

Capitolo V

In Francia tra Luigi XVI e Luigi Filippo.

È ora venuto il momento di occuparci degli scienziati francesi fondatori dell'ottica moderna i quali furono allievi, diretti od indiretti, di un eccezionale sestetto di grandi matematici e organizzatori di scuole superiori, sull'operato dei quali vale la pena di soffermarsi anche per inquadrare il momento storico che ha favorito una grandiosa fioritura delle scienze in Francia, tra la fine del Settecento ed il primo terzo dell'Ottocento. Per evitare una cesura troppo grande nel nostro racconto sugli sviluppi dell'ottica, questi argomenti vengono tratteggiati nell'Appendice 2. Ricordiamo qui che i sei, quasi coetanei, sono: Lagrange (Giuseppe Luigi, Torino, 1736, † Parigi, 1813); Condorcet (Marie-Jean-Antoine Caritat de, marchese, Ribemont, 1743, † carcere di Bourg-la-Reine, 1794); Monge (Gaspard, Beanne, 1746, † Parigi, 1818); Laplace (Pierre-Simon de, Beaumont en Auge, 1749, † Parigi, 1827); Legendre (Adrien-Marie, Parigi, 1752, † Auteil, 1833); Carnot (Lazare-Nicolas-Marguerite, Nolay, Côte d'Or, 1753, † Magdeburg, 1823). Lagrange nacque a Torino, però la sua famiglia era originaria della Turenna ed egli divenne cittadino francese dopo l'annessione del Piemonte, 1798; aveva già abbandonato Torino nel 1767 per recarsi a Berlino dove trascorrerà circa vent'anni.

Il ventennio Rivoluzione – Impero per la Francia costituisce indubbiamente un periodo irripetibile. Sono convinto che alla maggior parte degli scienziati operosi in questa età, o che si formarono in essa, le controversie tra cartesiani e newtoniani, deterministi e libertari ecc.,

dovettero sembrare retaggi di un passato ormai lontano mentre essi erano tutti tesi alla creazione di un nuovo ordine.

Lo sforzo organizzativo, nel campo dell'istruzione pubblica, del periodo rivoluzionario fu potenziato e completato da Napoleone Imperatore. L'operato di Napoleone però fu certamente di minore importanza; egli non si può nemmeno considerare un conservatore illuminato. Durante il quindicennio napoleonico non ci fu la minima libertà di riunione, associazione e tantomeno libertà di stampa. "Meno si stampa, meglio è", scriveva nel 1805 al figliastro, il vicerè Eugenio. Il suo ideale di governo fu il sistema prefettizio, dirigista e centralista al massimo, che gli riuscì di realizzare perfettamente, che gli sopravvisse e che divenne anche merce d'esportazione. Per fortuna gli sopravvissero anche le iniziative in campo educativo della Convenzione e del Direttorio, che egli indubbiamente completò. Si può infatti considerare un protettore delle Scienze; era del resto l'unico capo di stato ad avere una preparazione scientifica. L'Institut, creato con legge 3 Brumaio anno III, raggruppava cinque Accademie con l'Académie des Sciences quale prima classe e fu poi riorganizzato il 23 Gennaio 1803. Le altre Accademie sono: l'Accademia di Belle Arti, l'Accademia di Iscrizioni e Belle Lettere, l'Accademia di Scienze Politiche e Morali ed infine l'eclusiva Académie Française. Nel 1808 venne creata l'École Normale Supérieure per la preparazione di insegnanti per le scuole secondarie; la Normale di Pisa (1813) seguì il modello francese.

Nemico cosciente della possibile unificazione delle popolazioni italiane e germaniche, Napoleone mutilò e rimescolò continuamente i vecchi stati senza crearne dei nuovi. Questo modo di agire sembra fatto apposta per fare naufragare il tentativo di unificazione europea, del resto affatto prematuro. Tuttavia lo stimolo ricevuto da diversi paesi fu grande sia perchè suscitò reazioni nazionali sia perchè le riforme introdotte durante l'Impero finirono per essere mantenute dopo la caduta di Napoleone. Il principio di uguaglianza giuridica ed il rimescolamento delle classi sociali che in Francia generò la moderna borghesia, si propagò anche in Europa. Un risveglio scientifico si verificò infatti in Italia e Germania. Il rapido sviluppo industriale di

alcune regioni della seconda lo esaltò e nel corso dell'Ottocento la lingua tedesca divenne la lingua quasi ufficiale per le comunicazioni scientifiche in conseguenza dei contributi veramente unici portati da scienziati tedeschi in tutti i campi. È da notare che dall'inizio dell'Ottocento le Università di molti paesi divennero centri di ricerca scientifica non limitata alla sola matematica e/o medicina, come per l'innanzi.¹

L'entusiasmo suscitato nel popolo francese dalla Rivoluzione si accrebbe con le vittorie del Consolato e dell'Impero e si mantenne durante la Restaurazione, malgrado la Francia fosse uscita piuttosto male dal periodo napoleonico: erano andate perse colonie e stabilimenti in America ed Asia e la flotta era per il momento poca cosa. Mentre gli scienziati nati molto prima della Rivoluzione ed operanti durante il decennio rivoluzionario ebbero spesso una vita movimentata, come si può vedere nell'Appendice 2, quelli che si poterono formare nelle scuole di nuova formazione ebbero molte più facilitazioni. Ciò non toglie che alcuni, ad es. Malus, prendessero attiva parte alla vita militare. Ad ogni modo il quindicennio imperiale fu sì un susseguirsi di guerre, ma il territorio metropolitano non fu più toccato e le armate imperiali non ebbero più bisogno di leve in massa dato che a ripristinare gli effettivi concorrevano largamente soldati dei popoli liberati o da liberare. La situazione si fece più pesante dopo le perdite in Spagna (1808-9) ed ancor più in Russia (1812); ad ogni modo continuarono ad essere esentati dalla leva i cittadini ammogliati e, ad esempio, gli studenti della Ecole Normale.

In Francia si venne formando una nazione ed il processo si estese presto ad altri paesi: dal cosmopolitismo della classe colta, ma molto ristretta, del periodo illuminista si passa all'individualità nazionale coinvolgente strati molto più larghi di popolazione. Intanto nuove professioni si aprono a tutti coloro che hanno la possibilità di studiare: le professioni di architetto ed ingegnere civile, non più limitata alla progettazione di ponti e strade o di fortificazioni; un poco più tardi

¹ Per quanto riguarda l'Italia si può vedere St. J. Woolf in *Storia d'Italia Einaudi*, Vol. VI, (*Dal primo Settecento all'Unità*, *La storia politica e sociale*). Ed. CED SpA, Milano, 1997.

l'industria richiederà chimici ed ingegneri meccanici. Naturalmente l'impatto della rivoluzione industriale interesserà in modo diverso i vari paesi europei.

Tra i numerosi scienziati formati nelle nuove scuole, ci interessano quattro studiosi che dedicarono almeno parte della loro attività all'ottica: Biot, Malus, Arago e Fresnel.

Jean-Baptiste **Biot** (Parigi, 1774, † ivi, 1862) militò quale volontario nell'esercito repubblicano distinguendosi per il suo coraggio; ritornato a Parigi nel 1794, frequentò l'École Normale dove le sue doti scientifiche furono subito apprezzate da Monge. Con l'appoggio di Laplace nel 1800 fu nominato professore al Collège de France e nel 1803 divenne membro dell'Institut. Nel 1806-1807 si recò in Spagna con Arago (*vide infra*) allo scopo di misurare la lunghezza del meridiano zero. Fu autore di ottimi testi di fisica ed astronomia e portò i noti contributi all'elettromagnetismo. A noi interessa la sua scoperta della *polarizzazione della luce per rifrazione* avvenuta nel **1811** e lo studio quantitativo della rotazione del piano di polarizzazione ad opera di sostanze *in soluzione*, **1815-1818**. L'effetto di rotazione del piano di polarizzazione da parte di cristalli di quarzo era stato osservato da Arago (*vide infra*) nello stesso 1811. Biot negli anni successivi vide come la capacità di rotazione fosse legata alla struttura molecolare e come l'entità dell'effetto fosse proporzionale alla concentrazione della soluzione ed inversamente proporzionale al quadrato della lunghezza d'onda della radiazione utilizzata, *legge di Biot*. Continuando lo studio delle rotazioni della luce polarizzata dedusse che il fenomeno è legato alla conformazione, " asimmetria ", delle molecole. Nel 1832 fondò la saccarimetria, dosando gli zuccheri in base alla rotazione impartita dalle loro soluzioni a concentrazioni diverse. Controllò i primi lavori di Pasteur sugli acidi tartarici. Scopri inoltre il fenomeno del *dicroismo* nei cristalli, in particolare nella tormalina. Durante la sua lunghissima vita Biot ebbe tutto il tempo di leggere e meditare i lavori di Fresnel ed altri sull'ottica ondulatoria, ciò malgrado rimase un tenace assertore dell'ipotesi emissiva. Di Biot studioso di ottica va ancora

ricordata l'introduzione (ca. 1814) di compensatori, rosso del 1° ordine e cuneo di quarzo e lo studio approfondito (1820) dello stato di polarizzazione di raggi ordinari e straordinari nei cristalli uniassici già indagato da Malus. È infine da ricordare che egli fu un esperto sinologo ed autori di lavori sull'astronomia egiziana e cinese.

Ètienne-Louis **Malus** (Parigi, 1775, † ivi, 1812) frequentò nel 1793 la Scuola del Genio di Mèzières e, dopo un anno presso l'Armata del Nord, fu ammesso al Politecnico dove Monge ne apprezzò presto le doti e gli affidò supplenze di insegnamento durante le sue assenze. Dal '96 fu di nuovo impegnato nel servizio militare raggiungendo il grado di capitano del Genio nel '98. Seguì Napoleone in Egitto, dove fu colpito due volte dalla peste, e fu membro dell'Institut Egiziano. Fu uno degli ultimi rimpatriati, assieme a Monge e Fourier. Ritornò ai suoi primi studi di ottica e nel 1807 presentò un *Traité d'optique analytique* alla prima Classe dell'Institut che venne stampato nel *Recueil des savant étrangers* . Nello stesso anno pubblicò il saggio *Mémoire sur la mesure du pouvoir réfringent des corps opaque*, nel quale difendeva la teoria corpuscolare della luce. Continuò ad essere impegnato in compiti di ingegneria militare e giunse al grado di tenente colonnello del Genio Imperiale.

L'Institut nel Gennaio 1808 bandì un premio con un tema che si può riassumere così: dare della doppia rifrazione che la luce subisce nell'attraversare diverse sostanze cristalline una teoria matematica verificata dall'esperienza. Benchè il premio dovesse venire assegnato solo nel 1810, Malus alla fine del 1808 presentò all'Institut la memoria *Théorie de la double réfraction de la lumière dans les substances cristallisées* che venne debitamente premiata nel Gennaio 1810. Essa, più che per la teoria della doppia rifrazione, basata su ipotesi corpuscolari, è ben più importante per l'annuncio della scoperta della *polarizzazione per riflessione*. È ben noto l'aneddoto, non del tutto sicuro, sull'analisi della luce riflessa dalle finestre (o da un pavimento?) del Palais de Luxembourg che non stiamo a ripetere. Rimettiamoci a quanto scrive Malus stesso a proposito della riflessione da parte dell'acqua e di sostanze diafane (Malus era ben consapevole come la

riflessione da parte di metalli lucidati fosse più complicata) : “ Se si fa cadere un fascio di luce sulla superficie di acqua stagnante, sotto un angolo di $52^{\circ} 54'$ con la verticale, la luce riflessa ha tutti i caratteri di uno dei fasci prodotti dalla doppia rifrazione da parte di un cristallo ” .

Il termine *polarizzazione* venne introdotto proprio da Malus poichè egli supponeva che le radiazioni luminose fossero costituite da dipoli corpuscolari incandescenti che potevano venire isorientati all'atto della rifrazione da parte di cristalli birifrangenti od all'atto di riflessioni sotto angoli particolari. Il termine polarizzazione è rimasto, adottato universalmente, anche se non è il più adatto per significare l'orientazione di vettori elastici od elettrici. Di grande importanza è la dimostrazione (memoria del 1811) che i due raggi che si propagano in *una stessa direzione* in un cristallo uniassico hanno i piani di polarizzazione (vecchia dizione) rispettivamente coincidente e perpendicolare al piano che contiene la direzione di propagazione e l'asse ottico (sezione principale). È infine da ricordare che Malus, sfruttando il principio di polarizzazione, derivò (legge di Malus) i valori delle intensità dei raggi ordinario e straordinario generati da un " raggio polarizzato " incidente sullo spato d'Islanda. Con la scoperta della polarizzazione veniva a cadere la presunta analogia tra la propagazione, nei fluidi, di onde luminose e sonore visto che le seconde non possono venire polarizzate.

Malus è stato autore, tra i suoi numerosi contributi, di un teorema sulla rifrazione. Ragionando in termini di raggi egli notò che questi costituiscono una congruenza normale di rette, cioè possiedono una superficie, e quindi infinite, che le taglia tutte ortogonalmente. Malus dimostrò che dopo rifrazione (e riflessione) secondo le leggi dell'ottica geometrica una congruenza normale rimane tale. È una proposizione che suggerisce da sè la costruzione di Huygens tanto più che Malus costruì la superficie dopo rifrazione quale luogo dei raggi che hanno compiuto lo stesso *cammino ottico*. In termini di ottica ondulatoria il *Teorema di Malus* suona così : entro la validità delle leggi dell'ottica geometrica un'onda Σ_1 , dopo riflessione o rifrazione, deve dare luogo a nuove superfici Σ_2 ed il cammino ottico per andare dall'una all'altra superficie d'onda è lo stesso lungo qualunque

normale. Duecento anni fa era senz'altro un contributo molto interessante alla comprensione dei fenomeni di rifrazione ed è da notarsi che il teorema non implica ipotesi sulla forma delle superfici.

Come Biot, anche Malus rimase un corpuscolare sino alla fine; nel suo caso ciò è più comprensibile, vista la sua prematura scomparsa a soli 37 anni, nel 1812. Del resto la sua posizione è decisamente critica. La memoria del 1808 si inizia infatti con una presa di posizione sulla antinomia onde/corpuscoli che riassumiamo: "..... L'ipotesi di Huygens è soggetta a grandi difficoltà; essa sembra anche incompatibile coi fenomeni chimici prodotti dalla luce; quella dell'emissione è più verosimile lo adotto dunque l'opinione di Newton, non come verità indiscutibile, ma come un mezzo per fissare le idee e per interpretare le operazioni dell'analisi. *È una semplice ipotesi*, che d'altra parte non ha alcuna influenza sui risultati del calcolo". Più che una difesa sembra un elogio funebre.

Le reazioni cui allude Malus sono probabilmente le riduzioni degli ioni argento, in cloruri e nitrati, ad opera della luce, già notate da secoli. Tra la fine del Settecento e l'inizio dell'Ottocento esse vennero esaminate più accuratamente. Karl Wilhelm **Scheele** (Stralsund, Pomerania, 1742, † Köping, Svezia, 1786) aveva notato sin dal 1777 che la luce violetta era la più attiva nell'innescare la reazione. Nel **1801** Johan Wilhelm **Ritter** (Samitz, Slesia, 1776, † München, 1810) mise in evidenza come, proiettando lo spettro solare sopra una lastra ricoperta di nitrato di argento, si notasse annerimento anche dove l'occhio non notava colorazione alcuna, ma solo dalla banda del violetto. Così fu scoperta l'esistenza della radiazione *ultravioletta* che per il momento venne battezzata "luce invisibile" o "luce nera". L'adozione di queste goffe denominazioni, autocontraddittorie, è conseguenza dell'abbandono della distinzione tra *lux* e *lumen*.

La scoperta della radiazione infrarossa è opera di **Herschel** (Friedrich Wilhelm, Hannover, 1738, † Slough, Berkshire, 1822) che, nato nell'Hannover, si trasferì in Inghilterra nel 1762, come organista. Dal 1773 cominciò ad interessarsi di astronomia ed a costruire specchi per telescopi gregoriani. Nel 1786 realizzò uno specchio di 1,47m di

apertura e 12,20m di lunghezza focale, dimensioni enormi all'epoca. Pur continuando l'attività musicale divenne uno dei maggiori astronomi del Settecento: scoprì due satelliti di Crono, ma soprattutto portò notevoli contributi allo studio delle nebulose. In ottica legò il suo nome alla scoperta della radiazione *infrarossa*. Proiettando lo spettro solare sopra una serie di termometri riscontrò che le temperature maggiori si avevano fuori dallo spettro visibile dalla parte del rosso, cioè oltre il rosso. Anche questa radiazione fu detta luce nera. Lo spettro delle radiazioni si era così notevolmente allargato all'inizio dell'Ottocento. La misura delle λ con le apparecchiature interferenziali di Young e di Fresnel indicarono per la banda del rosso delle $\lambda \approx 0,8\mu$ e per il violetto $\approx 0,4\mu$. Quindi le radiazioni infrarosse dovevano avere $\lambda > 0,8\mu$ e le ultraviolette $\lambda < 0,4\mu$. Queste interessanti scoperte non ebbero tuttavia molta risonanza.

F.W. Herschel potè altri contributi all'ottica; è da ricordare in particolare la sua condizione di invarianza per avere *ortoscopia assiale* (detta aplanatismo assiale) in un diottro. Non va confuso con il figlio, sir John William, anch'esso illustre matematico, astronomo e fisico.

Prima di arrivare ad Arago e Fresnel, dobbiamo ancora considerare, molto brevemente, i contributi di **Brewster** (sir David , Jedburg, Roxburgshire, 1781, † Allerby, Roxb., 1868) che fu professore di fisica all'università di Edinburgo. Sostenitore della teoria ondulatoria, la espose nel suo *Treatise on opticks* del 1832; portò contributi alla interferometria (frange di Brewster). Studiò inoltre la piroelettricità, nome da lui coniato.

Per noi è importante la sua scoperta del **1815**. Se la radiazione luminosa incide dall'aria su di un mezzo con $n > 1$, sotto un angolo (\hat{i}_c) tale che

$$(\hat{i}_c) + (\hat{i}_{\text{rifr.}}) = 90^\circ \quad [n = \text{tang}(\hat{i})] \quad , \quad (1)$$

il vettore elastico della luce riflessa *non* ha componente nel piano di incidenza. Ciò equivale a dire che si ha *polarizzazione totale per riflessione*; la radiazione riflessa vibra perpendicolarmente al piano di

incidenza. L'angolo (i_c) viene appunto detto angolo di Brewster od angolo critico. È intuitivo quale importanza avrà questo risultato per Fresnel quando si accingerà a ricavare le relazioni tra le ampiezze delle onde incidenti, riflesse e rifratte in funzione dell'angolo di incidenza. Questi risultati sugli effetti di polarizzazione eliminavano ogni possibilità di analogia tra propagazione luminosa ed acustica poichè le onde sonore che si propagano nei fluidi con vibrazioni longitudinali non possono venire polarizzate. Le onde luminose si propagano invece sempre come vibrazioni trasversali, ma questa proprietà verrà chiarita nel 1817 (*supra* pag. 39) dopo gli studi di Malus e Brewster che ovviamente non potevano ancora sapere del comportamento del " vettore elastico ".

Per evitare confusioni nel seguito, ricordiamo la distinzione, comune a Fresnel ed alla maggioranza degli studiosi dell'Ottocento, tra piano di polarizzazione e piano di vibrazione per un'onda polarizzata linearmente. Con riferimento ad una terna ortogonale destra, ammettiamo che la normale d'onda si propaghi da sinistra a destra lungo l'asse delle y : il piano xy veniva detto *piano di polarizzazione* ed il piano xz *piano di vibrazione*; sarebbe meglio meglio abbandonare questa terminologia e considerare semplicemente il piano di vibrazione (del vettore elettrico) per un onda polarizzata linearmente.

Chiusa questa parentesi riguardante scienziati non francesi, passiamo ad **Arago** (Jean-François-Dominique, Estagel, 1786, † Parigi, 1853) : si formò anch'egli al Politecnico, frequentando pure l'Osservatorio. Nel 1806 raggiunse Biot in Spagna per collaborare alla misura della lunghezza di un grado di meridiano e nel 1808 fu fatto prigioniero dagli spagnoli (guerra Franco - Spagnola), ma riuscì a fuggire ed a raggiungere Marsiglia nel Giugno 1809, portando in salvo i risultati conseguiti. Nello stesso anno divenne professore di geometria analitica e di geodesia all' École Polytechnique nonchè astronomo dell'Osservatorio del quale diverrà direttore nel 1830. Oltrechè di astronomia si interessò moltissimo di elettromagnetismo. Partecipò

attivamente agli eventi del 1830 e 1848; fu ministro della Guerra e della Marina nel governo provvisorio della II Repubblica.

Arago dedicò quindi solo una parte della sua attività scientifica a studi di ottica. Nel **1819** pubblicò con Fresnel, negli *Annales de Chimie et de Physique*, una memoria dal titolo : *Mémoire sur l'action que le rayons de lumière polarisée exercent les uns sur les autres* . In essa viene esposto l'importante risultato già ricordato parlando di Young : due fasci di luce polarizzati ad angolo retto non interferiscono, ma l'intensità risultante è sempre la stessa per qualsiasi differenza di cammino ottico.

La figura di Arago, per quanto riguarda l'ottica, è importante anche per la sua funzione di *trait-d'union* tra Young e Fresnel di cui fu fedele amico e sostenitore sino alla fine. Nel 1827 a Fresnel, ormai morente, la Royal Society assegnò la Rumford Medal e fu Arago, ora anche segretario dell'Accademia, a portargliela a Ville d'Avray il 7 Luglio; Fresnel morirà una settimana dopo.

Va ancora ricordato il progetto di Arago per misurare le velocità della luce nell'aria, nell'acqua e nei vetri (1838). Non riuscì a realizzare il suo apparato basato su specchio rotante che nel 1850 proprio quando divenne improvvisamente cieco. L'apparecchiatura di Arago, modificata, fu impiegata da Foucault e Fizeau (*cf.* pag. 69) che confermarono le previsioni di Arago e Fresnel sulle velocità relative delle radiazioni visibili nei diversi mezzi : $n_i = c / v_i > 1$, che è *sempre* soddisfatta solo per le velocità di gruppo .

Augustin-Jean **Fresnel** (Broglie-lès-Bernay, Dipart. dell'Eure, 1788, † Ville d'Avray, Parigi, 1827) compì studi di ingegneria civile al Politecnico di Parigi e nel 1808 si impiegò in un cantiere di costruzioni stradali del Servizio Statale nella Francia meridionale. Realista convinto (strano), durante i cento giorni fu privato dell'incarico e confinato dapprima a Nyons e poi in un villaggio (Mathieu) presso Caen. Fu reintegrato nelle sue mansioni a fine anno, ma nei due anni successivi ottenne vari congedi, grazie all'interessamento di Arago; riprese regolarmente servizio nel 1818, però a Parigi. L'anno successivo fu assegnato al Servizio dei fari e negli anni seguenti portò

contributi pratici anche alla progettazione delle lenti per fari. I congedi ed il trasferimento a Parigi gli permisero di frequentare il laboratorio di Arago, con cui era già in contatto epistolare da tempo, che aveva avuto modo di apprezzare i primi risultati del Nostro. Di salute cagionevole, dal 1824 sino alla morte dovette ridurre drasticamente i suoi impegni. Come scienziato si dedicò esclusivamente all'ottica ed i suoi inestimabili contributi all'ottica fisica furono frutto di un solo decennio di ricerca , 1815 - 1824 / 25 ; l'unico termine possibile di paragone è H.R. Hertz.

Fresnel cominciò ad interessarsi vivamente all'ottica prima del '15 come si vede dalla sua corrispondenza con un fratello di nome Lèonor (come lo zio Mèrimèe, padre di Prosper autore della *Carmen*) residente a Parigi cui si rivolgeva per avere pubblicazioni, in particolare sulla polarizzazione della luce. Nell'Aprile del '15 è " sollevato" dal suo impiego e potrebbe dedicare tutto il tempo a leggere testi della disciplina preferita. Entrò in relazione epistolare con Arago ed a lui chiese consigli e suggerimenti bibliografici. Arago gli consigliò di leggere Newton, Young, Grimaldi ecc. , senonchè l'ingegner Fresnel sapeva poco o punto e di latino e di inglese e non poté leggere granchè delle opere dei detti autori. La cosa viene spesso giudicata una *felix culpa* perchè spinse Fresnel, che non ne aveva bisogno, a risolvere i suoi dubbi mediante esperimenti e misure. Non si può condividere una simile opinione: la temporanea ignoranza dei risultati altrui fece perdere tempo al Nostro che ebbe un inizio piuttosto incerto. Lavoratore infaticabile, già alla fine del '15, con mezzi di fortuna!, aveva raccolto un tale insieme di risultati sulla diffrazione da potere scrivere una memoria, *La diffraction de la lumière* , che inviò all'Accademia. Vi sono proposti argomenti nuovi in favore della teoria ondulatoria : ad es. che luce e calore devono essere della stessa natura per motivi sperimentali ed allora se la luce, e quindi il calore, fossero un insieme di corpuscoli , come potrebbe la radiazione solare arrivare a noi dopo avere incontrato miliardi di corpuscoli calorici negli spazi interplanetari occupati dal calore? Però i risultati sperimentali sono semplicemente quelli di Grimaldi e per di più interpretati invocando quelle riflessioni ed inflessioni che padre Grimaldi aveva

dimostrato non intervenire e ciò per tentare di spiegare la discordanza tra calcoli ed osservazioni. I primi infatti portavano a localizzare frange chiare dove invece osservava frange scure : un ipotetico salto di $\lambda / 2$ per riflessione agli orli degli ostacoli gli avrebbe eliminato l'incongruenza. Arago, che evidentemente non aveva letto Grimaldi pure lui, fu entusiasta della nota di Fresnel al contrario della totalità degli accademici.

L'appoggio di Arago fu un evento di grande importanza nella vita di Fresnel; Arago, infatti, benchè solo ventinovenne, aveva raggiunto una posizione di primo piano negli ambienti scientifici parigini, in particolare all'Osservatorio ed all'Accademia. Fu però lo stesso Fresnel a sentirsi insoddisfatto dei propri risultati e provvisorie conclusioni e continuò le osservazioni sperimentali, sempre più affinate, su interferenza e *diffrazione* .

È impossibile illustrare tutti i contributi del Nostro ed è anche difficile seguire un ordine strettamente cronologico; riportiamo solo i risultati più importanti senza preoccuparci eccessivamente delle date.² Già nel 1816 Fresnel era arrivato a vedere il ruolo giocato dalla *differenza di fase* nei fenomeni interferenziali. Per lo studio dell'interferenza impiegò (1819) dei dispositivi ideati da lui stesso, biprisma e specchi, che permisero di escludere definitivamente il concorso di qualsiasi inflessione. Il sistema degli *specchi di Fresnel* è costituito da due specchi piani le cui normali formano un angolo piccolissimo e sui quali una sorgente invia raggi luminosi. Di una sorgente puntiforme molto intensa gli specchi formano due immagini virtuali molto vicine che si possono considerare come sorgenti coerenti. Su uno schermo parallelo al piano delle due immagini virtuali si formano delle frange di interferenza con massimi e minimi dati rispettivamente da:

$$\Delta(z) = k \lambda \quad \text{e} \quad \Delta(z) = \left(k + \frac{1}{2} \right) \lambda \quad , \quad (2)$$

² L'opera omnia di Fresnel fu pubblicata durante il Secondo Impero : Œuvres complètes d'A. Fresnel , Paris, Imprimerie Impériale (1868).

dove $\Delta(z)$ è la differenza di cammino ottico tra due raggi interferenti. Con questo dispositivo si possono misurare le lunghezze d'onda; si tratta di misurazioni molto delicate che richiedono grande accuratezza ed abilità da parte dello sperimentatore, che evidentemente Fresnel possedeva. V'è notato che i luoghi geometrici dei massimi e minimi sono degli iperboloidi di rotazione attorno alla congiungente le due immagini virtuali che ne costituiscono i fuochi; le intersezioni con lo schermo sono dei segmenti di retta solo per una stretta zona del piano, (*cf.* [16] per questo strumento e tutto ciò che riguarda la strumentazione ottica sino alla metà del Novecento).

Il susseguirsi di pubblicazioni su risultati in accordo con la teoria oscillatoria cominciò ad allarmare seriamente i corpuscolari parigini; essi stessi si autodefinivano newtoniani, ma altrimenti la denominazione non sarebbe del tutto appropriata visto che Newton non fu mai categorico nel ritenere l'ipotesi emissiva l'unica valida per sempre. Il 17 Maggio 1817 l'Accademia delle Scienze bandì un concorso dal titolo molto lungo e da un preambolo ancora più lungo, entrambi stesi in termini corpuscolari. In sintesi, si chiedeva di produrre esperimenti accurati sul comportamento di raggi diretti, riflessi ed inflessi oggetto di diffrazione da parte di corpi e di dare forma matematica ai movimenti dei raggi. Nessun newtoniano si presentò; oltre a Fresnel presentò domanda solo un altro candidato di cui non si ricorda il nome. Fresnel inviò all'Accademia una breve nota riassuntiva, sigillata, il 20 Aprile del '18 ed una seconda nota, molto estesa, il 20 Luglio in plico anonimo per partecipare al concorso.

La Commissione giudicatrice era composta da Biot, Laplace, Poisson (corpuscolari sino alla morte), Gay Lussac (?) e da Arago che fu nominato relatore. Nella prima seduta pubblica del 1819 il premio venne ufficialmente attribuito al Nostro e ciò segna senz'altro il trionfo della teoria ondulatoria, anche se i commissari mantennero le loro opinioni. I corpuscolari si estinsero a poco a poco senza nemmeno lasciarci un qualche principio di complementarità.

Fresnel combinò la costruzione degli involuipi di Huygens con il

principio di interferenza ed enunciò quello che viene ora detto principio di Huygens - Fresnel. Gli elementi di una superficie Σ arbitraria, che circonda una sorgente *monocromatica* O , si comportano come virtuali sorgenti secondarie coerenti di *onde sinusoidali della stessa frequenza della sorgente* e di ampiezza decrescente al crescere dell'angolo θ tra la congiungente di O con un punto P , esterno a Σ , e le normali a Σ stessa nei suoi vari punti (angolo di diffrazione). Una superficie d'onda Σ_1 successiva a Σ è costituita dall'involuppo delle onde elementari emesse dai punti di Σ . La perturbazione in un punto P è la risultante *dell'interferenza* di tutte le onde elementari, tra loro coerenti, che vi arrivano emesse da Σ . Per la derivazione dell'ampiezza risultante Fresnel ricorse dapprima a metodi grafici e poi analitici, tuttavia sarà solo Kirchoff (1882) a mettere in forma integrale, con corrette condizioni al contorno, il principio partendo dall'espressione generale dell'onda; l'integrale viene detto teorema integrale di Helmholtz-Kirchoff perchè Helmholtz (1859) lo aveva già derivato per le onde acustiche. A rigor di termini il principio di Fresnel è soltanto un caso particolare, una applicazione, del principio più generale di Huygens: secondo questo principio la propagazione lungo un raggio ed il concetto stesso di raggio svaniscono; in un mezzo isotropo si può dare il nome di raggi alle traiettorie perpendicolari alle superfici d'onda. Uno degli argomenti principali della memoria del 1818 è la trattazione della diffrazione, basata sul detto principio, provocata da fenditure puntiformi o lineari, o da schermi, posti a distanza finita da una sorgente puntiforme e osservate in piani posti anch'essi a distanza finita dalle fenditure: *diffrazione di Fresnel*. Più o meno negli stessi anni Fraunhofer studiò i fenomeni di diffrazione localizzati all'infinito. S.D. Poisson dedusse dal lavoro di Fresnel, nello stesso 1818, che nel centro dell'ombra di un piccolo schermo circolare dovrebbe apparire una macchia brillante e pensò che l'effetto fosse in disaccordo coi risultati sperimentali e quindi un buon argomento per rifiutare la teoria di Fresnel. Invece Arago produsse una verifica sperimentale dell'effetto che costituì una delle conferme più eclatanti della teoria.

Fresnel diede forma matematica alla teoria della propagazione e diffrazione delle radiazioni luminose; vide la necessità di trattare in

forma integrale la diffrazione (integrali di Fresnel) anche se non riuscì a portare a termine compiutamente questa trattazione. Mise bene in chiaro come le onde possono interferire solo quando sono omogenee (stessa λ) e coerenti ($\Delta(\varphi)$ costante). Inoltre Fresnel ricavò le relazioni tra le ampiezze, e quindi anche tra le intensità di onde incidenti, riflesse e rifratte da mezzi trasparenti che sono perfettamente valide a tutt'oggi dato che il vettore elastico (ottico) di Fresnel è poi risultato coincidere col vettore \mathbf{E} intensità del campo elettrico delle onde elettromagnetiche. Era quindi risolto, e con relazioni *quantitative*, il secolare problema della riflessione parziale da parte di corpi trasparenti. Fresnel arrivò a derivare le seguenti formule valide per un'onda piana polarizzata linearmente (*cf.* ad es. i pertinenti paragrafi dei Cap. 7 ed 8 di [19], di lettura impegnativa, ma più agevole del trattato di Born & Wolf [6]). Indichiamo con A l'ampiezza di un'onda monocromatica incidente, attraverso un mezzo di indice di rifrazione n_1 (= 1 per l'aria), su un mezzo isotropo di indice n_2 e con gli apici // , \perp le componenti parallele ed ortogonali *al piano di incidenza* delle ampiezze dell'onda incidente A , riflessa A_r e rifratta A_{rf} . Valgono le seguenti relazioni :

$$A_{rf}^{//} = A^{//} \frac{2 \operatorname{sen}(r) \cos(i)}{\operatorname{sen}(i+r) \cos(i-r)} \quad , \quad A_r^{//} = -A^{//} \frac{\operatorname{tang}(i-r)}{\operatorname{tang}(i+r)} \quad ; \quad (3)$$

$$A_{rf}^{\perp} = A^{\perp} \frac{\operatorname{sen}(r) \cos(i)}{\operatorname{sen}(i+r)} \quad , \quad A_r^{\perp} = -A^{\perp} \frac{\operatorname{sen}(i-r)}{\operatorname{sen}(i+r)} \quad ; \quad (3')$$

Dalle (3) e (3'), che valgono per mezzi trasparenti, si possono dedurre i salti di fase che intervengono per riflessione e si può vedere come in corrispondenza dell'angolo (i_p) di Brewster, o principale, per cui ($i+r$) = 90° , l'onda riflessa vibri tutta nel piano di incidenza : *polarizzazione per riflessione* come dedotto sperimentalmente da Brewster. Esse ci dicono pure che si ha rotazione del piano di polarizzazione dell'onda incidente per riflessione e rifrazione: se (ψ) è l'angolo che il vettore di un'onda incidente polarizzata fa col piano di incidenza, i corrispondenti

angoli per le onde rifratte e riflesse saranno diversi poichè dalle (3) – (3') risultano riflesse e rifratte in percentuali diverse le componenti dei detti vettori e le stesse relazioni permettono di derivare le espressioni che legano i due angoli; si avrà quindi *rotazione del piano di polarizzazione*. Le relazioni di cui sopra diventano indeterminate per incidenza normale; si possono facilmente derivare i valori per $(i) \rightarrow 90^\circ$ anche se con un ragionamento non proprio ortodosso. Ammettiamo che per (i) ed (r) tendenti a zero il coseno valga 1 e che tangente e seno siano approssimabili ai loro argomenti; di conseguenza ricordando che

$$\frac{\sin(i)}{\sin(r)} \approx \frac{(i)}{(r)} = \frac{n_2}{n_1}, \quad (4)$$

dalle (3) e (3') di destra risulta:

$$\frac{A''_r}{A''} = \frac{A^\perp_r}{A^\perp} = - \frac{(i-r)}{(i+r)} = - \frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1}, \quad (5)$$

e dalle relazioni di sinistra :

$$\frac{A''_{rf}}{A''} = \frac{A^\perp_{rf}}{A^\perp} = \frac{2(r)}{(i+r)} = \frac{2n_1}{n_2 + n_1}. \quad (5')$$

Definendo *potere riflettente* R il rapporto tra *intensità* incidente e riflessa , abbiamo che in aria e per incidenza normale R risulta :

$$R^\perp = R'' = R_o = \frac{I_r}{I_i} = \frac{(n_2 - 1)^2}{(n_2 + 1)^2}, \quad (6)$$

ed è indipendente da (ψ) . Se si esamina un cristallo anisotropo, ad es. uniassico, si avranno due valori del potere riflettente corrispondenti ai valori di n_ω ed n_e che vengono detti *poteri riflettenti uniradiali* ; si avrà rotazione del piano di polarizzazione per anisotropia che, per incidenza qualsiasi, potrà aggiungersi o sottrarsi

alla rotazione per riflessione. Espressioni analoghe valgono per cristalli biassici.

Fresnel vide inoltre come la frequenza non cambi per riflessione e rifrazione e verificherà questa costanza anche nel caso di cristalli birifrangenti

Come già notato, nella memoria del '18 Fresnel adottava ancora, e decisamente, l'ipotesi della longitudinalità delle vibrazioni luminose che abbandonerà però subito (cf. Young, *supra*). Per giustificare la propagazione per onde trasversali Fresnel adottò l'ipotesi dell'esistenza di un etere fluidissimo avente però le proprietà di un solido rigidissimo (non comprimibile) che lasciò perplesso persino Arago. Lo spinoso problema dell'etere, che si trascinerà sino ad Einstein, verrà ripreso più avanti; possiamo anticipare che un esame delle critiche sollevate da matematici e fisici alle ipotesi di Fresnel si può trovare in Fletcher ([10]).

Dopo l'adozione del corretto tipo di vibrazione, Fresnel rivide parte dei suoi risultati, ma soprattutto arrivò a completare l'altro suo capolavoro : la teoria della *birifrangenza, ottica cristallografica* . Arrivato ad una completa padronanza del meccanismo ondulatorio ed alle relative espressioni analitiche, Fresnel completò lo studio della propagazione nei mezzi birifrangenti trasparenti durante i cinque anni che in pratica gli sarebbero rimasti a disposizione, 1820 - 24. Il lavoro completo apparirà solo nel 1827 sulle *Mémoires de l'Académie de l'Institut de France*, **7** , 45 – 176 poco dopo la morte dell'Autore. Come è ben noto ai mineralogisti, Fresnel derivò le equazioni delle superfici delle normali d'onda per i cristalli biassici, equazioni complicate di 4° grado nelle velocità (di fase) , che sono rappresentabili graficamente mediante superfici a due falde che degenerano in un ellissoide più una sfera, concentrici, nel caso di un cristallo uniassico. Studiò inoltre le quadriche direttrici degli andamenti degli indici di rifrazione, riprese poi in molto maggior dettaglio da studiosi posteriori (ad es. Hamilton). È però da notarsi che in base alle proprietà postulate per l'etere Fresnel arrivò a concludere che nei cristalli birifrangenti le vibrazioni dello stesso etere sono in generale oblique, ma non perpendicolari rispetto alla direzione di propagazione dei raggi. Questa deduzione, un pò

confusa, lasciò insoddisfatto lo stesso Fresnel (cf. Fletcher [10]). Sarà H. A. Lorentz (1873) a spiegare tutti i fenomeni di rifrazione base a sole vibrazioni trasversali del vettore \mathbf{E} di Maxwell (*vide infra*). Fresnel vide chiaramente che la frequenza delle onde birifratte, come del resto quella delle onde normalmente rifratte, è la stessa delle onde incidenti, quella che varia è la lunghezza d'onda.

Fresnel studiò inoltre il fenomeno della polarizzazione rotatoria per il quale un'onda polarizzata linearmente che si propaga in alcuni cristalli, aventi certe simmetrie, subisce una rotazione del piano di polarizzazione, in senso orario oppure antiorario, man mano che procede nel suo cammino. Fresnel non poteva sapere di assi di simmetria elicogiri, ma riuscì a razionalizzare il fenomeno con una costruzione tuttora sfruttata. Come in un cristallo birifrangente una vibrazione incidente monocromatica e polarizzata linearmente si sdoppia in due onde sempre polarizzate linearmente, ma in piani ortogonali, così in un mezzo otticamente attivo si può immaginare che la vibrazione incidente si sdoppi in due vibrazioni circolari di senso opposto. Due vibrazioni polarizzate circolarmente aventi stessa λ e viaggianti nella stessa direzione si ricompongono in una polarizzata linearmente e viceversa; quindi un'onda polarizzata linearmente si può pensare equivalente a due onde circolari, Destra e Sinistra, che si propagano con eguale velocità in un mezzo isotropo. Per ipotesi, secondo Fresnel, quando avviene birifrazione in un mezzo anisotropo un'onda incidente polarizzata linearmente si sdoppia in due onde polarizzate circolarmente che viaggiano *con velocità diverse* (*indici diversi*) nel mezzo e presentano all'uscita una differenza di fase; esse pertanto si ricompongono, ora la λ è uguale, e la risultante è un'onda polarizzata linearmente ma ruotata di un certo numero di gradi in funzione della λ e delle proprietà strutturali. L'ipotesi di Fresnel porta a risultati in accordo con i risultati sperimentali; Fresnel aveva anche dedotto la relazione :

$$\rho = \pi (n_S - n_D) / \lambda \quad , \quad (7)$$

dove ρ è il potere rotatorio specifico, radianti per mm. Costruendo un prisma composto da tre cristalli di quarzo, D - S - D, incollati con

balsamo del Canada, riuscì a mettere in evidenza, facendo viaggiare il fascio incidente lungo l'asse ottico per evitare la complicazione della birifrangenza, l'uscita di due onde caratterizzate da n diversi. In seguito si provò sperimentalmente che le due onde sono effettivamente polarizzate circolarmente e quindi quella di Fresnel è qualcosa di più di un'ipotesi.

Nell'ambito della trattazione generale della propagazione della luce trovano quindi esauriente spiegazione tutti i fenomeni di polarizzazione. Ricordiamo ancora che Fresnel è autore di un semplice strumento, *polarizzatore circolare*, che gli permise di produrre radiazione polarizzata circolarmente. Si tratta di una spessa lastra di vetro, opportunamente tagliata, su una faccia della quale Fresnel faceva incidere un fascio di radiazione polarizzata linearmente a 45° rispetto al piano di incidenza sotto un opportuno angolo di incidenza, di 52° nel caso specifico, in modo da avere riflessione totale. Sotto queste condizioni, le componenti del vettore di vibrazione normale e parallela al piano di incidenza subiscono uno sfasamento di $\pi / 4$ ad ogni riflessione: dopo due riflessioni su facce parallele lo sfasamento totale è di $\pi / 2$ e la radiazione uscita dalla lastra è polarizzata circolarmente.