

Fresnel Coefficient as a challenge of 19 century Optics of Moving bodies –Stachel

Rev 1.0

1. Introduzione.

Comunemente si pensa che nel corso del 19th secolo l'ottica geometrica dei corpi in movimento fosse un settore di ricerca consolidato. Si pensava infatti che la formula di Fresnel ed i lavori sia empirici sia teorici compiuti in seguito da Fizeau (1851) e Veltmann (1873) esaurissero, almeno ad un livello di accuratezza al primo ordine nella velocità della luce, le problematiche relative a tale campo di ricerca.

Se si osserva la situazione con uno sguardo più attento, si giunge ad una valutazione diametralmente opposta. L'ottica geometrica dei corpi in movimento risulta essere infatti il primo segnale di crisi della Meccanica Newtoniana, in quanto la formula di Fresnel – benché avesse un successo empirico consolidato – non era giustificata da un punto di vista teorico. In sostanza le varie teorie che vennero sviluppate a partire dalla seconda metà del 19th secolo per giustificare tale formula, e che si fondavano sui principi della Teoria newtoniana ed in special modo su quello di etere, non erano completamente soddisfacenti. Inoltre questa linea di ricerca aprì la via ad alcune innovazioni concettuali che solo Einstein in seguito riuscì a razionalizzare in una teoria completa. Mi riferisco ad esempio al fatto che verso la fine dell'800 alcuni fisici – Veltmann (1870) e Mascart (1874) – iniziarono ad inquadrare l'ottica dei corpi in movimento come una problematica legata al moto relativo.

Nello stesso periodo Potier (1874) enfatizzò il legame fra la formula di Fresnel e gli intervalli che intercorrono nella trasmissione della luce e questo indusse Poincare (di cui Potier era il maestro) all'introduzione del concetto di tempo locale, che come sappiamo nella Relatività Ristretta porta alla riformulazione del concetto di simultaneità.

2. Gli esperimenti di Arago e la formula di Fresnel.

Intorno al 1810 lo scienziato francese Arago cercò di verificare la bontà della teoria newtoniana sull'emissione della luce con due esperimenti che mostrarono al contrario la sua inadeguatezza empirica.

Il primo esperimento si basa sull'ipotesi che stelle di diversa magnitudine emettano raggi di luce a differente velocità; ciò implica che essi vengano rifratti da un prisma con un differente angolo. Arago dunque considerò raggi di luce provenienti da stelle di differente magnitudine nello stesso periodo dell'anno e verificò – nei limiti sperimentali degli strumenti dell'epoca – che essi non venivano rifratti in alcun modo. Concluse dunque che i raggi luminosi si propagano con la medesima velocità indipendentemente dal corpo che li emette.

Per accettare questa conclusione Arago propose un ulteriore esperimento che considerava il caso in cui le stelle fossero in movimento relativo rispetto al prisma dell'apparato sperimentale. Fu sufficiente a questo punto considerare raggi luminosi provenienti da

corpi celesti in periodi differenti dell'anno e controllare se essi venissero rifratti: il risultato di questo secondo esperimento fu ancora negativo.

I due esperimenti di Arago mostravano la debolezza della teoria corpuscolare proposta a suo tempo da Newton.

La teoria ondulatoria di Fresnel invece riusciva a rendere conto di entrambi gli esperimenti ed inoltre dell'osservazione che i raggi luminosi avessero lo stesso angolo di aberrazione indipendentemente dal mezzo in cui si compivano gli esperimenti (ad es. vuoto od acqua).

La Teoria di Fresnel si fonda sulla presenza di un etere stazionario che rappresenta il mezzo attraverso cui si propaga l'onda luminosa. Il primo esperimento di Arago ed il fenomeno dell'aberrazione nel vuoto sono facilmente spiegabili: La velocità di propagazione dell'onda è indipendente dalla velocità della sorgente (si noti che nel caso dell'esperimento di Arago la velocità della sorgente è nulla).

Per giustificare invece il secondo esperimento di Arago e l'aberrazione in presenza di un mezzo, Fresnel dovette ammettere un fenomeno di trascinamento dell'etere da parte del corpo in moto. In questo modo la velocità della luce veniva a dipendere da quella del mezzo si intende qua non l'etere ma ad esempio l'acqua) in cui si propaga. Se indichiamo con n l'indice di rifrazione del mezzo, il coefficiente di trascinamento è dato da:

$$f = (1 - 1/n^2) \quad (1)$$

e la velocità effettiva della luce risulta essere:

$$v_{\text{drag}} = f v_{\text{med}} \quad (2)$$

Anche se la descrizione data giustifica senza particolari problemi il fenomeno dell'aberrazione, Fresnel con la medesima formula riuscì a spiegare anche il secondo esperimento di Arago.

Rimane ora da fornire una struttura teorica che giustifichi la formula di Fresnel.

3. L'inquadramento teorico della formula di Fresnel e l'esperimento di Fizeau.

Sebbene la formula di Fresnel ebbe un immediato successo empirico, molti scienziati rimasero dubbiosi sulla sua giustificazione, ed infatti a metà del 19th secolo fiorirono un'insieme di teorie sulla struttura interna dell'etere e sul suo comportamento in presenza di altri corpi (in particolare lo stato di moto dell'etere all'interno di un corpo in moto) di cui qui di seguito riportiamo tre significativi esempi:

- a. Una parte dell'etere si muove con velocità pari a quella del corpo (Fresnel 1818)
- b. Tutte le particelle di etere sono trascinate dal corpo in moto con una velocità proporzionale alla velocità totale del corpo (Stokes 1846)
- c. L'etere contenuto in un corpo in moto viene suddiviso in parti che si muovono con tutte le velocità comprese tra la quiete e la velocità del corpo.

La teoria proposta da Fresnel si basava – come già asserito in precedenza – sull'ipotesi di un etere stazionario, ma una giustificazione alternativa, e forse più semplice, era quella di considerare il completo trascinamento dell'etere durante il moto del corpo (b). Fresnel non riuscì a costruire tale teoria ed in questo modo ripiegò su un etere stazionario e sul coefficiente di trascinamento che porta il suo nome, ma a partire dal 1846 Stokes fornì una teoria completa che descriveva in modo accurato i vari esperimenti ottici presentati in precedenza, senza l'utilizzo del coefficiente f .

Le teorie di Fresnel e simili (proposte dai sostenitori della teoria ondulatoria) differiscono in modo sostanziale da quella indicata da Stokes, in special modo in riferimento ai fenomeni di aberrazione. Mentre le prime considerano tale fenomeno come un'illusione ottica dovuta al moto relativo dell'osservatore, lo scienziato inglese ritiene al contrario che esso sia un'incurvamento effettivo dei raggi luminosi.

A parte le sostanziali differenze fra la teoria di Fresnel e quella di Stokes rimane da stabilire quale delle due sia la più opportuna, se in sostanza sia necessario mantenere il coefficiente di Fresnel o se invece abbandonarlo ed accettare totalmente l'ipotesi di Stokes. Nel 1850 fu raggiunta una soluzione a tale problematica grazie all'esperimento di Fizeau che sanciva la necessità del coefficiente di Fresnel in ogni teoria che tratti i fenomeni ottici di corpi in movimento. L'esperimento di Fizeau considerava un raggio luminoso che veniva suddiviso in due parti: la prima di esse veniva fatta passare in un tubo contenente acqua corrente (il corpo in moto) nella direzione di moto del liquido, la seconda invece seguiva un percorso opposto all'esterno del tubo.

Se indichiamo con:

c_{med} = c/n la velocità della luce nel mezzo

v_{lab} = velocità del mezzo (nel nostro caso l'acqua) nel laboratorio

c_{lab} = la velocità della luce nel laboratorio

si ottiene per c_{lab} la formula:

$$c_{lab} = c_{med} + f v_{lab} \quad (3)$$

indicando in questo modo che la velocità della luce in un mezzo in moto viene modificata in proporzione alla velocità del mezzo ed in funzione del coefficiente di Fresnel.

4. Alcuni progressi teorici nella seconda metà dell'800.

Sebbene l'esperimento di Fizeau sembrava condurre ad una completa accettazione del coefficiente di Fresnel, alcuni sviluppi empirici sembravano rimettere in discussione tale posizione. Mi riferisco qui agli esperimenti di Velthmann (1870) e Mascara (1872-74) che mostrarono come in alcuni esperimenti di interferenza (vedi lo stesso lavoro di Fizeau) o con l'utilizzo di mezzi birifrangenti, l'ipotesi di trascinamento dell'etere portava a dei comportamenti non accettabili (ad esempio l'etere doveva sostenere due comportamenti differenti dei raggi luminosi nel medesimo tempo).

L'attenzione dei Fisici si spostò dunque dagli aspetti empirici a quelli teorici e si ebbero alcuni progressi che indirizzarono la ricerca verso la giusta soluzione.

Velthmann ad esempio osservò come la formula di Fresnel non fosse altro che un mezzo compensativo per giustificare la mancata osservazione di effetti dovuti al moto della terra nel calcolo della velocità della luce. Secondo Velthmann "l'ipotesi di Fresnel non è altro che la condizione necessaria e sufficiente per l'applicazione delle leggi che derivano dalla teoria ondulatoria per la rifrazione dei raggi luminosi in mezzi a riposo in rapporto ai raggi relativi in corpi in moto". Vi è dunque con Velthmann il riconoscimento che la formula di Fresnel è legata in modo indissolubile al moto relativo dei corpi.

Un altro esempio di questo cambio di direzione teorico è fornito da Mascart che – nello stesso periodo di Velthmann – introduce il Principio di Relatività Ottico: "il moto di traslazione della Terra non ha alcun effetto osservabile su fenomeni ottici prodotti da

sorgenti terrestri: questi fenomeni forniscono alcun mezzo per la determinazione del moto assoluto del corpo.”

In seguito Potier reinterpreta la formula di Fresnel mettendo in evidenza la sua dipendenza dagli intervalli di tempo intercorsi nel passaggio della luce da un punto A ad uno B, aprendo in questo modo la definizione di Tempo Locale.