

2015: anno internazionale della luce.

Tra particelle e onde: teorie, filosofi e scienziati alla ricerca di un modello sulla natura e sulla modalità di propagazione della luce.

(M. Reggio)

1. L'ANNO DELLA LUCE ED I FILOSOFI ANTICHI.

Con una risoluzione dell'assemblea generale tenutasi il 20 dicembre 2013, l'UNESCO ha decretato il 2015 "Anno Internazionale della Luce (ILY)".

(V. il testo del decreto, <http://www.light2015.org/Home/About/Resources.html>).

Le motivazioni elencate per motivare la scelta di questo anno, procedono dal verificarsi di varie ricorrenze:

"... il 2015 coincide con gli anniversari di una serie di importanti pietre miliari nella storia della scienza della luce, compresi i lavori di ottica di Ibn Al-Haytham nel 1015, la nozione di luce come onda, proposta da Fresnel nel 1815, ... la teoria elettromagnetica della propagazione della luce proposta da Maxwell nel 1865, la teoria di Einstein sull'effetto fotoelettrico nel 1905, l'inserimento della modalità di propagazione della luce in cosmologia tramite la teoria della relatività generale nel 1915, la scoperta del fondo cosmico a microonde di Penzias e Wilson, e i risultati ottenuti da Kao riguardanti la trasmissione della luce nelle fibre ottiche per telecomunicazioni, entrambi risalenti al 1965." (Tratto dal testo del Decreto, e tradotto liberamente dall'A.).

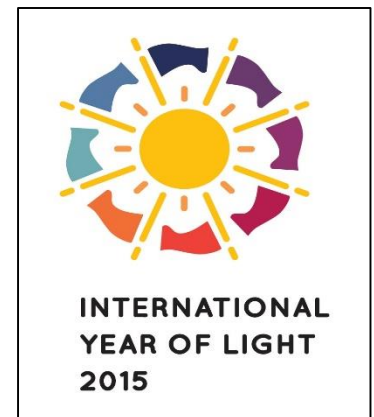


fig.1: Il logo ufficiale UNESCO

1.1. Ibn Al-Haytham (965 – 1039). Oltre alle altre tappe decisive per il progresso della conoscenza dei fenomeni luminosi, tutte in anni con il "5" come ultima cifra, risulta particolarmente interessante il richiamo ad Ibn Al-Haytham (o Alhazen) ed ai sette volumi del suo ponderoso trattato di ottica, pubblicati tra il 1011 e il 1021, trattato che risale quindi quasi esattamente a mille anni fa (<https://en.wikipedia.org/?title=Alhazen>). Alhazen riuniva le idee classiche sulla luce e sulla visione alle teorie geometriche euclidee e non trascurava l'impiego di metodi sperimentali a sostegno delle sue teorie. Naturalmente i suoi lavori di ricerca ed i suoi studi non potevano prescindere dalle teorie sulla luce e sulla visione di Empedocle (V sec. a.C.) di Platone (400 a.C.), dell'"Ottica" di Euclide (300 a.C.), di Tolomeo e Galeno (entrambi II sec. d.C.): in effetti il trattato sull'ottica di Alhazen trae principale ispirazione dall'Ottica di Tolomeo, mentre lo studio dell'anatomia e della fisiologia dell'occhio si basa sui lavori di Galeno e la trattazione matematico-geometrica della propagazione della luce si impernia sul metodo euclideo.

Nell'antichità le teorie sulla visione seguivano due filoni principali: quello dell'**emissione** dei raggi di luce dall'occhio (p.es. Euclide, Tolomeo) e quello della **intromissione** (teoria p. es. sostenuta da Aristotele e seguita anche da Alhazen), in cui la visione era generata da raggi che *entravano* nell'occhio. Nonostante la teoria dell'intromissione fosse sostenuta anche dal poeta latino Lucrezio nel 55 d.C., che nel *De Rerum Natura* si ispira con molta precisione alle teorie atomistiche di Democrito (in qualche modo assimilabili alla teoria corpuscolare sulla natura della luce), l'autorevolezza di Tolomeo e di Galeno fece sì che la teoria emissiva prevalesse ancora per molto tempo. D'altra parte ancora oggi è in uso l'espressione "perdere il lume degli occhi" per indicare lo stato d'animo di una persona "accecata" dall'ira. Un'altra piccola curiosità: da una ricerca condotta da Winer et al. **nel 2002 risulta che il 50% degli studenti liceali americani è convinto della teoria emissiva** ([https://en.wikipedia.org/wiki/Emission_theory_\(vision\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Emission_theory_(vision))).



Fig. 2: Banconota irachena da 10 dinari dedicata a Alhazen (1980) (<https://en.wikipedia.org/?title=Alhazen>)

2. L'ERA MODERNA (secondo la periodizzazione classica: dal 1492, scoperta dell'America, al 1815, Congresso di Vienna).

2.1. Leonardo da Vinci (1452 – 1519). Pur avendo iniziato a scrivere vari trattati, non risulta che Leonardo da Vinci ne abbia pubblicato nessuno mentre era in vita. Tuttavia nel 1509 raccontò a Luca Pacioli di aver terminato un trattato sulla "pictura et movimenti umani". Pare che questo trattato si componesse di diciotto capitoli, di cui oggi sono noti solo sette (il primo manoscritto del trattato si trovava alla corte di Urbino, ed oggi è conservato presso la Biblioteca Apostolica Vaticana col nome di *Codex Urbinas Latinus 1270*) (https://it.wikipedia.org/wiki/Trattato_della_pittura).



Fig. 3: Leonardo da Vinci, autoritratto (1515?). Torino, Biblioteca Reale (https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Leonardo_self.jpg)

E' particolarmente significativo che Leonardo ne avesse parlato con il Pacioli, con il quale condivideva spesso riflessioni e studi in ambito scientifico. Il frate francescano Luca Pacioli è noto infatti per le sue conoscenze in ambito matematico e geometrico: non va dimenticato che è suo il ritratto impresso sulla moneta da 500 lire coniata nel 1994 a celebrare i cinquecento anni dalla sua nascita. In particolare Pacioli è ricordato come il fondatore e perfezionatore della "partita doppia" nell'ambito finanziario. Il dettaglio dei rapporti tra Leonardo e Pacioli a riguardo del "Trattato della pittura", pubblicato postumo, non è di poco conto, in quanto sta a testimoniare il carattere "scientifico" che Leonardo attribuiva alla pittura, che lui non considerava semplicemente come un'"arte": *"Ogni aspetto viene infatti ricondotto alla*

comprensione sistematica di quei fenomeni fisici, matematici e geometrici che ne determinano la percezione visiva. Per Leonardo è proprio l'applicazione della logica, delle discipline matematiche e geometriche, dell'anatomia e dell'ottica che nobilita la pittura" (ibid.).

Da eccelso pittore quale era, Leonardo non poteva non occuparsi dei colori, che distingueva in sei colori fondamentali: il bianco, il giallo, il verde, l'azzurro, il rosso, il nero. Ma il nostro non cade nel tranello del senso comune, e spiega: "*De' semplici colori il primo è il bianco, benché i filosofi (... oggi si direbbe: "gli scienziati"...) non accettano né il bianco né il nero nel numero de' colori, perché l'uno è causa de' colori (...quindi c'era già la consapevolezza che l'insieme dei colori fosse presente nel colore bianco! ...), l'altro è privazione. Ma perché il pittore non può far senza di questi, noi li metteremo nel numero degli altri ...*" (dal cap. CLXI del Trattato della pittura). Particolarmente interessante, vista la sua esperienza di pittore, risulta la considerazione sulla composizione dei colori, basata non solo su quelli mischiati sulla tavolozza, ma anche quella dei corpi illuminati con luce colorata:

"Molte sono le volte che le superficie de' corpi opachi nel tingersi de' colori de' loro obietti (... corpi illuminatori, ...) pigliano colori che non sono in essi obietti. Provasi: 'cd' sia il corpo opaco, ed 'ab' sia il suo obietto, il quale porremo che sia di color giallo, ed il corpo opaco azzurro; dico che tutta la parte della superficie 'dnc' di tal corpo opaco, che in sè è azzurro, si dimostrerà esser verde, ed il simile farebbe se l'opaco fosse giallo e l'obietto azzurro" (Trattato della pittura, parte quinta – Dell'ombra e lume, e della prospettiva).

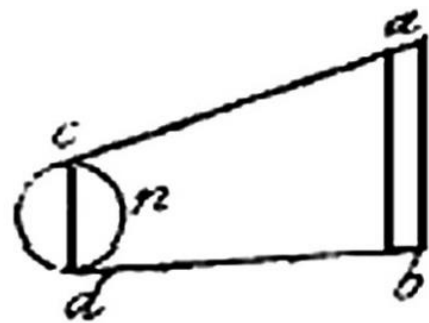


Fig. 4: V. testo a fianco

Con questa osservazione, evidentemente di tipo sperimentale, Leonardo dimostrò che il colore non era una proprietà intrinseca dei corpi opachi, bensì dipendeva anche dal colore della luce del corpo illuminante

Leonardo, oltre ad occuparsi di vari altri aspetti dell'ottica, dallo studio dell'anatomia dell'occhio alla formazione delle immagini nella "camera oscura" (nota anche come "camera stenopeica"), ebbe anche un'intuizione straordinaria, in grande anticipo sui tempi: quella di onde che si spostano senza trasporto di materia. Egli osservò infatti come le spighe di grano mosse dal vento si piegano e si drizzano descrivendo come delle onde che si spostano lungo la direzione del vento percorrendo l'intera superficie del campo senza che i loro steli si spostino dal punto in cui sono radicati. (<http://www.gses.it/pub/scienziati-luce.pdf>)

2.2. René Descartes (1596 – 1650). Nel 1637 Cartesio (René Descartes) pubblica "La Dioptrique", un trattato sulla luce e sulla visione. Per illustrare il suo pensiero utilizza l'esempio del cieco: egli procede descrivendo come un cieco, o una persona che si muova nel buio possa percepire la presenza e la forma di oggetti intorno a lui con l'aiuto di due bastoni. Il contatto dei bastoni con l'oggetto da percepire si trasmette alle mani del cieco e da queste ai nervi e quindi al cervello dandogli la percezione della forma dell'oggetto esplorato: "*Quindi la luce non è altro, nei corpi che si chiamano luminosi, che un certo movimento o un'azione molto pronta e viva, che passa verso i nostri occhi per il tramite dell'aria e degli altri corpi trasparenti, allo stesso modo che il movimento o la resistenza dei corpi che incontra il cieco, passa verso la sua mano, per il tramite del suo bastone*" (http://www.anisn.it/matita_ipertesti/visione/cartesio.htm).

Secondo il filosofo e matematico francese, quindi, la luce è costituita da corpuscoli proiettati verso i nostri occhi dagli oggetti osservati e la diversificazione dei colori è dovuta alla rotazione delle particelle che a seconda della velocità di rotazione su se stesse nell'interazione con gli occhi generano una pressione diversa e quindi danno origine ad una sensazione diversa: una rotazione maggiore provoca la sensazione del rosso, mentre una rotazione (e quindi una pressione) minore provoca la sensazione della luce blu. (ibid.)



Fig. 5: Ritratto di Cartesio (Frans Hals, 1649, Museo del Louvre).
https://it.wikipedia.org/wiki/Cartesio#/media/File:Frans_Hals_-_Portret_van_Ren%C3%A9_Descartes.jpg

Su questa base Cartesio studiò le leggi della riflessione e della rifrazione: la legge della rifrazione fu pubblicata nel 1637 nella sua celebre opera "Discorso sul metodo" e ancora oggi porta il nome di "legge di Cartesio". In realtà pare che fosse stata enunciata già nel 1626 dal matematico olandese Willebrord van Royen Snell (1580 – 1626), che però non riuscì a pubblicarla e che fu resa nota dopo la sua morte da Christiaan Huygens (<http://turnbull.dcs.st-and.ac.uk/history/Mathematicians/Snell.html>).

Addirittura si fa risalire il primo enunciato della legge della rifrazione al matematico inglese Thomas Harriot (1560 – 1621), che la scoprì nel 1602, ma non la pubblicò (<http://www-rohan.sdsu.edu/~aty/explain/optics/discovery.html>).

Ad oggi le leggi della rifrazione prendono indifferentemente il nome di "Legge di Snell", "Legge di Cartesio", "legge di Snell Cartesio".

Cartesio supponeva che la velocità della luce fosse infinita, tuttavia diversi scienziati si cimentarono senza successo nel determinarne la velocità di propagazione, compreso Galileo. La risposta definitiva alla finitezza di questa velocità e ad una sua prima misura, per quanto approssimativa, si deve all'astronomo **Ole Christensen Rømer** (1644 – 1710) nel 1656, con l'osservazione del variare dei tempi di occultamento dei satelliti di Giove (i pianeti chiamati "Medicei" da Galileo) in funzione delle diverse distanze di Giove dalla terra. In questo modo veniva totalmente esclusa l'ipotesi della velocità infinita della luce, o della sua propagazione istantanea nello spazio.

La prima misura della velocità della luce nell'atmosfera, rilevando un valore molto prossimo a quello attuale, sarà effettuata nel 1849 da **Amand Hippolyte Louis Fizeau** (1819 – 1896), mediante un dispositivo costituito da un sistema di specchi ed una ruota dentata in rapida rotazione.

2.3. Christiaan Huygens (1629 – 1695). Nel 1690 esce un trattato sulla natura della luce: il *Traité de la Lumière* ad opera del matematico, astronomo e fisico olandese Christiaan Huygens. Nel suo trattato Huygens sosteneva la natura ondulatoria della luce basandosi sulle seguenti ipotesi:



- a) La luce è costituita da un insieme di onde meccaniche che si propagano in linea retta a velocità finita. Il “raggio” è perpendicolare al fronte d’onda, ed individua la direzione di propagazione dell’onda.
- b) Le vibrazioni dei corpi luminosi producono tali onde.
- c) La propagazione della luce è dovuta all’oscillazione dell’etere.
- d) L’etere è un mezzo isotropo, estremamente sottile, composto da corpuscoli elastici.

Fig. 6: Christiaan Huygens (XVII secolo).

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Christiaan_Huygens.jpg

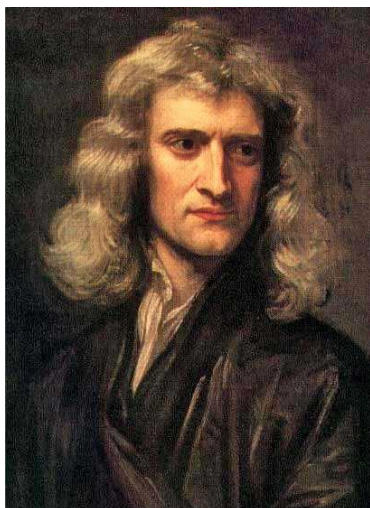
Nel suo trattato Huygens formula il principio fisico sulla propagazione delle onde luminose che può essere riassunto nei seguenti punti principali:

- a) Ciascun punto del fronte d’onda è il centro di onde particolari
- b) Il fronte d’onda è determinato dalla tangente comune alle estremità di queste onde elementari.
- c) **La velocità della luce è inferiore nei mezzi diversi dall’etere.**

Col suo modello Huygens riuscì a spiegare il fenomeno della rifrazione, della polarizzazione della luce e quello della doppia rifrazione.

2.4. Isaac Newton (1642 – 1727). Nel 1704, quasi quindici anni dopo l'opera di Huygens, esce il volume "Opticks" di Isaac Newton. In questo volume Newton esprime in maniera dettagliata la sua teoria sulla natura della luce, di cui, più di trent'anni prima, aveva enunciato una prima stesura in una lettera di 12 pagine diretta alla Royal Society e pubblicata nel gennaio 1671 su Philosophical Transactions (<http://rstl.royalsocietypublishing.org/content/6/69-80/3075.full.pdf>).

- a) La luce è composta da piccolissime particelle di materia emesse da sostanze luminose in tutte le direzioni.
- b) Tali particelle vengono liberate dai corpi luminosi e si propagano in linea retta (in un mezzo omogeneo).
- c) La riflessione è spiegata tramite il rimbalzo elastico delle particelle nel momento dell’urto con una superficie.
- d) La rifrazione è dovuta alle forze che le molecole di una sostanza esercitano sulle particelle di luce deviandone la direzione.



- e) **La luce è più veloce nei corpi trasparenti rispetto al vuoto.**
- f) Luci di colori diversi vengono rifratte con angoli differenti.
- g) Le particelle hanno diversa massa: – i corpuscoli più grossi provocano la sensazione del rosso; – i corpuscoli più piccoli danno la sensazione del violetto.

Fig. 7: Ritratto di Isaac Newton (Godfrey Kneller, 1689)

https://commons.wikimedia.org/wiki/Godfrey_Kneller

Sono ben noti gli esperimenti di Newton sulla dispersione della luce bianca mediante prismi: in base alla sua interpretazione corpuscolare dei colori della luce, attribuiva ad ogni colore una diversa dimensione dei corpuscoli che compongono i raggi di diverso colore (<http://crf.uniroma2.it/wp-content/uploads/2010/04/Ondulatoria.pdf>). Risale a Newton la definizione di "spettro" dei colori e la suddivisione nei classici sette colori dell'iride: rosso, arancione, giallo, verde, azzurro, indaco e violetto. Con le sue ipotesi egli riuscì a dare una spiegazione ragionevole ai fenomeni della riflessione, della rifrazione e della riflessione totale in corrispondenza dell'interfaccia tra due mezzi rifrangenti. Ma la sua teoria, oltre a non essere in grado di spiegare l'assorbimento della luce nei corpi opachi, non poteva fornire una spiegazione plausibile al fenomeno della doppia rifrazione.

2.5. Francesco Maria Grimaldi (1618 – 1663).

Discendente dal ramo emiliano della nobile famiglia genovese, da cui discendono anche gli attuali principi di Montecarlo ([https://it.wikipedia.org/wiki/Grimaldi_\(famiglia\)](https://it.wikipedia.org/wiki/Grimaldi_(famiglia))), Francesco Maria Grimaldi, filosofo, teologo, matematico, astronomo, nasce a Bologna. Nel 1632 entra nella Compagnia di Gesù. Tornato nella città natale nel 1638 vi rimarrà per il resto della sua vita. Assegnato al collegio felsineo di S. Lucia, già nell'anno successivo inizia una proficua collaborazione scientifica in ambito astronomico con un altro grande della storia dell'astronomia: il gesuita Giovanni Riccioli, di cui fu assistente in studi teorici e sperimentali. Realizzò in particolare una dettagliata descrizione delle macchie lunari, compilando una mappa della luna la cui nomenclatura è in uso ancora oggi. Solo per sottolineare l'importanza degli studi di Grimaldi e Riccioli, riconosciuta a livello internazionale, a due crateri lunari sono stati associati rispettivamente i loro nomi.



Fig. 8: Francesco Maria Grimaldi (Museo di Palazzo Poggi dell'Università degli Studi di Bologna)

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Francesco_Maria_Grimaldi.jpg

Fig. 9: Francobollo del Principato di Monaco dedicato a Francesco Maria Grimaldi nel 2009, anno mondiale dell'astronomia (in rosso la posizione del cratere che porta il suo nome)



<http://philatleccen.blogspot.it/2011/09/astromes-italiens-honores-par-la.html>

Ma il motivo per ricordare Grimaldi anche nell'anno mondiale della luce, è che lui fu il primo in assoluto a studiare sperimentalmente il fenomeno della diffrazione (cui dette il nome): "*Lumen propagatur seu diffunditur non solum Directe, Refracte ac Reflexe, sed etiam alio quodam Quarto modo, Diffracte*". Egli descrisse il fenomeno con molti esperimenti, ed interpretò secondo il modello ondulatorio la propagazione della luce, quando passando per un piccolo foro lambisce gli ostacoli, *permettendo all'ombra di penetrare nella zona illuminata e viceversa* (<http://www.slideshare.net/pascalini/luce-44717870>). Tra i suoi lavori sperimentali vi fu in particolare anche quello della osservazione e della interpretazione delle frange di diffrazione della luce nel passaggio tra due fenditure.

Questi effetti, mai osservati in precedenza, furono giustificati paragonando il comportamento della luce con quello dell'acqua. Per questa ragione Grimaldi, pur condividendo l'ipotesi della natura corpuscolare della luce, avanzò in via cautelativa l'ipotesi che **la luce almeno qualche volta si comporta come un onda**, "*..saltem aliquando etiam undulatum...*" (<http://l-esperimento-piu-bello-della->

fisica.bo.imm.cnr.it/didattica/introstorica.html) anticipando di qualche secolo le problematiche del dualismo "onda – corpuscolo".

Le sue ipotesi sulla natura della luce furono pubblicate nel trattato *De Lumine* ("*Physico-Mathesis De Lumine Coloribus Et Iride*", Bononiae: Ex Typographia Haeredi Victorij Benatij) uscito a Bologna nel 1665, due anni dopo la sua morte avvenuta all'età di soli 45 anni.

Gli studi di Grimaldi ebbero larga diffusione alla sua epoca ed è certo che fossero conosciuti ed apprezzati anche da Newton, tuttavia l'ipotesi esclusivamente corpuscolare della natura e della propagazione della luce dominò indiscussa il pensiero scientifico fino agli inizi del secolo XIX.

3. Dagli inizi del secolo XIX ai giorni nostri.

L'inizio del secolo XIX è contrassegnato da un enorme fermento di studi e ricerche nell'ambito delle scienze fisiche, e molte delle conoscenze fino ad allora date per certe e consolidate vengono poste in discussione, aprendo nuovi orizzonti alla conoscenza dei fenomeni naturali.

3.1. Thomas Young. Scienziato eclettico e versatile (a quattordici anni conosceva più di dieci lingue), Thomas Young (1773 – 1829) inizia gli studi in Medicina a Londra nel 1792 e si laurea in Fisica nel 1796 a Gottinga. Ha compiuto importanti studi di ottica, meccanica dei solidi, fisiologia ottica ed egittologia. Nel 1804 pubblica uno studio (Young T., 1804, The Bakerian lecture. *Experiments and calculations relative to physical optics* Philosophical Transactions of the Royal Society of London 94 1-16) in cui riprende e perfeziona gli esperimenti escogitati da "... *the ingenious and accurate Grimaldi ...*" sulla diffrazione della luce, tra cui (1801) quello della diffrazione di un fascio di luce attraverso due fenditure e oggi noto come "esperimento di Young".



Fig. 10: Thomas Young
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Thomas_Young_scientist.jpg

I risultati sono inequivocabilmente riconducibili a fenomeni analoghi osservati negli studi sulla propagazione delle onde sonore: in questo modo Young inferirà un grave colpo alla teoria corpuscolare della natura della luce, fino a quel momento protagonista indiscussa (<http://l-esperimento-piu-bello-della-fisica.bo.imm.cnr.it/didattica/introstorica.html>).



Fig. 11: Macedonio Melloni
(Ghirardi – Barchetta, 1830 ca., collezione privata)

3.2. Macedonio Melloni e Ottaviano Fabrizio Mossotti. Queste due illustri figure di scienziati sono accomunate dalla loro presenza come protagonisti nella storia del Risorgimento Italiano.

Macedonio Melloni (1798 – 1854). A Melloni si deve la dimostrazione che il "calore radiante", ossia la radiazione infrarossa, quella luminosa e quella ultravioletta possiedono la stessa natura di onde, differenti tra loro solo per la lunghezza d'onda, e ne studiò le proprietà di riflessione rifrazione e polarizzazione realizzando ingegnosi dispositivi sperimentali. Nel 1834 gli fu assegnata la Medaglia Rumford della Royal Society, della quale divenne membro straniero nel 1839.

(V. http://www.fisicamedica.it/museo_virtuale/02_sezioni/articoli/data/Ottaviano_Fabrizio_Mossotti_03-04-11.pdf).

Molto appropriatamente, nell'Anno Internazionale della Luce, nell'aprile 2015 la città di Parma dedicò allo scienziato la mostra "**Il calore e la luce invisibile**": *"Ideata e organizzata dal Sistema Museale dell'Università di Parma in collaborazione con il Dipartimento di Fisica e Scienze della Terra "Macedonio Melloni" e il Dipartimento di Fisica dell'Università di Napoli "Federico II", la mostra ha ricevuto il patrocinio del Comune di Parma e di numerose istituzioni scientifiche: la Società Italiana di Fisica, l'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN), l'ASI, la Fondazione IDIS Città della Scienza di Napoli e l'Osservatorio Vesuviano dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia"* (<http://www.primapagina.sif.it/article/261/il-calore-e-la-luce-invisibile#.VguyGHrtlBc>).

La presenza dell'Osservatorio Vesuviano tra i patrocinatori nasce dal fatto che il Melloni fu il primo direttore dell'Osservatorio Vesuviano, prima struttura in assoluto (a livello mondiale) ad occuparsi ad accurati e sistematici studi sismologici e vulcanologici. In questo Osservatorio Melloni compì importanti studi sul magnetismo di lave e rocce.



Fig. 12: Ottaviano Fabrizio Mossotti

http://notes9.senato.it/web/se_nregno.nsf/4bee8c11a5b4a95ec1256ffc00512823/a855666563254ed3c1257069003186fe?OpenDocument

Ottaviano Fabrizio Mossotti (1791 – 1863) si occupò di astronomia, elaborando un metodo per determinare le orbite dei corpi celesti sulla base di quattro osservazioni. Rivestì numerosi incarichi di insegnamento universitario, e, durante un periodo di esilio in Argentina, a Buenos Aires, fondò una scuola di Fisica e realizzò lo storico osservatorio astronomico e meteorologico presso il convento di Santo Domingo, fornendo un impulso fondamentale allo sviluppo dell'Astronomia e della meteorologia argentine.

(<http://historiadelaastronomia.wordpress.com/documentos/santo-domingo/>). Tra le numerose cariche scientifiche e politiche da lui rivestite vi fu anche quella di Senatore del Regno di Sardegna. Oltre ad importanti studi di ottica e di astronomia, elaborò un modello delle interazioni molecolari, il quale, pur presupponendo ancora l'esistenza dell'etere per la propagazione delle onde luminose, fu in grado di spiegare vari fenomeni e in particolare le proprietà dei dielettrici, con riferimento anche al loro indice di rifrazione. Il modello, ripreso da Rudolf Clausius, è a tutt'oggi noto con il nome di "equazione (o legge) di Clausius Mossotti", (https://it.wikipedia.org/wiki/Ottaviano_Fabrizio_Mossotti); l'equazione fornisce uno strumento matematico fondamentale per la comprensione delle proprietà ottiche della materia. I suoi studi sulle proprietà dei dielettrici trovarono impiego anche in neurobiologia.

(V. anche http://www.fisicamedica.it/museo_virtuale/02_sezioni/articoli/data/Macedonio_Melloni_02_11.pdf)

3.4. L'esperimento di Michelson e Morley. Nel 1865 James Clerk Maxwell unifica in quattro leggi fondamentali le modalità di interazione tra campi elettrici e magnetici: ormai quello della natura e della propagazione della luce è universalmente riconosciuto come un fenomeno ondulatorio di natura elettromagnetica. Resta il mistero del mezzo attraverso cui si propaga: era ben noto da tempo che le onde acustiche si propagavano mediante mezzi elastici, solidi, liquidi o gassosi che fossero. Per spiegare la propagazione delle onde luminose che raggiungevano la terra attraversando il cosiddetto vuoto cosmico, si doveva supporre la presenza di un mezzo che permeava tutto l'universo, con particolari caratteristiche di elasticità e trasparenza in risposta alla sollecitazione elettromagnetica delle onde luminose. A questo mezzo era stato dato il nome di "etere luminifero",

fin dai tempi più antichi, ma, per spiegare le modalità di propagazione della luce, questo mezzo doveva essere dotato di caratteristiche difficilmente conciliabili con le conoscenze dell'epoca.

La terra nel suo moto orbitale attorno al sole si muove con una velocità di 30km/s, per cui doveva essere investita da un "vento d'etere" non percepibile dai nostri sensi, ma che avrebbe dovuto influenzare la velocità di propagazione della luce su due direzioni, una parallela ed una ortogonale al moto della terra. A questo proposito nel 1887 **Albert Abraham Michelson** (1852 – 1931) e **Edward W. Morley** (1838 – 1923) tentarono di misurare con un sofisticato interferometro l'influenza del vento d'etere sul percorso di due raggi di luce ortogonali. Per quanto fosse condotto con il massimo rigore e la massima accuratezza, il totale insuccesso di questo esperimento, che può ben essere definito cruciale, ha rappresentato uno dei momenti più importanti della storia della Fisica: non solo segnò una volta per tutte la fine delle teorie sull'etere luminifero, ma pose le basi per la teoria della relatività di **Albert Einstein** (1879 – 1955). La conoscenza sulla natura e sulle caratteristiche della propagazione della luce subirono quindi alcune sconvolgenti modificazioni:

- a) La velocità della luce è indipendente dal moto relativo della sorgente e dell'osservatore.
- b) Nessuna entità che sia dotata di massa può muoversi a velocità superiore a quella della luce nel vuoto

3.5. Risputa la teoria corpuscolare. Gli studi sull'emissione radiante di un corpo riscaldato in funzione della temperatura furono introdotti da Gustav Kirchhoff nel 1862, escogitando un corpo ideale, da lui definito "corpo nero" (V. https://it.wikipedia.org/wiki/Corpo_nero). Una prima interpretazione sull'andamento dello spettro di emissione del corpo nero ideale in equilibrio con l'ambiente, partendo dalle equazioni di Maxwell e dalle leggi di Stefan-Boltzmann e di Wien, fu enunciata mediante la legge nota come "*legge dell'irraggiamento di Rayleigh-Jeans*". Tuttavia, mentre questa legge spiegava bene la distribuzione statistica delle energie emesse dal corpo nero in funzione della temperatura sotto forma di onde elettromagnetiche alle basse frequenze, nell'ambito delle alte frequenze si rivelava divergente e completamente errata: se fosse stata realistica, avrebbe condotto alla cosiddetta "catastrofe dell'ultravioletto", comportando una emissione di energie di intensità infinita alle alte frequenze.

La soluzione fu proposta da **Max Planck** (1858 – 1947) nel 1900, formulando una ipotesi che poteva nascere solamente da una mente geniale: gli scambi di energia nei fenomeni di emissione e di



Fig. 13: Louis De Broglie (1929)

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Broglie_Big.jpg

assorbimento delle radiazioni elettromagnetiche avvengono non già in forma continua, come sosteneva la teoria elettromagnetica classica bensì in forma discreta e proporzionale alla loro frequenza di oscillazione, secondo un valore costante di proporzionalità: quello che verrà poi chiamato "costante di Planck". Semplicemente trasformando l'integrale nella formula della legge in una sommatoria di elementi discreti Planck fornirà la soluzione al problema interpretando alla perfezione i dati sperimentali. Nel 1901 completerà la sua ipotesi affermando che gli atomi assorbono ed emettono energia radiante in modo discontinuo, per quanti di energia, cioè quantità di energia finite e discrete. In tal modo anche l'energia può essere concettualmente rappresentata, come la materia, sotto forma granulare. Nascono così i concetti di "*quanto di energia*" e di "fotone" che trovarono un degno complemento nello studio dell'effetto fotoelettrico (1905) da parte di Einstein. Risale a

questo studio la definizione di doppia natura onda-corpuscolo della luce (come aveva già ipotizzato Grimaldi ...). Lo studio dell'effetto fotoelettrico frutterà ad Einstein il premio Nobel per la Fisica nel 1921, mentre la quantizzazione dell'energia dei livelli elettronici negli atomi e nei fotoni troverà un adeguato complemento nel modello atomico di **Niels Bohr** (1885 – 1962) del 1913, che fruttò anche per lui il premio Nobel per la Fisica nel 1922.

3.6. Ma le onde ... La rivincita del sistema ondulatorio prese tuttavia una piega inattesa nel 1924, quando un giovane francese (dalle lontane nobili origini piemontesi), **Louis-Victor Pierre Raymond De Broglie** (1892 – 1987) presentò una tesi di dottorato con il titolo "*Recherches sur la Théorie des Quanta*". In questo suo lavoro De Broglie presentò una ipotesi estremamente ardita: anche la materia manifesta un doppio aspetto corpuscolo – ondulatorio, e le particelle materiali possono anch'esse venire descritte, e trattate, come pacchetti o quanti di energia ondulatoria. Le sue ipotesi furono immediatamente appoggiate da Einstein, e trovarono una conferma sperimentale con gli esperimenti sulla diffrazione degli elettroni di Davisson, Germer e Thomson. Gli sviluppi successivi confluiranno nelle teorie e nei metodi della meccanica ondulatoria e della meccanica quantistica.

Nel 1961 **Claus Jönsson** dell'Università di Tubinga eseguì per la prima volta l'esperimento della diffrazione di un fascio di elettroni nel passaggio attraverso una doppia fenditura, in analogia all'esperimento di Young per la luce, rilevando anche in questo caso le classiche frange di interferenza. Insieme ad altre considerazioni, questo effetto ha motivato Niels Bohr ad introdurre il *principio di complementarità*, secondo il quale i due aspetti, corpuscolare e ondulatorio, non possono essere osservati contemporaneamente in quanto escludentisi a vicenda: in sostanza il comportamento corpuscolare od ondulatorio delle particelle è determinato dal tipo di esperimento con cui vengono osservate (https://it.wikipedia.org/wiki/Esperimento_della_doppia_fenditura).

Ad ulteriore controprova del comportamento ondulatorio secondo le leggi della meccanica quantistica delle particelle elementari, nel 1976 un gruppo di ricercatori italiani (**Pier Giorgio Merli, Gian Franco Missiroli e Giulio Pozzi**) realizzarono uno straordinario esperimento di **interferenza tra elettroni singoli**, fatti passare attraverso le due fenditure **uno alla volta**. Concepito negli anni '20 del secolo scorso come esperimento mentale era stato ritenuto a lungo irrealizzabile a causa delle notevoli difficoltà tecniche; nel 2002 è stato definito da un sondaggio della rivista *Physics World* "**l'esperimento di Fisica più bello di tutti i tempi**". E così sembra essere definitivamente dimostrato che anche la materia microscopica non segue comportamenti sostanzialmente diversi da quelli della luce (o è vero il viceversa?)

Per illustrare questo esperimento è stato realizzato uno specifico sito dedicato alla memoria di Pier Giorgio Merli, prematuramente scomparso (<http://l-esperimento-piu-bello-della-fisica.bo.imm.cnr.it/index.html>). Oltre alla descrizione dell'esperimento sul sito sono raccontate le motivazioni scientifiche ed umane che portarono questo gruppo di scienziati italiani a realizzarlo.

Ultimamente, in un recente articolo comparso su "Le Scienze" (marzo 2015), è stato presentato un esperimento (V. il link ad un video divulgativo in lingua inglese:

http://www.lescienze.it/news/2015/03/02/video/video_onde_fotoni_esperimento-2505691/1/) in cui risultano "fotografate contemporaneamente" le caratteristiche corpuscolari ed ondulatorie della luce. L'esperimento è stato condotto nel laboratorio LUMES, diretto da Fabrizio Carbone, del Politecnico di Ginevra in Svizzera. Sarebbe così inconfutabilmente contraddetto il principio di complementarità enunciato da Bohr.

4. Conclusioni.

Conclusioni? In realtà non è possibile trarre conclusioni e nemmeno questo era lo scopo di questa breve rassegna: abbiamo cercato di illustrare alcune tappe che ci sono sembrate significative, o anche solo poco conosciute, nell'evoluzione delle conoscenze sulla natura della luce, con qualche riferimento necessario anche sulla struttura della materia. Non tutti i grandi protagonisti della entusiasmante avventura dello studio sulla natura e sulle proprietà della luce sono stati citati, ma in una semplice rassegna come questa è inevitabile dover operare delle scelte, magari anche opinabili, ma indispensabili, senza con questo voler sminuire il ruolo dei molti nomi eccellenti che qui sono stati esclusi.

Volendo comunque trarre qualche conclusione, probabilmente una risposta l'abbiamo già: la natura della luce e della materia rappresenta una realtà sfuggente, interconnessa, che si rivela a noi per qualche aspetto, ma che alla fine può risultare ingannatrice per la nostra sensibilità e capacità di intuizione. Si lascia studiare, questo sì, ci stimola con le sue difficoltà di comprenderne l'intima essenza, ma alla fine, proprio quando ci sembra di averla in pugno, riesce anche a disilluderci nel rivelarsi, in fondo, afferrabile solo in parte.

Attualmente la velocità della luce nel vuoto, assieme alla costante di Planck e alla carica dell'elettrone, rientra nel novero delle costanti fondamentali della Fisica; non è forse privo di significato che, nella descrizione della Genesi, la luce fosse creata nel "primo giorno", la prima 'entità' a venire creata: "Poi Dio disse: 'Sia la luce!' e la luce fu. E Dio vide che la luce era buona ..." (Genesi, 1: 3,4). Il posto di "prima donna" nello studio della natura le spetta quindi di diritto, sotto ogni aspetto.