura interna e la capacità di assorbire o lasciar penetrare altri corpi (Grimaldi, 1665, *Propositio VI*, pp. 47–48).

Poiché i pori non potevano essere concepiti come vuoti, dato che il vuoto in natura era ancora difficilmente ammissibile per gran parte dei filosofi dell'epoca, Grimaldi si interroga sulla sostanza che li riempisse. Egli ipotizza che potessero contenere la medesima materia di cui è costituita la luce, purché questa fosse ferma, fredda e invisibile e diventasse mobile al sopraggiungere di nuova luce. Secondo Ronchi (1952), tanto in questa ipotesi quanto nella concezione della propagazione della luce attraverso i pori è chiaramente avvertibile l'influsso di Descartes, che ebbe una grande fortuna tra i contemporanei, e che Grimaldi qui non cita, anche se lo farà in altri punti del trattato.

3.4.3 Riflessione e rifrazione della luce

La spiegazione della propagazione nei corpi diafani permette a Grimaldi di affrontare anche il problema della riflessione della luce. Nella *Propositio XVI*, egli rifiuta l'idea che la luce si rifletta semplicemente perché incontra un corpo opaco. Tale spiegazione infatti può sicuramente valere nel caso dell'opacità, ma per il gesuita non è efficace in molti altri casi: l'esperienza mostra infatti che si osserva riflessione anche nel passaggio tra mezzi trasparenti, sia da un mezzo più denso a uno più rarefatto, sia nel caso contrario (Grimaldi, 1665, *Propositio XVI*, pp. 158–159).

La causa della riflessione va per lui quindi ricercata, ancora una volta, nella struttura porosa dei corpi. Quando la luce passa da un mezzo all'altro, i pori del primo possono non coincidere adeguatamente con quelli del secondo: pertanto una parte del *lumen* può continuare il proprio percorso, mentre un'altra parte urta contro le parti solide del nuovo mezzo e viene riflessa, indipendentemente dalla maggiore o minore densità dei

due corpi. Per chiarire questo meccanismo, Grimaldi ricorre all'immagine di due veli sovrapposti: qualunque sia la loro tessitura, e sia che il velo più raro sia posto sopra quello più denso, sia che avvenga il contrario, la vista del corpo collocato oltre entrambi risulta comunque in parte ostacolata. La ragione sta nel fatto che i fori lasciati aperti tra i fili dei due veli non combaciano perfettamente tra loro, impedendo così alla luce di passare indisturbata (Grimaldi, 1665, Propositio XVI, p. 159).

Andando avanti nella trattazione, egli rafforza la sua interpretazione mettendo in evidenza tutte le difficoltà che sorgono se invece si considera la luce come una qualità accidentale. La riflessione, infatti, obbedisce a precise leggi geometriche, che al tempo erano a tutti ben note: il raggio perpendicolare al piano di incidenza viene riflesso su se stesso, il raggio incidente e quello riflesso si trovano sullo stesso piano e l'angolo di incidenza è sempre uguale all'angolo di riflessione, come mostrato in Fig.3.9.

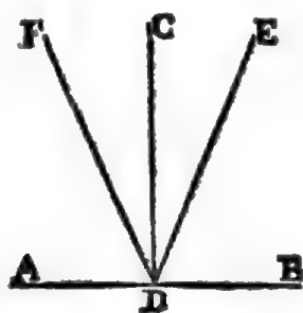


Figura 3.9: Leggi secondo cui avviene la riflessione della luce (Grimaldi, 1665, Propositio XVII, p. 162).

Secondo Grimaldi, simili regolarità sono difficili da spiegare se la luce viene intesa come accidente, poiché un accidente, nella concezione tradizionale, non dovrebbe propagarsi localmente da una parte all'altra del mezzo, né essere determinato secondo leggi geometriche ben precise (Grimaldi, 1665, Propositio XVII, pp. 161–163).

Il discorso viene poi ulteriormente approfondito e Grimaldi mostra come, assumendo la luce come una sostanza estremamente fluida e sottilissima, la riflessione risulti più facilmente spiegabile. Anche in questo caso egli procede, come spesso accade nell'opera, attraverso analogie tratte dall'esperienza comune: il comportamento della luce viene infatti accostato a quello di una palla da gioco o di un altro corpo mosso con impeto, che, urtando contro una certa superficie, cambia direzione e viene riflesso (Grimaldi, 1665, Propositio XVIII, p. 164).

In risposta ad una possibile obiezione da parte degli avversari, Grimaldi precisa che le proprietà della *fluiditas* possedute dalla luce non costituiscono affatto un impedimento alla riflessione di questa. Si potrebbe infatti pensare che solo i corpi solidi siano capaci di riflettersi quando urtano contro una superficie, ma egli osserva invece

che anche i fluidi sono soggetti a questo fenomeno, come accade ad esempio all'acqua gettata contro una parete o all'aria e al vento contro un muro. Anzi, egli afferma che più un corpo è fluido, più sarà propenso a tale fenomeno e, per mostrarlo, usa come riferimento l'olio e l'acqua: il primo lo considera più sottile, perché penetra più facilmente nei pori dei corpi, ma meno fluido, poiché le sue parti aderiscono maggiormente tra loro. La seconda, invece, è più fluida ed è proprio per questo che riesce a riflettersi più facilmente sulle superfici (Grimaldi, 1665, Propositio XVIII, pp. 164–165).

Grimaldi tenta poi di offrire una dimostrazione della legge della riflessione. Per farlo, non considera un raggio unico bensì un cilindro di raggi, dotato di un certo spessore fisico, per quanto impercettibile ai sensi. L'uguaglianza tra angolo di incidenza e angolo di riflessione viene così ricondotta alla necessità che la sezione del fascio, prima e dopo l'urto, rimanga costante. Poiché la luce riflessa continua a propagarsi nello stesso mezzo attraversato prima della riflessione, non vi è infatti ragione, secondo Grimaldi, che la sua densità, la compattezza delle sue parti o la disposizione dei pori del mezzo subiscano variazioni. La riflessione deve quindi avvenire in modo tale da mantenere invariato lo spessore del fascio.

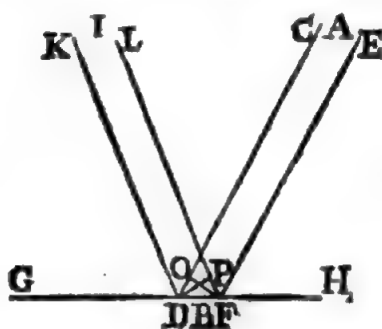


Figura 3.10: Schema della riflessione della luce (Grimaldi, 1665, Propositio XVIII, p. 167).

Nella Fig. 3.10, il fascio incidente AB , delimitato dai lati paralleli CD ed EF , cade obliquamente sulla superficie piana del corpo opaco GH , formando con essa l'angolo di incidenza ABH . Dopo l'urto con la superficie, il fascio viene riflesso da B verso I : di conseguenza, il lato EF viene riflesso lungo FL , mentre il lato opposto CD viene riflesso lungo DK . Il punto centrale della dimostrazione è che il fascio, propagandosi prima e dopo la riflessione nello stesso mezzo, deve mantenere invariati la propria densità e il proprio spessore. Per mostrarlo, Grimaldi traccia da F la perpendicolare FO al lato CD , che misura lo spessore del fascio incidente, e da D la perpendicolare DP al lato LF , che misura lo spessore del fascio riflesso. Affinché ci sia il medesimo spessore, le due misure devono risultare uguali. Da tale uguaglianza, attraverso il confronto dei triangoli rettangoli costruiti nella figura, egli ricava anche l'uguaglianza degli angoli

corrispondenti. Ne segue che l'angolo con cui il primo fascio arriva sulla superficie deve essere uguale a quello con cui se ne allontana (Grimaldi, 1665, Propositio XVIII, pp. 166–167).

Egli contesta inoltre alcune possibili obiezioni alla propria spiegazione della riflessione prendendo in esame la diversa capacità riflettente dei corpi bianchi e neri. L'obiezione è la seguente: se la riflessione dipende dal fatto che la luce, come sostanza corporea e fluida, urta contro un ostacolo e torna indietro, allora un corpo opaco dovrebbe riflettere più luce di un corpo diafano, poiché l'opaco blocca maggiormente il passaggio del *lumen*. L'esperienza mostra però che non è sempre così: una lamina di cristallo può riflettere più luce di un corpo nero non lucido. Grimaldi risponde riconducendo anche questa differenza alla disposizione interna dei pori. Nei corpi bianchi i pori sarebbero configurati in modo da respingere quasi subito la luce incidente verso l'esterno; nei corpi neri, invece, la luce penetrerebbe più profondamente, subendo molteplici agitazioni e riflessioni interne. Per questo motivo solo una piccola parte della luce riuscirebbe a tornare indietro, e per di più in forma indebolita. A tale agitazione interna Grimaldi collega anche il maggiore riscaldamento dei corpi neri, nei quali la luce sembra trattenersi e trasformarsi più facilmente in calore (Grimaldi, 1665, Propositio XVIII, pp. 168–169).

Le stesse considerazioni vengono applicate alla rifrazione della luce. Grimaldi osserva innanzitutto che il fenomeno della rifrazione è ben noto all'esperienza: quando la luce passa da un mezzo ad un altro di diversa densità, essa devia dalla propria direzione. Tuttavia, a suo giudizio, le spiegazioni tradizionali non riescono a renderne pienamente ragione, soprattutto se la luce viene concepita come una qualità accidentale. In tal caso, infatti, si potrebbe al massimo spiegare una variazione di intensità della luce, ma non il fatto che essa cambi direzione secondo determinate leggi geometriche (Grimaldi, 1665, Propositio XIX, pp. 169–170).

Grimaldi prosegue quindi esponendo la propria spiegazione della rifrazione, basata ancora una volta sulla concezione della luce come una sostanza fluidissima e sottilissima. Secondo il gesuita bolognese, quando la luce passa da un mezzo più rarefatto ad uno più denso, è costretta a diffondersi più largamente per vincere la maggiore resistenza del nuovo mezzo: è per questo motivo che il raggio rifratto si avvicina alla normale. Al contrario, quando passa da un mezzo più denso a uno più rarefatto, la luce tende a una diffusione più compressa e il raggio rifratto si allontana dalla normale. Anche in questo caso la spiegazione è quindi coerentemente ricondotta alla struttura porosa dei corpi diafani: la luce si propaga attraverso i pori, e il passaggio da un mezzo all'altro comporta una diversa disposizione e una diversa resistenza della materia attraversata. Grimaldi sottolinea inoltre che la rifrazione non dipende soltanto dalla diversa densità

dei mezzi, ma anche dall'obliquità del raggio incidente. Quanto più il raggio arriva inclinato sulla superficie, tanto più incontra un numero maggiore di pori, si divide più minutamente e subisce una deviazione più marcata (Grimaldi, 1665, Propositio XX, pp. 170–185).

Nella Fig. 3.11, Grimaldi considera il caso in cui un fascio CDE incide obliquamente sulla superficie piana AB di un mezzo più denso, come il cristallo. Poiché, come visto in precedenza, il fascio di raggi possiede uno spessore fisico, sebbene impercettibile ai sensi, egli ne considera i due estremi CD e CE . Entrando nel nuovo mezzo, questi non procedono in linea retta, ma si rifrangono verso la perpendicolare: il fascio diretto CD viene deviato secondo DH , mentre CE secondo EI . In questo modo tutta la luce che prima era contenuta tra CD e CE viene poi contenuta, dopo la rifrazione, tra DH ed EI . Grimaldi mostra così che, piegandosi verso la perpendicolare, il fascio aumenta la propria sezione: la misura che prima era ME diventa infatti DO , maggiore della precedente. La figura serve dunque a dimostrare che, nel passaggio da un mezzo più raro a uno più denso, la rifrazione verso la perpendicolare corrisponde a una diffusione più larga della luce (Grimaldi, 1665, Propositio XX, pp. 179–180).

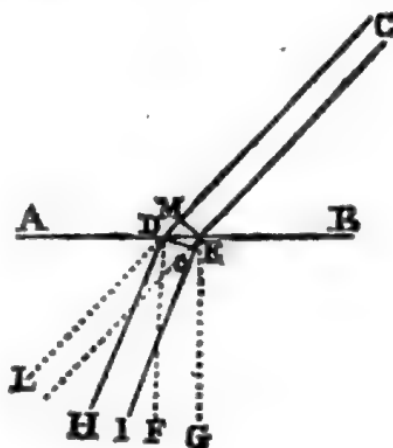


Figura 3.11: Rifrazione nel passaggio da un mezzo più rarefatto a uno più denso: il raggio si dilata (Grimaldi, 1665, Propositio XX, p. 180).

Nella Fig. 3.12, Grimaldi esamina il caso inverso, cioè il passaggio della luce da un mezzo più denso a uno più rarefatto. Il fascio ABC , proveniente ad esempio dal cristallo, incide obliquamente sulla superficie piana DE dell'altro mezzo, come l'aria. Anche qui il fascio è considerato come dotato di uno spessore fisico, delimitato dagli estremi AB e AC . Esso non prosegue in linea retta verso F , ma si rifrange allontanandosi dalla perpendicolare e dirigendosi verso G . Per misurare lo spessore del fascio incidente e di quello rifratto, Grimaldi traccia CO e BL : la prima misura lo spessore

del fascio prima della rifrazione, la seconda quella del fascio di raggi dopo la rifrazione. Poiché BL risulta minore di CO , egli conclude che il fascio, allontanandosi dalla perpendicolare, si restringe. La figura mostra quindi che, nel passaggio da un mezzo più denso a uno più raro, la rifrazione comporta una diffusione più compressa della luce (Grimaldi, 1665, *Propositio XX*, pp. 180–181).

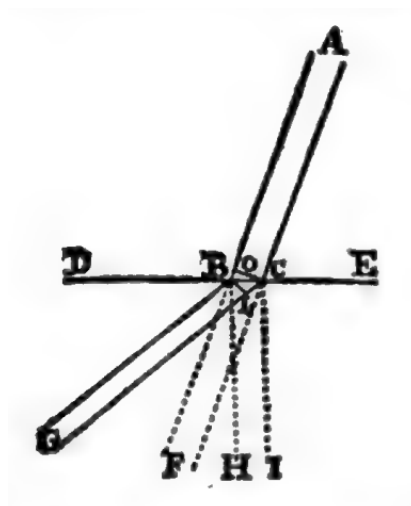


Figura 3.12: Rifrazione nel passaggio da un mezzo più denso a uno più rarefatto: il raggio si restringe (Grimaldi, 1665, *Propositio XX*, p. 182).

3.4.4 Il colore

Nelle teorie ottiche precedenti, il colore aveva sempre rappresentato un problema particolarmente complesso, affrontato attraverso interpretazioni molto diverse ma accomunate, in larga parte, dalla tendenza a separare nettamente la luce dal colore. Anche nelle dottrine che ammettevano una luce che usciva in qualche modo dall'occhio, la luce procedeva verso l'esterno per raggiungere le forme e i colori presenti all'interno dei corpi. Il colore veniva quindi così concepito come una proprietà distinta dalla luce, paragonabile alla forma o alla qualità sensibile dei corpi, e la visione cromatica era spiegata attraverso il ricorso alle cosiddette «*species visuales intentionales*». Se già Cartesio aveva cercato di mettere in crisi questa teoria, suppur con argomenti poco convincenti, Grimaldi per la prima volta, nella storia dell'ottica, la critica in maniera sistematica e incisiva (Ronchi, 1952).

A partire dalla *Propositio XXVIII*, egli si propone infatti di indagare in che modo la luce possa colorarsi e, allo stesso tempo, di discutere la tradizionale distinzione tra colore vero e colore apparente. A suo giudizio, infatti, tale divisione è problematica perché nessun corpo non luminoso possiede un colore in modo propriamente permanente: a eccezione delle sorgenti luminose, come il Sole, i corpi appaiono colorati solo in relazione alla luce che ricevono e riflettono. Per questo motivo Grimaldi ritiene

più corretta la distinzione tra colore permanente e colore non permanente: il primo appartiene alle fonti luminose, nelle quali il colore è sempre presente, il secondo riguarda invece i corpi non luminosi che possono tuttavia riflettere la luce (Grimaldi, 1665, *Propositio XXVIII*, pp. 229–231).

Seguono svariate esperienze e ragionamenti, all'interno dei quali l'autore si mette nelle condizioni di studiare un «*lumen non coloratum*» e cerca di studiare quali siano i processi necessari affinché esso assuma una determinata colorazione. La conclusione a cui Grimaldi giunge è particolarmente significativa: la luce può assumere colore non soltanto per rifrazione, ma anche per riflessione e per diffrazione. Proprio per questo, dal momento che fenomeni fisicamente diversi producono effetti analoghi, la causa del colore deve riguardare la luce stessa, che è l'unica componente comune a tutte queste esperienze.

Dopo aver stabilito che il colore non richiede necessariamente l'intervento di una nuova entità distinta dalla luce, Grimaldi procede con una lunga serie di esperienze condotte in condizioni diverse, servendosi di superfici riflettenti e rifrangenti, lamine a facce piane e parallele, prismi e lenti. Egli studia quella che oggi è nota come aberrazione cromatica e nota come in tutte le sue osservazioni la colorazione della luce è accompagnata da una variazione nella distribuzione del fascio luminoso. Dove il *lumen* risulta più addensato compare il rosso, dove invece appare più rarefatto compare l'azzurro o il ceruleo. In realtà, come sottolineano Ronchi (1952) e Savelli (1951), questa era un'osservazione realizzata precedentemente da altri ma che Grimaldi ancora una volta non cita⁷.

Tra le esperienze più significative che il gesuita conduce in questa parte del trattato vi è quella descritta nella *Propositio XXXV*, nella quale un raggio di luce solare viene fatto entrare, attraverso un piccolo foro, in una stanza oscura e viene mandato su un vaso contenente acqua, come si può osservare in Fig.3.13. Sul fondo del recipiente è posta una carta bianca, sulla quale si osservano gli effetti della luce dopo l'interazione con l'acqua. Il raggio viene in parte riflesso e in parte rifratto, tuttavia l'aspetto più rilevante, per Grimaldi, è la comparsa di due zone colorate: il rosso nella parte in cui il *lumen* risulta più denso, il ceruleo dove esso si presenta più rado.

⁷Savelli (1951) osserva che il concetto di "densità" della luce ricorre già in Keplero e in Kircher, che impiega l'espressione «*lux compressa*». Risalendo ulteriormente nel tempo, Savelli individua inoltre un possibile antecedente delle idee di condensazione e rarefazione nelle dottrine di Anassimene di Mileto, Diogene di Apollonia e Archelao di Atene.

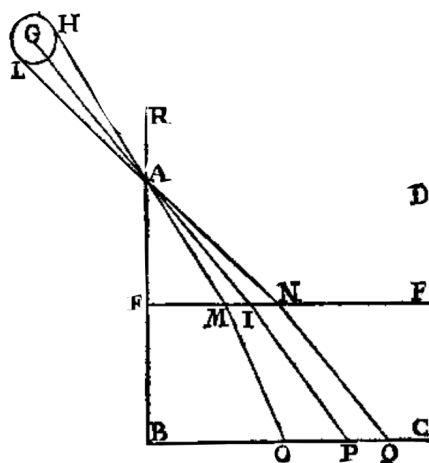


Figura 3.13: Dispositivo per mostrare la colorazione della luce rifratta attraverso la superficie dell'acqua (Grimaldi, 1665, Propositio XXXV, p. 255).

Particolarmente interessante è anche l'esperimento con il prisma triangolare equilatero, all'interno del quale Grimaldi fa passare la luce solare attraverso un prisma con angolo rifrangente di 60° , come visibile in Fig.3.14.

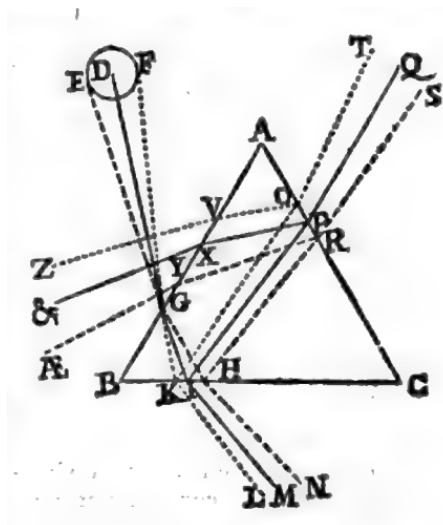


Figura 3.14: Rifrazione attraverso un prisma equilatero (Grimaldi, 1665, Propositio XXXV, p. 257).

L'autore esamina con attenzione le diverse possibilità offerte dal prisma, strumento già ampiamente noto all'epoca, ma destinato ad assumere un ruolo centrale nei successivi sviluppi dell'ottica, soprattutto con le ricerche di Isaac Newton sulla luce. Grimaldi rappresenta due riflessioni interne e quattro rifrazioni, rilevando che il fascio emergente dalla terza faccia, AC , rimane interamente bianco, mentre quelli che fuoriescono dalla prima faccia, AB , e dalla seconda, BC , appaiono colorati.

Come osserva Ronchi (1952), tuttavia, Grimaldi non riduce il fascio luminoso quanto sarebbe stato necessario per distinguere chiaramente l'intera successione cromatica. Nelle condizioni sperimentali adottate, egli riconosce soprattutto una colorazione rossa a un'estremità del fascio e una azzurra a quella opposta, separate da una regione intermedia di tonalità giallastra.

Grimaldi si sofferma inoltre sulla classificazione dei colori, distinguendo come semplici il rosso, il giallo e l'azzurro e interpretando gli altri come il risultato della loro combinazione. Tale trattazione lascia supporre che questi temi facessero parte delle discussioni ottiche e artistiche diffuse al tempo. Del resto, l'interesse di Grimaldi per le arti emerge dai numerosi riferimenti presenti nella sua opera (Battistini, 2000).

Prima di esaminare la spiegazione grimaldiana della natura del colore, fondamentale per comprendere entro quali limiti sia possibile riconoscere nel trattato una concezione ondulatoria della luce, nel prossimo paragrafo ci si soffermerà sulla sua interpretazione dell'iride.

3.4.5 L'iride

Nelle ultime proposizioni del primo libro Grimaldi si dedica allo studio dell'iride, ossia dell'arcobaleno, presentandolo come un fenomeno particolarmente adatto a confermare quanto esposto in precedenza sulla luce e sui colori. La spiegazione dell'arcobaleno, infatti, racchiude molti degli elementi analizzati in precedenza: la rifrazione, la riflessione, la dissipazione non uniforme del *lumen* e la conseguente comparsa dei colori. Grimaldi apre la trattazione sottolineando la difficoltà del problema e, allo stesso tempo, il piacere intellettuale che deriva dal riconoscerne la vera natura, soprattutto se confrontata con le spiegazioni incomplete o errate offerte dagli antichi filosofi (Grimaldi, 1665, Propositio XLVI, pp. 420–423).

Il primo passo consiste nell'elencare le principali caratteristiche osservabili dell'iride: la presenza di colori, il loro ordine costante, la forma dell'arco, la possibilità che esso appaia intero, parziale o frammentato, e il fatto che il suo centro si trovi sulla linea che congiunge il centro del Sole e l'occhio dello sperimentatore. Grimaldi dichiara di voler ricercare le cause di tali proprietà, in modo da eliminare quell'ammirazione che nasce dall'ignoranza e sostituirla con una forma più alta di meraviglia, la conoscenza, che è capace di accrescere la lode verso il Dio creatore (Grimaldi, 1665, Propositio XLVI, pp. 420–423).

Prima di arrivare alla spiegazione dell'iride, Grimaldi insiste su alcune osservazioni tratte dalla quotidianità. Ecco che egli richiama casi di iride artificiale, osservabile nelle fontane, negli spruzzi d'acqua marina, nella schiuma e in generale in tutte quelle situazioni in cui la luce solare attraversa una moltitudine di minute gocce sospese

nell'aria. Particolarmente significativo è anche l'esperimento ottenuto scuotendo una scopa imbevuta d'acqua in una stanza oscurata, ma attraversata da un fascio di luce solare: se si osserva da una posizione opportuna, nelle goccioline disperse nell'aria compaiono i colori dell'iride. È così reso evidente al lettore che l'arcobaleno non può formarsi senza la presenza di una nube o di un vapore illuminato e risolto in goccioline molto piccole (Grimaldi, 1665, Propositio XLVII, pp. 423–424).

Successivamente, Grimaldi riprende quanto aveva già mostrato a proposito del prisma e delle lenti: non tutte le radiazioni rifratte si colorano, ma solo quelle in cui il fascio luminoso subisce una dissipazione non uniforme. Lo stesso principio viene ora applicato alla singola goccia d'acqua, considerata come un analogo sistema ottico capace di rifrangere, riflettere e nuovamente rifrangere la luce solare.

Nella Fig. 3.15, *A* indica il centro della gocciolina sferica e *B* il punto della sua superficie in cui incidono tre raggi solari, provenienti rispettivamente da un margine del Sole, dal suo centro e dall'altro margine. Passando dall'aria nell'acqua, i raggi vengono rifratti verso la perpendicolare *AF*, ma non tutti nella stessa misura: quelli più inclinati subiscono una deviazione maggiore e procedono quindi all'interno della goccia secondo direzioni diverse, verso *G*, *H* e *I*. Giunti alla superficie interna opposta, vengono in parte riflessi dentro la goccia, dirigendosi verso *N*, *L* e *M*. Dopo la riflessione, i raggi si incrociano in prossimità di *R*, modificando ulteriormente la distribuzione del fascio luminoso. Infine, uscendo dalla goccia attraverso i punti *N*, *L* e *M*, subiscono una seconda rifrazione e si propagano nell'aria verso *O*, *P* e *Q*. Il fascio finale *ONMQ* risulta così disegualmente distribuito: in alcune parti i raggi sono più addensati, in altre più rarefatti.

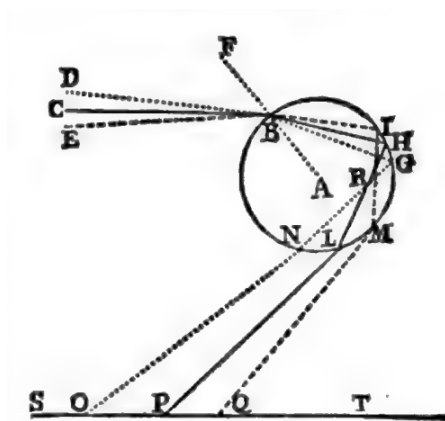


Figura 3.15: Schema che mostra la rifrazione e la riflessione della luce in una goccia d'acqua secondo Grimaldi (Grimaldi, 1665, Propositio XLIX, pp. 426–430).

È proprio questa diversa distribuzione del *lumen* a costituire, per Grimaldi, la causa della colorazione. Come già detto in precedenza, dove i raggi risultano più costipati

compare il colore rosso, mentre dove sono più rari appare il ceruleo. La goccia d'acqua, dunque, non produce i colori per semplice riflessione, ma attraverso una combinazione di rifrazione all'ingresso, riflessione interna e nuova rifrazione all'uscita (Grimaldi, 1665, Propositio XLIX, pp. 426–430).

Dopo aver esaminato le principali proprietà dell'arcobaleno, Grimaldi riprende la spiegazione dell'iride nell'ultima proposizione del primo libro. Qui afferma che tanto l'iride primaria quanto quella secondaria si producono per mezzo dei raggi solari rifratti e riflessi nelle gocce della nube umida. La differenza tra le due dipende dal numero di riflessioni interne: l'iride primaria è prodotta dai raggi che subiscono una sola riflessione all'interno delle gocce, mentre quella secondaria nasce dai raggi riflessi due volte. In entrambi i casi, tuttavia, i raggi giungono all'occhio dopo una doppia rifrazione, cioè dopo essere entrati nella goccia ed esserne poi usciti (Grimaldi, 1665, Propositio LX, pp. 467–472).

Con la trattazione dell'iride si chiude dunque il primo libro della *Physico-Mathesis*. Grimaldi ribadisce che l'arcobaleno resta un fenomeno degno di ammirazione, ma non per questo deve essere considerato necessariamente incomprensibile. Prima di passare al secondo libro, egli ricorda che nel corso della trattazione sono stati sviluppati diversi argomenti relativi alla natura e alle proprietà della luce, compresi quelli riguardanti la sua sostanzialità (Grimaldi, 1665, Propositio LX, pp. 471–472):

Maneat ergo, Iridem semper quidem admiratione dignam esse, non esse tamen adeo remotam, et supra nos elevatam, ut necessario ignoranda sit, praesertim apud eos, qui genuinam Luminis, et Colorum naturam praeintellexerunt, qualem nos hoc loco Deo adiuvante explicare conati sumus. Et sive ex aliena sententia hactenus, quae ad Luminis substantialitatem pertinent, sive etiam ex nostra mente promoverimus; plurima tamen in hoc ipso libro etiam de Luminis natura, et proprietatibus, nedum de Iride, Coloribus, aliisque adnexis ex animo nostro dicta volumus, ac profiteamur, ut ex dicendis in sequenti Secundo Libro constabit: quae si admirabilitatem aliquam, ut revera dicendum est, continere visa fuerint, tanto magis in Dei Creatoris admirationem, et amorem trahere illa nos poterunt, eiusque Infinitam Potentiam aliquanto propius nobis manifestare. Quod si fiat, vota nostra expleta erunt, quia id solum in hac qualicumque elucubratione nobis praeluxit, id solum intentum fuit.⁸

⁸«Rimanga dunque stabilito che l'iride è sempre degna di ammirazione, ma non è tuttavia tanto remota e innalzata sopra di noi da dover essere necessariamente ignorata, soprattutto da coloro che abbiano compreso prima la genuina natura della luce e dei colori, quale noi, con l'aiuto di Dio, abbiamo cercato qui di spiegare. E sia che finora abbiamo sviluppato, secondo

Il Libro primo si conclude pertanto con una lode a Dio, del quale il *lumen* costituisce una straordinaria manifestazione. Grimaldi adotterà una conclusione analoga anche al termine del Libro secondo, confermando così che tali chiuse non rappresentano soltanto un espediente retorico ma, come suggerisce Petruzzelli (2012), riflettono anche la profondità della sua fede.

3.4.6 «*Undosa fluitatio luminis*»: è davvero una teoria ondulatoria?

Solo verso la conclusione del primo libro, dopo aver accumulato una lunga serie di esperienze e osservazioni, Grimaldi torna esplicitamente sull'ipotesi ondulatoria che attraversa l'intera trattazione e la impiega per spiegare la natura del colore (Grimaldi, 1665, Propositio XLIII, p. 341):

*Luminis modificatio, vi cuius illud tam permanenter, quam (ut aiunt) apparenter coloratur, seu potius sit sensibile sub ratione coloris, non improbabili-ter dici potest esse determinata ipsius **undulatio minutissime crispata**, et quidem velut **tremor diffusionis**, cum certa **fluitatione subtilissima**, qua fiat ut illud propria ac determinata applicatione afficiat sensorium visionis.*⁹

Grimaldi giustifica infatti la grande varietà dei colori possibili riconducendola alla varietà delle possibili ondulazioni, ricorrendo più avanti anche all'utilizzo di alcune analogie: come dalla mano dello scrivente può derivare una varietà infinita di lettere, intenzionalmente uguali, così da differenti tipi di ondulazione possono nascere diversi

l'opinione altrui, le cose che riguardano la sostanzialità della luce, sia che le abbiamo portate avanti anche secondo il nostro pensiero, vogliamo e dichiariamo tuttavia che in questo stesso libro molte cose sulla natura e sulle proprietà della luce, non meno che sull'iride, sui colori e sugli altri fenomeni connessi, sono state dette secondo il nostro animo, come risulterà da quanto sarà detto nel seguente secondo libro. Se esse sembreranno contenere qualche motivo di ammirazione, come in realtà bisogna dire, tanto più potranno condurci all'ammirazione e all'amore di Dio creatore, e manifestarci un poco più da vicino la sua infinita potenza. Se ciò accadrà, i nostri desideri saranno soddisfatti, poiché solo questo ci ha guidati in questa modesta elaborazione, solo questo è stato il nostro intento.» [Traduzione a cura dell'autrice, realizzata con il supporto di strumenti di intelligenza artificiale]

⁹«La modificazione della luce, per forza della quale essa si colora permanentemente e apparentemente (come si dice), o meglio si rende sensibile con la qualifica di colore, non improbabilmente si può dire che sia una certa sua **ondulazione minutissimamente fluttuante**, come un **tremito di diffusione**, con una certa **oscillazione finissima**, mediante la quale avviene che essa luce stimoli l'organo della visione con una particolare e determinata attività» [Traduzione a cura di Ronchi (1952)]

colori. Analogamente, nel caso del suono, che Grimaldi interpreta come una vibrazione meccanica che viene trasmessa all'orecchio, la varietà dei toni può essere spiegata attraverso la varietà delle ondulazioni che li producono (Ronchi, 1952).

Il lessico adottato dal gesuita bolognese e l'utilizzo di analogie con i fluidi sembrano avvicinare la sua interpretazione a una concezione ondulatoria della luce. Resta tuttavia da chiarire in che senso, e fino a che punto, sia davvero possibile parlare di una teoria ondulatoria nel caso di Grimaldi.

Per chiarire questo punto, conviene partire proprio dall'uso dell'analogia che, come si è visto, non costituisce un elemento isolato all'interno dell'opera. Nel trattato, infatti, Grimaldi descrive la radiazione luminosa attraverso una terminologia ricca e, a una lettura retrospettiva, sorprendentemente vicina al lessico adottato dall'ottica fisica: ricorre a espressioni come «*fluitatione subtilissima*», «*luminis undosa glomeratio*» e «*undosa fluitatio luminis*», accostando più volte il comportamento della luce a quello dell'acqua, del suono e del magnetismo.

Questi richiami non devono però essere interpretati come anticipazioni dirette degli sviluppi successivi della fisica. Essi mostrano piuttosto il tentativo di Grimaldi di spiegare alcune proprietà della luce attraverso il confronto con fenomeni nei quali era possibile riconoscere forme analoghe di propagazione.

Per quanto concerne, ad esempio, l'analogia tra luce e suono, gli studi di Darrigol (2010a, 2010b) ne hanno mostrato l'ampia profondità storica, ricostruendone le radici fino all'Antica Grecia. Nel Seicento tale analogia venne enfatizzata da diversi autori, seppur con finalità differenti. Bacone insistette sulla necessità di un mezzo di propagazione tanto per la luce quanto per il suono; Keplero, Mersenne e Kircher trasferirono la propagazione dei raggi dell'ottica alla spiegazione dei fenomeni acustici; Mersenne e pochi altri, al contrario, applicarono all'ottica concetti elaborati nell'ambito dell'acustica meccanica.

Anche Grimaldi usò frequentemente tale analogia, purtroppo senza spingersi al punto da formulare una corrispondenza tra frequenza e altezza sonora, né tantomeno tra altezza del suono e colore. Il suo interesse sembrava piuttosto volto a mostrare che, tanto nei fenomeni acustici quanto in quelli luminosi, alcune qualità sensibili dipendono strettamente dalle proprietà delle ondulazioni che li caratterizzano.

Tuttavia, il fenomeno fisico che l'autore considera più vicino alla luce è senza dubbio il magnetismo. A quest'ultimo vi sono vari riferimenti in tutto il trattato, in particolare un'ampia digressione all'interno di una delle prime proposizioni (Grimaldi, 1665, Propositio VI, pp. 57-87). Per Grimaldi, l'azione dei magneti risulta infatti particolarmente efficace per immaginare la propagazione di una sostanza sottile attraverso i corpi diafani.

Anche in questo caso, come osserva Marek (1973), l'accostamento tra luce e magnetismo non deve essere interpretato come un'anticipazione diretta della relazione elettromagnetica ottocentesca: Grimaldi non intendeva indagare un rapporto reciproco tra i due fenomeni, almeno non nel senso in cui lo avrebbero fatto gli scienziati successivi. Al contrario, il suo obiettivo era quello di individuare alcune proprietà comuni che potessero sostenere la concezione della luce sviluppata nel primo libro. Se infatti la luce può penetrare i mezzi diafani grazie alla struttura porosa della materia, il *magnetis effluvium*, che per Grimaldi è una sostanza che aderisce all'oggetto magnetizzato e si diffonde da esso, sembra capace di attraversare anche corpi che, per la luce, risultano opachi. Proprio per questo, egli lo concepiva come una sostanza ancora più sottile della luce.

Nella sua trattazione, Grimaldi riprende elementi già presenti nella tradizione degli studi sul magnetismo, ma li rielabora alla luce delle proprie osservazioni ed esperienze. Ciò appare tanto più interessante se si considera che, nel panorama scientifico del XVII secolo, il magnetismo era ancora un ambito relativamente marginale della scienza. Gli esperimenti che egli conduce sull'influenza esercitata dal mezzo interposto sull'intensità dell'azione magnetica possono essere letti, secondo Marek (1973), come una prima approssimazione al concetto di permeabilità magnetica. Allo stesso modo, lo studio della direzione dei "raggi magnetici" e della loro propagazione permette di intravedere un'anticipazione dell'idea di linee di campo.

Le analogie con altri fenomeni fisici consentono a Grimaldi non solo di individuare somiglianze, ma anche di mettere in luce differenze. Un esempio significativo è dato dal confronto tra la visione della fiamma prodotta dallo scoppio di una bombarda e il successivo ascolto del suo boato, che consente all'autore di affrontare il problema della propagazione temporale della luce (Grimaldi, 1665, Propositio XIV, pp. 155–156):

Dices primo. Quia in explosione bombardae, tametsi certi simus flammam et bombum simul excitari, videmus tamen, in aliqua distantia positi, prius flammam micare, et deinde audimus sonum; recte argumentamur hunc propagari cum tempore, illam vero in instanti lumen suum diffundere. Et ratio est, quia non possemus hoc modo evidenter cognoscere temporaneam propagationem soni, nisi comparatio, quae fit cum lumine, esset comparatio contrarietatis. Ergo dicendum est: sicut sonus propagatur cum tempore, ita e contrario lumen spargi in instanti. Respondetur ex argumento illo non inferri, nisi quod sonus propagatur tardius quam lumen; et contrarietatem comparationis esse tantummodo secundum plus et minus, non vero secundum genus ipsum, seu quidditatem successionis. Ad hanc nimirum comparationem sufficit, si lumen ex iisdem velut carceribus et ad eandem usque metam currens cum sono, illum praevertat, seu propagetur citius per totum idem spatium. At quia lumen non habet aliquid ipso velocius cui comparetur, etsi haberet non est tamen in

*nobis sensus altior et adeo subtili comparationi idoneus; propterea negative tantum concludi potest eius propagationem esse instantaneam, id est factam sine successione temporis per sensum cognoscibili.*¹⁰

Grimaldi contesta che dal confronto con il suono si possa dedurre positivamente l'istantaneità della luce: l'esperienza della bombarda mostra soltanto che la luce giunge all'osservatore più rapidamente del suono, non che essa si diffonda necessariamente senza alcuna successione temporale. Per lui manca un fenomeno ancora più veloce con cui confrontarla e i sensi umani non sono in grado di cogliere una differenza così sottile.

Prende poi in considerazione un'ulteriore obiezione degli avversari, fondata sull'apparente immediatezza con cui vediamo il Sole al suo sorgere e cessiamo di vederlo al tramonto (Grimaldi, 1665, Propositio XIV, pp. 155–156):

*Dices secundo. Statim ac Sol in Oriente Horizonte oritur, videmus illum per lucem ab illo ad nos usque propagatam; et statim ac in Occidente occumbit, cessamus illum videre, defectu eiusdem lucis. Sed haec sunt positiva argumenta. Ergo positive, et non tantum negative, probatur ex visu instantanea lucis diffusio. Mirum quod sic argumentantes audiverim viros alioqui sapientissimos: quasi vero illi valeant discernere subitaneam illam apparentiam non differri ne per unam quidem morulam insensibilem, et possint illi percipere quod ex suppositione ipsa iam facta est imperceptibile.*¹¹

¹⁰ «Dirai in primo luogo: nell'esplosione di una bombarda, anche se siamo certi che la fiamma e il boato siano prodotti nello stesso momento, tuttavia, quando ci troviamo a una certa distanza, vediamo prima brillare la fiamma e solo dopo udiamo il suono. Da ciò argomentiamo correttamente che il suono si propaga nel tempo, mentre la luce diffonde il proprio lume in un istante. La ragione sarebbe questa: non potremmo conoscere in modo evidente la propagazione temporale del suono, se il confronto con la luce non fosse un confronto di contrarietà. Dunque, come il suono si propaga nel tempo, così, al contrario, bisogna dire che la luce si diffonde istantaneamente. Si risponde che da quell'argomento non si ricava altro se non che il suono si propaga più lentamente della luce. La contrarietà del confronto riguarda soltanto il più e il meno, non il genere stesso, cioè la natura della successione. Per stabilire tale confronto è sufficiente che la luce, partendo per così dire dagli stessi punti di partenza del suono e giungendo alla medesima meta, lo preceda, ossia attraversi più rapidamente tutto quello stesso spazio. Ma poiché la luce non ha nulla di più veloce di sé con cui possa essere confrontata, e poiché noi non possediamo un senso più elevato e adatto a una comparazione così sottile, si può concludere soltanto in modo negativo che la sua propagazione è istantanea: vale a dire che avviene senza una successione temporale percepibile dai sensi» [Traduzione a cura dell'autrice, realizzata con il supporto di strumenti di intelligenza artificiale]

¹¹ «Dirai in secondo luogo: appena il Sole sorge all'orizzonte, noi lo vediamo grazie alla luce che da esso si propaga fino a noi; e appena tramonta a occidente, cessiamo di vederlo per mancanza di quella stessa luce. Ma questi sono argomenti positivi. Dunque, attraverso la

Anche in questo caso, Grimaldi respinge l'argomento: il fatto che la comparsa o la scomparsa del Sole appaia immediata non prova che la propagazione della luce sia realmente istantanea. L'eventuale ritardo potrebbe infatti essere così piccolo da risultare del tutto impercettibile ai sensi.

Nella stessa prospettiva, egli prende in esame anche una possibile prova sperimentale¹². Immagina due osservatori collocati in luoghi elevati, separati da trenta o quaranta miglia e reciprocamente visibili, ciascuno posto davanti a una parete bianca che possa essere scoperta ed essere così illuminata. Il primo osservatore scopre la propria parete; il secondo, appena la vede illuminata, scopre a sua volta la propria. Se il primo osservatore vede nello stesso istante illuminarsi anche la parete lontana, sembrerebbe che la luce abbia percorso l'intervallo tra i due luoghi senza alcun ritardo sensibile. Per Grimaldi, tuttavia, neppure un simile esperimento è sufficiente a dimostrare l'istantaneità assoluta della luce: esso mostra soltanto che, entro quelle distanze e con i mezzi sensibili disponibili, l'eventuale successione temporale della propagazione resta impercettibile.

A coloro che non intendono ammettere la luce come sostanza, Grimaldi chiede almeno di ammetterne la diffusione come una forma di emissione ondulata. Solo in questo modo, infatti, sarebbe possibile rendere conto degli esperimenti presentati nel corso del primo libro. È significativo, tuttavia, che l'autore non rappresenti quasi mai il raggio luminoso come ondulato: nelle figure che accompagnano le esperienze, i raggi sono generalmente tracciati mediante linee rette. Soltanto in un caso compare un disegno, riportato in Fig. 3.16, nel quale un movimento spiraliforme viene raffigurato tra due linee rette (Grimaldi, 1665, p. 342).

vista, si prova positivamente, e non soltanto negativamente, la diffusione istantanea della luce. È sorprendente che io abbia udito uomini per altro sapientissimi argomentare in questo modo: quasi che essi potessero distinguere che quella comparsa improvvisa non sia differita neppure di un piccolissimo intervallo impercettibile, e potessero percepire ciò che, per l'ipotesi stessa, è già dichiarato impercettibile» [Traduzione a cura dell'autrice, realizzata con il supporto di strumenti di intelligenza artificiale]

¹²L'esperimento a cui fa riferimento sembra essere quello descritto da Galileo Galilei nei suoi *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze* (Galilei, 1638, pp. 43–44).

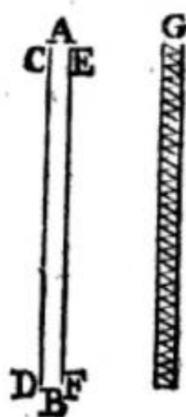


Figura 3.16: Rappresentazione della traiettoria del raggio luminoso nella Proposizione XLIII della *Physico-mathesis* (Grimaldi, 1665, p. 342).

All'interno di tale proposizione, l'autore descrive il moto della luce come un avanzamento complessivo di particelle luminose, ma attraversato da minutissime curvature interne (Grimaldi, 1665, Propositio XLIII, p. 342):

*[...] propterea si harum viam et motum distincte consideremus, dicendum erit quamlibet earum moveri minutissimis flexibus ac spiris, ut de una particula G vides aliquo modo expressum in schemate; ita ut ex omnibus sic resultet una quaedam diffusio totius luminis AB, sinuose crispata, et multiplici undationum volumine implexa. In qua tamen non debemus concedere ullam particulam luminis sensibilibiter retrocedere unquam versus A, cum omnes continuato accessu promoveantur sensibilibiter versus B.*¹³

Si ricordi infatti che, per Grimaldi, la luce è una sostanza corporea sottilissima e fluida, diffusa rapidissimamente attraverso il diafano secondo una direzione complessivamente rettilinea. A questo moto principale può sovrapporsi, in determinate circostanze, un impulso ondoso, analogo a quello prodotto da un ostacolo o da una perturbazione in una corrente d'acqua. Da tale agitazione nascerebbero le *undulatio-*

¹³«[...] perciò, se consideriamo distintamente il percorso e il movimento di queste particelle, bisognerà dire che ciascuna di esse si muove con piccolissime curvature e spirali, come si vede in qualche modo rappresentato nello schema per una sola particella, indicata con G; così che da tutte risulti una certa diffusione dell'intera luce AB, increspata in modo sinuoso e intrecciata in un molteplice avvolgimento di ondulazioni. In questa diffusione, tuttavia, non dobbiamo ammettere che alcuna particella di luce retroceda mai sensibilmente verso A, poiché tutte avanzano con movimento continuo e percepibile verso B» [Traduzione a cura dell'autrice, realizzata con il supporto di strumenti di intelligenza artificiale]

nes colorificae, cioè quelle ondulazioni minutissime che rendono la luce sensibile sotto forma di colore.

È proprio qui che Savelli (1951) individua una differenza decisiva rispetto alla futura ottica fisica. Nel caso di Grimaldi, infatti, si può forse parlare di una teoria ondulatoria del colore, ma non di una teoria ondulatoria della luce in senso proprio.

Anche il disegno riportato in Fig.3.16 conferma tale distanza. La linea sinuosa tracciata da Grimaldi non rappresenta infatti l'oscillazione di una particella attorno a una posizione di equilibrio, né un'onda nel significato che il termine assumerà nella fisica successiva. Essa indica piuttosto la traiettoria attribuita al corpuscolo luminoso nel suo avanzamento. Per questo Savelli ritiene più opportuno parlare di “serpeggiamenti” che di onde: la particella luminosa non vibra tornando continuamente sulle stesse posizioni, ma procede serpeggiando velocemente lungo la propria direzione.

D'altronde, anche le parole con cui Grimaldi descrive la sua teoria ondulatoria finiscono per contraddirlo. L'autore intende infatti difendere la luce come sostanza corporea, eppure quando cerca di descriverne concretamente il comportamento, ricorre a termini come *undulatio*, *agitatio*, *fluctuatio*, *dissipatio*, *diffRACTio*. Il caso del colore è particolarmente significativo: se il colore nasce da un'ondulazione del flusso luminoso, allora esso risulta essere una modificazione accidentale innestata su un moto già preesistente. Seguendo il suo ragionamento, si arriverebbe quasi a pensare il colore come un accidente sopra un altro accidente (Savelli, 1951).

Queste contraddizioni si manifestano ancor più nel rapporto tra luce e calore. Grimaldi vorrebbe infatti attribuire alla luce una consistenza corporea, ma l'effetto sensibile del calore viene attribuito ancora una volta al suo rapidissimo moto locale. La luce per l'autore riscalda infatti per *attrizione*, secondo un modello analogo a quello della lima che riscalda il legno solo quando è in movimento, non quando resta ferma sul tavolo. Anche in questo caso, dunque, ciò che produce l'effetto non è la corporeità della luce, ma il suo impeto: la luce che Grimaldi vorrebbe affermare come sostanza finisce così, più volte, per assumere i tratti di un accidente (Savelli, 1951).

Le brillanti intuizioni del gesuita, tuttavia, non mancano: Grimaldi è un abile osservatore e ad un certo punto afferma che i corpi bianchi riflettono la luce senza alterare sensibilmente l'agitazione, mentre i corpi neri ne estinguono gran parte, rimandando ciò che resta in forma più debole e turbata (Grimaldi, 1665, *Propositio XLIII*, p. 362):

Nempe candidum corpus cum tale sit, quia reflectit ipsum candorem suum, seu lucem ipsam puram, sinceramque, ac nulla, vel fere nulla agitationis turbatione per ipsum infectam, eadem pariter fidelitate reflectit radios lucis aliunde cum volutatione aliqua turbatos, adeo ut illi ad ipsum terminati nulla de novo turbentur agitatione, sed remittantur quales ad illud appulerunt. At corpus nigredine aliqua obscuratum, quemadmodum, ut supra diximus, multum ex-

*tinguit de lumine ad eius superficiem allapso, sic nova aliqua fluitatione turbatum languidumque remittit quod superfuit; ita consequenter immutat radios a coloratis corporibus ad ipsum extensos, infringens eorum vim pictoriam, et cogens illos ad novam aliquam fluitationem ex parte saltem suscipiendam.*¹⁴

In molti casi, tuttavia, le intuizioni restano soltanto intuizioni, seppur promettenti. Da un punto di vista filosofico, infatti, sarebbe stato difficilmente ammissibile sostenere che la luce assorbita dai corpi potesse trasformarsi in calore: ciò avrebbe implicato la possibilità che una sostanza si mutasse in un accidente, conclusione incompatibile con le categorie entro cui Grimaldi continuava a muoversi.

Secondo Savelli (1951), il limite della teoria grimaldiana risiede proprio in questo: nel tentativo di affermare la corporeità della luce attraverso categorie filosofiche ancora tradizionali. Quelle stesse categorie, tuttavia, finiscono per indebolire l'argomentazione, rendendo difficile sostenere fino in fondo la posizione che Grimaldi intendeva difendere.

La critica avanzata da Savelli appare difficilmente eludibile. Un esempio significativo è offerto da un passaggio in cui Grimaldi respinge una concezione piuttosto diffusa all'epoca, da lui attribuita ai propri avversari, secondo la quale la luce si propagherebbe attraverso azioni sferiche secondarie. Si tratta, in sostanza, di un'idea che richiama il principio che sarà successivamente associato a Huygens. Grimaldi ritiene tuttavia che, a partire da tale ipotesi, non sia possibile ricavare correttamente le leggi della riflessione e della rifrazione, e considera questa difficoltà sufficiente per rifiutare una simile idea.

Tuttavia, come osserva Ronchi (1952), l'ottica grimaldiana conduce comunque a una concezione della luce più definita rispetto al punto di partenza. Essa viene infatti descritta come un fluido materiale, dotato di una velocità elevatissima ma non infinita, che si propaga mediante raggi complessivamente rettilinei, al cui interno si produce un'ondulazione ad altissima frequenza capace di suscitare nell'occhio la sensazione del

¹⁴ «Infatti, un corpo bianco è tale perché riflette il proprio candore, cioè la luce stessa pura e sincera, non alterata da alcuna, o quasi alcuna, turbazione dell'agitazione. Per questo, con la stessa fedeltà, esso riflette anche i raggi di luce che giungono da altrove già turbati da qualche forma di movimento vorticoso; così che, una volta terminati su di esso, essi non vengono turbati di nuovo da una nuova agitazione, ma sono rimandati così come vi erano arrivati. Al contrario, un corpo oscurato da una certa nerezza, come abbiamo detto sopra, estingue molta parte della luce che giunge alla sua superficie; e ciò che ne rimane viene rimandato debole e turbato da una nuova fluttuazione. Di conseguenza, esso altera anche i raggi provenienti dai corpi colorati e diretti verso di lui, indebolendo la loro forza rappresentativa e costringendoli ad assumere, almeno in parte, una nuova fluttuazione» [Traduzione a cura dell'autrice, realizzata con il supporto di strumenti di intelligenza artificiale]

colore. Tali raggi seguono le leggi della propagazione diretta, della riflessione e della rifrazione già note, ma possono anche diffondersi secondo una nuova e quarta modalità, che permette loro di diffrangersi in prossimità di ostacoli sottili o di aperture ristrette.

Sebbene l'interpretazione fisica proposta da Grimaldi si sarebbe rivelata errata, la sua opera contribuì a mostrare l'insufficienza dell'ottica geometrica nel rendere conto di tutti i comportamenti della luce. Con la descrizione della diffrazione, la presenza di una qualche ondulazione ma anche delle strette analogie della luce con l'effluvio magnetico, venivano infatti introdotti numerosi elementi che avrebbero portato all'elaborazione di quella che oggi è nota come ottica fisica.

3.4.7 Una scoperta inaspettata: il caso del glutine

Una notizia singolare, segnalata da Savelli (1956) e interessante da includere in una ricostruzione complessiva della figura scientifica di Grimaldi, riguarda il caso del glutine. Nell'articolo *Jacopo Bartolomeo Beccari n'a pas découvert le gluten*, Savelli mette infatti in discussione l'attribuzione tradizionale della scoperta del glutine a Jacopo Bartolomeo Beccari, osservando come Grimaldi ne parli già, quasi un secolo prima, all'interno della sua opera. Il riferimento compare all'interno di una discussione sulla porosità e sulle proprietà dei corpi: Grimaldi ricorda che il glutine può essere ricavato dalla farina, che da bagnato si presenta come una sostanza vischiosa e adesiva, e che, una volta essiccato, diventa duro e fragile (Grimaldi, 1665, Propositio VI, p. 47).

Savelli non intende naturalmente negare il ruolo di Beccari nella successiva trattazione chimica del glutine, né il valore delle sue osservazioni sulla natura e sulle proprietà nutritive di tale sostanza. Piuttosto, il suo intervento mira a mostrare che le proprietà del glutine erano già note ben prima del suo contributo e che furono probabilmente scoperte per caso in cucina, per opera di qualche brava massaia bolognese.

Grimaldi, tuttavia, è il primo autore ad inserire il glutine entro una riflessione scientifica e, dopo l'analisi della sua opera, questo non sorprende poi così tanto: ancora una volta emerge infatti la tendenza del gesuita a trovare materia di indagine in ogni aspetto del mondo circostante.

3.5 Censure e controversie attorno al secondo libro

La peculiare struttura della *Physico-Mathesis de Lumine, Coloribus et Iride*, i cui due libri sono dedicati rispettivamente prima alla difesa e poi alla successiva confutazione della sostanzialità della luce, è stata spesso oggetto di curiosità e delle congetture più disparate, anche a causa della relativa scarsità di notizie su Grimaldi.

Per quale ragione Grimaldi avrebbe dovuto comporre dapprima un libro volto a sostenere la sostanzialità della luce, per poi dedicarne un secondo alla confutazione di quanto affermato in precedenza? Al di là dell'apparente singolarità di questa divisione, colpisce anche la marcata sproporzione tra le due sezioni dell'opera: il primo libro si articola in ben sessanta proposizioni, mentre il secondo ne presenta appena sei.

Secondo buona parte della letteratura, la divisione del trattato in due sezioni contrapposte non sarebbe stata altro che un espediente di tipo prudenziale, una sorta di accorgimento retorico attraverso il quale l'autore avrebbe potuto attenuare eventuali sospetti da parte della censura. Del resto, sebbene la critica alle tesi peripatetiche non fosse di per sé vietata, non può essere trascurato il ruolo centrale assunto dalla censura ecclesiastica nel contesto della scienza italiana del Seicento, soprattutto per la sua capacità di incidere sulla circolazione e sulla legittimazione del sapere scientifico.

Savelli (1951), tuttavia, respinge con fermezza tale interpretazione. A suo giudizio, l'ipotesi di una simile scorciatoia non sarebbe innanzitutto coerente né con la personalità di Grimaldi, né con lo stile complessivo dell'opera. Inoltre, l'argomento del trattato non sembrerebbe, di per sé, tale da suscitare particolari allarmi da parte della censura. La natura della luce poteva infatti certamente generare contrasti sul piano accademico, ma difficilmente appariva minacciosa nei confronti dell'autorità dottrinale o istituzionale della Chiesa. D'altronde, stando alle sue parole, persino le controversie suscitate da Galileo erano rimaste, in una prima fase, circoscritte al solo piano accademico, almeno «*finché egli s'era ristretto ad argomenti come la caduta dei gravi o i pianeti medicei, comunque ben più appassionanti e popolari della... sostanzialità della luce*».

Savelli (1951) respinge anche altre possibili interpretazioni, tra cui l'idea che uno dei due libri possa essere letto come un atto di resipiscenza da parte di Grimaldi. A suo giudizio, la struttura dell'opera riflette piuttosto un dualismo teorico interno, che costituisce il nucleo centrale dell'intero trattato.

Un'ipotesi simile è stata proposta più recentemente anche da Petruzzelli (2012), secondo cui la presenza del secondo libro non aggiunge tanto un contributo autonomo alla storia delle teorie scientifiche sulla luce e sui colori, quanto testimonia l'opposizione tra diversi possibili schieramenti teorici. Essa restituisce quindi la vivacità di un dibattito già annunciato nel *Proemium*, all'interno di un clima culturale segnato da dispute dottrinali e contrasti accesi.

Tali contrasti, secondo Ronchi (1952), avrebbero portato lo stesso Grimaldi, più che ad una presa di posizione, ad uno stato di modesta perplessità, dal momento che nell'opera egli stesso sottolinea come la natura della luce resti, in fin dei conti, un grande mistero.

Le riflessioni di Savelli e della storiografia precedente, tuttavia, devono essere senz'altro riconsiderate alla luce delle censure rintracciate da Baldini (1992) nelle sue indagini d'archivio, poi confluite nella sua *Legem impone subactis*. I documenti da lui individuati mostrano infatti che, tra il 1661 e il 1662, l'opera di Grimaldi fu effettivamente sottoposta al giudizio censorio dei Revisori Generali della Compagnia.

Dalla lettura dei documenti emerge come, contrariamente a quanto ipotizzato da Savelli (1951), le riserve dei censori si concentravano proprio sulle implicazioni teologiche e filosofiche del trattato. Le proposizioni sottoposte al loro giudizio, infatti, apparivano ai revisori come espressione di una dottrina nuova, in contrasto con ciò che veniva comunemente insegnato dai dottori. Il punto più problematico era costituito dal fatto che tali proposizioni sembravano favorire una concezione corpuscolare, incompatibile con alcuni presupposti fondamentali della dottrina peripatetica e tale da introdurre, a detta dei censori, gravi difficoltà anche nella spiegazione delle questioni di fede.

Inoltre, il confronto tra la numerazione con cui le proposizioni compaiono nelle censure e quella presente nel testo effettivamente pubblicato mostra che, nell'intervallo tra l'esame del manoscritto e la stampa, il trattato dovette subire un riordinamento non proprio trascurabile. Non è possibile tuttavia stabilire, esclusivamente sulla base di tali rilievi, se nel testo originario il corpuscolarismo di Grimaldi fosse espresso in una forma più decisa rispetto a quella poi assunta nell'edizione a stampa (Baldini, 1992).

Resta però significativo che le osservazioni dei revisori sembrano riferirsi esclusivamente a materiali riconducibili all'attuale primo libro. Questa circostanza, infatti, rende più che plausibile l'ipotesi che il secondo libro sia stato composto da Grimaldi soltanto in un momento successivo, tra il marzo 1662 e il dicembre 1663, anno della sua morte. Non può tuttavia essere esclusa un'altra possibilità, sostenuta ad esempio da Tabarroni (1998), cioè che questa seconda parte sia stata in realtà redatta da Riccioli dopo la morte di Grimaldi, proprio allo scopo di rendere possibile la pubblicazione postuma dell'opera dell'allievo, attenuando al massimo le modifiche ai contenuti scientifici appartenenti al primo libro.

Sebbene non sia possibile stabilire con certezza la natura e la funzione originaria del secondo libro, è innegabile che la sua presenza sia stata decisiva nella vicenda editoriale dell'opera. Senza quella parte, infatti, è probabile che uno dei più importanti trattati di ottica del Seicento non sarebbe stato pubblicato, oppure sarebbe giunto ai posteri in una forma profondamente diversa.

Il testo vide infine la luce con la data del 1665 presso la tipografia degli eredi di Vittorio Benacci, a spese del libraio bolognese Gerolamo Bernia, già noto per aver sostenuto iniziative editoriali di rilievo culturale, sebbene probabilmente poco remu-

nerative (Tabarroni, 1998). Si concludeva così una vicenda editoriale complessa ma destinata a consegnare alla storia dell'ottica uno dei suoi trattati più importanti.

L'influenza esercitata dalla *Physico-Mathesis de Lumine, de Coloribus, et Iride* sulla successiva storia dell'ottica e, più in generale, sulla formazione dell'ottica fisica sarà esaminata nell'ultimo capitolo. Prima di ricostruirne la ricezione, tuttavia, è necessario tornare al nucleo sperimentale dell'opera, per interrogarsi su ciò che Grimaldi osservò effettivamente e per comprendere in che misura oggi è possibile replicare le sue osservazioni.

Capitolo 4

Dal testo all'esperimento: che cosa ha realmente osservato Grimaldi?

Questa sezione è dedicata alla replica sperimentale di alcune esperienze descritte da Grimaldi nella sua *Physico-Mathesis*. A differenza di repliche precedenti, condotte con l'uso del laser, si è scelto di lavorare con luce solare, così da proporre una replica storicamente orientata e più vicina alle condizioni indicate dall'autore. La ricostruzione prenderà avvio dall'allestimento della camera oscura e seguirà poi il testo grimaldiano, ripercorrendo le principali osservazioni del gesuita bolognese. La discussione dei risultati sarà dedicata a valutare in che modo questi esperimenti possano essere riprodotti oggi, quali difficoltà materiali e percettive emergano durante la replica e che cosa tali difficoltà permettano di comprendere sulla metodologia adottata da Grimaldi, sulle sue scelte operative e sulle potenzialità didattiche di esperienze di questo tipo.

4.1 Allestire la camera oscura

Sulla camera oscura utilizzata da Grimaldi non si possiedono informazioni dettagliate. È certo che, almeno per i primi due gruppi di esperienze, egli lavorò in una stanza oscurata, facendo entrare la luce del Sole attraverso un foro molto piccolo, ma a partire dal suo testo non è possibile stabilire con certezza né come questa fosse materialmente predisposta, né dove egli avesse effettivamente condotto le sue osservazioni.

Da un punto di vista storiografico, si può tuttavia ipotizzare che Grimaldi, prima di realizzarle, avesse già una certa familiarità con esperienze di questo tipo. Come ricorda Baldini (2002), le sue ricerche in ottica fisica maturarono grazie ad una serie di osservazioni condotte accanto a Riccioli, in particolare quelle relative alla misura del diametro solare, svolte come sempre con particolare finezza metodologica, proprio mediante l'utilizzo di una camera oscura. A conferma di ciò, lo stesso Riccioli (1665) collega il riscontrato problema dell'indefinitezza del bordo dell'immagine solare agli studi di Grimaldi sulla luce e sui colori. Il suo allievo, infatti, attribuiva quella sorta di penombra ad un nuovo modo di propagazione della luce, non per raggio diretto, riflesso o rifratto, ma per raggio diffratto. Il maestro dichiara inoltre esplicitamente di aver assistito in prima persona a molti esperimenti del confratello, ritenendoli difficilmente

spiegabili senza ricorrere a questa nuova forma di propagazione.

Sebbene questo genere di osservazioni astronomiche venisse talvolta effettuato in grandi spazi, come la chiesa di San Petronio, è stato più volte ipotizzato che le esperienze ottiche di Grimaldi siano state condotte in un contesto più privato, probabilmente all'interno della sua stessa camera. A differenza di Riccioli, infatti, Grimaldi non fu mai dispensato dall'attività di insegnamento e, fino alla sua morte, rimase anche assistente del maestro: tali circostanze non solo dovettero limitare la possibilità di dedicarsi a tempo pieno ai suoi studi sulla luce, ma anche quella di disporre di allievi o assistenti che potessero aiutarlo nella realizzazione dei suoi esperimenti.

Nell'opera, tuttavia, egli sottolinea più volte la necessità di disporre di una luce solare molto intensa e di un cielo serenissimo, precisando in alcuni casi di aver condotto le osservazioni in estate. Questo consente almeno di avanzare l'ipotesi che una parte delle esperienze possa essere stata svolta presso villa Guastavillani, dimora estiva dei gesuiti a Paderno, dove nei mesi estivi erano già stati condotti altri esperimenti insieme a Riccioli, tra cui quelli relativi alle rilevazioni geodetiche.

Sulla base delle precedenti considerazioni, che non consentono di conoscere con esattezza le condizioni materiali nelle quali lavorò Grimaldi, il fisico che tenta di replicare gli esperimenti è necessariamente chiamato a formulare alcuni *educated guesses*, ossia ipotesi ragionate fondate sull'analisi della fonte e sulle caratteristiche fisiche del fenomeno.

Innanzitutto, Grimaldi afferma che per i suoi esperimenti è necessaria una luce solare molto intensa. Poiché le prove della presente ricerca non sono state svolte in estate, bensì in primavera, e le condizioni meteorologiche non sono state sempre favorevoli, prima di procedere alla ricostruzione del set-up grimaldiano si è scelto di utilizzare un apparato preliminare, progettato per riprodurre un Sole artificiale in modo analogo a quanto già realizzato da Stuewer (1970).

A tale scopo è stato utilizzato un banco ottico, sul quale è stata montata una lampada schermata da un foro di 2 mm. L'obiettivo era riprodurre il fatto che il Sole, osservato dalla Terra, appare come un piccolo disco con un diametro angolare di circa 30 minuti d'arco. Per ottenere una condizione analoga, il foro illuminato di 2 mm è stato collocato a circa 23 cm dal foro principale: a questa distanza, infatti, esso sottende un angolo di circa mezzo grado.

La luce così ottenuta è risultata molto meno intensa di quella solare. Tuttavia, dopo aver oscurato le finestre, questo apparato preliminare ha consentito di acquisire familiarità con il fenomeno e di *imparare a vedere la diffrazione*, aspetto particolarmente rilevante al quale è dedicato uno dei prossimi paragrafi. Quando le condizioni meteorologiche lo hanno consentito e, in particolare, in presenza di luce solare intensa

e di cielo completamente sereno, si è proceduto alla replica storica vera e propria.

Per quest'ultima è stato utilizzato il Laboratorio di Didattica del Dipartimento di Fisica “Augusto Righi” dell'Università di Bologna sito al piano terra dell'edificio storico di Via Irnerio, 46 (Stanza 40). La stanza dispone di due finestre, che sono state oscurate mediante l'utilizzo di semplici cartoncini neri. Su una di esse sono stati praticati i fori necessari all'esperimento. La finestra impiegata è orientata secondo un azimut di circa 86° , dunque quasi esattamente verso Est. In queste condizioni, tenendo conto anche degli ostacoli esterni e della traiettoria apparente del Sole, nei mesi di aprile, maggio e giugno, la luce diretta raggiungeva il foro nella tarda mattinata, entro un intervallo utile compreso indicativamente tra le ore 10:00 e le ore 12:00.

4.2 *Experimentum primum*

4.2.1 Osservazione delle frange esterne all'ombra

Per replicare le osservazioni di Grimaldi esattamente così come egli le descrive, ci si lascia guidare da quello che in passato è stato definito il “verbale di laboratorio” grimaldiano sulla diffrazione (Petruzzelli, 2012).

Come emerge ampiamente dal capitolo precedente, Grimaldi nel suo trattato procede in modo estremamente minuzioso: descrive con attenzione le condizioni sperimentali, anticipa tutte le possibili obiezioni e risponde puntualmente alle eventuali critiche. Tuttavia, nei primi paragrafi del suo trattato, egli introduce un fenomeno completamente nuovo, non ancora inserito in alcuna discussione, e per questo inizia a discutere delle condizioni che ne consentono l'osservazione. Egli deve chiaramente mostrare che il fenomeno esiste e indicare al lettore in quali condizioni può essere visto. È anche per questo che i primi paragrafi contengono molte descrizioni operative e presentano un maggior numero di illustrazioni (Grimaldi, 1665, Propositio I, pp. 1-11):

Aperto in fenestra foraminulo perquam parvo AB, introducatur per illud in cubiculum, alioqui valde obscurum, lumen Solis serenissimo caelo, cuius diffusio erit per conum, vel quasi conum ACDB, visibilem si aer fuerit refertus atomis pulvereis, vel si in eo excitetur aliquis fumus. Huic cono inferatur aliquod corpus opacum EF, in magna distantia a foramine AB, et ita ut saltem unum extremum corporis opaci illuminetur. Excipiatur deinde in tabella candida, vel in folio chartae albae super pavimento extensae, conus praedictus, seu basis eius lucida CD, cum umbra GH, quam proicit opacum EF insertum cono, et illuminatum in utroque sui extremo E et F: quae tamen umbra secundum leges Opticas non erit exactissime praecisa, et terminata in uno puncto G versus unam partem, et in uno alio puncto H versus aliam; sed ratione foraminis AB, aliquam tandem latitudinem habentis, simulque ratione

*Solis in latum extensi, aliave de causa erit confinium umbrae aliquo modo incertum propter penumbram quandam, et cum sensibili decremento, seu ut vocant, exfumatione luminis per spatium IG inter certam umbram et nitidum lumen ad unam partem praedictae basis, et per spatium HL ad aliam partem.*¹

L'apparato sperimentale descritto da Grimaldi è riportato in Fig. 4.1. Il gesuita suggerisce di praticare nella finestra di una stanza oscurata un foro molto piccolo AB , attraverso il quale la luce solare forma un cono luminoso. All'interno di quest'ultimo viene posizionato un oggetto opaco EF , in modo che almeno uno dei suoi margini sia illuminato. Successivamente, ad una certa distanza e su un foglio bianco, viene raccolta e osservata la base luminosa CD , assieme all'ombra GH .

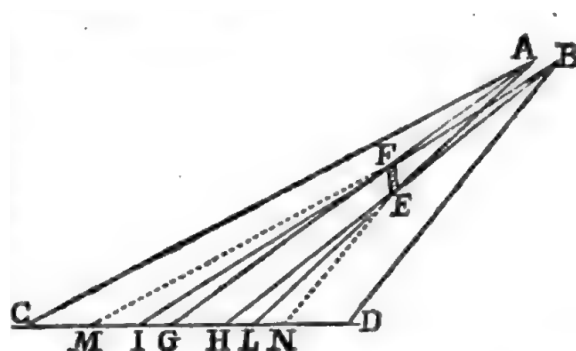


Figura 4.1: Schema del primo esperimento sulla diffrazione (Grimaldi, 1665, Propositio I, p. 2).

Grimaldi, in questo primo esperimento, non fornisce indicazioni precise né sulle dimensioni del foro né sulle distanze impiegate tra foro, ostacolo e piano di osservazione.

¹«Aperto in una finestra un forellino molto piccolo AB , si faccia entrare attraverso di esso, in una stanza per il resto molto oscurata, la luce del Sole in un cielo serenissimo; la sua diffusione avverrà in forma di cono, o quasi cono, $ACDB$, visibile se l'aria sarà piena di particelle di polvere, oppure se in essa verrà prodotto un po' di fumo. In questo cono si inserisca un qualche corpo opaco EF , a grande distanza dal foro AB , in modo che almeno un estremo del corpo opaco sia illuminato. Si raccolga poi sopra una tavoletta bianca, oppure sopra un foglio di carta bianca disteso sul pavimento, il cono suddetto, cioè la sua base luminosa CD , insieme all'ombra GH , proiettata dal corpo opaco EF inserito nel cono e illuminato in entrambi i suoi estremi E ed F . Questa ombra, tuttavia, secondo le leggi dell'ottica, non sarà precisissima, né terminata in un solo punto G da una parte e in un solo altro punto H dall'altra; ma, a causa del foro AB , che possiede comunque una certa larghezza, e insieme a causa dell'estensione laterale del Sole, o per altra ragione, il confine dell'ombra sarà in qualche modo incerto per la presenza di una certa penombra e per un sensibile decremento, o, come dicono, sfumatura della luce, nello spazio IG tra l'ombra certa e la luce nitida da una parte della base suddetta, e nello spazio HL dall'altra parte» [Traduzione a cura di Bettini (2015)].

Questi parametri sono tuttavia decisivi per la riuscita dell'esperimento, poiché la visibilità delle frange dipende dalle condizioni di coerenza temporale e spaziale della luce, anche se il gesuita non poteva naturalmente saperlo. La luce solare presenta uno spettro molto ampio, ma l'osservazione di singoli colori, come il rosso e il blu, permette di restringerne la banda, garantendo la necessaria coerenza temporale. La visibilità delle frange di un dato colore dipende poi dal grado di coerenza spaziale, determinato a sua volta dalla lunghezza d'onda, dall'estensione effettiva della sorgente e dalla distanza tra il foro e l'ostacolo. Nel caso della luce solare e di distanze dell'ordine di alcuni metri, compatibili sia con lo spazio disponibile in laboratorio sia, verosimilmente, con quello di cui poteva disporre Grimaldi, il foro non poteva essere più grande di qualche millimetro (Bettini, 2015).

Nell'allestimento qui realizzato, la geometria della stanza ha consentito di raggiungere una distanza complessiva massima di circa 3 m tra il foro praticato nella finestra e lo schermo bianco. Per individuare le dimensioni più adatte dell'apertura sono state effettuate numerose prove, dalle quali è emerso che i risultati migliori si ottenevano con un diametro di circa 1 mm. Con aperture inferiori al millimetro, infatti, l'intensità luminosa risultava troppo debole per permettere una chiara osservazione delle frange. Al contrario, aumentando il diametro oltre circa 2 mm, la maggiore estensione della sorgente riduceva la coerenza spaziale della luce incidente e rendeva le frange meno contrastate.

All'interno del cono luminoso sono stati collocati vari ostacoli, secondo le indicazioni fornite da Grimaldi e servendosi di alcuni supporti per modificare la loro posizione e mantenerli stabili. Il pattern di diffrazione è stato poi osservato su un foglio bianco, tenuto in mano oppure poggiato sul pavimento, a seconda della configurazione adottata nelle varie osservazioni. Una volta completato l'allestimento sperimentale, si è proseguito seguendo la descrizione fornita da Grimaldi, qui riportata nella traduzione italiana fornita da Bettini (2015) per facilitarne la lettura (Grimaldi, 1665, Propositio I, pp. 1-11):

Ma, cosa importante da notare, l'ombra totale IL apparirà nei fatti notevolmente maggiore di quanto dovrebbe, se si supponesse che tutto avvenga mediante linee rette condotte dagli estremi A e B attraverso ciascuno degli estremi E e F, come nella figura qui mostrata; essa risulterà inoltre maggiore di quanto si possa dedurre mediante il calcolo dalle distanze BF e FI, dalle misure AB ed EI e, infine, da tutti gli angoli necessari alla risoluzione dei triangoli rappresentati nella figura, come noi stessi abbiamo verificato sperimentalmente.

Quindi, per darne un breve cenno, dati i tre lati del triangolo AFE, si ricava mediante la trigonometria l'angolo A. Con questo, nel triangolo AGL,

conoscendo inoltre il lato AG , oppure AL , e avendo misurato l'angolo G , si determina GL . Successivamente, nel triangolo AFB , che può essere considerato isoscele, dai tre lati si ricava l'angolo F e, di conseguenza, l'angolo IFG , ad esso opposto al vertice e uguale. Con quest'ultimo, nel triangolo IGF , conoscendo anche la distanza FI e avendo misurato l'angolo I , si ottiene la retta IG , che deve essere aggiunta alla già determinata GL , così da ricavare infine la base cercata IL . Questa rappresenta l'ampiezza che l'ombra dovrebbe avere se l'intera diffusione della luce nel cono luminoso, interrotto dall'interposizione dell'ostacolo EF , avvenisse mediante linee rette. Poiché questi triangoli presentano angoli molto acuti, saranno necessarie tavole trigonometriche estese a un raggio molto grande; la loro risoluzione, tuttavia, non è impossibile. Supponiamo dunque che, nella figura, l'ombra ricavata mediante il calcolo e sulla base dell'ipotesi delle linee rette sia IL , mentre l'ombra che appare effettivamente nell'osservazione sia MN .

Si osservi inoltre che, sulle parti CM e ND della base luminosa, chiaramente e intensamente illuminate, si distribuiscono e si distinguono alcuni tratti, ossia frange di luce colorata. In ciascuna frangia la luce è molto pura e sincera nella parte centrale, mentre alle estremità presenta dei colori: precisamente, il blu nell'estremità più vicina all'ombra MN e il rosso in quella più lontana. Sebbene queste frange luminose possano dipendere dalle dimensioni del foro AB , poiché non apparirebbero se questo fosse più grande, esse non sono tuttavia determinate dalle sue dimensioni, così come non lo sono dal diametro del Sole, come risulterà da quanto segue.

Si osservi inoltre che i tratti appena descritti, ossia le frange di luce colorata, si estendono da M verso C e, analogamente, da N verso D , in modo tale che la prima sia più larga della seconda e questa, a sua volta, più larga della terza; non accade mai, infatti, che se ne vedano più di tre. In esse diminuiscono anche l'intensità della luce e quella dei colori, secondo il medesimo ordine con cui si allontanano dall'ombra. Le frange risultano inoltre sempre più larghe quanto più lontano dall'ostacolo che proietta l'ombra vengono intercettate sulla tavoletta bianca e quanto più quest'ultima viene inclinata rispetto alla radiazione solare. Ciò è richiesto dalla ragione stessa, poiché tali frange sono disegnate da raggi che costituiscono una parte del cono luminoso e che si separano sempre più gli uni dagli altri man mano che procedono.

Potrebbe tuttavia esservi qualcuno che, per una certa mancanza di attenzione durante l'osservazione, non voglia riconoscere che le frange appena descritte siano frange luminose, come abbiamo affermato, ma sostenga piuttosto che debbano essere chiamate frange d'ombra, perché non percepisce sufficientemente quei colori alquanto scuri che, come abbiamo detto, compaiono ai lati illuminati delle frange luminose. Per chiarire meglio questo aspetto, nella figura seguente siano rappresentate, vicino all'ombra X , proiettata come sopra da un ostacolo opaco e ricevuta su una tavoletta o su un foglio di carta bianca, tre di quelle frange luminose, ciascuna composta da tre piccole fasce.

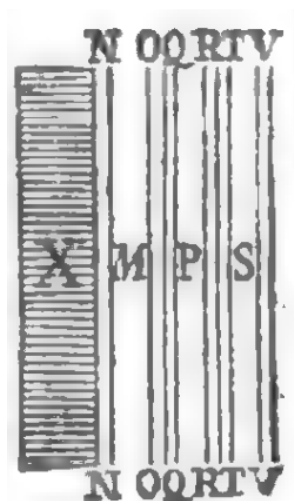


Figura 4.2: Frange colorate osservate da Grimaldi al bordo dell'ombra di un ostacolo opaco (Grimaldi, 1665, Propositio I, p. 3).

La prima e più larga frangia sia NMO. Al suo centro si trovi M, la fascia più larga e luminosa di tutte, priva di qualsiasi colore. Essa è delimitata da due fasce più piccole e colorate: N, più vicina all'ombra, è blu, mentre O è rossa. La seconda frangia, più stretta della prima, sia QPR. Anche al suo centro si trovi una fascia luminosa non colorata, P, delimitata da due fasce colorate e alquanto scure: Q, rivolta verso l'ombra precedentemente indicata, è blu, mentre R è rossa. La terza frangia, infine, la più stretta di tutte, sia TSV. Essa presenta al centro la fascia S, costituita da luce pura, e ai lati due fasce colorate meno evidenti: T, blu, e V, rossa.

Può dunque accadere che un osservatore, sebbene esegua l'esperimento con un cielo perfettamente sereno e le suddette frange siano prodotte da una luce adeguata, ritenga ugualmente, per mancanza di attenzione e di acutezza, che sulla base luminosa del cono compaiano frange d'ombra anziché luminose. Egli potrebbe infatti scambiare le due fasce O e Q per una sola fascia scura, non accorgendosi che in esse sono presenti due colori differenti, i quali dimostrano che si tratta di due fasce distinte e luminose. A maggior ragione, non distinguerà le due fasce minori R e T come separate e colorate, ma penserà che esse costituiscano un'unica fascia scura. Riterrà quindi di osservare sulla base luminosa del suddetto cono soltanto tre fasce oscure, separate sia dall'ombra principale sia tra loro, e considererà le tre parti luminose M, P e S come porzioni della base luminosa interposte tra le tre ombre OQ, RT e V, disposte lungo l'ombra principale X, proiettata dall'ostacolo inserito, come detto sopra, nel cono di luce.

La figura richiamata da Grimaldi è riprodotta in Fig. 4.2 e rappresenta le tre *series lucidae* da lui osservate in prossimità del bordo dell'ombra di un ostacolo opaco. Sebbene questo non risulti particolarmente evidente nel disegno, l'autore precisa che

la seconda frangia è più stretta della prima e la terza più stretta della seconda. Allontanandosi dall'ombra, esse mostrano inoltre una progressiva diminuzione dell'intensità luminosa e, secondo quanto riferito da Grimaldi, non risultano mai visibili in numero superiore a tre.

Con i diversi oggetti impiegati nella replica è stato possibile distinguere chiaramente, nella maggior parte delle prove, le prime due frange. La terza risultava invece molto meno evidente: gli osservatori esterni riuscivano generalmente a riconoscerla soltanto dopo che era stato loro indicato con precisione quale elemento dover cercare.

In Fig. 4.3 è riportata una fotografia delle frange esterne prodotte dal bordo di un ostacolo opaco e rettilineo, costituito nello specifico dal supporto utilizzato per mantenere in posizione gli altri oggetti. Come si può osservare, la terza frangia è appena distinguibile. Risultano invece particolarmente evidenti le colorazioni descritte da Grimaldi: il blu compare sul margine rivolto verso l'ombra e il rosso su quello più esterno, secondo una successione che si ripete nelle diverse frange.



Figura 4.3: Frange di diffrazione prodotte dal bordo rettilineo di un ostacolo opaco, osservate utilizzando luce solare. La distanza tra il foro e l'ostacolo è di circa 160 cm, mentre quella tra l'ostacolo e lo schermo è di circa 130 cm.

L'immagine è riportata senza modifiche.

La quarta frangia è comparsa solo in pochissime occasioni, soprattutto in prossimità del bordo del cono luminoso, come visibile in Fig. 4.4. In questa zona, infatti, si riscontra un maggiore contrasto nel pattern di diffrazione, il che rende visibili anche le frange di ordine più elevato, altrimenti mascherate.

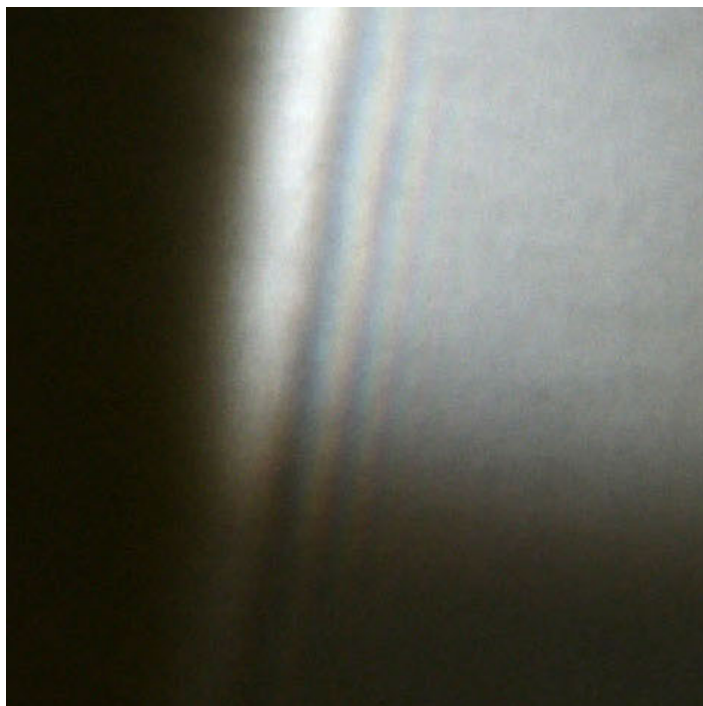


Figura 4.4: Frange di diffrazione prodotte dal bordo rettilineo di un ostacolo opaco, osservate in prossimità del bordo del cono luminoso e ottenute utilizzando luce solare. La distanza tra il foro e l'ostacolo è di circa 160 cm, mentre quella tra l'ostacolo e lo schermo è di circa 130 cm. L'immagine è riportata senza modifiche.

Proseguendo nella descrizione, Grimaldi mette in guardia il lettore dal rischio di interpretare tali bande come semplici ombre, precisando che un'osservazione più attenta permette invece di riconoscerne la natura luminosa e colorata. Egli rileva inoltre che le frange si dispongono sempre parallelamente al profilo dell'ombra proiettata dall'ostacolo: in corrispondenza degli angoli esterni si incurvano seguendone il contorno, mentre presso quelli interni, occupati dalla luce, si intersecano tra loro (Grimaldi, 1665, *Propositio I*, pp. 1–11):

E infatti, se si osserva attentamente e l'esperimento è eseguito come si deve, sarà chiaro che quelle frange quasi scure non sono ombre, né un mero difetto di luce, ma tratti gemelli di colori diversi, tra i quali appare inoltre qualcosa di oscuro in corrispondenza del loro confine comune, che non risulta colorato. Tuttavia, tali tratti si distingueranno chiaramente se risplende un'intensa

luce solare e, per il fatto stesso che appaiono colorati, non possono non essere luminosi. È inoltre degno di nota che i tratti luminosi M, P e S, precedentemente menzionati, risultano più luminosi della restante base del cono di raggi proiettata sulla suddetta tavoletta [...].

Si osserva inoltre che le frange suddette sono tutte parallele all'ombra proiettata dall'ostacolo e che risultano rette se è retto il margine dell'ostacolo inserito nel cono di luce, oppure curve, se questo è curvo. Quando invece il suddetto ostacolo presenta degli angoli e, di conseguenza, anche l'ombra raccolta sul piano risulta angolosa, le frange rimangono rette finché procedono parallelamente ai lati rettilinei dell'ombra; successivamente, però, si incurvano formando archi simili attorno a quell'angolo dell'ombra che la luce circonda esternamente da entrambi i lati, come si può osservare nello schema allegato.

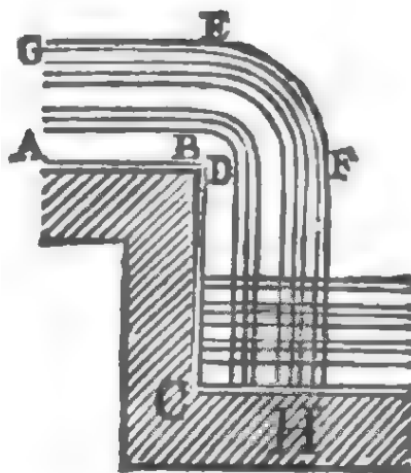


Figura 4.5: Frange di diffrazione osservate da Grimaldi attorno agli angoli di un ostacolo (Grimaldi, 1665, Propositio I, p. 4).

In esso, l'ombra ABC sia angolosa in B e C, come il corpo che la proietta. Parallelamente al lato AB si dispongano le frange colorate e luminose che, dai punti A e G, si estendono fino a B ed E; siano inoltre parallele al lato CD quelle che, dai punti C e H, procedono fino a D e F. Terminato questo tratto di completo parallelismo con i lati dell'ombra, tutte le frange non proseguono più rettilineamente verso una meta comune, ma appaiono incurvarsi in maniera simile l'una all'altra attorno all'angolo dell'ombra ABC, come si osserva in BD ed EF. Verso l'angolo che contiene al proprio interno la luce, quale è l'angolo DCH, le frange si incrociano invece reciprocamente, come mostrato nella figura, senza che la forma dell'una impedisca quella dell'altra; nel punto di intersezione, i colori risultano infatti più intensi o mescolati.

Lo schema realizzato da Grimaldi è riportato in Fig.4.5. Anche in questo caso Grimaldi non specifica la natura dell'oggetto impiegato. Per la replica è stato pertanto

utilizzato un cartoncino nero, ritagliato in una forma simile a quella raffigurata dal gesuita, così da riprodurre i due angoli e osservarne gli effetti di diffrazione, come mostrato in Fig.4.6 e Fig.4.7.

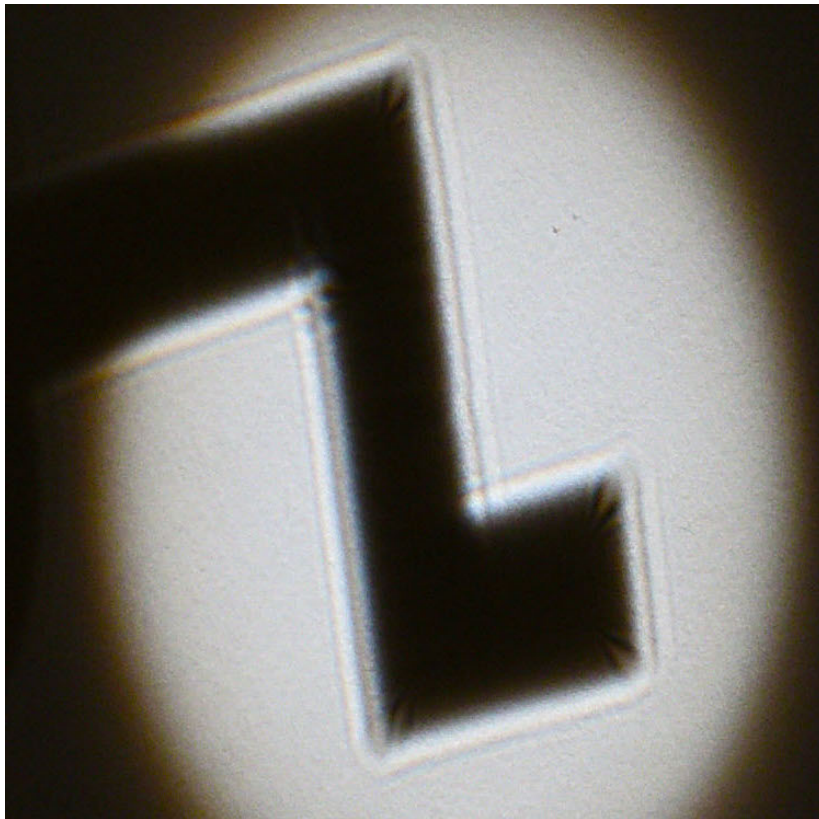


Figura 4.6: Frange di diffrazione prodotte dagli angoli retti di un ostacolo opaco, osservate utilizzando luce solare. Le frange risultano incurvate in prossimità degli angoli esterni e si intersecano in corrispondenza di quelli interni. La distanza tra il foro e l'ostacolo è di circa 160 cm, mentre quella tra l'ostacolo e lo schermo è di circa 130 cm. L'immagine è riportata senza modifiche.

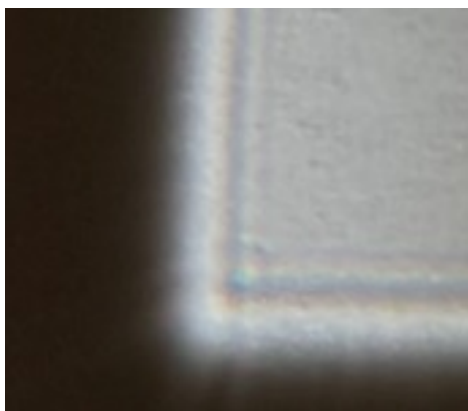


Figura 4.7: Dettaglio delle frange di diffrazione che si intersecano in corrispondenza dell'angolo interno di un ostacolo opaco, osservate utilizzando luce solare. L'immagine è riportata senza modifiche.

4.2.2 Osservazione delle frange interne all'ombra

Grimaldi passa poi ad una osservazione più difficile, relativa alla comparsa delle frange interne all'ombra, fenomeno che, come si vedrà più avanti, sfuggirà anche a Newton. Anche in questo caso la descrizione è estremamente minuziosa: l'autore precisa che è necessaria una luce solare molto intensa e che l'ostacolo inserito nel cono luminoso deve essere illuminato da entrambi i lati. Esso deve inoltre essere sufficientemente lungo e di larghezza moderata, poiché ostacoli troppo sottili, come capelli o fili molto fini, non permettono di distinguere chiaramente le frange interne. Da queste indicazioni emerge con chiarezza che Grimaldi non si limita a registrare un'osservazione isolata, ma riferisce il risultato di prove ripetute, attraverso le quali individua le condizioni più favorevoli affinché il fenomeno possa essere riconosciuto e riprodotto dal lettore (Grimaldi, 1665, Propositio I, pp. 1–11):

Si deve parimenti osservare che nella stessa ombra compaiono a volte le dette frange di luce colorata, un numero a volte maggiore a volte minore. A ciò 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 di larghezza non troppo piccola, quanto le prove stesse insegnino. E infatti se, ad esempio, si usa un capello o un filo da ago da calzolaio di un qualche spessore, all'ombra da esso proiettata si mescolerà un po' di luce e di colore confuso, fino al punto in cui la luce del detto cono, scorsa agli estremi del filo così sottile, si dissipa poi ed estingue l'ombra del filo a quella distanza dal filo che è richiesta perché le frange colorate e luminose appaiano nell'ombra, intercettata da un piano. Si deve pertanto inserire nel cono di luce una lamina, o qualche sbarra poco più larga, e poi altre più larghe, finché si giunga a quella, la cui ombra intercettata a debita distanza, si riconosce contenere in sé le frange suddette: la quale distanza quanto maggiore sarà, quanto più distinte appariranno le frange, purché il lume dal quale vanno formate, per troppa distanza non si indebolisca.

La replica ha confermato la particolare difficoltà di questa osservazione. Le frange interne, infatti, non sono comparse con la stessa immediatezza delle frange esterne, ma sono risultate visibili solo in condizioni abbastanza precise: luce solare intensa, ambiente ben oscurato, ostacolo completamente intercettato dal fascio luminoso e distanza adeguata tra l'oggetto e lo schermo. In particolare, modificando la posizione dell'ostacolo si osservavano variazioni sensibili nella figura: quando l'oggetto veniva avvicinato al foro, le frange apparivano più larghe ma anche più sfocate; quando invece veniva avvicinato allo schermo, diventavano più nitide, ma anche più piccole e meno facilmente distinguibili ad occhio nudo, fino a scomparire del tutto. Anche la scelta

dell'ostacolo si è rivelata decisiva: fili troppo sottili non permettevano di riconoscere chiaramente le frange interne, mentre oggetti leggermente più spessi, così come indicato dal gesuita, rendevano più visibili le bande luminose all'interno dell'ombra.

In Fig. 4.8 sono visibili le frange di diffrazione prodotte da un filo di ferro inserito nel cono di luce solare. Si distinguono sia le frange esterne ai margini dell'ombra, sia quelle interne alla regione d'ombra, accompagnate da evidenti colorazioni analoghe a quelle descritte da Grimaldi. Una configurazione molto simile è riportata in Fig. 4.9, dove si è utilizzato come ostacolo una spilla metallica.

In Fig.4.10, invece, vengono messe a confronto le ombre prodotte da un capello e dal filo di ferro: il confronto mostra che, nelle condizioni della replica, le frange interne risultano riconoscibili solo nel secondo caso, mentre l'ombra prodotta dal capello non permette una chiara distinzione delle bande luminose.

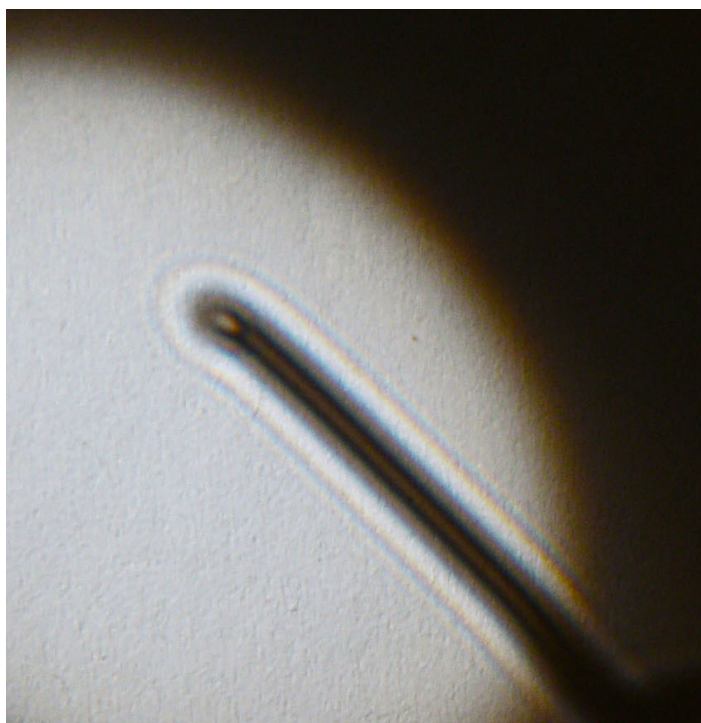


Figura 4.8: Frange di diffrazione prodotte da un filo di ferro di diametro pari a 0,9 mm, osservate utilizzando luce solare. Sono visibili sia le frange esterne ai margini dell'ombra sia quelle interne alla regione d'ombra. La distanza tra il foro e l'ostacolo è di circa 160 cm, mentre quella tra l'ostacolo e lo schermo è di circa 130 cm. L'immagine è riportata senza modifiche.

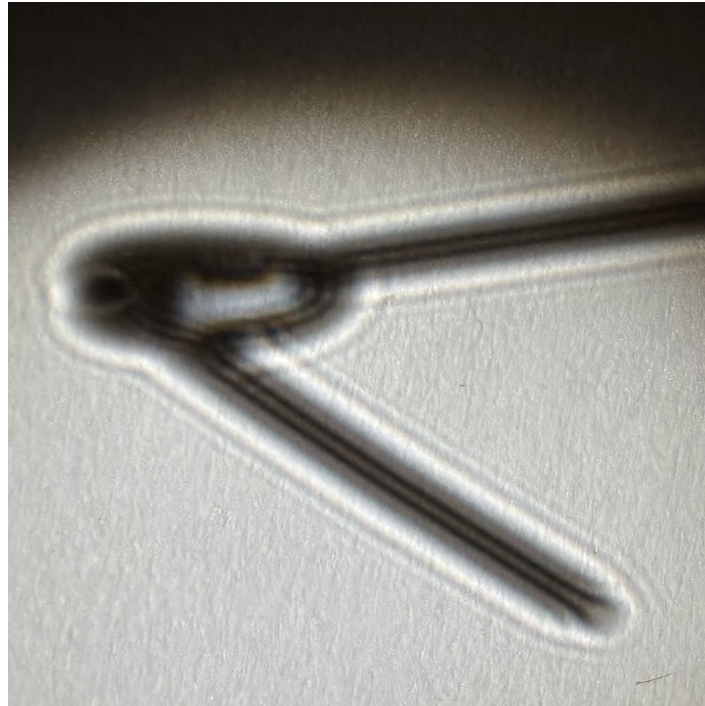


Figura 4.9: Frange di diffrazione prodotte da una spilla metallica di spessore pari a 0,8 mm, osservate utilizzando luce solare. La distanza tra il foro e l'ostacolo è di circa 160 cm, mentre quella tra l'ostacolo e lo schermo è di circa 130 cm. L'immagine è riportata senza modifiche.



Figura 4.10: Confronto tra ombre ottenute con un capello (in basso) e con un filo di ferro (in alto) di diametro pari a 0,9 mm, utilizzando luce solare. La distanza tra il foro e l'ostacolo è di circa 160 cm, mentre quella tra l'ostacolo e lo schermo è di circa 130 cm. L'immagine è riportata senza modifiche.

Grimaldi prosegue osservando che il numero delle frange dipende sia dalla larghezza dell'ostacolo sia dalla posizione del piano di osservazione. Particolarmente significativo è il riferimento al piano candido disposto leggermente obliquo rispetto al cono di luce: anche nella replica si è ricorso a questo accorgimento, che ha permesso di rendere le frange più facilmente distinguibili senza dover necessariamente utilizzare una lente d'ingrandimento (Grimaldi, 1665, Propositio I, pp. 1–11):

Inoltre il numero delle frange che compaiono nell'ombra, sarà tanto maggiore, ceteris paribus, quanto più larga sarà la lamina, o verga, inserita nel cono: saranno queste al minimo due e, se si usa una verga più larga, quattro. E così procedendo per maggiore grossezza, o larghezza dell'ostacolo, che comunque sia illuminato da entrambi i lati, o meglio sia totalmente inserito nel predetto cono, le frange saranno di più, per esempio sei, in numero comunque sempre pari, poiché quante sono visibili nell'ombra da un solo lato estremo, altrettante ne sono contemporaneamente visibili dall'altro. Ho detto "ceteris paribus", perché mantenendo la stessa lamina, o verga opaca, possono apparire frange in maggior o minor numero a seconda che siano raccolte nel piano candido posto più lontano o più vicino. Inoltre saranno maggiori, o più larghe, quelle frange che sono in numero minore; e al contrario più strette quando esistono in maggior numero. Tutte le frange luminose e colorate predette appaiono in ogni caso più chiare e distinte se sono raccolte in un piano pulito e candido, ma posto un po' obliquo rispetto al cono di raggi di luce solare. Non aggiungo qui una figura specifica, perché sembrano sufficienti le cose dette, anzi tutte le predizioni sono rappresentate anche nello schema seguente.

Nella Fig. 4.11 sono riportate le frange prodotte da un filo di ferro più spesso, che ha permesso di distinguere con maggiore chiarezza un numero più elevato di frange interne. Il dettaglio mostrato in Fig. 4.12 consente di riconoscere meglio la successione delle bande luminose all'interno dell'ombra. Le varie prove effettuate, inoltre, hanno mostrato che all'aumentare dello spessore del filo le frange interne diventavano sempre più numerose. In Fig. 4.13, invece, il piano di osservazione non è disposto orizzontalmente sul pavimento, ma inclinato rispetto al cono di luce. Questo accorgimento, già suggerito da Grimaldi, ha reso le frange più visibili e più facilmente distinguibili.

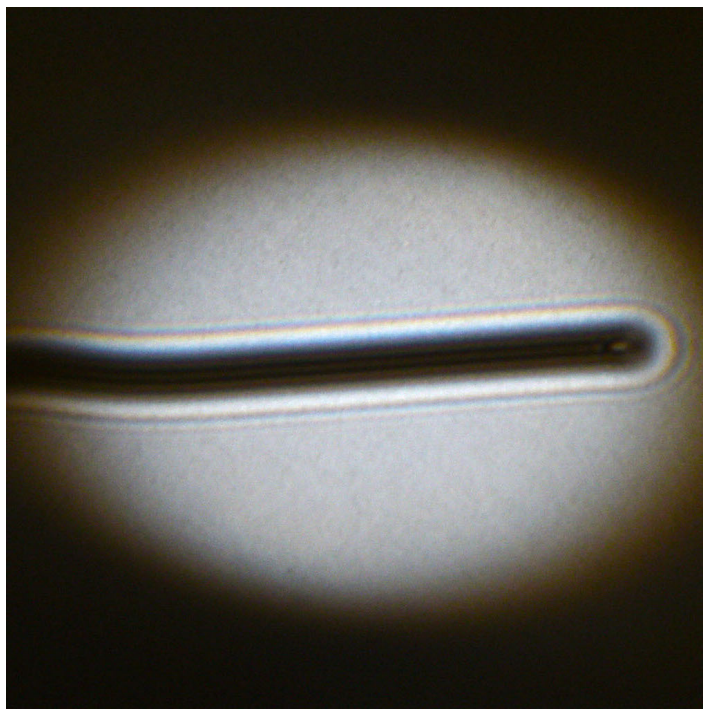


Figura 4.11: Frange di diffrazione prodotte da un filo di ferro di diametro pari a 1,2 mm, osservate utilizzando luce solare. Sono visibili più frange interne nella regione d'ombra. La distanza tra il foro e l'ostacolo è di circa 160 cm, mentre quella tra l'ostacolo e lo schermo è di circa 130 cm. L'immagine è riportata senza modifiche.

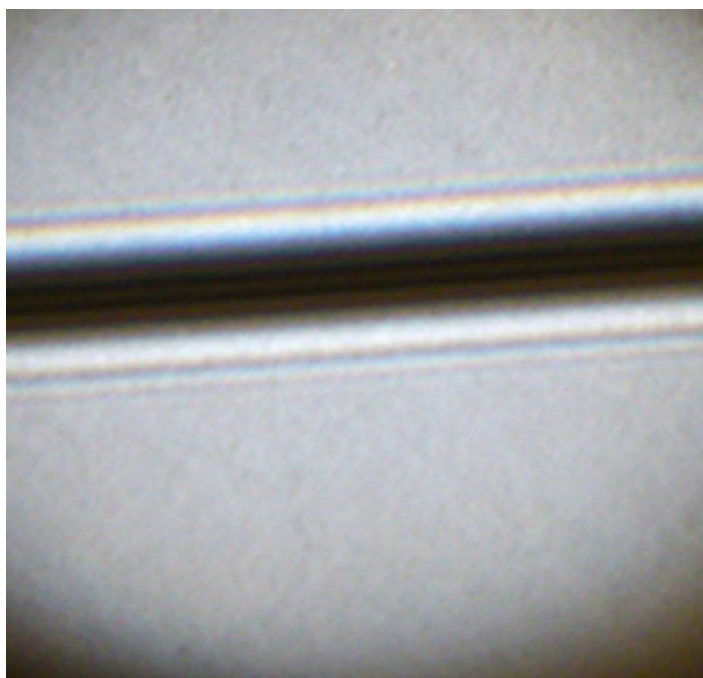


Figura 4.12: Ingrandimento della figura precedente, realizzato per evidenziare più chiaramente le frange interne prodotte dal filo di ferro di diametro pari a 1,2 mm.

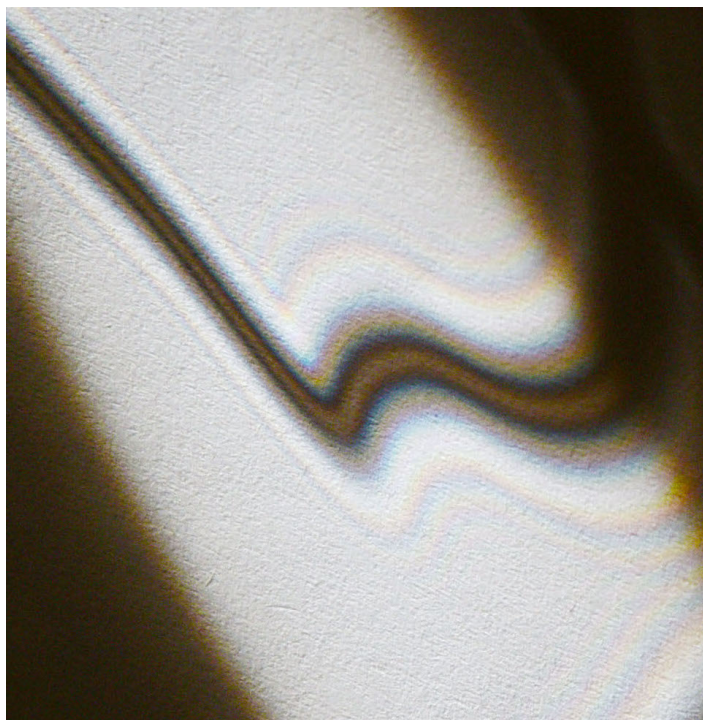


Figura 4.13: Frange di diffrazione prodotte da un filo di ferro di diametro pari a circa 0,9 mm, osservate su un foglio bianco leggermente inclinato rispetto al cono di luce. La distanza tra il foro e l'ostacolo è di circa 160 cm, mentre quella tra l'ostacolo e lo schermo è di circa 130 cm. L'immagine è riportata senza modifiche.

Grimaldi prosegue descrivendo il comportamento delle frange interne: quando i bordi dell'ostacolo sono rettilinei, le frange mantengono il parallelismo con i lati dell'ombra, mentre in prossimità degli angoli appaiono all'interno dell'ombra frange simili alle nappe di un galero (Grimaldi, 1665, Propositio I, pp. 1–11):

Infine si osservano le suddette frange luminose visibili nell'ombra mantenere il parallelismo con i lati estremi dell'ombra, ed essere rette fin tanto che questi saranno retti; ma, quando l'ombra sia angolata, si osservano curvare attorno all'angolo dell'ombra. In verità, inoltre, nel detto angolo appaiono sull'ombra frange luminose più brevi, anch'esse curve, ma simili alle nappe, che pendono in un galero, dopo una qualche elevazione delle medesime, da entrambe le parti, come mostra la figura allegata, nella quale, oltre alle quattro frange sopra discusse ed estese nell'ombra ABC da A verso C e da B verso D, che curvano vicino all'angolo dell'ombra, si notano anche tra D e C poche frange luminose alquanto più brevi, incurvate da una parte e dall'altra rispetto alla linea di mezzo DC, convergenti in D, ma in nessun modo seguaci del percorso di quelle che si estendono in lunghezza lungo i lati dell'ombra. Queste frange più brevi e più luminose presso l'angolo dell'ombra appaiono anche se la lamina, o verga, non è completamente inserita nel cono di luce, ma solo sino ad un estremo, peraltro terminato da qualche

angolo, e sono a volte di più, a volte di meno a seconda della larghezza della lamina, o verga, inserita nel cono. Perché se quella lamina, o verga, è molto sottile, ma comunque adatta a proiettare un'ombra contenente frange luminose, che si estendano lungo la sua lunghezza, appariranno esse stesse curve vicino all'estremo di tale ombra, come si vede nella figura vicina all'estremo B, né nell'estremo dell'ombra manterranno perfetta separazione, e parallelismo, sebbene esse siano rappresentate così in figura all'estremo A, dove è rappresentata un'ombra tronca. Parimenti seguono la rotondità della curvatura attorno al detto estremo dell'ombra le frange colorate, o luminose, che, estese al di fuori dell'ombra, procedono parallele ad entrambi i lati, in modo che sarà facile comprendere da queste quelle che sono ombreggiate nel precedente schema dell'ombra, per cui ci asteniamo dall'esprimere un nuovo schema di quelle curvature.

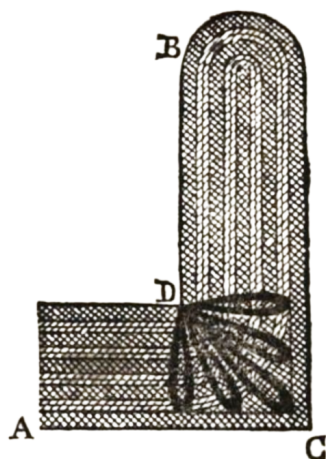


Figura 4.14: Frange interne osservate da Grimaldi in prossimità degli angoli dell'ombra e paragonate dall'autore alle nappe di un galero (Grimaldi, 1665, Propositio I, p. 5).

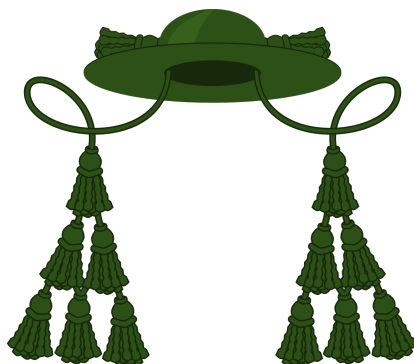


Figura 4.15: Esempio di galero, copricapo ecclesiastico con cordoni e nappe laterali.



Figura 4.16: Frange interne osservate in prossimità dello spigolo di un oggetto opaco. L'andamento delle bande luminose richiama la descrizione di Grimaldi, che paragona queste frange alle nappe di un galero. L'esperimento è stato realizzato utilizzando luce solare. L'immagine è riportata senza modifiche.

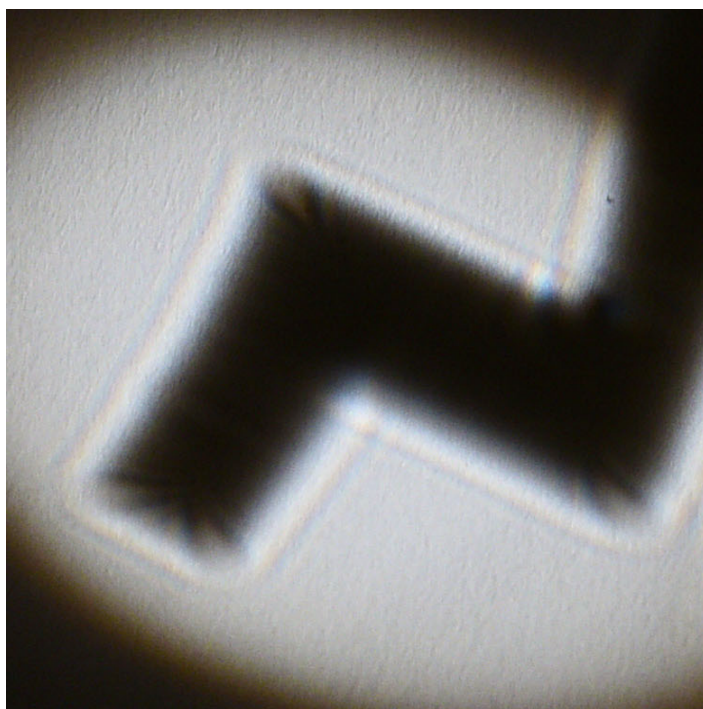


Figura 4.17: Frange interne osservate in prossimità di più spigoli dell'ombra. L'esperimento è stato realizzato utilizzando luce solare. L'immagine è riportata senza modifiche.

Grimaldi conclude questa parte sottolineando un aspetto importante: per quanto la sua descrizione sia dettagliata, le parole non bastano a far comprendere pienamente il fenomeno osservato. Le frange luminose ai margini e all'interno dell'ombra erano infatti qualcosa di nuovo, difficile da immaginare e da riconoscere se non attraverso l'esperienza diretta. Per questo motivo l'autore invita, in modo esplicito, a ripetere gli esperimenti proposti. Solo osservando il fenomeno è possibile davvero comprenderlo (Grimaldi, 1665, Propositio I, pp. 1–11):

Omettiamo anche osservazioni meno importanti che non sono funzionali al nostro oggetto, né necessarie, e che in maniera facile e insieme divertente potrà fare da sé chi vorrà intraprendere questi esperimenti. Ma li fa anche chiunque vorrà comprendere più chiaramente ciò che abbiamo esposto, perché da nessuna esposizione fatta a parole possiamo comprendere compiutamente, quanto occorre, la cosa stessa.

Questa conclusione appare particolarmente significativa anche alla luce dei motivi che hanno portato alla realizzazione della replica sperimentale. Come si è visto nel Paragrafo 1.2, la *storia della scienza sperimentale* ritiene che la conoscenza non sia contenuta soltanto nei testi o nei risultati, ma anche nelle pratiche operative attraverso cui i fenomeni vengono indagati.

4.3 *Experimentum secundum*

A differenza dell'*Experimentum primum*, in cui l'attenzione era rivolta soprattutto alla comparsa delle frange ai margini e all'interno dell'ombra di un ostacolo, nel secondo esperimento l'autore propone una configurazione a due fori, con l'obiettivo di confrontare la base luminosa effettivamente osservata sullo schermo con quella che si sarebbe dovuta ottenere assumendo la sola propagazione rettilinea della luce, come visibile in Fig. 4.18.

L'esperimento prevede che la luce solare entri nella camera oscura attraverso un primo foro molto piccolo, indicato con CD . Il cono luminoso così prodotto viene poi intercettato, a una certa distanza, da una seconda lamina, nella quale è praticato un foro più ampio, GH . La luce che attraversa questa seconda apertura genera a sua volta un nuovo cono, la cui base viene raccolta su un piano bianco.

Grimaldi osserva che la base luminosa ottenuta, indicata con IK , risulta sensibilmente più larga di quella che si sarebbe dovuta formare secondo la sola propagazione rettilinea della luce, indicata con NO e calcolata considerando i raggi passanti attraverso i due fori. L'autore aggiunge inoltre un particolare importante: la base illuminata

non appare uniforme, ma presenta una zona centrale di luce chiara e, agli estremi, colorazioni distinte, con il rosso da un lato e un blu intenso dall'altro (Grimaldi, 1665, Propositio I, pp. 1–11):

Aperto in una finestra di legno di una stanzetta bene oscurata un foro dello spessore di un dito circa, gli si applichi una lamina opaca sottile AB, per il cui forellino strettissimo CD la luce del Sole entrando prende la forma di un cono: su questo si ponga a grande distanza dietro la lamina AB ad angolo retto la lamella EF, che parimenti abbia un piccolo foro GH, dal quale sia ricevuta una parte del detto cono di luce tagliato perpendicolarmente dalla lamina EF in un punto nel quale la sua base superi notevolmente la larghezza del foro GH, in modo che il foro sia completamente illuminato, o riempito di luce. Di nuovo questa stessa luce, che entra nel secondo foro GH, si forma, o procede in forma di cono, o quasi cono, che tagliato ortogonalmente, e terminato da una superficie piana pulita e candida, esibirà su di essa la sua base luminosa IK notevolmente maggiore, di quanto sarebbe per raggi trasmessi in linea retta da entrambi i fori, e non solo se passanti per gli estremi dei fori appartenenti alla medesima parte, come sono i raggi CGL e DHM, ma anche alle parti opposte, come sono DGN e CHO.

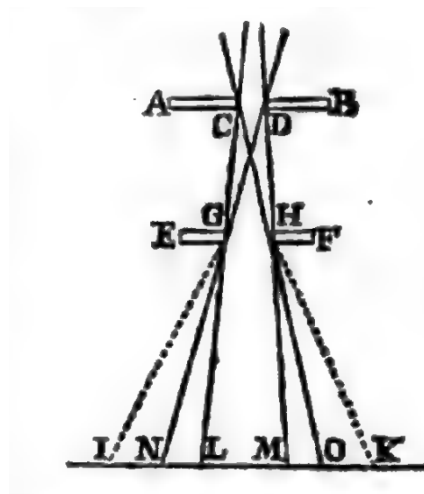


Figura 4.18: Schema del secondo esperimento sulla diffrazione (Grimaldi, 1665, Propositio I, p. 9).

Ciò risultò manifesto dopo aver ripetuto più volte l'esperimento, osservando quanto apparisse di fatto esser larga la base IK e calcolando quanto dovesse essere la base NO per raggi rettilinei e incrociati tra i lati dei due fori. Il calcolo poi fu tanto evidente quanto facile. Si divida un'oncia, cioè 1/12 di piede antico romano di uso più frequente, in 300 parti uguali e si usi come misura dei diametri GH e CD e anche della distanza DG, che è sensibilmente uguale alla distanza CG, e GN, che sensibilmente è uguale alla distanza GL; fu facile conoscere nel triangolo CDG l'angolo CGD e così NGL avente lo stesso vertice, e di conseguenza anche NL nel triangolo GLN, del quale sono

dati i lati, e l'angolo G tra di essi compreso. Infine la retta LO fu immediatamente acquisita, facendo come CG sta a GH , così CL , composta di due date, sta a LO per Euclide. Poi aggiungendo NL a LO si ottiene NO , che cercavamo, e che sempre è molto minore dell'osservata IK .

Perché l'esperimento avvenga correttamente, si richiede una luce solare intensa, perché, come si disse, i fori devono essere sottili, in particolare il primo CD , e inoltre il piano candido, nel quale si raccoglie la base IK , deve distare molto dal foro GH , dato che essa eccede poco o nulla la base NO dedotta dal calcolo. Noi abbiamo usato per lo più per CD quattro o cinque parti, e per GH 25 o 30 di tali parti. Ma le distanze DG e GN siano almeno 12 di tali piedi. All'osservazione fatta in estate, circa a mezzogiorno e con cielo serenissimo, sempre fu evidente l'eccesso della base osservata IK sopra la dedotta NO , tanto che è vano temere pericolo di errore o di sottilizzare con inutili critiche l'aver assunto isosceli i triangoli CGD e NGL . Infine, non si deve omettere 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.

In questo esperimento Grimaldi fornisce delle misure al lettore, anche se la loro interpretazione è controversa. Considerando infatti il piede romano antico pari, secondo Riccioli, a circa 308 mm (Bettini, 2015), le distanze indicate dall'autore sono piuttosto grandi: i tratti DG e GN , che Grimaldi prescrive non inferiori a dodici piedi, corrispondono infatti a circa 3,7 m ciascuno. Se si interpretano invece le dimensioni dei fori come parti dell'oncia romana divisa in 300 parti, il primo foro CD , di 4 o 5 parti, risulta dell'ordine di 0,3-0,4 mm, mentre il secondo foro GH , di 25 o 30 parti, misura circa 2-2,5 mm. Ad ogni modo, l'apparato complessivo richiedeva dunque uno spazio di almeno 7 m, oltre a un ambiente ben oscurato e a una luce solare particolarmente intensa.

Le dimensioni disponibili in laboratorio non hanno permesso di condurre una replica fedele della configurazione descritta da Grimaldi. Si è quindi proceduto a una prova adattata, mantenendo il foro da 1 mm già impiegato nell'esperimento precedente e utilizzando come distanze dell'allestimento circa 110 cm tra il primo foro e la seconda apertura, e circa 160 cm tra quest'ultima e lo schermo. In questo caso, al posto dell'ostacolo opaco è stata inserita una lamina dotata di apertura circolare, così da riprodurre almeno la struttura concettuale dell'*Experimentum secundum*: un primo foro genera il cono di luce solare, una seconda apertura ne intercetta una parte e la figura risultante viene raccolta su un piano bianco. Sono state effettuate diverse prove con fori realizzati su cartoncino, ma i risultati sono stati sempre poco soddisfacenti: i bordi irregolari delle aperture, anche quando queste erano praticate con accortezza, rendevano la macchia luminosa piuttosto confusa. Il risultato ottimale si è ottenuto utilizzando un foro circolare già tagliato in fabbrica, con un diametro pari a 4 mm.



Figura 4.19: Figura ottenuta utilizzando un foro realizzato manualmente su cartoncino: la macchia luminosa appare poco definita. L'immagine è riportata senza modifiche.



Figura 4.20: Figura di diffrazione ottenuta utilizzando un'apertura circolare preformata, di produzione industriale e di diametro pari a circa 4 mm. Sono ben visibili anelli concentrici luminosi, riconducibili alla diffrazione di Fresnel da apertura circolare. L'immagine è riportata senza modifiche.

4.4 Imparare a vedere la diffrazione

Quali difficoltà operative e percettive emergono dalla replica sperimentale degli esperimenti di Grimaldi? Il primo elemento emerso durante la ricostruzione sperimentale delle osservazioni grimaldiane riguarda senza dubbio la necessità di *imparare a vedere la diffrazione*.

Con questa espressione si intende un vero e proprio processo di familiarizzazione, dapprima con l'apparato sperimentale e successivamente con il fenomeno stesso. Prima ancora di riuscire a distinguere le frange, è stato infatti necessario comprendere come disporre i diversi elementi del *set-up*: dove collocare l'ostacolo rispetto al cono luminoso, in che modo fissarlo, a quale distanza porre lo schermo, da quale posizione osservare le frange e come seguire gli spostamenti progressivi dell'immagine prodotta dal foro. Quest'ultimo aspetto ha rappresentato un vincolo pratico con cui è stato necessario confrontarsi continuamente: durante le osservazioni, infatti, il fascio si sposta seguendo il moto apparente del Sole e questo richiede un adattamento continuo dell'intero apparato, oltre a lasciare una finestra utile di meno di due ore per ciascuna sessione di osservazioni.

Molte di queste difficoltà erano state naturalmente previste già in fase di progettazione, ma sono diventate pienamente tangibili soltanto nella pratica. Le condizioni effettive dell'esperimento hanno infatti reso più complesso il controllo di ogni singolo elemento: il vento muoveva talvolta i cartoncini utilizzati per oscurare le finestre, causando vibrazioni sulla figura osservata sullo schermo; la presenza di piccole fessure nelle finestre impediva di ottenere un buio ottimale; anche minime variazioni della luce diffusa nella stanza riducevano il contrasto dell'immagine e rendevano più difficile la distinzione delle frange, soprattutto di quelle meno intense o di quelle presenti all'interno dell'ombra geometrica.

A questa prima dimensione, strettamente legata all'apprendimento del funzionamento dell'apparato e progressivamente migliorata attraverso prove ripetute, se ne è aggiunta una seconda, riguardante direttamente l'osservatore e ripresentatasi puntualmente a ogni nuova sessione di osservazioni. L'occhio necessita infatti di alcuni minuti per adattarsi all'oscurità. Di conseguenza, ogni allontanamento dall'apparato, così come ogni modifica della posizione dell'ostacolo o della distanza dello schermo, ha comportato una nuova fase di adattamento visivo. Questo aspetto si è rivelato particolarmente rilevante sia perché il tempo disponibile per le osservazioni era già di per sé limitato, a causa del movimento apparente del Sole, sia perché il fenomeno richiedeva uno sforzo percettivo non immediato. Le frange, soprattutto quando risultavano sottili o poco intense, dovevano essere ricercate con attenzione, spesso osservando lo schermo

da una distanza molto ravvicinata. Quando quest'ultimo era collocato sul pavimento, come è avvenuto nella maggior parte delle osservazioni, è stato necessario abbassarsi o persino sdraiarsi a terra per riuscire a distinguerle a occhio nudo. Da questo punto di vista, un accorgimento molto valido è stato quello di inclinare lo schermo, come suggerito dallo stesso Grimaldi, in modo da rendere le frange interne più facilmente distinguibili.

Per le ragioni fin qui esposte, la disponibilità di un banco ottico e di un apparato preliminare si è rivelata particolarmente utile. Sebbene tale configurazione non riproducesse pienamente le condizioni dell'esperimento storico, essa ha permesso di acquisire familiarità con la disposizione degli elementi e, soprattutto, di educare progressivamente l'occhio al riconoscimento delle frange. Questa esigenza è emersa con particolare evidenza durante le prove condotte alla presenza di osservatori non abituati al fenomeno: in più occasioni, infatti, alcuni dettagli ormai facilmente riconoscibili da chi aveva ripetuto numerose volte l'esperimento, con o senza banco ottico, non sono risultati immediatamente visibili a chi osservava la figura per la prima volta, se non dopo essere stati esplicitamente indicati. Un aspetto analogo è stato riscontrato anche in altri studi dedicati alla replica di esperimenti storici di ottica, come quello di Mercier (2022).

Un altro aspetto rilevante riguarda ovviamente le condizioni meteorologiche, che rappresentano uno dei limiti più significativi per chi voglia riprodurre le osservazioni di Grimaldi utilizzando luce solare. La riuscita degli esperimenti richiede infatti una luce intensa e un cielo sereno: anche il passaggio temporaneo di una nuvola davanti al Sole può ridurre bruscamente la luminosità del fascio e impedire l'osservazione delle frange. Questo vincolo rende l'esperimento dipendente da condizioni esterne non controllabili e spiega perché Grimaldi insistesse continuamente sulla necessità di operare in estate e con un cielo serenissimo.

4.5 Grimaldi alla prova della replica

Le difficoltà emerse durante la replica offrono alcuni elementi utili anche per comprendere meglio il modo in cui Grimaldi dovette condurre le proprie osservazioni. Se nel precedente paragrafo l'attenzione è stata rivolta soprattutto all'esperienza dell'autrice, qui la replica diventa uno strumento per interrogare il metodo sperimentale e le scelte adottate dal gesuita bolognese.

Un primo aspetto riguarda le condizioni necessarie alla riuscita dell'esperimento. Come già detto, Grimaldi insiste più volte sulla necessità di un cielo sereno e di una luce solare molto intensa, condizione che la replica ha confermato in modo evidente. Da questo punto di vista, è utile ricordare anche la posizione di Grimaldi all'interno

del collegio bolognese. Rimasto fino alla morte assistente di Riccioli e impegnato nell'attività di insegnamento, egli non poteva dedicarsi interamente alla realizzazione di questi esperimenti. Pertanto, la messa a punto di osservazioni così delicate, sensibili alle condizioni meteorologiche, dovette richiederli un lavoro ancor più prolungato, fatto di tentativi ripetuti e di occasioni favorevoli colte nel corso degli anni.

A questa difficoltà si aggiunge un elemento ancora più significativo. Chi replica oggi l'esperimento sa quasi esattamente cosa cercare: conosce l'esistenza delle frange interne ed esterne, dispone di una descrizione del fenomeno e può orientare l'osservazione verso determinati dettagli. Grimaldi, al contrario, non poteva partire da questa consapevolezza: le frange non costituivano per lui un fenomeno atteso, né potevano essere previste in alcun modo sulla base delle conoscenze ottiche disponibili alla metà del Seicento. È quindi del tutto plausibile pensare che la loro scoperta sia avvenuta per caso sperimentando con fasci molto sottili di luce, probabilmente in continuità con le osservazioni astronomiche svolte insieme a Riccioli.

Colpisce inoltre l'accuratezza con cui Grimaldi descrisse i risultati ottenuti. Nelle sue osservazioni egli distingue con precisione le frange esterne, quelle interne e le variazioni di queste prodotte da ostacoli di forma diversa. Tale livello di dettaglio appare tanto più notevole se si considera che alcune di queste caratteristiche sarebbero state osservate soltanto da Young e Fresnel, quasi due secoli più tardi, mentre sfuggirono persino a sperimentatori come Newton, come si vedrà nel prossimo capitolo.

Le difficoltà incontrate nella replica permettono inoltre di riflettere su ciò che Grimaldi avrebbe potuto fare, ma che verosimilmente non fece. L'uso di uno specchio, o di un eliostato come quello messo a punto proprio in quegli anni da Giovanni Alfonso Borelli, avrebbero potuto semplificare notevolmente l'esperimento, consentendo di dirigere il fascio solare in modo più stabile e orizzontale all'interno della stanza. Lo stesso Young, più tardi, introdusse uno specchio proprio per rendere più controllabile il percorso della luce. Nel caso di Grimaldi, tuttavia, l'impiego di un simile accorgimento appare poco probabile. Nella *Physico-Mathesis* egli menziona gli specchi in altre occasioni, quando effettivamente se ne servì all'interno degli esperimenti. Il fatto che non compaiano nella descrizione degli esperimenti di diffrazione, altrimenti molto dettagliata, rende difficile pensare a una loro omissione.

Un discorso analogo può essere fatto per la lente d'ingrandimento. Grimaldi non dichiara di averne fatto uso, sebbene essa sarebbe stata particolarmente utile nell'osservazione delle frange più sottili, soprattutto di quelle interne all'ombra geometrica. La replica ha mostrato infatti che tali dettagli richiedono spesso un'osservazione molto ravvicinata e condizioni di contrasto estremamente favorevoli. Anche in questo caso, l'assenza di riferimenti espliciti induce a pensare che egli osservasse prevalentemente

a occhio nudo, affidandosi alla propria capacità visiva e alla ripetizione di numerose prove. A conferma di ciò vi è il suggerimento da lui proposto di osservare le frange inclinando lo schermo bianco: avrebbe potuto dire lo stesso per un'eventuale lente.

La replica rende poi ancora più evidente la difficoltà concreta del lavoro svolto da Grimaldi: le stesse condizioni che hanno complicato l'osservazione moderna, come il movimento del fascio solare, la necessità di adattare continuamente l'apparato, la debolezza delle frange, la posizione talvolta scomoda dello schermo, dovettero necessariamente presentarsi anche a lui. L'eventualità di osservare la figura proiettata a terra, o comunque in posizioni poco agevoli, assume poi un rilievo ulteriore se si considera la salute notoriamente cagionevole del gesuita. Anche Grimaldi, dunque, dovette *imparare a vedere la diffrazione* e il fatto che, al termine della descrizione, egli inviti il lettore a ripetere l'esperimento mostra che era pienamente consapevole delle sue difficoltà.

Ci si potrebbe chiedere, infine, come mai Grimaldi non fornisce delle misure delle frange osservate. Egli ne indica la posizione, l'andamento, il numero e la successione dei colori, ma non misura né la loro larghezza né la distanza dal margine dell'ombra. Se nell'Ottocento Fresnel riuscirà a quantificare questi dettagli con estrema precisione utilizzando un micrometro, nelle condizioni in cui operava il gesuita una misura rigorosa risultava quasi impossibile. Come già discusso nel paragrafo 2.6.3, infatti, Grimaldi e il suo gruppo non presero parte ai contemporanei sviluppi di questo strumento. Oltre all'evidente difficoltà di misurare a occhio nudo frange così piccole e deboli, la procedura era anche ostacolata dal fatto che il fascio solare si spostava continuamente, richiedendo aggiustamenti costanti dell'apparato entro finestre temporali ridottissime. Inoltre, se Grimaldi lavorava da solo, il che è altamente probabile dato che non disponeva di assistenti, controllare l'esperimento e registrare al tempo stesso le misure sarebbe stato estremamente difficile. Va però ugualmente considerato che questa scelta non è isolata: anche nel resto della sua opera il gesuita ricorre molto raramente a misure quantitative.

4.6 Potenzialità didattiche

Nella presente ricerca, la replica sperimentale viene impiegata come strumento per riportare alla luce quella *tacit knowledge* di cui parlava Polanyi (1966): le difficoltà che si incontrano durante la realizzazione dell'esperimento, le condizioni necessarie per osservare il fenomeno e le scelte compiute da Grimaldi. Come emerge dal Capitolo 1, lo stesso approccio può tuttavia offrire interessanti spunti di applicazione anche in ambito didattico.

L'ottica è considerata uno degli ambiti della fisica in cui gli studenti incontrano maggiori difficoltà concettuali, tanto nello studio dei fenomeni geometrici quanto in quello dei fenomeni ondulatori (Tural, 2015). La familiarità quotidiana con specchi, ombre,

colori e immagini non implica infatti il possesso di modelli adeguati per interpretarli. Al contrario, proprio l'esperienza comune che gli studenti possiedono nei confronti dei fenomeni luminosi può favorire la formazione di *misconceptions*, ossia concezioni intuitive e personali spesso errate e capaci di persistere anche dopo l'insegnamento formale (Fetherstonhaugh et al., 1987).

Tra i numerosi studi svolti in quest'ambito, quello di Goldberg e McDermott (1986) ha, per esempio, mostrato come molti studenti concludano lo studio dell'ottica geometrica senza riuscire a collegare la descrizione formale della formazione delle immagini per riflessione speculare con ciò che osservano effettivamente in uno specchio. Questo risultato è particolarmente significativo, dal momento che uno degli obiettivi fondamentali dell'insegnamento della fisica dovrebbe essere proprio quello di mettere gli studenti nella condizione di poter collegare i principi fisici ai fenomeni osservati nella vita quotidiana.

Le difficoltà diventano ancora più evidenti nel passaggio dall'ottica geometrica a quella ondulatoria. Fenomeni come interferenza e diffrazione richiedono infatti di superare l'idea intuitiva secondo cui la luce si propaghi sempre in linea retta, ma anche di comprendere che i modelli geometrico e ondulatorio non sono spiegazioni reciprocamente esclusive: ciascuno risulta adeguato entro determinate condizioni e, in alcune situazioni, i due devono essere utilizzati congiuntamente. Colin e Viennot (2001) hanno mostrato che anche studenti universitari incontrano notevoli difficoltà nell'analizzare situazioni nelle quali intervengono contemporaneamente questi due modelli. Una parte del problema sembra dipendere dalla lettura superficiale delle rappresentazioni grafiche comunemente impiegate nello studio dell'ottica e dalla scarsa consapevolezza del significato attribuito a queste.

Risultati analoghi sono stati anche ottenuti da Ambrose et al. (1999), che hanno esaminato la comprensione della diffrazione da fenditura singola e dell'interferenza da doppia fenditura. Molti studenti, tanto nei corsi introduttivi quanto in quelli più avanzati, non comprendevano le caratteristiche fondamentali dei modelli fisici e non riuscivano a riconoscere le condizioni nelle quali applicare ciascuno di essi. Anche gli studenti capaci di risolvere correttamente i problemi standard dei manuali mostravano difficoltà nel collegare i risultati all'effettivo comportamento della luce. Tali difficoltà persistevano, in alcuni casi, persino nei corsi di fisica moderna e di meccanica quantistica, mostrando come l'avanzamento nel percorso universitario non determini automaticamente il superamento delle incomprensioni relative a questi concetti.

Alla luce di tali questioni, la replica degli esperimenti di Grimaldi potrebbe essere inserita nella progettazione di un percorso didattico rivolto agli studenti della scuola secondaria superiore, dei primi anni universitari o a programmi di formazione per

insegnanti. L'impiego della storia della scienza nell'insegnamento della fisica non costirebbe, del resto, un approccio privo di precedenti. Si pensi, per esempio, ai numerosi contributi di Heering (2000, 2009, 2010) o, restando nel campo dell'ottica, al percorso sperimentato da Galili e Hazan (2000). In quest'ultimo caso, l'insegnamento dell'ottica rivolto agli studenti della scuola secondaria è stato costruito attraverso materiali ricchi di contenuti storici, selezionati appositamente per affrontare alcune difficoltà note nella comprensione dei fenomeni coinvolti. I risultati ottenuti hanno mostrato, tanto sul piano qualitativo quanto su quello quantitativo, effetti positivi sull'apprendimento da parte degli studenti, riconsiderando anche l'idea secondo cui i modelli storici sarebbero necessariamente troppo complessi per essere presentati a scuola. Al contrario, quando vengono scelti in funzione delle *misconceptions* già presenti, possono contribuire a rendere l'insegnamento della fisica, oltre che efficace, pure coinvolgente per un maggior numero di studenti.

Le esperienze di Grimaldi, replicate nel presente studio, potrebbero essere rielaborate e inserite in percorsi differenti, calibrati sugli obiettivi formativi e sul livello degli studenti coinvolti.

Prima di mostrare il risultato degli esperimenti, si potrebbe per esempio chiedere agli studenti di prevedere, sulla base dell'ottica geometrica, quale ombra dovrebbe essere prodotta da un piccolo ostacolo inserito nel cono di luce. Soltanto in un secondo momento verrebbe realizzato l'esperimento, invitandoli a osservare con attenzione le dimensioni dell'ombra e la comparsa delle *series lucidae* lungo i suoi margini. La discrepanza tra modello e osservazione farebbe emergere i limiti di una spiegazione fondata esclusivamente sulla propagazione rettilinea, così come avvenuto per Grimaldi.

È interessante osservare infatti come le difficoltà incontrate dagli studenti nel passaggio dal modello della propagazione rettilinea a quello ondulatorio presentino una significativa analogia con le resistenze emerse nella storia dell'ottica. Anche diversi studiosi del Seicento, pur confrontandosi con fenomeni che mettevano in discussione i limiti dell'ottica geometrica, non riuscirono ad abbandonare immediatamente il modello dei raggi né a interpretare correttamente la diffrazione. Non sorprende, quindi, che gli studenti faticino a compiere in poche lezioni un cambiamento concettuale che, nella storia della scienza, richiese oltre un secolo per potersi affermare.

Secondo Bravo e Pesa (2015), affinché gli studenti possano superare le difficoltà, è necessario analizzare in modo più approfondito proprio gli apparati sperimentali impiegati negli esperimenti, prestando attenzione alle dimensioni dell'apertura o dell'ostacolo, alle distanze tra i diversi elementi, alle caratteristiche o alla coerenza della sorgente luminosa.

Uno dei pregi fondamentali della replica di Grimaldi risiede senza dubbio nella

semplicità dell'apparato sperimentale. Come osservano Casamayou et al. (2025), le attività laboratoriali di ottica si rivelano fondamentali nell'insegnamento della materia, ma spesso richiedono l'impiego di strumenti particolarmente costosi e non sempre disponibili nelle diverse istituzioni. Anche laddove gli strumenti siano presenti, il tempo concesso agli studenti per lavorarci risulta spesso insufficiente: per questa ragione, vengono sempre più utilizzate simulazioni digitali.

Da questo punto di vista, la replica degli esperimenti di Grimaldi offre un vantaggio significativo, poiché può essere realizzata con materiali semplici e facilmente reperibili, quali cartone o lamine opache, piccoli fori, fili, spilli e fogli bianchi. La possibilità di modificare agevolmente il diametro delle aperture, la forma degli ostacoli e le distanze tra i diversi elementi consente inoltre agli studenti di esplorare numerose configurazioni. Essi potrebbero, per esempio, osservare come varia il pattern al cambiare delle dimensioni del foro, della posizione dello schermo o della natura dell'ostacolo, sostituendolo con fili, capelli, piume o altri materiali.

Non mancherebbero, tuttavia, alcune difficoltà operative. Come discusso nel paragrafo 4.4, imparare a riconoscere le frange richiede tempo e numerosi tentativi, il cui esito dipende strettamente dalle caratteristiche del luogo e dalle condizioni nelle quali viene condotto l'esperimento. Questa necessità di procedere per prove successive potrebbe quindi difficilmente conciliarsi con la durata limitata delle lezioni. Per superare questo limite, la formazione degli insegnanti potrebbe assumere un ruolo decisivo: il docente sperimenterebbe prima l'allestimento, imparando così a riconoscere il fenomeno e individuando le condizioni più ideali per poter riproporre l'attività all'interno della classe.

In alternativa, si potrebbe proporre agli studenti un'attività da svolgere a casa, eventualmente durante i mesi estivi, chiedendo di documentare fotograficamente le configurazioni sperimentate e i risultati ottenuti. Il materiale raccolto potrebbe essere successivamente discusso in classe, confrontando le osservazioni riuscite con i tentativi non andati a buon fine. Anche l'insuccesso sperimentale avrebbe così un valore formativo, poiché permetterebbe di riflettere sulle condizioni materiali e ambientali necessarie per rendere visibile il fenomeno.

Un'ulteriore difficoltà è quella riguardante le condizioni meteorologiche, che rendono complessa la programmazione dell'attività e potrebbero limitarne la praticabilità in determinate località o periodi dell'anno. Come avvenuto nella presente ricerca, il problema potrebbe essere affrontato ricorrendo inizialmente a un banco ottico e a una sorgente artificiale, così da consentire agli studenti di familiarizzare con il fenomeno. Il successivo confronto tra luce solare, lampada e laser offrirebbe inoltre l'occasione per discutere il ruolo delle caratteristiche della sorgente, in particolare della monocromaticità

e della coerenza della luce.

La proposta si presterebbe inoltre alla costruzione di un percorso interdisciplinare. Nei curricula che lo consentono, l'attività sperimentale potrebbe essere accompagnata dalla lettura e dall'analisi di alcuni passi della *Physico-Mathesis* nella lingua originale.

L'integrazione tra fonte storica, attività sperimentale e discussione teorica permetterebbe inoltre di riflettere su alcuni aspetti della natura della scienza. Il caso di Grimaldi mostra, anzitutto, come una scoperta possa nascere dal riconoscimento di un risultato inatteso rispetto alle previsioni dell'ottica geometrica. Allo stesso tempo, consente di comprendere che i dati sperimentali non conducono necessariamente a un'unica interpretazione: Grimaldi osservò correttamente il fenomeno, ma cercò di spiegarlo servendosi delle categorie concettuali disponibili nel suo tempo, richiamandosi per esempio alla fluidità della luce e alla porosità dei corpi.

Un ulteriore elemento di particolare interesse sarebbe rappresentato dall'impiego della luce solare, anziché del laser comunemente utilizzato nelle esperienze didattiche sulla diffrazione. Il laser permette certamente di ottenere figure più riconoscibili, ma rischia di presentare il fenomeno in condizioni fortemente idealizzate e lontane tanto dall'esperienza storica di Grimaldi quanto dall'osservazione quotidiana. L'utilizzo di luce solare consentirebbe invece agli studenti di confrontarsi con le difficoltà dovute all'impiego di una sorgente scarsamente coerente e questo richiederebbe maggiore attenzione nell'osservazione e una riflessione più consapevole sulle caratteristiche della sorgente. Il confronto tra le figure prodotte dal Sole e quelle ottenute con una lampada o con un laser potrebbe infine diventare parte integrante dell'esperimento, permettendo ai docenti di introdurre riflessioni riguardanti la coerenza o l'estensione della sorgente.

Come si è visto, la replica apre molte prospettive sul piano didattico, che potranno essere approfondite in ricerche successive per valutarne concretamente l'efficacia e individuare le modalità più adatte per introdurle all'interno di una proposta didattica.

4.7 L'esperimento dei due fori: Grimaldi ha anticipato Young?

La replica svolta nella presente tesi ha offerto l'occasione per prendere in considerazione anche un'altra osservazione descritta da Grimaldi nella sua *Physico-Mathesis*. Si tratta della *Propositio XXII*, nella quale il gesuita bolognese formula una tesi che sembra richiamare al lettore moderno ciò che oggi comunemente si intende quando si parla di interferenza luminosa (Grimaldi, 1665, *Propositio I*, p. 187):

Lumen aliquando per sui communicationem reddit obscuriorem superficiem

*corporis aliunde, ac prius illustratam.*²

L'affermazione per Grimaldi è sorprendente perché sembra contraddire la funzione stessa della luce: illuminare, non oscurare. Il gesuita ne è pienamente consapevole e introduce infatti la proposizione sottolineandone il carattere apparentemente paradossale (Grimaldi, 1665, Propositio I, p. 187):

*Haec propositio paradoxum est, et ex terminis ipsis magnam praesefert improbabilitatem, quia luminis est illustrare, non autem obscurare superficiem corporis opaci, ad quam terminatur, et cui aliquo tandem modo se communicat.*³

Per dimostrare questa tesi, Grimaldi descrive un esperimento eseguito sempre all'interno di una camera oscura. In una finestra vengono praticati due piccoli fori, di cui non specifica le dimensioni, separati da una distanza tale che i due coni di luce solare entranti nella stanza si sovrappongano solo parzialmente su uno schermo bianco posto a una certa distanza. Su di esso compaiono così due immagini del Sole, parzialmente intersecate, come nella figura riportata nel trattato.

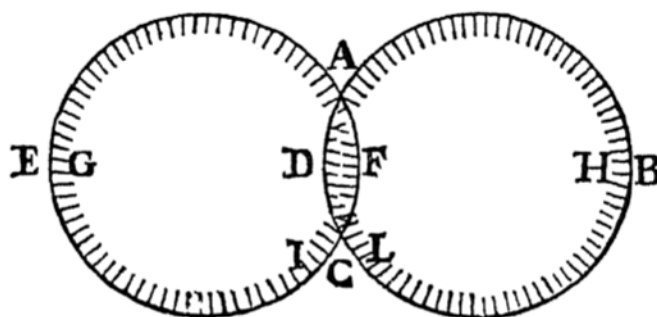


Figura 4.21: Esperimento con il doppio foro descritto da Grimaldi (Grimaldi, 1665, Propositio XXII, p. 187).

²«La luce, talvolta, col suo intervento, rende più oscura la superficie di un corpo già precedentemente illuminata da altra luce» [Traduzione a cura dell'autrice, con il supporto di strumenti di intelligenza artificiale]

³«Questa proposizione è un paradosso e, già nei suoi stessi termini, presenta una grande improbabilità, poiché è proprio della luce illuminare, non oscurare la superficie di un corpo opaco sulla quale essa termina e alla quale in qualche modo si comunica» [Traduzione a cura dell'autrice, con il supporto di strumenti di intelligenza artificiale]

Grimaldi osserva anzitutto separatamente l'immagine prodotta da ciascun foro. Chiudendone uno, nota che il disco luminoso formato dall'altro appare circondato da un anello più debole, meno illuminato rispetto alla parte centrale. Quando invece entrambi i fori sono aperti, le due immagini circolari si sovrappongono parzialmente. Come ci si aspetterebbe, la regione comune risulta più luminosa, poiché riceve luce da entrambi i fori. Tuttavia Grimaldi richiama l'attenzione su un fatto che gli appare particolarmente significativo: lungo i bordi della zona di sovrapposizione, i tratti *ADC* e *AFC* risultano sensibilmente più oscuri rispetto ad altri punti posti alla stessa distanza dal centro dei rispettivi dischi luminosi. Da qui l'idea che, in determinate condizioni, l'aggiunta di luce a luce possa produrre oscurità.

A prima vista, la lettura della proposizione sembra richiamare molto da vicino ciò che Thomas Young avrebbe mostrato circa un secolo e mezzo più tardi con il suo celebre esperimento della doppia fenditura. Occorre tuttavia distinguere con attenzione l'evidente somiglianza tra i due dispositivi dalla loro effettiva interpretazione fisica.

Nell'esperimento di Young, i due fori o le due fenditure sono infatti illuminati da una sorgente che fa sì che siano soddisfatte le condizioni di coerenza: per questo le onde luminose provenienti dalle due aperture possono interferire, producendo frange di interferenza costruttiva e distruttiva. Nella configurazione descritta da Grimaldi, invece, i due piccoli fori sono illuminati direttamente dal Sole. Poiché quest'ultimo è una sorgente estesa, vista dalla Terra sotto un angolo di circa mezzo grado, da un punto di vista fisico il gesuita non si trovava nelle condizioni di poter osservare alcun tipo di interferenza.

Tuttavia, come sostenuto da Savelli (1951) «*c'è una storia naturale dell'errore e per essa bisognerebbe mostrare la via donde è venuto quel qualche cosa che poteva dargli l'idea del fatto enunciato*». Pertanto, nella replica si è cercato di riprodurre quanto osservato da Grimaldi, utilizzando due fori di 2 mm di diametro, con una distanza tra i loro centri pari a 5 mm.

Nella Fig. 4.22 è riportata l'osservazione ottenuta con tale configurazione, raccogliendo le immagini su un foglio bianco posto a circa 1 m di distanza. Durante l'osservazione il foglio è stato avvicinato e allontanato più volte rispetto alla finestra, senza che comparisse alcuna alternanza regolare di frange chiare e scure, né alcuna colorazione riconducibile a un fenomeno di interferenza. Ciò che si osservava era piuttosto un bordo più scuro, localizzato in corrispondenza della regione di contatto e sovrapposizione tra le immagini solari. Tale bordo non si comportava come una frangia interferenziale, ma la spiegazione più plausibile è che possa essere ricondotto ad un effetto di contrasto visivo.

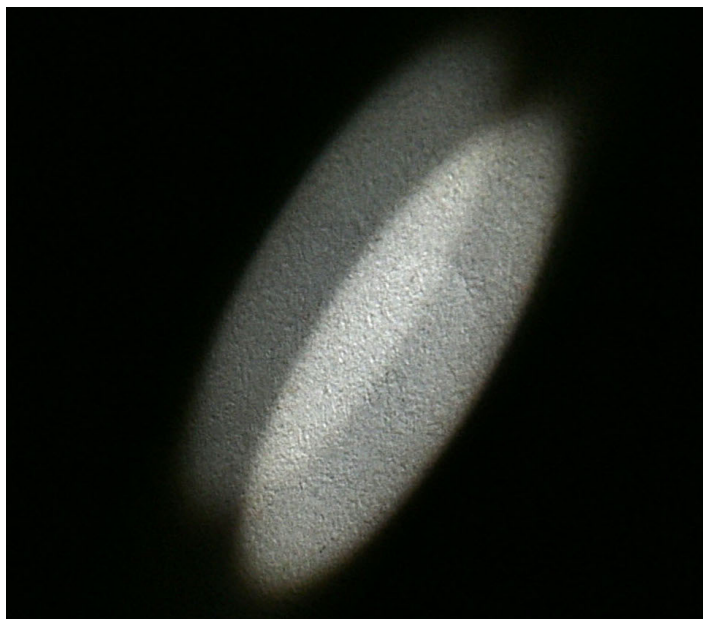


Figura 4.22: Replica dell'esperimento del doppio foro: sovrapposizione parziale delle due immagini solari prodotte dai fori.

In questa prospettiva si collocano anche le interpretazioni date in passato da Mach (2013), Ronchi (1952) e Righi (Amaduzzi, 1928), che non riconoscono nell'esperimento grimaldiano alcun effetto di interferenza, ma soltanto un fenomeno percettivo da parte di Grimaldi.

È chiaro dunque come Grimaldi non possa essere considerato un anticipatore diretto dell'esperimento di Young nel senso moderno del termine. Tuttavia, la sua osservazione resta storicamente notevole, perché anticipa inconsapevolmente un effetto che si rivelerà vero soltanto con l'esperimento di Young. Inoltre, come si vedrà nel capitolo successivo, il medico inglese conosceva molto bene l'opera di Grimaldi, almeno per quanto concerne i primi esperimenti sulla diffrazione: non si può quindi escludere che l'esperimento del doppio foro abbia contribuito, anche indirettamente, a orientare la sua riflessione.

Capitolo 5

Radici ed eredità dell'ottica grimaldiana

La prima notizia della pubblicazione della *Physico-Mathesis de Lumine, Coloribus, et Iride* giunse probabilmente negli ambienti scientifici d'oltre Manica nel gennaio del 1672, quando nel numero 79 delle *Philosophical Transactions* apparve un resoconto di quasi tre pagine dell'opera di Grimaldi. La rivista era espressione della Royal Society, istituita a Londra nel 1660, e avrebbe pubblicato appena un mese più tardi la celebre lettera nella quale Isaac Newton esponeva la propria teoria della luce e dei colori.

La storia della progressiva affermazione dell'ottica fisica è tuttavia troppo ampia e articolata per poter essere ricostruita integralmente in questa sede e, del resto, è già stata oggetto di numerosi studi¹. Per tale ragione, in questo capitolo si assumeranno esclusivamente le osservazioni di Grimaldi come filo conduttore, seguendone la ricezione e cercando di comprendere, anche alla luce della replica che è stata svolta, da quali studiosi furono riprese, se (e in che modo) vennero replicate e quale ruolo assunsero nelle successive interpretazioni dei fenomeni ottici.

Prima di ricostruire tale percorso, sarà però necessario riservare alcuni paragrafi alle osservazioni e alle teorie precedenti a Grimaldi, così da poter collocare più adeguatamente il suo contributo nel più ampio sviluppo storico dell'ottica fisica, ricostruendone le radici e l'eredità.

5.1 I possibili riferimenti dell'ottica di Grimaldi

Rinvenire con esattezza le fonti che Grimaldi potrebbe aver impiegato nella stesura della *Physico-Mathesis de Lumine, Coloribus et Iride* è un'operazione tutt'altro che semplice da compiere. Nella trattatistica scientifica del Seicento era infatti una tendenza piuttosto comune quella di incorporare nelle proprie opere argomenti e osservazioni provenienti da altri autori senza dichiarare esplicitamente la loro origine. Tale consuetudine rende oggi difficile stabilire la provenienza di determinate idee, tanto più capire quando esse derivavano da testi poco conosciuti o da autori che la storiografia

¹Per una trattazione più estesa si rimanda a trattati che hanno ricostruito l'evoluzione delle teorie nell'ambito dell'ottica, come quelli di Ronchi (1952) e di Darrigol (2012).

successiva ha progressivamente dimenticato.

Come si è già in parte visto all'interno del Capitolo 3, anche Grimaldi riprende in più punti argomentazioni altrui, non sempre citandole. Del resto, un trattato che conta mezzo migliaio di pagine non poteva che rappresentare, in larga parte, una *summa* del sapere precedente, alla quale il gesuita affiancava un contributo più esiguo di elementi davvero originali, quali ad esempio la diffrazione.

In molti casi, tuttavia, le corrispondenze grafiche e testuali permettono di individuare una parte significativa degli elementi non originali confluiti nell'opera. Savelli (1951) da questo punto di vista ne riconosce diversi, mettendo in luce apporti riconducibili, per esempio, ad autori come René Descartes, Johannes Kepler e Marin Cureau de La Chambre. Si tratta quindi di un'operazione che deve essere tendenzialmente condotta per via indiretta, attraverso il confronto delle varie opere, dal momento che le citazioni esplicite presenti nel trattato di Grimaldi sono piuttosto limitate.

Tra i filosofi antichi menzionati esplicitamente dall'autore ci sono per esempio Anasagora e Aristotele, la cui dottrina era il riferimento principale dei gesuiti, mentre altre correnti di pensiero sono richiamate soltanto attraverso denominazioni collettive, come quelle di platonici, peripatetici e atomisti.

Un importante punto di riferimento per Grimaldi dovette tuttavia essere certamente Witelo, noto anche come Vitellione, monaco e studioso cristiano nonché autore della *Perspectiva*, composta con ogni probabilità tra il 1270 e il 1274 e considerata uno dei testi più significativi dell'ottica medievale. È del tutto plausibile che il gesuita ne conoscesse bene i contenuti, dal momento che, per l'ampiezza e l'ordine sistematico della trattazione, l'opera costituiva un passaggio pressoché obbligato per chiunque intendesse avvicinarsi a tale disciplina. La *Perspectiva* raccoglieva infatti in forma organica una parte consistente delle teorie sulla luce elaborate da Alhazen, integrandole con elementi derivati da Euclide e da Tolomeo.

A questa consolidata tradizione non poteva che affiancarsi quella degli *Ad Vitellionem paralipomena* di Kepler, pubblicati nel 1604. Fin dal titolo, l'opera si presentava come una prosecuzione e un aggiornamento della *Perspectiva* di Witelo, della quale riprendeva numerosi problemi integrandoli con nuove conoscenze sulla propagazione della luce, sulla formazione delle immagini e sul funzionamento dell'occhio. Va detto che, sebbene oggi questo trattato occupi una posizione centrale nella storia dell'ottica, presso i contemporanei la sua diffusione fu inizialmente molto più limitata perché una parte significativa degli studiosi continuava infatti a muoversi entro categorie aristoteliche e scolastiche, interpretando la visione attraverso specie o simulacri capaci di trasmettere all'occhio le forme e i colori dei corpi esterni. Quando Grimaldi compose la sua *Physico-Mathesis*, il confronto tra queste concezioni e le nuove teorie ottiche si

era ormai fatto più acceso, come mostrano anche i toni polemici con cui egli si rivolge ripetutamente ai filosofi legati alle interpretazioni tradizionali. Nel frattempo, inoltre, le opere di Kepler avevano acquisito una maggiore notorietà, compresa la sua celebre *Dioptrice*, pubblicata nel 1611. Vi sono buone ragioni per ritenere che Grimaldi conoscesse approfonditamente queste opere, sia perché Savelli (1951) ne individua delle tracce nell'ottica grimaldiana, sia perché, anche in ambito astronomico, le osservazioni e le teorie di Kepler vengono ampiamente citate e discusse nell'*Almagestum novum* di Riccioli.

Tra gli antecedenti più significativi va poi anche ricordato Francesco Maurolico, la cui opera *Photismi de lumine et umbra* fu pubblicata postuma nel 1611, oltre trent'anni dopo la morte dell'autore messinese. La vicenda editoriale di questa, che a livello di contenuti appare sconcertante dal momento che in essa compaiono idee che sarebbero riemerse molti anni dopo nell'ottica di Kepler, è particolarmente interessante, poiché strettamente legata alla figura di Cristoforo Clavio e ai gesuiti, i cui rapporti con Maurolico risalivano già ai primi anni di fondazione dell'ordine. I gesuiti mostrarono infatti un certo interesse per i suoi scritti, compresi quelli di ottica, probabilmente anche nella prospettiva di disporre di testi utili all'insegnamento previsto dalla *Ratio Studiorum*. Nella dedica al mecenate, il ritardo della pubblicazione dell'opera veniva giustificato ricordando come quelle questioni avessero acquistato una rinnovata importanza dopo l'invenzione del cannocchiale. A ciò si aggiungeva il desiderio di sottrarre al rischio del plagio materiali che, rimasti a lungo inediti, iniziavano a circolare ormai in numerose copie manoscritte.

Un ruolo di particolare rilievo ebbe anche il breve trattato di Marco Antonio de Dominis, composto sempre nel 1611, prima che l'autore venisse espulso dalla Compagnia di Gesù, e pubblicato con il titolo *De radiis visus et lucis in vitris perspectivis et iride*. Pur contando appena settantotto pagine, l'opera si distingueva per un'esposizione molto chiara, caratteristiche che contribuirono alla sua fortuna nell'Inghilterra di Giacomo I. Il valore del suo contributo sarebbe stato successivamente riconosciuto anche da Newton, che lo annoverò tra i primi autori ad aver proposto una spiegazione convincente della formazione dell'arcobaleno.

Tra gli autori cronologicamente più vicini a Grimaldi o comunque appartenenti al medesimo ambiente culturale va ricordato anzitutto François d'Aguilon, noto nella forma latinizzata Franciscus Aguilonius, autore degli *Opticorum libri sex*, pubblicati nel 1613. A questo trattato seguì l'*Oculus, hoc est: Fundamentum opticum* di Christoph Scheiner, il cui nome appare nell'opera del gesuita bolognese, dato alle stampe nel 1619 e dedicato in particolare ai fondamenti ottici della visione e al funzionamento dell'occhio. Entrambe le opere si inserirono nella tradizione scientifica della Compagnia

di Gesù e dovettero rappresentare riferimenti significativi per la formazione ottica di Grimaldi.

Nel 1646 apparve poi la monumentale *Ars magna lucis et umbrae* di Athanasius Kircher, nella quale confluivano osservazioni, esperimenti e interpretazioni riguardanti un'ampia varietà di fenomeni luminosi, dalla riflessione e rifrazione alla visione, alla camera oscura e alla proiezione delle immagini. Per la sua ampiezza e per la vicinanza cronologica alla redazione della *Physico-Mathesis*, anche quest'opera dovette costituire un importante termine di confronto per Grimaldi.

Infine, tra il 1652 e il 1656 Niccolò Zucchi pubblicò i due volumi dell'*Optica philosophia experimentis et ratione a fundamentis constituta*. A differenza degli autori precedenti, la cui influenza può essere ricostruita soprattutto sulla base del comune contesto culturale, Zucchi viene esplicitamente menzionato nella *Physico-Mathesis*: alcune delle sue ipotesi sono infatti esaminate e direttamente confutate da Grimaldi.

Al di fuori dell'ambiente della Compagnia di Gesù, almeno altri due autori dovettero costituire importanti termini di confronto.

Un ruolo significativo ebbero anzitutto le idee di René Descartes, esposte soprattutto nella *Dioptrique* e nei *Météores*, pubblicati entrambi nel 1637 insieme al *Discours de la méthode*. Le sue concezioni sulla natura e sulla propagazione della luce, sulla rifrazione, sui colori e sulla formazione dell'arcobaleno furono al centro di vivaci controversie, alle quali presero parte, in maniera più o meno esplicita, anche diversi esponenti della Compagnia. Tali discussioni non si svolgevano soltanto attraverso le opere a stampa, ma circolavano anche mediante lettere, resoconti e scambi personali tra studiosi. In un'epoca in cui la corrispondenza rappresentava uno dei principali strumenti di diffusione delle novità scientifiche, è dunque plausibile che nel Collegio bolognese fossero note almeno le linee fondamentali dell'ottica cartesiana, indipendentemente da una lettura diretta dei testi.

Ancora più evidenti sembrano essere le affinità con gli scritti di Marin Cureau de La Chambre, autore delle *Nouvelles observations et conjectures sur l'iris*, pubblicate nel 1650, e de *La lumière*, apparso nel 1657. Medico e uomo di corte, De La Chambre intervenne nelle controversie contemporanee sulla natura della luce e dei colori assumendo una posizione apertamente critica nei confronti di Descartes. Si distinse inoltre per la scelta di scrivere in francese anziché in latino, contribuendo a rendere la discussione scientifica accessibile a un pubblico più ampio. Le numerose consonanze riscontrabili nella *Physico-Mathesis* rendono plausibile che Grimaldi conoscesse almeno una parte delle sue argomentazioni.

Va detto che a questi riferimenti, oggi ancora identificabili, potrebbero naturalmente essersi affiancati scritti meno noti o andati perduti nel corso del tempo.

5.2 Le osservazioni di Leonardo da Vinci e Francesco Maurolico

In alcuni studi viene attribuita a Leonardo da Vinci una possibile prima osservazione della diffrazione della luce, anticipando così di oltre un secolo le osservazioni di Grimaldi (Thayer, 1894). Tale attribuzione sembra risalire al matematico italiano Guglielmo Libri che, nel terzo volume della sua *Histoire des sciences mathématiques en Italie*, include tra i contributi ottici di Leonardo anche l'osservazione di un fenomeno di diffrazione (Libri, 1840, Vol. 3, p. 55). A sostegno di questa affermazione, Libri rinvia alla nota XVIII collocata in appendice al volume, nella quale trascrive un passo tratto dal foglio 31 del Manoscritto F:

Lo spiraculo luminoso veduto di loco tenebroso, ancora ch'esso sia d'uniforma larghezza, e parrà forte ristringersi vicino qualunque obietto fia interposto infra l'occhio e tale spiraculo.

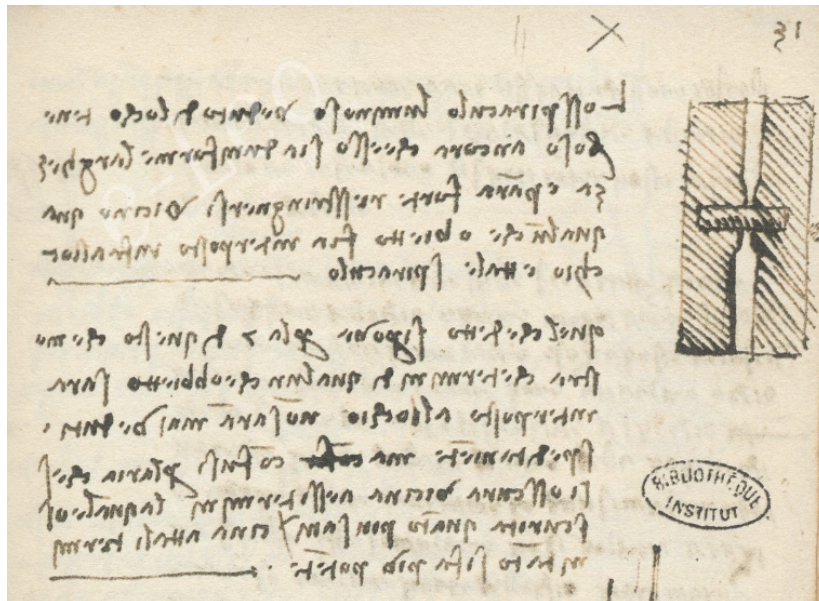


Figura 5.1: Leonardo da Vinci, rappresentazione dello «spiraculo luminoso» nel Manoscritto F, f. 31. Digitalizzazione: e-Leo, Archivio digitale della Biblioteca Leonardiana di Vinci.

In realtà, il contenuto del passo non permette di riconoscere con certezza un fenomeno di diffrazione. Leonardo descrive infatti l'apparente restringimento di un'apertura luminosa in prossimità di un oggetto interposto fra essa e l'occhio, ma potrebbe riferirsi a un fenomeno percettivo di contrasto. Inoltre, anche secondo autori più recenti, il ri-

ferimento appare controverso poiché la nota richiamata da Libri non contiene elementi direttamente e inequivocabilmente riconducibili alla diffrazione (Mottana et al., 2013).

In questa prospettiva, è necessario anche chiarire che cosa debba intendersi, propriamente, per *scoperta scientifica*. La diffrazione, infatti, accompagna naturalmente la propagazione della luce ed è quindi più che plausibile pensare che anche altri studiosi, prima di Grimaldi, ne abbiano osservato inconsapevolmente alcuni effetti senza riconoscerli come manifestazioni di un fenomeno nuovo e distinto. Proprio su questo punto si inserisce una questione storiografica emersa molto di recente grazie a Raynaud e Zanier (2025), secondo i quali la scoperta della diffrazione dovrebbe essere retrodatata al 1567 ed essere così ricondotta alla figura di Francesco Maurolico.

Nei suoi *Problemata ad perspectivam et iridem pertinentia*, stampati in un unico volume assieme ai *Photismi de lumine et umbra e Diaphanorum partes*, lo studioso messinese invitava infatti a osservare la fiamma di una candela non troppo distante attraverso una piuma bianca posta davanti all'occhio (Maurolico, 1613, p. 84):

*Ad summam, haec varietas colorum non provenit, nisi propter multimodam, reciprocam ac pluries repetitam radiorum repercussionem [...] Quod si per pennam candidam columbae sive alterius avis oculo appositam perspicias lumen candelae non ita longe positum, videbis inter plumarum lineas ac surculos illos crucem quandam mira colorum varietate, quales in iride sunt, distinctam. Qui non aliter fiunt quam per lucem inter floccorum canaliculos receptam ac multiphariam et successive incidentem et alternis repercussam.*²

Attraverso una ricostruzione moderna dell'osservazione di Maurolico, i due studiosi hanno mostrato che il fenomeno descritto può effettivamente essere ricondotto alla diffrazione della luce. Maurolico aveva dunque osservato il fenomeno quasi un secolo prima della pubblicazione della *Physico-Mathesis*, interpretandolo erroneamente come il risultato di riflessioni molteplici della luce tra le sottili fessure della piuma.

Un'esperienza molto simile compare nell'opera di Grimaldi in un punto in cui il gesuita, prendendo come sempre elementi tratti dalla propria quotidianità, scriveva (Grimaldi, 1665, p. 239):

²«In conclusione, questa varietà di colori non deriva se non dalle molteplici, reciproche e ripetute riflessioni dei raggi [...] Se poi osserverai la luce di una candela posta non troppo lontano attraverso una piuma bianca di colomba o di un altro uccello, collocata davanti all'occhio, vedrai tra le linee delle piume e i loro intrecci una sorta di croce distinta da una meravigliosa varietà di colori, simili a quelli dell'arcobaleno. Tali colori non si producono altrimenti che per mezzo della luce accolta nei sottili interstizi, incidente in molteplici modi e successivamente riflessa in direzioni alternate» [Traduzione a cura dell'autrice]

*Huc facerent alia plurima experimenta, praeter duo praedicta ad Propos. 1. allata: ut cùm Solem [...] intuemur praeposita ante oculum penna aliqua avis, aut sudariolo, aliove simili opaco filatim discriminato: in quibus casibus manifestè apparet nobis lumen Solare versicoloratum.*³

Secondo Raynaud e Zanier (2025), Grimaldi avrebbe probabilmente ripreso dal testo di Maurolico la descrizione dell'esperimento con la piuma, riportandone una configurazione molto simile all'interno della sua *Physico-Mathesis*. Pertanto, gli autori pongono i due studiosi sul medesimo piano dal punto di vista scientifico, dal momento che nessuno dei due riuscì a comprendere la natura della diffrazione né a fornirne un'interpretazione ottica corretta.

La questione deve essere tuttavia precisata, anche alla luce della presente ricerca: se sul piano esplicativo Maurolico e Grimaldi condivisero effettivamente lo stesso limite, sul piano epistemologico le loro posizioni erano profondamente differenti. Grimaldi fu il primo scienziato nella storia dell'ottica a riconoscere nella diffrazione una nuova modalità di propagazione della luce, facendone uno dei principali fondamenti della propria teoria sulla luce e sui colori. Sarebbe sufficiente considerare la posizione assegnata alla scoperta all'interno del trattato: Grimaldi la colloca infatti in apertura, attribuendole fin dalle prime pagine un ruolo centrale nella sua trattazione.

È del tutto plausibile pensare che Grimaldi conoscesse l'opera di Maurolico, come suggeriscono gli elementi emersi nel paragrafo precedente, ma ciò non consente di stabilire con certezza una dipendenza diretta per quanto concerne questa specifica osservazione. La *Physico-Mathesis* contiene infatti un'enorme quantità di esempi tratti dall'esperienza quotidiana e dall'uso di oggetti comuni: la piuma costituisce soltanto una delle molte configurazioni sperimentali attraverso le quali Grimaldi indagò il nuovo fenomeno. Va inoltre ricordato che l'osservazione attraverso la piuma compare in Grimaldi come esempio accessorio, richiamato a sostegno dell'argomentazione, mentre nella prima proposizione della *Physico-Mathesis* il fenomeno della diffrazione viene indagato attraverso esperimenti veri e propri, descritti con grande attenzione alle condizioni di esecuzione e ai risultati osservati.

Pertanto, se per scoperta si intende anche un processo attraverso il quale un fenomeno viene isolato, distinto, nominato e reso oggetto di un'indagine sistematica, il

³«A questo proposito potrebbero essere richiamati molti altri esperimenti, oltre ai due già presentati nella Proposizione I: per esempio, quando osserviamo il Sole [...] ponendo davanti all'occhio una piuma di uccello, un fazzoletto o un altro corpo opaco simile suddiviso in fili; in tutti questi casi la luce solare ci appare chiaramente variamente colorata» [Traduzione a cura dell'autrice con il supporto di strumenti di intelligenza artificiale].

ruolo attribuito tradizionalmente a Grimaldi dovrebbe conservare la propria validità.

5.3 Gli esperimenti di Grimaldi al vaglio dei suoi primi lettori

La *Physico-Mathesis de Lumine, Coloribus, et Iride* fu pubblicata a Bologna nel 1665, al termine di una vicenda editoriale già ricostruita nel paragrafo 3.5. Secondo Battistini (2000), non si può escludere che Riccioli si fosse adoperato fin da subito per favorire la diffusione dell'opera presso i confratelli maggiormente interessati agli studi di ottica. Tale ipotesi trova infatti sostegno nel fatto che, proprio in quegli anni, almeno a partire dal 1664, il maestro di Grimaldi intratteneva una fitta corrispondenza con lo scienziato e gesuita francese Honoré Fabri.

Quest'ultimo non poteva che rappresentare, del resto, un interlocutore particolarmente ricettivo, sia per il suo interesse verso le questioni ottiche, sia per una certa apertura nei confronti delle istanze della nuova scienza. Difatti, le sue simpatie copernicane gli avevano consentito di entrare in relazione con l'ambiente dell'Accademia del Cimento, ma gli avevano anche procurato il trasferimento da Lione a Roma, un processo e una breve detenzione.

Fabri fu, quasi certamente, il primo studioso a citare esplicitamente Grimaldi in una propria opera. Nei *Dialogi physici*, testo nel quale sottopone a discussione critica, oltre le idee di Grimaldi, anche quelle di Giovanni Alfonso Borelli e Geminiano Montanari, egli inserì un resoconto degli esperimenti sulla diffrazione condotti dal gesuita bolognese (Fabri, 1669). Non si limitò a discuterli esclusivamente sul piano teorico ma, attraverso il personaggio di Antimo, dichiarò di aver riprodotto almeno il primo esperimento in varie condizioni, sia all'aperto che in una camera oscura. Nella prima variante l'esperimento chiaramente non riuscì, mentre nel secondo caso ottenne dei risultati soltanto in alcune occasioni e con intensità abbastanza variabile, il che appare del tutto verosimile dati i risultati della replica condotta in questa ricerca (Fabri, 1669, p. 7):

*Probauit non semel experimentum in aprico loco, et nunquam radii NT deflexio visa est [...] Probauit quoque; et, quod mirum tibi accidet, successit aliquando, et radius NT deflexus fuit in NZ; alias tamen minus successit, et radius NT parum admodum versus NZ deflexus est.*⁴

⁴«Ho ripetuto più volte l'esperimento in un luogo esposto al Sole e non ho mai osservato la

Fabri mostrava tuttavia di conoscere in prima persona il testo di Grimaldi, ricordando che l'autore raccomandava di eseguire l'esperimento nel pieno dell'estate, sotto un cielo perfettamente sereno, con una luce solare intensa, all'interno di una stanza ben oscurata e servendosi di un piccolo foro.

Tuttavia, egli ricondusse tali indicazioni alla propria spiegazione del fenomeno. Come avrebbe sostenuto in seguito anche Newton, Fabri si discostava dall'interpretazione di Grimaldi e attribuiva la deviazione dei raggi a una particolare forma di rifrazione nell'aria circostante. Secondo lui, la luce che passa in prossimità del bordo dell'ostacolo e viene riflessa dal suo spigolo riscalda la regione d'aria adiacente e questa, divenuta meno densa, si comporterebbe come un prisma rifrangente, capace di produrre, per analogia, serie di bande colorate (Hall, 1990).

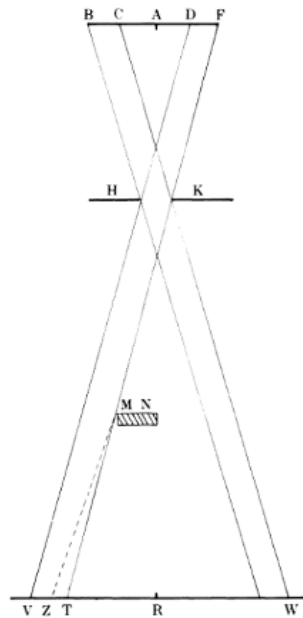


Figura 5.2: Figura riprodotta da Fabri a partire da Grimaldi. BF rappresenta il disco solare; HK è un foro di piccole dimensioni attraverso il quale la luce entra in una camera oscura. Sullo schermo si forma l'immagine solare VW . Nel fascio è collocato il corpo opaco MN . Il segmento TR indica l'estensione dell'ombra geometrica proiettata dal corpo, mentre Z ne rappresenta il limite effettivamente osservato. La figura è tratta dall'articolo di Hall (1990, p. 16).

deviazione del raggio NT [...] L'ho provato anche [nella stanza oscura] e, cosa che ti sembrerà sorprendente, talvolta l'esperimento riuscì e il raggio NT risultò deviato verso NZ ; altre volte, invece, riuscì in misura minore e il raggio NT fu deviato soltanto leggermente verso NZ » [Traduzione a cura dell'autrice, realizzata con il supporto di strumenti di intelligenza artificiale]

Pertanto, a suo giudizio, la diversa riuscita dell'esperimento dipendeva dalle condizioni termiche dell'aria: nella camera oscura, più fresca rispetto all'ambiente esterno, la luce riflessa dal corpo opaco avrebbe riscaldato e rarefatto in misura più sensibile la regione circostante, provocando così la deviazione dei raggi. Le condizioni che per Grimaldi favorivano quindi l'osservazione della diffrazione diventavano, nella lettura di Fabri, argomenti a sostegno di un'altra spiegazione, basata sull'attraversamento di strati d'aria diversamente riscaldati.

Come ricorda Hall (1990), gli scritti di Fabri, soprattutto quelli dedicati alla matematica pura, godevano già di una discreta circolazione. La pubblicazione dei *Dialogi physici* poté pertanto contribuire a far conoscere gli esperimenti del confratello bolognese anche indirettamente, attraverso la sua opera. Un pubblico scientifico inglese più ampio ricevette però per la prima volta la notizia della pubblicazione del trattato di Grimaldi soltanto il 22 gennaio del 1672, quando le *Philosophical Transactions*, il periodico della Royal Society, dedicarono al volume una recensione lunga ben tre pagine («An Account of Some Books», 1671, pp. 3068–3071).

Il resoconto si apriva giustificando il notevole ritardo con cui il volume veniva presentato ai lettori: un'opera tanto autorevole, osservava il recensore, non poteva essere del tutto esclusa dalle notizie, benché fosse giunta soltanto di recente nelle mani dell'editore. La recensione seguiva una prassi prevalentemente espositiva, ricostruendo con sostanziale fedeltà la struttura bipartita del trattato e passandone in rassegna i principali contenuti, senza entrare nel dettaglio degli esperimenti che erano stati condotti. Fin dalle righe iniziali, nondimeno, il ricorso all'esperimento veniva indicato come uno dei tratti distintivi dell'indagine grimaldiana:

*The Author then finding, that much obscurity was left in the Doctrine of Light, and esteeming it rather commendable than presumptuous, to endeavor the clearing of it, especially if that be done by Experiments (which he judgeth an exceedingly conducive way for the Improvement of all Natural Knowledge;) undertaketh in Two parts to deliver his Tryals and Meditations on this Subject.*⁵

La recensione presentava dunque la *Physico-Mathesis* come un'opera caratterizzata

⁵ «L'autore, constatando che nella dottrina della luce rimanevano ancora molti punti oscuri e giudicando più lodevole che presuntuoso il tentativo di chiarirli, soprattutto se compiuto mediante esperimenti, che egli considera un metodo estremamente efficace per il progresso di tutta la conoscenza naturale, si propone di esporre in due parti le proprie prove sperimentali e riflessioni su questo argomento» [Traduzione a cura dell'autrice].

da un marcato orientamento sperimentale, ma ne offriva una sintesi generale più che una guida alla riproduzione delle esperienze.

Soltanto un mese più tardi, all'interno dello stesso periodico, apparve la lettera nella quale Newton presentava la propria teoria della luce e dei colori. Si trattava della sua prima pubblicazione scientifica e conteneva il celebre *Experimentum crucis*, destinato a esercitare una profonda influenza sulla storia successiva dell'ottica (Lohne, 1968).

La vicinanza cronologica tra i due contributi ha sollevato la questione se Newton avesse potuto leggere la recensione prima di inviare il proprio scritto a Oldenburg. Secondo Battistini (2000), questo appare poco probabile: sebbene Newton divenne membro della Royal Society nel mese di gennaio, il suo scritto fu inviato prima che egli potesse effettivamente leggere dell'opera di Grimaldi. Il rapporto di Newton con l'opera del gesuita e, più in generale, con il fenomeno della diffrazione rimane comunque molto complesso e, per questo, sarà esaminato separatamente nel paragrafo successivo.

Ad ogni modo, è certo che la pubblicazione della recensione contribuì a inserire più frequentemente il nome di Grimaldi nelle discussioni ottiche di quel tempo, specie quelle inglesi. Ben presto infatti si iniziò a parlare della sua opera, almeno nella corrispondenza privata, tra i più grandi studiosi che al tempo si occupavano di questi temi: Hooke, Boyle e Leibniz (Battistini, 2000).

Più difficile da interpretare è il caso di Christiaan Huygens. Nel *Traité de la lumière*, composto nel 1678 ma pubblicato soltanto nel 1690, egli elaborò una teoria ondulatoria della luce che, ripresa e sviluppata nel secolo successivo, avrebbe fornito gli strumenti per poter finalmente comprendere la diffrazione della luce (Huygens, 1690). Eppure, nei suoi scritti noti, Huygens non discusse esplicitamente gli esperimenti di Grimaldi né dedicò una trattazione al fenomeno da lui scoperto. L'omissione appare particolarmente curiosa, poiché la sua teoria conteneva già molti degli elementi che, nella successiva elaborazione, avrebbero consentito di descrivere la propagazione della luce oltre i bordi di un'apertura. Per quale ragione, dunque, il fisico olandese non affrontò direttamente la diffrazione?

La questione sembra aver suscitato perplessità già tra i contemporanei. In una bozza di lettera indirizzata a Huygens, probabilmente mai spedita, Leibniz osservava: «*Mi sarebbe piaciuto che ci avesse dato almeno le sue congetture sui colori, e vorrei anche sapere che cosa pensa dell'attrazione che il signor Newton riconobbe nella luce, seguendo padre Grimaldi, a pagina 231 dei suoi Principia*». Il catalogo della biblioteca di Huygens attesta che, nel 1695, egli possedeva una copia della *Physico-Mathesis*. Tale testimonianza non permette tuttavia di stabilire quando l'avesse letta, quale giudizio avesse formulato sugli esperimenti descritti da Grimaldi né se avesse tentato di riprodurli personalmente (Moser & Robinson, 2024).

Tuttavia, Huygens doveva essere sicuramente al corrente del fatto che Newton avesse richiamato Grimaldi nei *Principia* del 1687. È anche plausibile che avesse assistito, in quanto membro di spicco, alle prove eseguite il 6 maggio 1679 da Edme Mariotte e Philippe de La Hire presso l'*Académie Royale des Sciences* di Parigi, nelle quali tentarono di riprodurre gli esperimenti sulla diffrazione della luce solare attraverso una piccola apertura. Nel successivo *Traité de la nature des couleurs*, parlando dell'esperimento, Mariotte mostrava di conoscere con una certa precisione l'esperienza descritta da Grimaldi: ricordava il piccolo corpo opaco collocato all'interno del fascio solare, l'ombra più estesa di quanto previsto dalla propagazione rettilinea e la comparsa delle frange colorate. Dichiarava tuttavia di non essere riuscito a osservare nulla di simile, nonostante avesse ripetuto la prova insieme ad altri osservatori da lui giudicati particolarmente accurati (Mariotte, 1717, p. 201):

*Le Père Grimaldi, dans un livre où il traite de la lumière et des couleurs, soutient que les rayons du Soleil passant par un petit trou ne gardent pas une rectitude exacte, mais qu'ils souffrent une réfraction qu'il appelle diffraction [...] mais dans toutes les expériences que j'ai faites avec plusieurs personnes fort exactes, on n'a jamais rien aperçu de semblable. [...] Quand on fera les expériences bien exactes, on les trouvera toujours conformes à l'hypothèse de la rectitude des rayons et sans aucune diffraction.*⁶

Non è possibile stabilire con certezza perché Mariotte non riuscì a riprodurre il fenomeno, poiché il suo resoconto non specifica le dimensioni del foro, le distanze tra gli elementi dell'apparato e le condizioni atmosferiche. La replica condotta nella presente ricerca mostra tuttavia quanto l'osservazione delle frange sia sensibile proprio a questi parametri: variazioni anche modeste nell'allineamento, nell'ampiezza dell'apertura, nelle distanze o nell'illuminazione possono attenuare notevolmente il fenomeno, fino ad impedirne il riconoscimento. Senza dimenticare, inoltre, che per *imparare a vedere la diffrazione* erano necessari tempo, pratica e una certa familiarità con il fenomeno e non è affatto detto che questi studiosi attribuissero all'esperimento un'importanza tale da giustificare numerose ripetizioni.

⁶ «Padre Grimaldi, in un libro nel quale tratta della luce e dei colori, sostiene che i raggi del Sole, passando attraverso un piccolo foro, non mantengano un'esatta rettilineità, ma subiscano una rifrazione che egli chiama diffrazione [...] Tuttavia, in tutti gli esperimenti che ho compiuto insieme a diverse persone assai scrupolose, non si è mai osservato nulla di simile. [...] Quando gli esperimenti saranno eseguiti con sufficiente accuratezza, li si troverà sempre conformi all'ipotesi della rettilineità dei raggi e privi di qualsiasi diffrazione» [Traduzione a cura dell'autrice].

Resta tuttavia difficile comprendere perché Huygens abbia del tutto ignorato la diffrazione osservata da Grimaldi. Secondo Ronchi (1952), una possibile spiegazione potrebbe risiedere anche nell'assenza, all'epoca, di un'adeguata preparazione matematica circa la cinematica e la dinamica dei moti oscillatori che impediva di arrivare ad una trattazione matematica dei fenomeni ondulatori, facendo restare inevitabilmente la discussione sulla natura della luce quasi sempre nell'ambito delle opinioni.

Alle difficoltà teoriche e quelle sperimentali, in molti casi poteva aggiungersi anche una certa diffidenza nei confronti degli esperimenti condotti dagli studiosi gesuiti. Come ricorda Battistini (2000), nell'ambiente inglese, Thomas Sprat, nella *History of the Royal Society* del 1667, interpretava con una punta di ostilità il loro interesse per la nuova filosofia sperimentale come una scelta essenzialmente opportunistica, paragonabile a quella di sovrani che occupano un territorio soltanto per impedire che cada nelle mani dei vicini. Tale atteggiamento poteva condizionare la ricezione delle loro osservazioni, soprattutto quando queste non venivano conosciute attraverso una lettura diretta della *Physico-Mathesis*, ma tramite resoconti, recensioni o reinterpretazioni, come quella proposta da Fabri.

5.4 Newton e la mancata osservazione delle frange interne

Come anticipato nel paragrafo precedente, il rapporto di Newton con la diffrazione e con l'opera di Grimaldi è particolarmente complesso e richiede pertanto di essere esaminato separatamente. A questo tema Roger H. Stuewer ha dedicato uno specifico studio nel quale si è interrogato sulle ragioni per cui il celebre fisico inglese, nonostante la straordinaria accuratezza delle sue indagini ottiche, non riuscì a osservare le frange interne all'ombra geometrica prodotta da un ostacolo sottile (Stuewer, 1970).

Attraverso una ricostruzione moderna dell'apparato newtoniano, Stuewer ha osservato che la frangia luminosa centrale diventava riconoscibile soltanto quando risultavano visibili almeno cinque o sei frange esterne. Poiché Newton riferì di averne distinte soltanto tre, le condizioni del suo esperimento non gli avrebbero consentito di individuare anche la debole frangia interna. Per l'autore, dunque, la mancata osservazione di Newton non sarebbe imputabile a una qualche sua disattenzione, ma semplicemente ai limiti della configurazione da lui impiegata.

L'analisi dell'opera di Grimaldi e la replica storica condotta nella presente ricerca con luce solare permettono tuttavia di aggiungere ulteriori elementi alla ricostruzione di Stuewer. Nello specifico, il confronto tra le indicazioni sperimentali fornite da Grimaldi nel suo attento "verbale di laboratorio" e la configurazione che fu poi effettivamente adottata da Newton conferma l'ipotesi che quest'ultimo non conoscesse direttamente l'opera del gesuita o comunque che ne avesse avuto una conoscenza soltanto parziale.

Per chiarire questo aspetto è necessario ripercorrere l'evoluzione delle conoscenze e delle interpretazioni di Newton sulla diffrazione, distinguendo tre fasi principali nei suoi studi, così come precedentemente fatto da Stuewer (1970). Nella prima, anteriore al 1678, è ormai certo che egli conobbe il fenomeno soltanto attraverso testimonianze indirette; nella seconda, compresa tra il 1678 e il 1686, iniziò a compiere delle proprie osservazioni sul fenomeno utilizzando bordi rettilinei; nella terza, le cui osservazioni confluirono nell'*Opticks* del 1704, effettuò delle misure quantitative relative all'ombra e alle frange prodotte da un ostacolo lungo e sottile.

È noto che, nel 1672, Newton pubblicò nelle *Philosophical Transactions* la propria teoria sulla luce e sui colori, contenente il celebre *Experimentum crucis*. Come si è visto in precedenza, è improbabile che prima di inviare la memoria avesse già letto la recensione inglese della *Physico-Mathesis de Lumine, Coloribus, et Iride*. Nello stesso anno, tuttavia, il nome di Grimaldi comparve nello scambio epistolare con il gesuita Ignace-Gaston Pardies. Nel contestare la teoria newtoniana sulla luce e sui colori da poco pubblicata, Pardies accostava l'ipotesi grimaldiana a quella ondulatoria di Hooke:

*For according to that hypothesis, which is explained at large by Grimaldi, and in which it is supposed that light is a certain substance very rapidly moved, there may take place some diffusion of the rays of light after their passage and decussation in the hole. Also on that other hypothesis, in which light is made to proceed by certain undulations of a subtile matter, as explained by Mr. Hook, colours may be explained by a certain diffusion and expansion of the undulations, made on the sides of the rays beyond the hole by the influence and continuation of the subtile matter.*⁷

Padre Pardies potrebbe quindi aver indotto Newton a fraintendere la posizione di Grimaldi, facendogli ritenere che il gesuita avesse semplicemente avanzato un'ipotesi sulla natura della luce e non che questa fosse sostenuta da prove sperimentali. Secondo Stuewer, la risposta di Newton non lascia dubbi sul fatto che egli non possedesse allora una conoscenza diretta della *Physico-Mathesis*: accostò infatti la presunta ipotesi di

⁷ «Secondo l'ipotesi esposta diffusamente da Grimaldi, nella quale si suppone che la luce sia una determinata sostanza dotata di un moto rapidissimo, potrebbe verificarsi una diffusione dei raggi luminosi dopo il loro passaggio e il loro incrocio nel foro. Anche secondo l'altra ipotesi, illustrata dal signor Hooke, nella quale si ritiene che la luce si propaghi mediante determinate ondulazioni di una materia sottile, i colori potrebbero essere spiegati attraverso una certa diffusione ed espansione delle ondulazioni, prodotta ai lati dei raggi oltre il foro per effetto dell'azione e della continuità della materia sottile» [Traduzione a cura dell'autrice].

Grimaldi a quelle di Hooke e Descartes, per poi richiamare la propria celebre considerazione metodologica, secondo cui «*il modo migliore e più sicuro di filosofare*» consiste nel procedere a partire dai fenomeni (Stuewer, 1970, p. 189). Il confronto appare quasi paradossale, poiché il medesimo principio orientava anche l'indagine di Grimaldi: come emerge già dal proemio della sua opera, egli attribuiva agli esperimenti un ruolo prioritario, assumendo i risultati dell'osservazione come punto di partenza per la sua trattazione.

Nel 1675, con il saggio *Hypothesis explaining the properties of light*, Newton rielaborò l'interpretazione puramente corpuscolare della luce a favore di un'interpretazione mista. Egli ripescò l'etere dall'antichità dicendo che questo, oscillando come una mantice, spingerebbe i corpuscoli da zone di maggior densità di etere a zone di minor densità di etere, cioè dall'aria ai materiali: questa spinta sarebbe la ragione dell'aumento di velocità nel mezzo, mentre la diversa forma dei corpuscoli determinerebbe la separazione dei colori. Tuttavia, in questo periodo lui è ormai pienamente consapevole dell'esistenza di prove che mostrano come la luce possa penetrare nell'ombra geometrica dell'ostacolo. Inoltre, era perfettamente disposto ad ammettere la possibilità che proprio lì potessero prodursi frange colorate. In particolare cita i lavori di Hooke e Fabri, che a sua volta aveva ripreso le osservazioni di Grimaldi:

*I thought I had seen the experiment before in some Italian author. And the author is Honoratus Faber, in his dialogue De Lumine, who had it from Grimaldo.*⁸

Newton dichiarava apertamente di conoscere gli esperimenti di Grimaldi attraverso Fabri, riprese inoltre la figura pubblicata nei *Dialogi physici*, descrivendo sei serie colorate e una debole luminosità diffusa oltre l'ombra geometrica. Allo stesso tempo ammetteva di non aver compiuto osservazioni sufficienti sul fenomeno. Infatti, come sostiene Stuewer (1970), proprio il disegno è una prova del fatto che nel 1675 Newton non avesse ancora condotto personalmente esperimenti sulla diffrazione: come si evince in Fig.5.3 egli rappresenta le frange colorate all'interno dell'ombra prodotta da un bordo rettilineo, risultato che non è possibile ottenere in quella configurazione perché è necessario che siano illuminate contemporaneamente parte sinistra e destra.

⁸«Mi sembrava di aver già visto l'esperimento in qualche autore italiano. L'autore è Honoré Fabri, nel suo dialogo *De Lumine*, che lo aveva ripreso da Grimaldi» [Traduzione a cura dell'autrice].

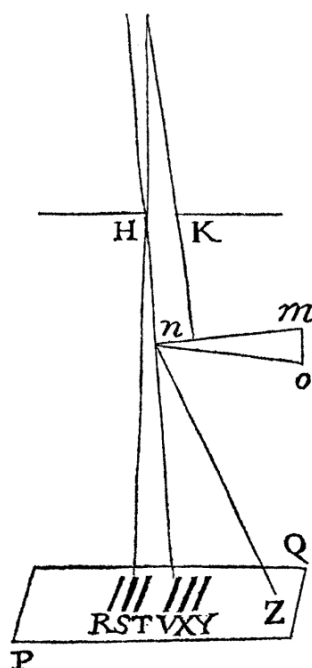


Figura 5.3: Schema dell'esperimento di Grimaldi tracciato da Newton sulla base del resoconto di Honoré Fabri. La figura è tratta dall'articolo di Stuewer (1970, p. 193).

Ad ogni modo, Newton non interpretò la penetrazione della luce nell'ombra come una prova della sua natura ondulatoria. La ricondusse piuttosto a una particolare rifrazione causata dalla variazione di densità dell'etere in prossimità del corpo:

*I took it to be only a new kind of refraction, caused perhaps by the external aether's beginning to grow rarer a little before it came at the opaque body.*⁹

Le osservazioni riportate da Hooke e Fabri potevano quindi essere accolte senza abbandonare il modello corpuscolare. I raggi rimanevano entità distinte dalle vibrazioni dell'etere e la loro deviazione derivava dall'attraversamento di regioni caratterizzate da densità differenti. La diffrazione veniva così assimilata a una nuova forma di rifrazione, in modo non troppo distante, almeno nell'impostazione generale, dalla spiegazione già proposta da Fabri attraverso l'aria riscaldata e rarefatta.

⁹«Ritenni che si trattasse soltanto di una nuova specie di rifrazione, causata forse dal fatto che l'etere esterno cominciasse a diventare più rarefatto poco prima di raggiungere il corpo opaco» [Traduzione a cura dell'autrice].

Quando, tra il 1685 e il 1686, Newton compose le proposizioni 94–96 del primo libro dei *Principia*, dichiarò di aver verificato accuratamente l'inflessione dei raggi in prossimità dei margini di monete, coltelli e frammenti di pietra o di vetro. La sua spiegazione però era ancora una volta cambiata: al gradiente dell'etere si sostituiva l'azione di forze emanate dal corpo. I raggi più vicini al bordo venivano piegati come se fossero attratti, mentre quelli più distanti subivano una deviazione opposta, dalla quale Newton faceva dipendere la formazione delle tre frange colorate esterne.

Questa seconda fase modificò ulteriormente il quadro osservativo: dopo aver condotto esperimenti personali con bordi rettilinei, Newton non confermò le frange interne rappresentate nel disegno del 1675. Le bande da lui riconosciute erano poste soltanto all'esterno dell'ombra geometrica.

La fase più importante su questi esperimenti ebbe tuttavia inizio dopo il 1686 e trovò espressione nel terzo libro dell'*Opticks*. Nelle Osservazioni 1, 3 e 4 Newton citò esplicitamente il lavoro di Grimaldi e studiò l'ombra prodotta da un capello umano collocato in un fascio di luce solare introdotto attraverso una piccola apertura. Variò la distanza tra il capello e lo schermo, misurò l'allargamento dell'ombra e determinò con notevole accuratezza la posizione di tre frange colorate lungo ciascuno dei suoi margini. Non riferì però di aver osservato alcuna banda all'interno dell'ombra.

La spiegazione proposta da Stuewer (1970) chiarisce efficacemente perché Newton non riuscì a distinguere le frange interne nelle condizioni da lui adottate. I risultati della replica condotta nella presente ricerca permettono tuttavia di aggiungere un ulteriore elemento. Utilizzando un capello come ostacolo, non è stato mai possibile riconoscere le bande all'interno dell'ombra. Queste sono invece risultate chiaramente visibili quando il capello è stato sostituito con un sottile filo metallico: la scelta dell'ostacolo appare dunque determinante per la riuscita dell'osservazione.

Come si è visto in precedenza, Grimaldi aveva sperimentato con ostacoli differenti, precisando la necessità di impiegare oggetti sottili ma non tanto quanto i capelli. La *Physico-Mathesis* conteneva quindi tutte le indicazioni operative capaci di facilitare il riconoscimento delle frange interne, che non furono evidentemente trasmesse con la stessa chiarezza dai resoconti successivi. Fabri, pur riprendendo numerosi aspetti degli esperimenti grimaldiani, non si soffermò su questo dettaglio. Newton, che conobbe tali esperienze probabilmente soltanto attraverso la sua mediazione e scelse in seguito il capello come ostacolo privilegiato delle proprie misurazioni, si trovò così a lavorare in una configurazione sfavorevole. Questo elemento non può quindi che confermare ulteriormente l'ipotesi, già avanzata in precedenza, che in realtà la conoscenza dell'opera di Grimaldi da parte di Newton fosse purtroppo soltanto indiretta.

5.5 Verso l'affermazione dell'ottica ondulatoria

Nel corso del XVIII secolo la concezione corpuscolare della luce associata a Newton acquisì una posizione largamente dominante, sostenuta tanto dall'autorevolezza del suo sostenitore quanto dalla fortuna della sua *Opticks*. Le alternative elaborate nel secolo precedente non riuscirono a imporsi con altrettanta efficacia. Grimaldi aveva affrontato estesamente il problema della natura della luce, ma la struttura della sua opera non conduceva a una presa di posizione inequivocabile. D'altra parte Huygens, pur formulando una teoria ondulatoria, non affrontò direttamente la diffrazione né collegò il proprio modello agli esperimenti del gesuita bolognese.

Il predominio della teoria corpuscolare non fu tuttavia assoluto. Già Hooke aveva sostenuto una concezione ondulatoria della luce, mentre Leibniz si era opposto ad alcuni aspetti della filosofia naturale newtoniana, privilegiando spiegazioni fondate sulla continuità e sull'azione mediata. Nel corso del Settecento fu tuttavia soprattutto Leonhard Euler a difendere con decisione una teoria ondulatoria, interpretando la luce come vibrazione di un mezzo elastico e richiamando l'analogia con la propagazione del suono.

Agli inizi del XIX secolo, la natura della luce rimaneva però ancora oggetto di accese discussioni. Diversi fenomeni, tra cui la diffrazione, non riuscivano ad essere spiegati in maniera soddisfacente entro il quadro corpuscolare. Il punto di svolta si raggiunse soltanto con i contributi di Thomas Young e di Augustin-Jean Fresnel, entrambi provenienti da percorsi professionali relativamente distanti dalla fisica accademica tradizionale: il primo era medico, il secondo ingegnere. Grazie alle loro ricerche, a quasi un secolo e mezzo di distanza, le osservazioni di Grimaldi tornarono al centro del dibattito scientifico, divenendo elementi decisivi per l'affermazione della teoria ondulatoria della luce.

5.5.1 Thomas Young: *Experiments and Calculations Relative to Physical Optics*

Thomas Young, descritto da Ronchi (1952) come un animo ribelle, attratto dal nuovo e dall'imprevisto, non aveva ancora trent'anni quando iniziò ad occuparsi del problema della natura della luce. È plausibile ritenere che il suo interesse per l'ottica fosse maturato durante gli studi di medicina, grazie allo studio del meccanismo della visione e dell'occhio. Medico di formazione, ma successivamente attivo anche nel campo della fisica e dell'egittologia, Young attribuì particolare importanza alle proprie ricerche ottiche, considerando tra i suoi maggiori contributi scientifici proprio quello di aver fornito prove sperimentali a sostegno della teoria ondulatoria della luce.

Nella *Bakerian Lecture*, letta alla Royal Society il 24 novembre 1803, egli presentò una serie di esperimenti e calcoli dedicati ai fenomeni della diffrazione e dell'interferenza luminosa (Young, 1804).

Nel primo esperimento riprese una configurazione riconducibile a quella descritta da Grimaldi, introducendo tuttavia alcune modifiche volte a rendere più agevoli e controllabili le condizioni di osservazione. Praticò anzitutto un'apertura nell'imposta di una finestra, la ricoprì con un foglio di carta spessa e perforò quest'ultimo mediante un ago sottile. Collocò quindi all'esterno un piccolo specchio, orientato in modo da riflettere la luce solare quasi orizzontalmente verso la parete opposta e da far passare il cono luminoso sopra un tavolo, sul quale erano disposti diversi schermi di cartoncino (Young, 1804, pp. 1–2). L'impiego dello specchio consentiva di regolare la direzione del fascio, di osservare l'ombra su schermi collocati a distanze differenti e di limitare alcune delle difficoltà pratiche legate alla variazione della posizione del Sole.

Nel cono di luce Young introdusse una sottile striscia di cartoncino, larga circa un trentesimo di pollice, ossia circa 0,85 mm, dunque non troppo sottile come aveva fatto Newton in precedenza, e ne osservò l'ombra su schermi posti a diverse distanze. Oltre alle consuete frange colorate esterne, rilevò la presenza di bande parallele anche all'interno dell'ombra, in numero variabile a seconda della distanza di osservazione. Nel descrivere il fenomeno, parlò significativamente di luce «*inflected, or rather diffracted, into the shadow*», preferendo il termine coniato da Grimaldi a quello adottato da Newton (Young, 1804, p. 2)

Fece anche un'esperienza apparentemente nuova: realizzate le condizioni per ottenere le frange luminose all'interno dell'ombra del filo, mostrò che queste frange sparivano se si ostruiva con uno schermo opaco la luce e si lambiva uno solo dei due orli del filo. Questo mostrava che per la formazione di tali frange era necessaria la luce proveniente da una e dall'altra parte del filo stesso. Mostrò anche che l'incapacità di una sola delle due porzioni luminose di produrre autonomamente le frange non dipendeva da un'insufficiente intensità della luce: quando entrambe erano lasciate libere, le linee continuavano infatti ad apparire anche se l'intensità luminosa veniva ridotta a un decimo o a un ventesimo di quella iniziale.

Si è detto che il risultato era soltanto apparentemente nuovo: dall'analisi del manoscritto di Grimaldi, infatti, emerge come il gesuita avesse già descritto la comparsa di frange all'interno dell'ombra e aveva rilevato che esse si manifestavano soltanto quando l'ostacolo riceveva luce da entrambi i lati. Eppure, in riferimento a questa specifica osservazione di Young, George Peacock attribuì all'esperimento un'importanza decisiva per l'affermazione della teoria ondulatoria, sostenendo che «*This was a crucial experiment, and may be considered as having constituted an important epoch in the history*

of the undulatory theory» (Peacock, 1855, p. 162).

La continuità con le osservazioni di Grimaldi risultava ancora più esplicita nel secondo esperimento, dedicato alle frange che si formavano nell'ombra di un corpo con un bordo ad angolo retto. Qui Young cita esplicitamente il gesuita bolognese, presentando le frange a cresta descritte dall'«*ingenious and accurate Grimaldi*» (Young, 1804, p. 3). Anche in questo caso verificò che le frange scomparivano quando veniva intercettata la luce proveniente da uno dei due contorni dell'oggetto, mentre rimanevano inalterate se lo schermo bloccava soltanto il vertice dell'ombra, senza interrompere i due contributi laterali.

Quanto alla loro interpretazione, il medico inglese riteneva che le frange interne fossero prodotte dall'interferenza tra i due fasci di luce che, passando ai lati opposti dell'ostacolo, penetravano nella regione dell'ombra geometrica. Le frange esterne venivano invece ricondotte all'interferenza tra la luce che proseguiva indisturbata secondo il cammino previsto dall'ottica geometrica e una componente riflessa dal bordo dell'ostacolo. Nel tentativo di estendere la propria legge di interferenza anche a questo secondo caso, Young attribuì erroneamente un ruolo alla luce riflessa dalla superficie del corpo: è significativo osservare come già Grimaldi, attraverso i suoi esperimenti, avesse escluso del tutto che la formazione delle frange dipendesse da un fenomeno di riflessione (Ronchi, 1952).

Ad ogni modo, le esperienze riprodotte portarono lo studioso a dichiararsi favorevole alla teoria ondulatoria della luce. Nella parte conclusiva della sua memoria, egli osservava che l'esperimento sulle frange curve interne all'ombra, insieme ad altri risultati ugualmente importanti che Grimaldi aveva ottenuto, erano stati trascurati da Newton. Invitava pertanto i sostenitori della teoria corpuscolare a spiegare tali fenomeni sulla base dei propri principi e, qualora non fossero riusciti a farlo, ad abbandonare le critiche rivolte alla concezione ondulatoria (Young, 1804, p. 11):

The experiment of Grimaldi, on the crested fringes within the shadow, together with several others of his observations, equally important, has been left unnoticed by Newton. Those who are attached to the Newtonian theory of light, or to the hypotheses of modern opticians, founded on views still less enlarged, would do well to endeavour to imagine any thing like an explanation of these experiments, derived from their own doctrines; and, if they fail in the attempt, to refrain at least from idle declamation against a system which is founded on the accuracy of its application to all these facts, and to a thousand others of a similar nature.¹⁰

¹⁰ «L'esperimento di Grimaldi relativo alle frange a cresta all'interno dell'ombra, insieme a

Tutto lascia pensare che lo scienziato inglese non conoscesse la diffrazione esclusivamente attraverso la sintesi fornita da Newton o da altri lettori, ma avesse avuto un accesso diretto all'opera del gesuita. Young fu infatti il primo studioso a riprendere gli esperimenti di Grimaldi nei loro aspetti più specifici, a distinguere chiaramente le frange interne precedentemente osservate e a soffermarsi su particolari che erano del tutto sfuggiti a Newton. Del resto, egli conosceva il latino già da bambino e questo rende ancora più plausibile una lettura diretta dell'opera. Ancora più significativo appare, tuttavia, il modo in cui egli rese l'esperimento più agevole da eseguire e più facilmente controllabile, collocando all'esterno uno specchio con il quale poteva dirigere il fascio solare quasi orizzontalmente all'interno della stanza oscurata.

A distanza di oltre mezzo secolo, Helmholtz avrebbe riassunto efficacemente tanto l'originalità del pensiero di Young quanto la difficoltà incontrata dai contemporanei nel comprenderne la portata (Helmholtz, 1873, p. 249):

*He [Thomas Young] was one of the most acute men who ever lived, but had the misfortune to be too far in advance of his contemporaries. They looked on him with astonishment, but could not follow his bold speculations, and thus a mass of his most important thoughts remained buried and forgotten in the Transactions of the Royal Society, until a later generation by slow degrees arrived at the rediscovery of his discoveries, and came to appreciate the force of his arguments and the accuracy of his conclusions.*¹¹

Le parole di Helmholtz descrivono bene la sorte iniziale delle idee di Young, accolte con dure critiche e, in alcuni casi, con aperto disprezzo. Poco più di un decennio dopo, tuttavia, il principio di interferenza sarebbe stato ripreso e sviluppato da Augustin-Jean Fresnel, che lo integrò in una teoria della diffrazione assai più elaborata, contribuendo all'affermazione definitiva della concezione ondulatoria della luce.

numerose altre sue osservazioni altrettanto importanti, fu trascurato da Newton. Coloro che aderiscono alla teoria newtoniana della luce, oppure alle ipotesi degli ottici moderni fondate su concezioni ancora più ristrette, farebbero bene a tentare di ricavare dalle proprie dottrine una qualche spiegazione di questi esperimenti; e, qualora non vi riuscissero, dovrebbero almeno astenersi da vane declamazioni contro un sistema fondato sull'esattezza con cui si applica a tutti questi fatti e a migliaia di altri fenomeni della stessa natura» [Traduzione a cura dell'autrice]

¹¹«Egli [Thomas Young] fu uno degli uomini più acuti mai esistiti, ma ebbe la sventura di essere troppo avanti rispetto ai suoi contemporanei. Essi lo guardavano con stupore, ma non riuscivano a seguire le sue ardite speculazioni; così, una gran quantità dei suoi pensieri più importanti rimase sepolta e dimenticata nelle *Transactions of the Royal Society*, finché una generazione successiva giunse lentamente a riscoprire le sue scoperte e ad apprezzare la forza delle sue argomentazioni e l'esattezza delle sue conclusioni» [Traduzione a cura dell'autrice]

5.5.2 Augustin-Jean Fresnel: *Mémoire sur la diffraction de la lumière*

Augustin-Jean Fresnel, dopo aver studiato all'*École Polytechnique* di Parigi e aver ottenuto nel 1809 la qualifica di ingegnere civile, iniziò a lavorare nella Francia meridionale, dove era impegnato nella costruzione e nella manutenzione di strade e ponti. Nonostante il carattere eminentemente pratico della sua attività, iniziò progressivamente ad interessarsi a problemi scientifici di più ampia portata, tra i quali occupava un posto centrale la natura della luce. Nei suoi quaderni di lavoro, accanto ai calcoli tecnici e alle registrazioni relative alle paghe degli operai, comparivano infatti schemi e riflessioni dedicati ai fenomeni ottici. Fu proprio in questo contesto, lontano dai principali centri della ricerca scientifica, che Fresnel maturò progressivamente la convinzione che la luce non potesse essere costituita da corpuscoli materiali e che fosse necessario prendere in considerazione un'interpretazione ondulatoria. In questa prima fase, tuttavia, le sue riflessioni erano ancora prevalentemente intuitive, a causa del suo isolamento professionale nonché della scarsa preparazione su questi temi (Ronchi, 1952).

La situazione cambiò nel 1815 quando, dopo essere stato destituito dal proprio incarico per essersi schierato apertamente contro Napoleone, ebbe maggiore possibilità di dedicarsi agli studi di ottica. In quel periodo entrò in contatto con François Arago, astronomo dell'Osservatorio di Parigi e membro dell'*Académie des Sciences*, di appena due anni più anziano, che avrebbe svolto un ruolo decisivo nel sostenere le sue ricerche.

Fresnel si rivolse ad Arago per conoscere quali opere fosse opportuno consultare per chiarire i suoi dubbi sulla natura della luce. Quest'ultimo gli indicò gli scritti di Grimaldi e Newton, un trattato inglese di Jordan e le memorie di Lord Brougham e di Thomas Young. L'accesso a tali fonti non era però per lui così immediato: Fresnel dichiarò esplicitamente di non conoscere abbastanza l'inglese da poter leggere autonomamente i lavori di Young. Inoltre, è altrettanto improbabile che avesse consultato l'opera di Grimaldi: l'accesso diretto a questa era ostacolato dalla lingua latina, che agli inizi del XIX secolo aveva ormai perso il ruolo centrale precedentemente occupato nella comunicazione scientifica (A. J. Fresnel, 1866).

Fresnel avviò così un programma sperimentale autonomo e il 15 ottobre 1815 presentò all'*Académie des Sciences* la sua prima memoria sulla diffrazione. Il testo si apriva con una critica esplicita a Newton e alla teoria corpuscolare della luce, dopo la quale l'autore tornava sugli esperimenti di diffrazione, perfezionando ulteriormente l'apparato rispetto alle configurazioni adottate dagli studiosi precedenti.

Da Grimaldi fino a Young, gli esperimenti erano stati infatti generalmente condotti in una stanza oscurata, facendo entrare la luce solare attraverso un piccolo foro praticato nell'imposta della finestra e raccogliendo il cono luminoso su uno schermo bianco.

Fresnel cercò invece di adottare una serie di accorgimenti per facilitare l'osservazione delle frange e soprattutto per riuscire ad effettuare delle misure accurate.

Nel suo apparato, la luce solare, diretta all'interno della stanza mediante uno specchio, veniva concentrata da una lente fortemente convessa, posta in prossimità di una piccola apertura praticata nell'imposta. Nel fuoco della lente si formava una minuscola immagine del Sole, che agiva come una sorgente quasi puntiforme: ad una certa distanza veniva poi collocato un sottile filo di ferro, la cui ombra, accompagnata dalle frange interne ed esterne, veniva osservata mediante una lente d'ingrandimento. Quando l'ostacolo veniva avvicinato alla sorgente, tuttavia, le frange diventavano troppo sfocate per essere misurate. Non disponendo di una lente dalla curvatura maggiore, Fresnel depositò un piccolo globulo di miele sopra un foro praticato in una lamina di rame: la goccia, comportandosi come una minuscola lente dalla distanza focale minima, consentiva di ottenere un punto luminoso ancora più sottile e di distinguere nitidamente le frange anche quando il filo si trovava ad appena un centimetro dalla sorgente (A. J. Fresnel, 1866, pp. 13–14):

*Je me suis d'abord servi, pour obtenir un point lumineux, d'un très petit trou fait dans une feuille d'étain [...] N'ayant pas de plus forte lentille pour obtenir un point lumineux plus fin, je me suis servi d'un globule de miel déposé sur un petit trou fait à une feuille de cuivre.*¹²

Per effettuare le sue misure, Fresnel non disponeva inizialmente di strumenti particolarmente sofisticati. Egli racconta infatti di essersi fatto costruire dal fabbro del villaggio un semplice micrometro a doppio filo in seta, con il quale riuscì tuttavia a determinare la posizione delle frange con una precisione dell'ordine del centesimo di millimetro, raggiungendo così un livello di accuratezza senza precedenti.

In questa prima fase, Fresnel interpretava la formazione delle frange esterne e interne all'ombra geometrica attraverso un modello basato sull'interferenza tra due raggi (Basdevant, 2009). Nella configurazione da lui considerata, indicata schematicamente in Fig. 5.4, sia R la sorgente luminosa, AA' l'ostacolo diffrangente, F un punto di osservazione situato all'esterno dell'ombra geometrica, a la distanza tra la sorgente e l'ostacolo e b la distanza tra l'ostacolo e lo schermo.

¹²«Per ottenere un punto luminoso mi servii inizialmente di un piccolissimo foro praticato in una lamina di stagno [...] Non disponendo di una lente più potente con cui ottenere un punto luminoso più sottile, utilizzai un globulo di miele depositato sopra un piccolo foro praticato in una lamina di rame» [Traduzione a cura dell'autrice].

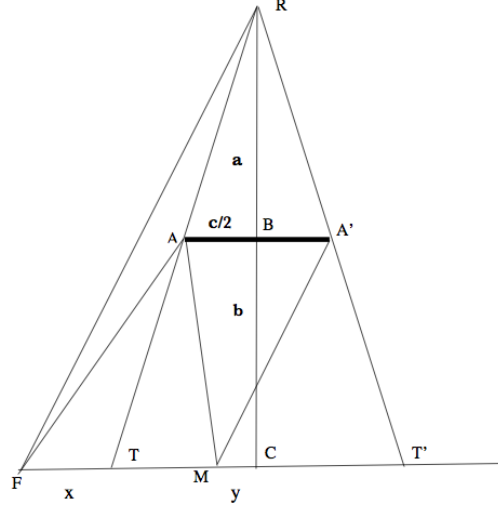


Figura 5.4: Schema geometrico utilizzato da Fresnel per descrivere la formazione delle frange esterne e interne prodotte da un filo sottile. La figura è tratta da Basdevant (2009).

Per le frange esterne, Fresnel considerò l'interferenza tra il raggio che giunge direttamente da R a F e quello che raggiunge il punto di osservazione dopo essere passato in prossimità del bordo A . La differenza di cammino può quindi essere espressa come:

$$d = RA + AF - RF. \quad (5.1)$$

Indicando con x la distanza del punto F dal limite dell'ombra geometrica, un semplice calcolo geometrico, nell'approssimazione dei piccoli angoli, conduce alla relazione:

$$x^2 \simeq \frac{2db(a+b)}{a}. \quad (5.2)$$

Le frange luminose esterne corrispondono alla condizione di interferenza costruttiva $d = n\lambda$ e si trovano quindi nelle posizioni:

$$x_n^{(\text{lum})} = \sqrt{\frac{2n\lambda b(a+b)}{a}}. \quad (5.3)$$

Le frange scure, invece, corrispondono alla condizione di interferenza distruttiva $d = \frac{(2n+1)\lambda}{2}$ da cui si ottiene:

$$x_n^{(\text{sc})} = \sqrt{\frac{(2n+1)\lambda b(a+b)}{a}}. \quad (5.4)$$

In accordo con le osservazioni, da queste relazioni emerge che le frange esterne non sono equidistanti: esse tendono infatti ad avvicinarsi progressivamente man mano che ci si allontana dal limite dell'ombra geometrica.

Per le frange interne, Fresnel prese invece in considerazione i raggi provenienti dai due bordi A e A' dell'ostacolo. Se c indica la larghezza del filo e y la coordinata di un punto M situato all'interno dell'ombra geometrica, la differenza di cammino tra i raggi provenienti dai due bordi è, nella stessa approssimazione:

$$\Delta = A'M - AM \simeq \frac{cy}{b}. \quad (5.5)$$

Le frange luminose interne si hanno quando $\Delta = n\lambda$, da cui segue:

$$y_n^{(\text{lum})} = \frac{nb\lambda}{c}. \quad (5.6)$$

Le frange scure interne corrispondono invece alla condizione $\Delta = \frac{(2n+1)\lambda}{2}$ e si trovano quindi in:

$$y_n^{(\text{sc})} = \frac{(2n+1)b\lambda}{2c}. \quad (5.7)$$

A differenza delle frange esterne, le frange interne risultano dunque equidistanti. Fresnel osservò inoltre che, al variare delle distanze a e b , le frange esterne non si dispongono lungo linee rette, ma lungo delle iperboli i cui fuochi sono dati dal punto luminoso e dal bordo del filo. In modo analogo, le frange interne individuano una famiglia di iperboli aventi come fuochi i due bordi A e A' dell'ostacolo diffrangente. Come si osserva in Fig. 5.5, queste iperboli erano interpretate come il risultato dell'interferenza tra le onde sferiche “dirette”, cioè provenienti dalla sorgente luminosa, e le onde sferiche generate dall'orlo dell'ostacolo (Ronchi, 1952).

L'accordo tra le formule e le misure sperimentali appariva inizialmente molto convincente: gli scarti tra le posizioni calcolate e quelle osservate erano infatti inferiori agli errori di osservazione, che non superavano comunque il 7%. Rimaneva tuttavia una discrepanza: le formule prevedevano una disposizione delle frange chiare e scure invertita rispetto a quella effettivamente osservata. Proprio questo disaccordo spinse Fresnel a rivedere successivamente la propria interpretazione del fenomeno.

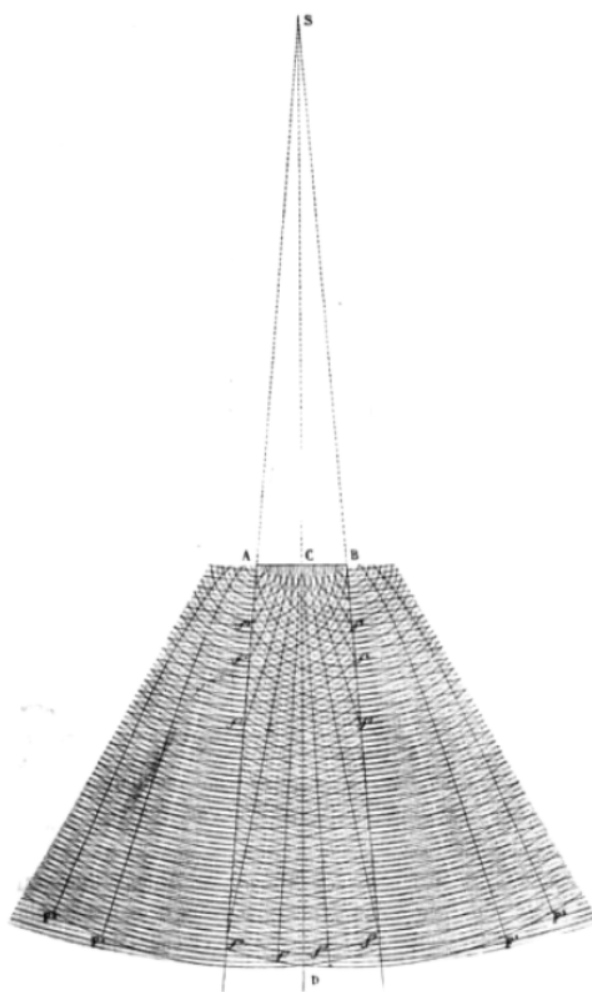


Figura 5.5: Schema geometrico con cui Fresnel dette la prima spiegazione delle frange di diffrazione nell'ombra di un filo. La figura rappresenta il fenomeno in una sezione piana perpendicolare all'ostacolo AB. La figura è tratta da A. J. Fresnel (1866, p. 23)

Già il 15 luglio 1816 egli presentò all'*Académie des Sciences* una nuova memoria, nella quale formulava la cosiddetta *teoria dei raggi efficaci*. In questa fase Fresnel fa appello all'idea di onde elementari, sulla scia di Huygens, ma rispetto a quest'ultimo fa un passo avanti perché sa che le onde possono interferire ed è quindi necessario tener conto della loro differenza di fase. Il nuovo procedimento che egli sviluppa non risultava però ancora pienamente adatto a spiegare i risultati sperimentali e, dopo essersi dedicato per più di un anno alla polarizzazione cromatica, tornò a lavorare sulla diffrazione nell'inverno del 1817, maturando ormai l'idea che le onde elementari emesse dai punti dell'onda anche assai distanti dagli spigoli diffrangenti intervengono nella formazione di tutte le frange dietro l'ostacolo (Ronchi, 1952).

Inizialmente egli dubitò di poter gestire i calcoli richiesti da tale impostazione. Tuttavia, dopo l'apertura da parte dell'*Académie*, il 17 marzo 1818, di un concorso a

premio dedicato alla diffrazione, inviò il mese successivo un *pli cacheté* contenente la sua teoria ormai compiuta. Prima di esporla, è interessante ricordare le circostanze che portarono l'*Académie des Sciences* a bandire tale concorso.

Il susseguirsi delle memorie presentate da Fresnel tra il 1815, il 1816 e il 1817 aveva infatti allarmato i newtoniani più convinti dell'Accademia, soprattutto perché l'ingegnere francese riusciva progressivamente a ricondurre al proprio modello un numero sempre più ampio di fenomeni che, al contrario, la teoria corpuscolare lasciava in parte irrisolti. Fu in questo contesto che l'Accademia decise di proporre un concorso dedicato alla diffrazione, il cui bando si apriva riconoscendo esplicitamente a Grimaldi il merito della scoperta del fenomeno che era al centro dei dibattiti più accesi del tempo. Per agevolarne la lettura, il passo viene riportato in italiano nella traduzione proposta da Ronchi (1952):

I fenomeni della diffrazione, scoperti da Grimaldi, in seguito studiati da Hooke e da Newton, sono stati, in questi ultimi tempi, l'oggetto di ricerche di numerosi fisici, specialmente di Young, Fresnel, Arago, Pouillet, Biot, ecc. Si sono osservate le frange diffratte che si formano e si propagano fuori dell'ombra dei corpi, quelle che appaiono dentro l'ombra stessa, quando i raggi passano simultaneamente dalle due parti di un corpo stretto, e quelle che si formano per riflessione sulle superfici di estensione limitata quando la luce incidente e riflessa passa molto vicina ai loro orli. Ma non si è ancora determinato a sufficienza il movimento dei raggi in prossimità dei corpi stessi dove avviene l'inflessione. La natura di questi movimenti offre dunque oggi il punto della diffrazione che più importa approfondire, perché racchiude il segreto del modo fisico con cui i raggi sono inflessi e separati in diverse bande di direzione e d'intensità differenti. Ciò ha indotto l'Accademia a proporre questa ricerca per soggetto di un premio, bandendolo nel modo seguente:

- 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 della 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.*

Come si è detto, nella memoria inviata nel 1818 Fresnel presenta la sua teoria ormai compiuta: egli si rende conto che i calcoli errati derivano da un'approssimazione in cui interferiscono soltanto due raggi. Il problema da lui individuato doveva quindi essere generalizzato: non si trattava più di studiare l'interferenza tra due raggi, ma

di considerare il contributo complessivo dell'intero fronte d'onda. Come si osserva in Fig. 5.6, la luce che giunge in un punto P è data dalla sovrapposizione di tutte le onde elementari provenienti dagli infiniti punti del fronte d'onda EMA . Per determinare l'intensità di questa luce occorre dunque sommare, attraverso un integrale, i contributi elementari provenienti dall'intero fronte d'onda (Ronchi, 1952).

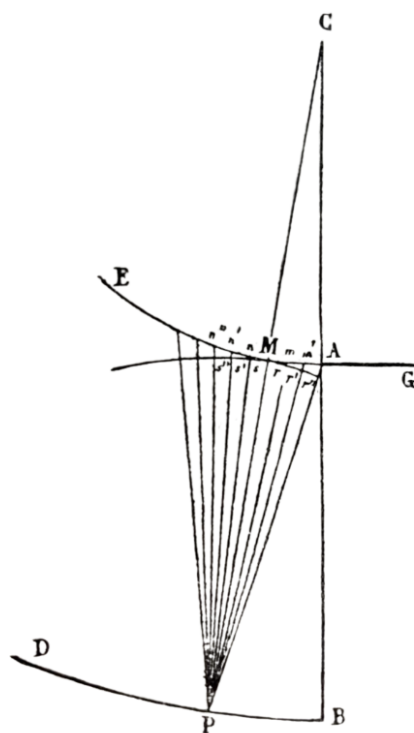


Figura 5.6: Schematizzazione del meccanismo integrale con cui Fresnel spiegava le frange di diffrazione all'orlo dell'ombra di un semipiano AG infinito. La figura è tratta da Ronchi (1952, p. 251).

Così Fresnel, combinando il principio di Huygens con quello dell'interferenza tra onde aveva dettato il principio dell'integrazione delle onde elementari, che riusciva finalmente a spiegare tutti i fenomeni di diffrazione (Ronchi, 1952).

Nella nuova configurazione da lui considerata, riportata in Fig. 5.7 utilizzando l'esempio di un semipiano infinito, sia C la sorgente luminosa e P il punto di osservazione. Il punto M , che Fresnel chiama "polo", è definito come l'intersezione tra la retta CP e il fronte d'onda circolare AMI , di raggio a e centro in C . Su tale circonferenza le onde emesse da C sono tutte in fase e di uguale intensità.

$$a(n) \propto \sin \left[2\pi \left(t - \frac{CM + \delta}{\lambda} \right) \right]. \quad (5.11)$$

Sviluppando questa espressione, si ottengono due termini in quadratura di fase:

$$a(n) \propto \sin \left[2\pi \left(t - \frac{CM}{\lambda} \right) \right] \cos \left(\frac{2\pi\delta}{\lambda} \right) - \cos \left[2\pi \left(t - \frac{CM}{\lambda} \right) \right] \sin \left(\frac{2\pi\delta}{\lambda} \right). \quad (5.12)$$

Ciascuno di questi è dato dalla stessa oscillazione temporale (indipendente dal punto n), moltiplicata per un'ampiezza spaziale che, sostituendo l'espressione di δ , assume la seguente forma:

$$\cos \left(\pi z^2 \frac{a+b}{ab\lambda} \right), \quad \sin \left(\pi z^2 \frac{a+b}{ab\lambda} \right). \quad (5.13)$$

Integrando questi contributi sul fronte d'onda, la somma di tutte le ampiezze risulta anch'essa composta da due termini in quadratura di fase, con le rispettive ampiezze espresse dai seguenti integrali:

$$\int \cos \left(\pi z^2 \frac{a+b}{ab\lambda} \right) dz, \quad \int \sin \left(\pi z^2 \frac{a+b}{ab\lambda} \right) dz, \quad (5.14)$$

che costituiscono i cosiddetti *integrali di Fresnel*. L'integrazione viene estesa alla porzione di fronte d'onda effettivamente libera, cioè non intercettata dall'ostacolo. Se u indica l'ascissa curvilinea del bordo dell'ostacolo misurata a partire da M, l'integrale può essere espresso come somma del contributo proveniente da una parte del fronte d'onda e di quello proveniente dalla porzione compresa tra M e il bordo:

$$\int_0^\infty \cos \left(\pi z^2 \frac{a+b}{ab\lambda} \right) dz + \int_0^u \cos \left(\pi z^2 \frac{a+b}{ab\lambda} \right) dz, \quad (5.15)$$

e analogamente per il termine in seno:

$$\int_0^\infty \sin \left(\pi z^2 \frac{a+b}{ab\lambda} \right) dz + \int_0^u \sin \left(\pi z^2 \frac{a+b}{ab\lambda} \right) dz. \quad (5.16)$$

Questi integrali sono funzioni trascendenti di u . Nel caso particolare di un fronte d'onda completamente libero ($u \rightarrow \infty$) e normalizzando i coefficienti, entrambi gli integrali estesi da 0 a ∞ convergono al valore limite di $1/2$. Storicamente, Fresnel procedette a calcolarli numericamente a mano attraverso sviluppi in serie, ottenendo una

precisione fino al decimillesimo. L'intensità luminosa osservata risulta proporzionale al quadrato dell'ampiezza totale, da cui si ottiene:

$$I \propto \left[\int \cos \left(\pi z^2 \frac{a+b}{ab\lambda} \right) dz \right]^2 + \left[\int \sin \left(\pi z^2 \frac{a+b}{ab\lambda} \right) dz \right]^2. \quad (5.17)$$

Grazie a questa costruzione e inserendo i valori delle geometrie degli esperimenti, Fresnel calcolò le posizioni dei massimi, dei minimi e le intensità, ottenendo un perfetto accordo tra teoria ed esperimento e aggiudicandosi il premio del concorso. A quest'ultimo prese parte anche un secondo candidato rimasto anonimo, mentre nessun newtoniano presentò una memoria. Il dibattito suscitato dalla memoria di Fresnel fu però particolarmente acceso: Laplace, Biot e Poisson accolsero con scetticismo le sue conclusioni. Al contrario, Arago e Gay-Lussac ne compresero immediatamente la portata e si mostrarono favorevoli alla nuova interpretazione ondulatoria della luce.

Un momento decisivo si ebbe quando Poisson osservò che, secondo la teoria di Fresnel, al centro dell'ombra proiettata da un piccolo disco circolare avrebbe dovuto formarsi un punto luminoso. La previsione appariva paradossale, poiché sembrava contraddire le aspettative della teoria corpuscolare. Tuttavia, la simmetria del problema mostrava che i contributi luminosi provenienti dal bordo dell'ostacolo dovevano giungere in fase sull'asse centrale, interferendo quindi costruttivamente. Fresnel e Arago verificarono subito sperimentalmente questa conseguenza della teoria, confermando la presenza del punto luminoso al centro dell'ombra. Ciò che era stato inizialmente presentato come un'obiezione si trasformò così in una conferma, suscitando l'entusiasmo degli stessi accademici e portando Laplace a congratularsi pubblicamente con Fresnel (Basdevant, 2009).

Fresnel fu eletto all'unanimità all'*Académie des Sciences* il 12 maggio 1823. Negli stessi anni, tuttavia, le sue condizioni di salute peggiorarono rapidamente. Agli impegni scientifici si aggiunsero quelli professionali e istituzionali, che egli sostenne con crescente difficoltà. Dopo una sessione di esami orali all'*École Polytechnique*, scrisse a Young di sentirsi «*sopraffatto dalla stanchezza e dal bisogno di dormire*». Poco dopo fu colpito da un grave attacco di emottisi (Basdevant, 2009).

Nel 1825 Fresnel interruppe quasi del tutto la propria attività scientifica, dedicandosi prevalentemente alla professione di ingegnere. Il riconoscimento internazionale arrivò comunque prima della morte: nel 1827 Arago gli consegnò la medaglia Rumford, conferitagli dalla *Royal Society*. Fresnel morì pochi giorni dopo, quando il valore delle sue ricerche sulla diffrazione e sull'ottica ondulatoria era ormai stato pienamente riconosciuto.

Diverso fu il destino di Grimaldi, la cui figura e la cui opera sono state al centro della

presente ricerca. Il gesuita bolognese dovette infatti attendere quasi due secoli affinché il fenomeno da lui osservato trovasse una spiegazione adeguata. Tuttavia, proprio nel momento in cui la diffrazione diveniva un elemento determinante per la comprensione della natura della luce, il suo nome iniziava ad essere ricordato soprattutto come quello dello scopritore del fenomeno, mentre la complessità delle sue ricerche sperimentali tendeva a essere progressivamente oscurata. In realtà, come si è cercato di mostrare in questo capitolo, Grimaldi non si limitò a registrare un'anomalia ai margini dell'ombra: egli individuò numerosi dettagli sperimentali che molti dei suoi successori trascurarono o fraintesero, e che sarebbero stati riscoperti e interpretati quasi due secoli più tardi.

Capitolo 6

Conclusioni

Al termine di questo lavoro si può ritenere raggiunto il principale obiettivo della presente ricerca: proporre uno studio organico della figura di Francesco Maria Grimaldi, ricostruendone il profilo attraverso un approccio che integra indagine storica e replica sperimentale, e valutandone il contributo scientifico sia in rapporto agli studi precedenti sia alla luce della successiva tradizione ottica.

L'indagine ha preso avvio dalla biografia dello studioso e dalle testimonianze dei contemporanei, affiancate dalle poche tracce materiali ancora riconoscibili nella città di Bologna, per poi estendersi all'ambiente culturale, religioso e scientifico nel quale maturò la sua attività. Ne è emersa la figura di un uomo modesto e profondamente devoto, ma anche di uno studioso dotato di notevoli capacità sperimentali. Grimaldi accompagnò Giovanni Battista Riccioli durante una parte significativa della sua carriera e contribuì in maniera sostanziale alle ricerche astronomiche e fisiche confluite nelle opere del maestro. Non è casuale che lo stesso Riccioli distinguesse il suo apporto da quello degli altri collaboratori, riconoscendogli un ruolo di primo piano nell'ideazione e nella conduzione degli esperimenti. Le fonti restituiscono inoltre l'immagine di un uomo molto apprezzato non soltanto dai confratelli, ma anche dagli studiosi che ebbero occasione di conoscerlo, i quali ne elogiarono le competenze scientifiche, la disponibilità nell'insegnamento e la dedizione con cui svolse i propri incarichi.

Rispetto allo studio di Petruzzelli (2012), ad oggi l'unica monografia interamente dedicata al gesuita bolognese, il presente lavoro si distingue anzitutto per una maggiore attenzione al contesto che precede e segue la *Physico-Mathesis*. A questa prospettiva storico-critica si è affiancata una più marcata attenzione alla dimensione sperimentale. Pur senza trascurare le questioni metodologiche, filosofiche e teologiche che attraversano il trattato, l'analisi si è concentrata soprattutto sui contenuti scientifici dell'opera e, in particolare, sugli esperimenti dedicati alla diffrazione. In questa direzione, la replica storicamente orientata delle esperienze di Grimaldi è stata impiegata come vero e proprio strumento d'indagine: essa ha permesso di chiarire non solo le procedure descritte nel testo, ma anche le difficoltà materiali, operative e osservative che dovettero affrontare tanto il gesuita quanto gli studiosi che, nei decenni successivi, tentarono di riprodurre le osservazioni.

Uno dei risultati più significativi della replica riguarda infatti la necessità di *impara-*

re a vedere la diffrazione. La visibilità delle frange non dipende soltanto dalla corretta disposizione dell'apparato, ma anche dall'esperienza dell'osservatore, dalla sua capacità di riconoscere strutture deboli e dalla conoscenza delle condizioni nelle quali cercarle. Questo aspetto consente di comprendere meglio anche il merito di Grimaldi: a differenza dello sperimentatore moderno che ne replica le osservazioni, egli non disponeva né di una teoria ondulatoria della luce né di una tradizione sperimentale consolidata che gli permettesse di interpretare immediatamente ciò che osservava.

La replica ha inoltre mostrato quanto la descrizione grimaldiana fosse legata a condizioni operative precise: la dimensione del foro, l'oscuramento dell'ambiente, la distanza tra foro, ostacolo e schermo, la posizione dell'osservatore e la scelta dell'oggetto diffrangente. Questi elementi aiutano a comprendere anche la ricezione discontinua degli esperimenti contenuti nella *Physico-Mathesis*: Fabri ottenne risultati variabili, Mariotte dichiarò di non essere riuscito a riprodurre il fenomeno, Newton misurò accuratamente le frange esterne ma non riconobbe quelle interne. In assenza di informazioni complete sugli apparati impiegati da questi autori, non è possibile stabilire con certezza le ragioni dei loro insuccessi. Tuttavia, le difficoltà incontrate nella replica suggeriscono che la riproduzione degli esperimenti di Grimaldi richiedesse una conoscenza operativa molto più dettagliata di quanto potesse emergere da resoconti indiretti o da reinterpretazioni parziali, ai quali molti di questi autori presumibilmente si affidarono.

Da questo punto di vista, il caso di Newton è particolarmente significativo. La replica qui realizzata mostra infatti come la scelta di impiegare capelli come oggetti diffrangenti possa contribuire ad alimentare l'ipotesi secondo cui Newton non avrebbe avuto una conoscenza diretta della *Physico-Mathesis*, pur citando Grimaldi in più occasioni nei suoi lavori. Grimaldi stesso, infatti, aveva osservato che le frange interne non risultavano visibili quando l'ostacolo era troppo sottile: un'indicazione operativa che, se conosciuta e compresa da Newton, avrebbe potuto orientare diversamente la scelta dell'oggetto diffrangente. Questo elemento, insieme ad altre osservazioni poi riprese e chiarite da Young e Fresnel, come la necessità che il corpo sia illuminato da entrambi i lati per rendere visibili le frange interne, mostra quanto alcune indicazioni operative presenti nell'opera grimaldiana fossero rilevanti, ma siano rimaste a lungo in secondo piano nella tradizione ottica successiva.

Sul piano strettamente teorico, è necessario riconoscere che Grimaldi non giunse a una spiegazione corretta dei fenomeni osservati. Come emerso dallo stato dell'arte, egli viene spesso presentato come un precursore dell'ottica ondulatoria. Dalla lettura dell'opera emerge come sia improprio attribuirgli una vera e propria teoria ondulatoria della luce nel significato che tale espressione avrebbe assunto nei secoli successivi. Il ricorso alle ondulazioni compare infatti soprattutto nel tentativo di spiegare la formazione dei

colori: appare quindi più corretto parlare, con la necessaria cautela, di un'ipotesi ondulatoria del colore, senza ridurre in alcun modo la portata del suo contributo. Grimaldi consegna ai posteri un'immagine della luce molto più definita di quella ricevuta dalla tradizione precedente. Nella sua concezione, essa è un fluido materiale dotato di una velocità elevatissima, ma non infinita, capace di propagarsi in linea retta secondo le leggi dell'ottica geometrica e, in particolari condizioni, di diffrangersi in prossimità degli ostacoli. La luce per l'autore presenta inoltre numerose analogie con le onde prodotte nell'acqua, con il suono e con gli effluvi magnetici: tali accostamenti non devono essere letti nel significato che avrebbero assunto nelle teorie successive, ma mostrano come Grimaldi avesse riunito e posto al centro della discussione diversi elementi destinati a trovare pieno sviluppo nell'ottica fisica, primo fra tutti il fenomeno della diffrazione.

Ciò che emerge con chiarezza è la piena consapevolezza con cui Grimaldi presentò la diffrazione come un fenomeno nuovo rispetto alla tradizione precedente. Egli scelse di collocare la descrizione in apertura dell'opera, attribuendole fin dalle prime pagine un ruolo centrale nella discussione sulla natura della luce e dei colori. Nel corso del trattato tornò più volte sul fenomeno, richiamando anche numerose esperienze tratte dal suo laboratorio domestico, come l'osservazione della luce attraverso piume e tessuti finemente intrecciati. In questo senso, la sua indagine rivela una forte coerenza interna, riconosciuta anche da studiosi come Goethe.

Da questo punto di vista, la posizione di Grimaldi si distingue da osservazioni precedenti, come quella di Maurolico. Sebbene entrambi avessero osservato fenomeni oggi riconducibili alla diffrazione e ne avessero proposto una spiegazione errata, essi si collocano su piani epistemologici completamente differenti. Maurolico registrò un effetto luminoso particolare, interpretandolo però all'interno delle categorie dell'ottica geometrica tradizionale. Grimaldi, pur senza giungere a una teoria corretta, comprese invece che la luce poteva propagarsi secondo un modo distinto dalla propagazione diretta, dalla riflessione e dalla rifrazione, e introdusse per esso il termine *diffrazione*. Se per scoperta si intende non soltanto l'aver osservato per la prima volta un certo fenomeno, ma l'averlo isolato, distinto da quelli già conosciuti e trasformato in oggetto di una ricerca sistematica, il merito deve continuare a essere attribuito a Grimaldi. Resta comunque plausibile che Grimaldi conoscesse il passo di Maurolico e che ne avesse ripreso l'osservazione senza citarlo, come accade anche in altri punti della *Physico-Mathesis*. Tuttavia, non è possibile dimostrare una dipendenza diretta, anche perché il ricorso a oggetti comuni nelle spiegazioni, in questo caso la piuma, rappresenta, come si è visto, un tratto distintivo della scienza grimaldiana.

Da un punto di vista storiografico restano ancora alcune questioni aperte, tra cui quella relativa al significato da attribuire alla divisione dell'opera in due libri. Non è

possibile determinare con certezza se tale suddivisione rispecchiasse uno stato di reale perplessità, un espediente dialettico volto ad aggirare eventuali rilievi della censura o se, addirittura, il secondo libro sia da attribuire al maestro Riccioli. In assenza di carteggi, appunti o altre testimonianze dirette, è probabile che su questo aspetto non sia possibile giungere a una risposta definitiva.

La figura di Grimaldi invita inoltre a riconsiderare il ruolo dei gesuiti nel contesto della Rivoluzione scientifica. Una lettura fondata sulla semplice contrapposizione tra la Compagnia di Gesù e la scienza galileiana non consente infatti di cogliere la complessità dell'ambiente bolognese in cui operarono figure come Riccioli e Grimaldi, e che questo lavoro ha cercato di ricostruire. Il gesuita bolognese partecipò alla prima verifica sperimentale della legge galileiana di caduta dei gravi, contribuì a una ricerca astronomica fondata sulla cooperazione con studiosi esterni all'ambiente dei gesuiti e accolse nella propria opera ottica elementi riconducibili alla nuova scienza, tra i quali anzitutto la centralità assunta dall'esperimento nella comprensione dei fenomeni della natura. Ciò non significa, tuttavia, che nell'opera non si avvertano gli effetti dell'ambiente religioso e culturale nel quale Grimaldi si era formato e continuava a operare. In diversi passaggi egli rimane infatti legato alle categorie della tradizione scolastica, che talvolta entrano in tensione con i risultati delle sue stesse osservazioni e con le sue argomentazioni. La novità del metodo sperimentale convive dunque con schemi concettuali ereditati dal passato, dai quali Grimaldi non riesce sempre a distaccarsi completamente.

Tra i possibili sviluppi futuri della presente ricerca, un primo ambito riguarda le applicazioni didattiche della replica sperimentale. L'impiego di materiali semplici, unito all'uso della luce bianca, potrebbe infatti consentire di riproporre gli esperimenti di Grimaldi in contesti scolastici, universitari o nella formazione degli insegnanti. In questa prospettiva, la replica potrebbe diventare uno strumento utile per affrontare alcune delle difficoltà, ampiamente evidenziate dalla letteratura didattica, che gli studenti incontrano nel passaggio dall'ottica geometrica all'ottica ondulatoria. Sarebbe quindi interessante in futuro progettare e sperimentare specifici percorsi didattici, volti a verificare se l'osservazione diretta della diffrazione a partire dal testo di Grimaldi possa favorire la comprensione dei fenomeni ondulatori della luce da parte degli studenti.

Un secondo sviluppo potrebbe consistere nella ricostruzione sperimentale delle misure di Young e di Fresnel, per le quali sono disponibili indicazioni più precise sulle distanze e sugli strumenti impiegati. Ciò permetterebbe di seguire, anche sul piano pratico, il passaggio dalla descrizione prevalentemente qualitativa di Grimaldi a misure quantitative delle frange di diffrazione, mostrando anche come uno stesso fenomeno sia stato progressivamente reinterpretato all'interno di quadri teorici e sperimentali sempre più raffinati.

Sul piano storico, restano infine da approfondire alcuni contributi attribuiti a Grimaldi da Riccioli, come ad esempio la costruzione o il perfezionamento del compasso di proporzione. Un'indagine più mirata su questo aspetto potrebbe contribuire in futuro ad ampliare ulteriormente il profilo scientifico del gesuita bolognese, mostrando come la sua attività non si limitasse all'ottica, ma si estendesse anche a molti altri ambiti scientifici.

In conclusione, la vicenda di Grimaldi mostra come il riconoscimento di un contributo scientifico non coincida necessariamente con il momento della sua formulazione. La sua figura rimase, e per molti aspetti rimane ancora, in secondo piano rispetto a protagonisti più influenti della storia dell'ottica, primo fra tutti Newton, la cui autorità contribuì a orientare per decenni la riflessione sulla natura della luce. Si tratta tuttavia di una dinamica ricorrente nella storia della scienza: molte scoperte sono state comprese e valorizzate soltanto dopo una lunga gestazione, attraverso nuove conferme, nuove cornici teoriche o successive reinterpretazioni.

Anche il problema sollevato da Grimaldi, relativo alla natura della luce e alla possibilità di considerarla sostanza o accidente, non si esaurì con la *Physico-Mathesis*, né trovò una soluzione definitiva con i contributi di Young e Fresnel. Al contrario, esso continuò a ripresentarsi in forme nuove e diverse, fino ai fotoni di Einstein e agli sviluppi della fisica quantistica. Come si è visto, questo non deve sorprendere: tra i numerosi dibattiti che hanno attraversato la storia del pensiero scientifico, quello sulla natura della luce si distingue per durata, complessità e carattere interdisciplinare, poiché coinvolge non soltanto la fisica, ma anche la riflessione filosofica e, almeno nel contesto seicentesco, la tradizione teologica.

Proprio per questo, al termine di questo lavoro, appaiono particolarmente significative le parole con cui Young introduceva la propria riflessione sull'argomento: *«la natura della luce è un argomento che non ha alcuna importante rilevanza per le faccende della vita o per la pratica delle arti, ma è per molti altri versi estremamente interessante, specialmente perché porta a sostenere le nostre idee sia sulla Natura, sia sui nostri sensi, e in generale sulla struttura dell'universo»*.

Bibliografia

- An Account of Some Books. (1671). *Philosophical Transactions (1665–1678)*, 6, 3064–3074.
- Amaduzzi, L. (1928). *Per la scienza e per tre suoi insigni cultori (Grimaldi, Volta, Melloni)*. Zanichelli.
- Ambrose, B. S., Shaffer, P. S., Steinberg, R. N., & McDermott, L. C. (1999). An investigation of student understanding of single-slit diffraction and double-slit interference. *American Journal of Physics*, 67(2), 146–155.
- Aricò, D. (2002). Riccioli nella cultura bolognese del suo tempo. In *Giambattista Riccioli e il merito scientifico dei gesuiti nell'età barocca* (pp. 1000–1026). Leo S. Olschki.
- Baldini, U. (1992). *Legem impone subactis: studi su filosofia e scienza dei Gesuiti in Italia: 1540-1632*. Bulzoni.
- Baldini, U. (1996). La formazione scientifica di Giovanni Battista Riccioli. In L. Pepe (Cur.), *Copernico e la questione copernicana in Italia dal XVI al XIX secolo* (pp. 123–182). Olschki.
- Baldini, U. (2002). Riccioli e Grimaldi. In M. T. Borgato (Cur.), *Giambattista Riccioli e il merito scientifico dei Gesuiti nell'età barocca*. Olschki.
- Basdevant, J.-L. (2009). Le Mémoire de Fresnel sur la diffraction de la lumière. *Bibnum*.
- Battistini, A. (1988). La cultura scientifica nel collegio bolognese. In G. P. Brizzi & A. M. Matteucci (Cur.), *Dall'isola alla città. I gesuiti a Bologna*. Nuova Alfa Editoriale.
- Battistini, A. (1989). La struttura del De lumine di F.M. Grimaldi e le forme della sua ricezione newtoniana. *Giornale di Fisica*.
- Battistini, A. (2000). *Galileo e i gesuiti: miti letterari e retorica della scienza* (Vol. 12). Vita e Pensiero.
- Bettini, A. (2015). Francesco Maria Grimaldi: la diffrazione della luce. *Il Nuovo Saggiatore*, 31(1-2), 71–76.

- Bònoli, F. (2002). Riccioli e gli strumenti dell'astronomia. In *Giambattista Riccioli e il merito scientifico dei gesuiti nell'età barocca*. Leo S. Olschki.
- Borgato, M. T. (2002). Riccioli e la caduta dei gravi. In M. T. Borgato (Cur.), *Giambattista Riccioli e il merito scientifico dei gesuiti nell'età barocca*. Leo S. Olschki.
- Borgato, M. T. (2015). Galileo, i Gesuiti e la caduta dei gravi. *Atti dell'Accademia delle Scienze di Ferrara*, 92, 43–56.
- Bravo, S., & Pesa, M. (2015). El fenómeno de la difracción en la historia de la óptica y en los libros de texto: Reflexiones sobre sus dificultades de aprendizaje. *Investigações em Ensino de Ciências*, 20(2), 76–102.
- Breidbach, O., Heering, P., Müller, M., & Weber, H. (2010). Experimentelle Wissenschaftsgeschichte. In *Experimentelle Wissenschaftsgeschichte*. Brill.
- Burani, B. (2023). “Arte più che Humana, impareggiabile, e quasi dissì Divina”: Studio della Dioptrica Pratica di Carlo Antonio Manzini e della collezione di lenti del Museo di Palazzo Poggi e del Museo della Specola dell'Università di Bologna [Tesi di laurea magistrale]. Università di Bologna.
- Casamayou, V., Bousquet, B., Dillmann, J., Salin, N., Guillet, J.-P., Canioni, L., & Hachet, M. (2025). Pushing the boundaries of hands-on optics experiments with interactive digital simulation. *Discover Education*, 4(1).
- Cassini, G. D. (1810). Anecdotes de la vie de J.-D. Cassini rapportées par lui-même. In *Mémoires pour servir à l'histoire des sciences et à celle de l'Observatoire Royal de Paris*. Chez Bleuet.
- Cavazza, M. (2006). La scienza, lo Studio, i Gesuiti a Bologna nella metà del Seicento. *Giornale di astronomia: rivista di informazione, cultura e didattica della Società Astronomica Italiana*, 32(1), 1000–1009.
- Cavicchi, E. M. (2009). Exploring mirrors, recreating science and history, becoming a class community. *The New Educator*, 5(3), 249–273.
- Chang, H. (2011). How Historical Experiments Can Improve Scientific Knowledge and Science Education: The Cases of Boiling Water and Electrochemistry. *Science & Education*, 20, 317–341.

- Colin, P., & Viennot, L. (2001). Using two models in optics: Students' difficulties and suggestions for teaching. *American Journal of Physics*, 69(S1), S36–S44.
- Darrigol, O. (2010a). The analogy between light and sound in the history of optics from the ancient Greeks to Isaac Newton. Part 1. *Centaurus*, 52(2), 117–155.
- Darrigol, O. (2010b). The analogy between light and sound in the history of optics from the ancient Greeks to Isaac Newton. Part 2. *Centaurus*, 52(3), 206–257.
- Darrigol, O. (2012). *A History of Optics: From Greek Antiquity to the Nineteenth Century*. Oxford University Press.
- Dear, P. (1995). *Discipline and Experience: The Mathematical Way in the Scientific Revolution*. University of Chicago Press.
- Di Teodoro, E. M., Bònoli, F., & Bedogni, R. (2010). I primi esperimenti sulla caduta dei gravi: Galileo e Riccioli. *Giornale di Astronomia*, 36(3), 1000–1009.
- Dinis, A. (2003). Giovanni Battista Riccioli and the Science of His Time. In M. Feingold (Cur.), *Jesuit Science and the Republic of Letters* (pp. 195–224). MIT Press.
- Drake, S. (1970). Renaissance Music and Experimental Science. *Journal of the History of Ideas*, 31(4), 483–500.
- Drake, S. (1973). Galileo's Experimental Confirmation of Horizontal Inertia: Unpublished Manuscripts. *Isis*, 64(3), 291–305.
- Fabri, H. (1669). *Dialogi physici quorum primus est de lumine, secundus et tertius de vi percussione et motu, quartus de humoris elevatione per canaliculum, quintus et sextus de variis selectis*. Apud Antonium Molin.
- Fetherstonhaugh, A., Happs, J., & Treagust, D. (1987). Student misconceptions about light: A comparative study of prevalent views found in Western Australia, France, New Zealand, Sweden and the United States. *Research in Science Education*, 17(1), 156–164.
- Fors, H., Principe, L. M., & Sibum, H. O. (2016). From the Library to the Laboratory and Back Again: Experiment as a Tool for Historians of Science. *Ambix*, 63(2), 85–97.
- Fresnel, A. J. (1866). *Œuvres complètes d'Augustin Fresnel* (Vol. 1). Imprimerie impériale.

- Fresnel, A.-J. (1826). Mémoire sur la diffraction de la lumière. *Mémoires de l'Académie royale des sciences de l'Institut de France*, 5, 339–475.
- Galilei, G. (1638). *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze attenenti alla meccanica & i movimenti locali*. Appresso gli Elsevirii.
- Galili, I., & Hazan, A. (2000). The influence of an historically oriented course on students' content knowledge in optics evaluated by means of facets-schemes analysis. *American Journal of Physics*, 68(S1), S3–S15.
- Goethe, J. W. (2013). *La storia dei colori* (R. Troncon, Trad.). Luni Editrice.
- Goldberg, F. M., & McDermott, L. C. (1986). Student difficulties in understanding image formation by a plane mirror. *The Physics Teacher*, 24(8), 472–481.
- Graney, C. M. (2015). *Setting Aside All Authority: Giovanni Battista Riccioli and the Science Against Copernicus in the Age of Galileo*. University of Notre Dame Press.
- Grimaldi, F. M. (1665). *Physico-mathesis de lumine, coloribus, et iride, aliisque adnexis libri duo*. Ex typographia Haeredis Victorii Benatii.
- Grusche, S. (2015). Revealing the nature of the final image in Newton's experimentum crucis. *American Journal of Physics*, 83(7), 583–589.
- Guidi, S. (2018). Lux sive qualitas: incorporeità ed estensione della luce nell'aristotelismo iberico e italiano di primo Seicento. *Galilaeana: Journal of Galilean Studies*, 15, 61–81.
- Hall, A. R. (1990). Beyond the Fringe: Diffraction as Seen by Grimaldi, Fabri, Hooke and Newton. *Notes and Records of the Royal Society of London*, 44(1), 13–23.
- Heering, P. (1992). On Coulomb's inverse square law. *American Journal of Physics*, 60(11), 988–994.
- Heering, P. (2000). Getting shocks: Teaching secondary school physics through history. *Science & Education*, 9(4), 363–373.
- Heering, P. (2009). The role of historical experiments in science teacher training: experiences and perspectives. *Actes d'història de la ciència i de la tècnica*, 2(1), 389–395.

- Heering, P. (2010). An Experimenter's Gotta Do What an Experimenter's Gotta Do—But How? In *Experimentelle Wissenschaftsgeschichte*. Brill.
- Heering, P., & Wittje, R. (2012). An historical perspective on instruments and experiments in science education. *Science & Education*, 21(2), 151–155.
- Helmholtz, H. v. (1873). *Popular Lectures on Scientific Subjects*. Longmans, Green, Co.
- Höttecke, D. (2000). How and What Can We Learn From Replicating Historical Experiments? A Case Study. *Science & Education*, 9(4), 343–362.
- Höttecke, D., Henke, A., & Riess, F. (2012). Implementing history and philosophy in science teaching: Strategies, methods, results and experiences from the European HIPST project. *Science & Education*, 21(9), 1233–1261.
- Huygens, C. (1690). *Traité de la lumière: Où sont expliquées les causes de ce qui luy arrive dans la réflexion, & dans la réfraction, et particulièrement dans l'étrange réfraction du cristal d'Islande*. Pierre van der Aa.
- Jori, A. (2020). La teoria aristotelica dei colori tra fisica e fisiologia. *Medicina nei secoli*, 32(2), 491–542.
- La Sacra Bibbia. Versione CEI 2008*. (2008). Libreria Editrice Vaticana.
- Libri, G. (1840). *Histoire des sciences mathématiques en Italie, depuis la Renaissance des lettres jusqu'à la fin du dix-septième siècle* (Vol. 3). Jules Renouard et Cie.
- Lohne, J. A. (1968). Experimentum Crucis. *Notes and Records of the Royal Society of London*, 23(2), 169–199.
- Mach, E. (2013). *The Principles of Physical Optics: An Historical and Philosophical Treatment*. Courier Corporation.
- MacLachlan, J. (1976). Galileo's Experiments with Pendulums: Real and Imaginary. *Annals of Science*, 33(2), 173–185.
- MacLachlan, J. (1998). Experiments in the History of Science. *Isis*, 89(1), 90–92.
- Marcacci, F. (2018). Un gesuita contro tutti: astronomia e pensiero di Giovanni Battista Riccioli. *Giornale di astronomia: rivista di informazione, cultura e didattica della Società Astronomica Italiana*, 44(3), 11–20.

- Marcacci, F. (2019). Lo statuto dell'astronomia e il metodo delle ipotesi secondo Giovanni Battista Riccioli. *Syzethesis*, 1, 9–24.
- Marek, J. (1973). Grimaldi's ideas concerning magnetism. *Physis*, 15(2), 148–156.
- Mariotte, E. (1717). Traité de la nature des couleurs. In *Œuvres de M. Mariotte* (Vol. 1). Pierre Vander Aa.
- Mascart, É. É. N. (1889). *Traité d'optique* (Vol. 1). Gauthier-Villars.
- Matteoli, G. (2023). *La storia della scienza nell'epoca delle accademie scientifiche. Da Cassini a D'Alembert (1693–1758)* [Tesi di dottorato]. Università degli Studi di Torino.
- Maurolico, F. (1613). *Theoremata de lumine et umbra ad perspectivam et radio-rum incidentiam facientia; Diaphanorum partes, seu libri tres; Problemata ad perspectivam et iridem pertinentia*. Apud Bartholomaeum Vincentium.
- Mercier, M. (2022). In einem anderen Licht: Das Youngsche Doppelspaltexperiment. In *Kanonische Experimente der Physik: Fachliche Grundlagen und historischer Kontext* (pp. 67–87). Springer Berlin Heidelberg.
- Merli, V. (2018). *L'esperimento di Grimaldi e la storia della diffrazione* [Tesi di laurea triennale]. Università di Bologna.
- Millar, R. (1987). Towards a role for experiment in the science teaching laboratory. *Studies in Science Education*, 14(1), 109–118.
- Moser, T. J., & Robinson, E. A. (2024). What Huygens Could Have Written on Diffraction. In *Walking with Christiaan Huygens: From Archimedes' Influence to Unsung Contributions in Modern Science* (pp. 251–292). Springer Nature Switzerland.
- Mottana, A., Ferraris, G., & Brunori, M. (2013). The Centennial of X-Ray Diffraction (1912–2012). *Rendiconti Lincei. Scienze Fisiche e Naturali*, 24(S1), 1–5.
- Newton, I. (1704). *Opticks: or, A Treatise of the Reflexions, Refractions, Inflexions and Colours of Light*. Sam. Smith; Benj. Walford.
- Park, D. A. (1997). *The Fire Within the Eye: A Historical Essay on the Nature and Meaning of Light*. Princeton University Press.

- Patrignani, G. A. (1730). *Menologio di pie memorie d'alcuni religiosi della Compagnia de Gesù* (Vol. 1). Pezzana.
- Peacock, G. (1855). *Life of Thomas Young, M.D., F.R.S., &c.; and One of the Eight Foreign Associates of the National Institute of France*. John Murray.
- Pestre, D. (1994). La pratique de reconstitution des expériences historiques, une toute première réflexion. In C. Blondel & M. Dörries (Cur.), *Restaging Coulomb: Usages, controverses et pratiques expérimentales* (pp. 17–30).
- Pestre, D. (1995). Pour une histoire sociale et culturelle des sciences: Nouvelles définitions, nouveaux objets, nouvelles pratiques. *Annales. Histoire, Sciences Sociales*, 50(3), 487–522.
- Petruzzelli, G. (2012). *La luce e i colori: Il caso Grimaldi tra scienza e fede*. Progedit.
- Pineda de Ávila, N. (2024). Universal enough: the politics of nomenclature in seventeenth-century selenography. *The British Journal for the History of Science*, 57, 623–643.
- Polanyi, M. (1966). *The Tacit Dimension*. Routledge & Kegan Paul.
- Pumfrey, S. (2011). La selenografia di William Gilbert: la sua mappa lunare pre-telescopica e la sua scoperta della librazione lunare. *Journal for the History of Astronomy*, 42(2), 193–203.
- Raynaud, D., & Zanier, S. (2025). An Account of Diffraction Before Grimaldi (1665) in Maurolico's Problemata ad perspectivam et iridem pertinentia (1567). *Physics in Perspective*.
- Riccioli, G. B. (1651). *Almagestum novum astronomiam veterem novamque complectens observationibus aliorum, et propriis*. Haeredis Victorii Benatii.
- Riccioli, G. B. (1661). *Geographiae et hydrographiae reformatae libri duodecim*. Ex typographia haeredis Victorii Benatii.
- Riccioli, G. B. (1665). *Astronomia reformata*. Erede di V. Benacci.
- Riccioli, G. B. (1669). *Chronologia reformata et ad certas conclusiones redacta*. Barbieri.

- Riess, F. (2000). History of physics in science teacher education at Oldenburg. *Science & Education*, 9(4), 399–402.
- Ronchi, V. (1952). *Storia della luce* (2^a ed.). Zanichelli.
- Sabra, A. I. (1981). *Theories of light: From Descartes to Newton*. Cambridge University Press.
- Savelli, R. (1951). Grimaldi e la rifrazione. *Cesalpinia*.
- Savelli, R. (1956). Jacopo Bartolomeo Beccari n'a pas découvert le gluten. *Actes du VIIIe Congrès International d'Histoire des Sciences*.
- Settle, T. B. (1961). An Experiment in the History of Science. *Science*, 133(3445), 19–23.
- Settle, T. B. (1995). La rete degli esperimenti Galileiani. In P. Bozzi, C. Maccagni, C. Olivieri & T. B. Settle (Cur.), *Galileo e la scienza sperimentale* (pp. 11–62). Dipartimento di Fisica Galileo Galilei.
- Sibum, H. O. (1995). Reworking the mechanical value of heat: Instruments of precision and gestures of accuracy in early Victorian England. *Studies in History and Philosophy of Science Part A*, 26(1), 73–106.
- Sibum, H. O. (2022). Knowledge in action: Experimenting in history and science. *Physis: Rivista internazionale per la storia della scienza*, 57(1), 127–138.
- Sichau, C. (2000). Practice Helps: Thermodynamics, History and Experiment. *Science & Education*, 9, 389–398.
- Stuewer, R. H. (1970). A Critical Analysis of Newton's Work on Diffraction. *Isis*, 61(2), 188–205.
- Tabarroni, G. (1964). Nel terzo centenario della morte di Francesco Maria Grimaldi. *Coelum*, 31(11-12).
- Tabarroni, G. (1998). Francesco Maria Grimaldi (1618-1663) e il ramo bolognese della sua famiglia. *Atti e Memorie della Deputazione di Storia Patria per le Province di Romagna*.
- Taub, L. (2011). Introduction: Reengaging with Instruments. *Isis*, 102(4), 689–696.

- Thayer, W. R. (1894). Leonardo da Vinci as a Pioneer in Science. *The Monist*, 4(4), 507–532.
- Tural, G. (2015). Active learning environment with lenses in geometric optics. *Asia-Pacific Forum on Science Learning and Teaching*, 16(1).
- Voskuhl, A. (1997). Recreating Herschel’s Actinometry: An Essay in the Historiography of Experimental Practice. *The British Journal for the History of Science*, 30(3), 337–355.
- Wood, R. W. (1911). *Physical Optics* (2^a ed.). The Macmillan Company.
- Young, T. (1804). The Bakerian Lecture: Experiments and Calculations Relative to Physical Optics. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 94, 1–16.
- Zanini, V. (2022). La storia sulla Luna. *Società italiana degli storici della fisica e dell’astronomia: Atti del XLI Convegno annuale*, 325–330.
- Zanini, V., & Gargano, M. (2021). L’affermazione selenografica di Giovan Battista Riccioli, tra nomenclature celesti e cartografie planetarie. *Società italiana degli storici della fisica e dell’astronomia: atti del XL Convegno annuale*, 57–64.

Ringraziamenti

Chi mi conosce sa bene quanto sia stata felice di aver scelto questo percorso e quanto questi ultimi due anni siano stati per me stimolanti e ricchi di soddisfazioni. Accanto alla qualità dell'insegnamento e alle opportunità che mi sono state offerte, però, sono state soprattutto le persone che mi sono state accanto, e quelle incontrate lungo il cammino, a rendere questa esperienza davvero speciale. È a loro che, con profonda gratitudine, desidero dedicare i prossimi pensieri.

Ringrazio innanzitutto chi ha reso possibile la realizzazione di questo lavoro. Un sentito grazie va al prof. Eugenio Bertozzi, per avermi dato l'opportunità di lavorare a un progetto che mi ha profondamente appassionata e per aver sempre sostenuto il mio interesse per la Storia della Fisica. La sua passione per questa disciplina e i suoi preziosi consigli resteranno per me un insegnamento fondamentale, che porterò sempre nel cuore e nel mio futuro professionale. Un ringraziamento speciale va inoltre a Stefano Meneghini per la pazienza, la disponibilità e l'aiuto nella realizzazione delle fotografie presenti in questa tesi.

A Davide, a cui dedico questo traguardo, va il mio grazie più grande. Senza dubbio sei la persona che più di tutte mi è stata accanto in questo percorso, sempre pronto ad ascoltarmi e a sostenermi nonostante la distanza. Non sono mai stata brava a trovare le parole giuste per dire certe cose e probabilmente queste poche righe non basterebbero comunque per ringraziarti per tutto ciò che fai e sei per me. Grazie per l'amore che mi dimostri ogni giorno, per essere la persona più genuina che io conosca e quella con cui desidero costruire il mio futuro. Sono convinta che la notizia migliore per te, oggi, sia che non sentirai nominare Grimaldi per un bel pezzo!

Un ringraziamento speciale va naturalmente a mio padre e a mio fratello. Il vostro amore e la vostra forza sono stati una presenza costante, che mi ha accompagnata in ogni momento di questo cammino. Spero davvero di avervi resi orgogliosi del traguardo che oggi festeggiamo insieme.

Ringrazio Letizia e Valeria, punti fermi da anni, sin dai banchi di scuola, che hanno continuato a sostenermi con l'affetto e la naturalezza di chi mi conosce praticamente da sempre. Grazie anche a Francesco e Annamaria, i miei cari amici fisici, per essere rimasti presenti nonostante le nostre strade abbiano preso direzioni diverse: grazie per le risate, i ricordi condivisi e per essere passati a trovarmi in questi anni bolognesi.

Un riconoscimento profondo va a Luca, una spalla su cui poter contare e con cui ho condiviso una parte importante di questo viaggio. Siamo partiti insieme poco meno di due anni fa, con due pesanti valigie in mano e senza neanche una stanza in cui poter stare, e siamo arrivati fin qui. Mi hai detto più volte di provare gratitudine nei miei confronti, ma non immagini quanta ne provi io per te: per la tua sincera amicizia, per esserci ormai da anni, per avermi aiutata a superare i momenti più bui e a ritrovare, giorno dopo giorno, fiducia in me stessa.

Grazie a tutta la redazione, un gruppo di amici prima che di colleghi di lavoro. Grazie per condividere con me l'amore per la scienza e per fare di un lavoro una passione. Un grazie sincero va a Nicola, con cui ho condiviso non solo scadenze e revisioni, ma anche innumerevoli pranzi a mensa e tanti momenti di pura e spensierata leggerezza bolognese.

Il mio pensiero va poi a tutte le meravigliose persone incontrate a Bologna, una città che ho amato ogni singolo giorno e che mi ha accolta e accompagnata in una fase importante della mia vita. In particolare, ringrazio Gennaro per le risate, le lunghe sessioni di studio e i momenti più spensierati di questi ultimi due anni. Desidero ringraziare Samuele e Francesco, persone di cui nutro una profonda stima e con cui mi sono confrontata quotidianamente durante la stesura della tesi. Accanto a loro, ringrazio tutti i miei compagni di corso che, pur non potendo citare singolarmente, ricordo con affetto per le pause tra una lezione e l'altra e le infinite ore passate a preparare progetti ed esami insieme. Un grazie affettuoso va a Luna e Nicolle, le mie coinquiline, per l'allegria e le nostre interminabili conversazioni dopo cena. Resterete tutti per sempre nel mio cuore.

Infine, un ringraziamento va anche a me stessa per aver saputo affrontare questo percorso con dedizione e tenacia, e per poter finalmente guardare con orgoglio a ciò che ho raggiunto. Oggi si chiude un capitolo importante, con l'augurio che questo traguardo sia soltanto l'inizio di tante cose belle!