

Università "la Sapienza"
Dipartimento di Fisica

OTTICA

- Cap.1 Luce ed altre radiazioni
- Cap.2 L'ottica geometrica
- Cap.3 Accoppiamento e guide

(da "Lezioni di Fisica" di Franco Dupré)

Ottobre 1997

INDICE

PARTE PRIMA

OTTICA FENOMENOLOGICAPag 1

CAPITOLO PRIMO

LUCE ED ALTRE RADIAZIONI

1.1 Fenomenologia e modelli....."	3
1.2 La luce ed il modello corpuscolare....."	5
1.2.1 La massa della luce....."	5
1.2.2 La velocità della luce....."	6
1.2.3 La luce va in linea retta?....."	8
1.2.4 La scelta del modello corpuscolare....."	11
1.3 Il principio di sovrapposizione....."	12
1.4 Elementi di Fotometria....."	13
1.4.1 Le grandezze fotometriche fondamentali....."	13
a) La sorgente....."	13
b) La propagazione nello spazio....."	16
c) L'illuminazione di un oggetto....."	16
d) Sorgenti estese....."	18
1.4.2 La legge del quadrato delle distanze....."	19
1.4.3 Fotometria per confronto....."	21
1.4.4 Unità fotometriche....."	22
1.4.5 Misure assolute e misure relative....."	23
1.5 Dosimetria....."	24

CAPITOLO SECONDO

L'OTTICA GEOMETRICA

2.1 I raggi luminosi....."	29
2.1.1 La visione....."	30
2.1.2 La camera oscura....."	31

2 Indice parte prima: Ottica

2.1.3 Coni di luce.....	34
2.2 Interazione della luce con la materia	34
A) Diffusione e riflessione della luce.....	35
2.3 La diffusione.....	35
2.4 La riflessione.....	36
2.5 Specchi.....	36
2.5.1 Specchi piani.....	37
2.5.2 Specchi sferici.....	39
2.5.3 Punti coniugati.....	43
2.5.4 Immagini virtuali ed immagini reali.....	45
2.5.5 Il fuoco.....	46
2.5.6 Costruzione grafica di immagini.....	47
2.5.7 Specchi sferici fuori approssimazione di Gauss	49
2.6 Schematizzare e generalizzare.....	51
B) Trasmissione della luce	51
2.7 La rifrazione.....	51
2.7.1 L'indice di rifrazione	53
2.7.2 La riflessione interna.....	55
2.8 Dispersione della luce e spettroscopia.....	57
2.9 Il principio di Fermat.....	59
a) Spiegazione di fatti già incontrati	60
b) Previsioni nuove	60
c) Problemi nuovi	61
2.9.1 Rifrazione, seconda parte	64
2.10 Il diottrico.....	65
2.10.1 Il diottrico sferico	65
2.10.2 Convenzione dei segni.....	69
2.11 Lenti.....	72
2.11.1 Lenti sottili.....	73
2.11.2 Lenti spesse.....	75
2.11.3 Schermi e diaframmi.....	76
2.11.4 Tracciatura di raggi e costruzione di immagini.....	78
2.11.5 Alcuni esempi notevoli.....	79
a) Lente divergente.....	79
b) Lenti di ingrandimento e oculari	80
2.12 L'ingrandimento	80
2.13 Sistemi ottici	83

2.13.1	Il microscopio....."	84
2.13.2	Cannocchiale e teleobiettivo....."	84
2.14	Il metodo dei raggi obliqui....."	85
2.15	Rilassamento delle approssimazioni....."	88
1)	Aberrazione cromatica....."	89
2)	Aberrazione di sfericit�....."	90
3)	Curvatura di campo....."	91
4)	Astigmatismo....."	91
2.16	Occhi....."	94

CAPITOLO TERZO

ASSORBIMENTO E COLORI

3.1	Il colore....."	97
3.2	Attenuazione per assorbimento....."	100
3.2.1	Il coefficiente di attenuazione ottica....."	104
3.2.2	Decadimenti esponenziali....."	107
3.3	Attenuazione per diffusione....."	110
3.4	Raggi α e γ"	113
3.5	I colori e l'occhio....."	115

PARTE PRIMA

OTTICA FENOMENOLOGICA

L'ottica geometrica è di solito relegata in un angolo del programma dei corsi universitari di fisica, ben separata dalla classica sequenza centrale meccanica-termodinamica-elettromagnetismo. Essa non viene ritenuta particolarmente interessante per la formazione fisica perché teoria prettamente fenomenologica, incapace di spiegare i fenomeni di interferenza (la cosiddetta ottica fisica) perché è solo un'approssimazione della teoria elettromagnetica completa.

Ma proprio il carattere di "teoria intermedia" che formalizza osservazioni anche quotidiane, i cui limiti ed inadeguatezze sono facilmente individuabili, ma che con tutto ciò riesce a spiegare e predire moltissimi fenomeni, rende l'ottica geometrica adatta a fare da introduzione ad un corso di fisica, perché ne esemplifica vari modi tipici di procedere. Essa ha inoltre diverse caratteristiche interessanti dal punto di vista didattico:

— si evita di iniziare lo studio della fisica con la meccanica, una teoria "inconfondibile e ineluttabile che sempre (tanto è vero che l'"aristotelismo" del senso comune (§6.1) sopravvive, indistruttibile), le cui difficoltà concettuali restano per i più nascoste dietro alla matematica dell'analisi differenziale, ancora poco familiare a chi sta agli inizi.

È molto comune che gli studenti si facciano ipnotizzare dalle difficoltà tecniche della matematica; poco abituati ad usarla, essi ritengono che l'ostacolo principale stia lì, vi concentrano tutti i loro sforzi, e non riconoscono che le matematiche sono solo dei linguaggi, utili per esprimere con efficacia i concetti della fisica ma non indispensabili. Come ogni lingua che ci è straniera, anche le matematiche non sono facili da dominare, ma per un principiante è prima di tutto necessario saperle leggere e capire, senza dover esser subito anche capace di usarle pienamente.

Invece la vera difficoltà della fisica è la comprensione dei concetti: per questo ci si deve per prima cosa costruire una propria rappresentazione mentale del fenomeno (si deve riuscire a "vederlo" con gli occhi della

2 Parte Prima - *Ottica fenomenologica*

mente), poi lo si deve articolare in parole, e solo come passo finale tradurre la propria comprensione in un linguaggio matematico, con grafici e in formule.

- dato che la matematica necessaria per l'ottica geometrica (la trigonometria) è elementare, è più facile cogliere la differenza fra difficoltà matematiche, che sono di capacità tecnica "linguistica", e difficoltà fisiche, che sono di comprensione dei concetti;
- il tema della luce è più vario ed affascinante della meccanica;
- è sorprendente constatare quanto, armati solo di una teoria fenomenologica estremamente semplice, ci si possa spingere avanti su un tema che, non appena lo si voglia trattare più a fondo, richiede invece un formalismo molto spinto;
- si incontrano innumerevoli stimoli a fare osservazioni e piccoli esperimenti di verifica nella vita quotidiana, una scuola al guardarsi intorno con una sensibilità più attenta, che aiuta ad intuire il ruolo centrale che nelle scienze ha l'ininterrotto confronto fra teoria e fatti;
- quando si sviluppa una teoria è molto spontaneo, ed il più delle volte inevitabile, appoggiarsi ad un modello (*), che per l'ottica geometrica è quello corpuscolare. L'introduzione esplicita di questo modello permette di discutere su utilità, significato e limiti delle teorie modellistiche;
- la teoria fenomenologica della fotometria (§1.4), non appena sviluppata, viene subito a sua volta usata come modello per gettare le basi di dosimetria delle radiazioni (§1.5);
- con l'introduzione del principio di Fermat (§2.9) si raggiunge il terzo livello di teoria, quello basato su principi. Perciò in ottica è possibile in breve spazio vedere all'opera su uno stesso argomento tutti e tre i livelli di teoria (fenomenologica, modellistica, di principi), un'occasione che non si presenta molto facilmente;
- si ha un primo incontro con il flusso, un concetto astratto molto importante, del quale si può fare qui la conoscenza in un contesto modellistico, più intuitivo di quello puramente matematico in cui lo si incontra tradizionalmente (nel teorema di Gauss, cap.15);
- usando solo nozioni molto semplici ed intuitive di calcolo infinitesimale si possono già affrontare l'assorbimento ed i colori, due temi che non si trovano trattati spesso nei testi di fisica.

Questa prima parte del corso di fisica è costruita per essere usata come un modulo introduttivo, relativamente indipendente dal resto del corso, anche se metodologicamente propedeutico ad esso.

(*) Perché le rappresentazioni mentali personali, primo passo per la comprensione dei concetti, sono sempre basate su dei modelli (§1.1).

CAPITOLO PRIMO

LUCE ED ALTRE RADIAZIONI

Se riflettiamo sulle esperienze che abbiamo della luce (cosa non facile da fare per un fenomeno così naturale ed ovvio) probabilmente finiremmo col riconoscerne due "tipi" (e con ciò saremmo in buona compagnia, d'accordo con un gran numero di concittadini):

- una luce che pervade lo spazio, come la luce diffusa di un giorno senza sole o quella di un locale ben illuminato, ed
- una luce a fasci, come quella di una torcia elettrica, o quella che entra in una cantina da una finestrella, o un raggio laser.

Di solito non si pensa a cercare la sorgente di una luce del primo tipo, perché questa o "c'è" dappertutto o "non c'è" (p.es. quando si spegne improvvisamente l'illuminazione elettrica su una città "e andata via la luce"). Il secondo tipo nasce invece palesemente da una sorgente e da lì va ad illuminare gli oggetti, come ci si convince facilmente se si interrompe il fascio con un ostacolo interposto sul suo cammino.

Pur essendo ragionevole, questa classificazione non viene usata in fisica perché è poco produttiva, in quanto non porta avanti nella comprensione del fenomeno "luce". Ma avremo qualche aiuto a capire che è più fruttuoso concentrare l'attenzione sul secondo "tipo" di luce perché, essendo più artificiale, è più facile da manipolare e con ciò da sottoporre a verifica sperimentale. Si riescono così a mettere in evidenza, e separare, gli elementi chiave di una sua descrizione coerente:

- una sorgente da cui la luce ha origine,
- la luce stessa che si propaga, in tutte le direzioni, ed
- un oggetto che cambia aspetto quando viene illuminato.

1.1 Fenomenologia e modelli

Il primo livello di ogni teorizzazione è fare della *fenomenologia*, cioè descrivere un fenomeno individuandone le variabili significative e le loro interconnessioni. Esso è un passaggio obbligato del fare scienza.

Ogni *teoria fenomenologica* diviene però ben presto insoddisfacente perché non “spiega” nulla; la fenomenologia si limita a descrivere, mentre l’intelletto cerca “spiegazioni”, cioè collegamenti con altri fatti.

Il passo seguente è lo sviluppo di un *modello*. Una *teoria modellistica* consiste nel paragonare il sistema sotto studio con un altro meglio conosciuto che si comporti in modo analogo, almeno per gli aspetti più importanti che interessano: il sistema più familiare fa da *modello*, nel senso che le sue proprietà ed il suo funzionamento vengono usati per “capire” il sistema che si vuol studiare, e per fare previsioni. Alcuni esempi ben noti sono: il sistema solare come modello per l’atomo, la cerniera lampo per la duplicazione del DNA, le onde sulla superficie dell’acqua per il comportamento della luce, etc. (*).

Non è strettamente necessario sviluppare modelli, ma poiché ciò viene generalmente fatto, spesso inconsciamente, e la teoria modellistica è di gran lunga la più diffusa forma di teoria, è opportuno parlarne fin da subito in modo esplicito, per imparare a coglierne al più presto pregi e limiti.

Un modello può essere anche un *astratto modello matematico*, p.es. un’equazione, o un sistema di equazioni, o un programma di calcolo, tutti modi di simulare il funzionamento di un sistema, con il quale hanno in comune la struttura delle relazioni fra le variabili più importanti (o meglio, ritenute tali: il confronto con la realtà ne darà conferma o meno). In particolare sono sempre più diffusi i modelli su calcolatore.

Il punto fondamentale per la scelta di un modello è la familiarità che si ha con esso, perché il suo compito è di fornire una vivida immagine mentale del sistema sotto studio, per aiutarne la comprensione tramite l’intuizione (**).

Il grosso pericolo dei modelli è che si tende a crederli veri, pericolo che cresce quanto più essi sono aderenti al sistema da descrivere, dimenticando che una teoria modellistica è un’analogia, che non arriva mai a coprire tutti gli aspetti del sistema al quale la si applica.

Ogni teoria modellistica ha solo un certo campo di validità, al di fuori del quale essa può portare a conclusioni anche completamente erranee; è perciò fondamentale riconoscere sempre molto bene questi limiti, per evitare di superarli.

(*) Nell’uso comune si chiama invece “modello” un prototipo, cioè un esemplare da copiare per riprodurre (modellismo) il sistema che interessa, funzionante o meno, ma senza alcuna autonomia concettuale da esso, come p.es. molti giocattoli. Si tratta di significati ben diversi da quello qui definito ed usato nelle scienze, in cui si riproduce il sistema modello come esemplare, per paragonarlo l’uno dall’altro, collegati solo da una maggiore o minore rassomiglianza strutturale e/o di funzionamento.

(**) Il caso dei secondi fa la cerniera lampo non sarebbe stato un modello.

1.2 La luce ed il modello corpuscolare

Per la luce esistono due modelli importanti, il *corpuscolare* che rappresenta la luce con un flusso di particelle, e l'*ondulatorio* che la descrive come delle onde. Il primo viene suggerito dal procedere in linea retta dei raggi luminosi; il secondo si è affermato perché riesce ad interpretare una serie di fenomeni luminosi (di interferenza) che, poco appariscenti nella vita comune, non si lasciano spiegare con un modello a particelle, e perciò ne limitano fortemente la portata esplicativa. Tuttavia la luce non è né un fascio di particelle né un'onda ma un fenomeno a sé, che in alcuni casi si lascia descrivere meglio con il primo modello, in altri con il secondo.

In questa prima parte del corso noi ci appoggeremo solamente al modello corpuscolare, perché esso offre la spiegazione più semplice all'esperienza di raggi rettilinei, all'idea di qualcosa che va dalla sorgente agli oggetti. Esso è completamente sufficiente per i fenomeni più comuni, ed è il più adatto per descrivere i fenomeni di fotochimica.

Un modello serve per fornire agganci all'immaginazione, per far sorgere domande che suggeriscano esperimenti con i quali verificare la bontà della descrizione proposta. P.es. il modello corpuscolare della luce propone l'idea che ci sia un movimento di qualcosa, suddiviso in entità discrete, le "particelle di luce", di cui viene spontaneo chiedersi la massa, la velocità, e che traiettoria seguano.

1.2.1 Le particelle di luce

Le particelle di luce hanno massa?

Si potrebbe cercare di pesare un oggetto che assorbe la luce (un oggetto nero, §10.4.4) prima e dopo averlo illuminato a lungo con una sorgente intensa. L'esperimento non è così semplice da realizzare, comunque oggi la risposta è che le "particelle" di luce hanno massa (a riposo, §6.5.1) zero. Esse hanno però una quantità di moto (*), per cui un fascio di luce che colpisce una superficie esercita su di essa una (pur se debole) forza. E' con questa la forza che si progetta la propulsione a fotoni per viaggi interstellari di astronavi.

(*) Le due affermazioni non sono compatibili con la definizione $\vec{p} = m\vec{v}$ della meccanica classica (§5.2), ma lo sono con la definizione modificata dalla meccanica relativistica (§6.5.1).

1.2.2 La velocità della luce

A che velocità viaggiano le particelle di luce?

Se la velocità di un oggetto è costante, essa è il rapporto fra una distanza ed il tempo impiegato a percorrerla. Nel caso della luce (ma anche del suono) non esiste però un oggetto concreto il cui moto si possa osservare, per cui è necessario crearne uno immateriale, una discontinuità nel tempo, uno "scalino". La velocità del suono si ottiene misurando il tempo di viaggio di una discontinuità fra silenzio e suono (p.es. misurando il ritardo fra uno schiocco e la sua eco da una parete a distanza nota). Uno scalino di luce è una discontinuità fra buio e luce, che si crea accendendo una sorgente luminosa, oppure facendola scomparire dietro una schermatura.

La misura del tempo di viaggio diventa difficile se la velocità è molto elevata, e costringe o a scegliere una distanza sufficientemente grande per riuscire a misurarlo con gli orologi di cui si dispone, oppure a migliorare la tecnica di rilevazione di tempi molto brevi.

- Galileo tentò di misurare la velocità della luce con il primo metodo: un assistente appostato di notte su una collinetta ad una buona distanza (un paio di chilometri) doveva scoprire un lume non appena vedeva quello scoperto da Galileo, il quale sperava così di osservare un ritardo, una specie di "eco" della luce. L'esperimento non ebbe successo, gli permise solo di scagliare un'ipotesi: un limite inferiore alla velocità della luce.
- La prima determinazione della velocità della luce fu compiuta su una distanza planetaria, il diametro dell'orbita terrestre. Misurando con precisione il periodo di rotazione dei quattro satelliti maggiori di Giove (definito dal tempo fra due occultamenti successivi dietro al pianeta), Rømer (*) aveva notato (1676) che durante mezz'anno essi erano *più brevi* di *quattro* giorni (o alcuni secondi, fino al massimo di una trentina) di quelli del mezz'anno seguente, fino ad accumulare un ritardo di poco meno di 17 minuti sull'istante previsto per l'eclisse, per poi essere più brevi nei sei mesi seguenti e recuperare tutto il ritardo (le osservazioni sono ovviamente limitate ai mesi in cui Giove è visibile di notte).
P.es. in un anno avvengono 206 eclissi di Io, per cui il suo periodo medio di rivoluzione è di circa 42.5 ore. Ma nel mezz'anno in cui la Terra si allontana da Giove i primi 103 periodi richiedono circa 34 minuti in più dei 103 seguenti, ovvero essi richiedono rispettivamente circa 17 minuti in più o in meno di 103 periodi medi. Facendo la ragionevolissima ipotesi che il periodo vero sia costante, pari alla media annuale misurata, Rømer sup-

(*) Ole Christensen Rømer, astronomo danese (1644-1710)

Queste misure servivano per giungere alla pubblicazione periodica di tabelle (*effemeridi*), valide per qualche anno, degli istanti esatti degli occultamenti, secondo l'ora di un meridiano di riferimento (il meridiano di Greenwich). La loro osservazione in altri luoghi della Terra, misurata nel tempo locale, permetteva di determinare la latitudine delle terre sconosciute.

pose che gli scostamenti di pochi secondi (al massimo quindici) del periodo apparente (misurato) dalla media (calcolata) dipendessero dalle variazioni della distanza fra Terra e Giove fra un occultamento e l'altro, per cui ogni "scalino di luce" ha da percorrere una distanza un po' diversa di quello precedente. Dato che il moto relativo fra i due pianeti è dovuto sostanzialmente alla Terra, perché (per la terza legge di Keplero, §5.15) Giove compie la sua orbita molto più lentamente della Terra (un suo "anno" dura quasi 12 anni terrestri), i 17 minuti di ritardo accumulati durante il mezz'anno di allontanamento reciproco fra Terra e Giove sarebbero il tempo che la luce impiega a percorrere la somma dei successivi aumenti della distanza fra i due pianeti, cioè il diametro dell'orbita terrestre, la cui lunghezza era già nota agli astronomi (*). Con questi dati Rømer riuscì a calcolare una velocità della luce che differiva solo del 30% da quello oggi accettato.

• Nel secolo scorso, con lo sviluppo della meccanica fine, divenne possibile far ruotare oggetti a velocità angolari sempre più elevate, e con ciò a misurare intervalli di tempo sempre più brevi.

La prima misura fatta su distanze terrestri è di Fizeau (**), il quale usò (1849) una ruota dentata i cui denti facevano da interruttore di un pennello di luce, creando una "mitragliata di pacchetti" di luce. Fin tanto che la ruota gira lentamente ogni pacchetto di luce passato nell'intaglio fra due denti e riflesso da uno specchio fa in tempo a ripassare fra gli stessi due denti, per cui lo sperimentatore da dietro la ruota dentata vede l'immagine della sorgente riflessa nello specchio. Ma al crescere della velocità angolare l'immagine nello specchio non trova il lo stesso per spazzarsi del tutto quando ogni pacchetto che torna dallo specchio trova l'intaglio per cui era passato occupato dal dente successivo. Dalla misura della distanza ruota-dentata-specchio (8.6 km), della velocità angolare a cui il fascio riflesso si spegne (12.6 giri/s), e conoscendo il numero dei denti (720) è facile calcolare il tempo necessario perché un dente prenda il posto di un intervallo, che è anche il tempo che la luce impiega a percorrere i 17.2 km. La velocità della luce che Fizeau misurò con questa tecnica fu solo un 5% superiore al valore attualmente riconosciuto (verificare il conto con i dati appena forniti).

• Foucault (***) riuscì (1850) a ridurre ulteriormente la base di misura, compiendo la prima misura entro un laboratorio. Come interruttore di luce egli usò uno specchietto rotante, che ad ogni giro manda un lampo di luce verso uno specchio fisso: al ritorno il lampo di luce trova lo spec-

(*) Il raggio dell'orbita terrestre è $\sim 1.5 \cdot 10^8$ km = 150 Mkm (§5.10.1).

Fra due occultamenti successivi di Io la Terra percorre un angolo di $2\pi/206 \sim 0.03$ rad attorno al Sole, cioè una distanza di $\sim 4.6 \cdot 10^6$ km. La massima deviazione del periodo apparente da quello medio è perciò di $4.6 \cdot 10^6 \text{ m} / 3 \cdot 10^8 \text{ m/s} \sim 15$ s.

In quale posizione relativa fra Terra, Giove e Sole avviene ciò?

(**) Armand-Hippolyte-Louis Fizeau, fisico francese (1819-1896).

(***) Léon Foucault, fisico francese (1819-1868).

chietto lievemente ruotato, per cui ne viene riflesso in una direzione diversa da quella di partenza. Conoscendo la velocità angolare dello specchietto, dalla misura dell'angolo fra le due direzioni è facile risalire al tempo impiegato dalla luce per andare e tornare fra specchio rotante e specchio fisso. Con una distanza di appena 4.5 m Foucault riuscì a misurare la velocità della luce in laboratorio, anche in mezzi trasparenti diversi dall'aria.

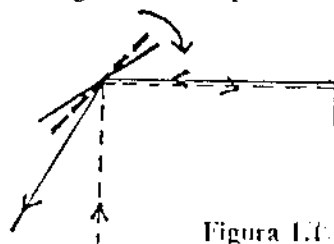


Figura 1.6.

La velocità della luce nel vuoto è oggi la grandezza fisica nota con maggior precisione; il valore attualmente accettato è

$$c = 299\,792\,458 \pm 1 \text{ m/s}$$

il cui errore è di appena 1 su 300 milioni, di 1/300 ppm ~ 0.003 ppm (ppm = parti per milione).

Per tutte le esigenze pratiche è però ampiamente sufficiente (perché lo scarto è minore dell'1‰) ricordare

$$c \approx 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

Aggiungiamo subito, anche se ciò esula dal discorso di ottica, che la velocità della luce nel vuoto è una costante universale, la più importante fondamentale nella fisica moderna; essa è la velocità delle onde elettromagnetiche, qualunque sia la loro frequenza (fig.1.7), ed è la massima velocità possibile per qualsiasi corpo materiale, come pure di qualsiasi segnale modulato, che cioè porti informazione (*). Da questa limitazione conseguono gli "scatti" cinesi che la teoria della relatività ristretta prevede (§6.7).

1.2.3 La luce va in linea retta?

Il modello corpuscolare (ed il senso comune!) suggeriscono che la luce si propaghi lungo linee rette, chiamate *raggi*. Questa previsione trova conferma nella realtà sperimentale?

• Una delle indicazioni per la propagazione rettilinea sono le ombre che gli oggetti proiettano su una superficie illuminata. Ma se le si esaminano accuratamente si trova che il loro bordo non è mai netto, ma sempre un po' sfocato. (Cfr. l'immagine di un oggetto luminoso in fig. 1.8.)

(*) Ci sarebbe il pensiero, che si dice "più veloce della luce"; ma la sua trasmissione a distanza (telepatia) non è provata secondo i criteri della scienza, perché non si è sinora riusciti a riprodurla in modo controllato.

diritta, che aggiri gli spigoli? Questo significherebbe dover rinunciare al modello corpuscolare.

È però buona abitudine, prima di rigettare una teoria, cercare tutte le spiegazioni possibili nell'ambito della stessa. Ed in effetti il bordo sfumato delle ombre si spiega non appena si tenga conto che qualsiasi sorgente reale è estesa: a causa di ciò ogni zona di ombra vera e propria (OKA) è sempre preceduta da una fascia di penombra (AKB), di densità non uniforme perché è illuminata solo da parte della sorgente.

Per non dover sempre tener conto di questo effetto che, una volta compreso, non è più di interesse, si schematizzano le situazioni ragionando con una *sorgente puntiforme*, ideale.

Da ora in poi considereremo sempre solo sorgenti di questo tipo (anche se esse non sono realizzabili ma solo approssimabili) per semplificare il problema quanto più possibile.

Lo *schematizzare*, cioè l'immaginare delle situazioni idealizzate su cui sviluppare il ragionamento teorico, è un procedimento tipico delle scienze.

Di conseguenza gli esperimenti delle scienze sono in genere artificiosi e complicati, perché si tratta di realizzare il meglio possibile in laboratorio le condizioni ideali cui si è fatto riferimento.

minando, o per lo meno limitando, i tanti effetti che, anche se ormai capiti, influenzano il risultato e spesso lo rendono illeggibile.

- Nel passaggio da un mezzo trasparente ad un altro la luce viene deviata di un certo angolo (di rifrazione), ed in mezzi non omogenei si incurva con continuità (p.es. nel fenomeno del miraggio). Queste deviazioni dalla linea retta si lasciano però spiegare perfettamente (§2.7) nell'ambito dell'ottica geometrica, e per evitarle basta limitarsi ad operare entro un unico mezzo trasparente omogeneo ed isotropo.

- Durante un'eclisse totale di Sole si possono osservare stelle anche molto vicine al bordo solare. Le loro posizioni reciproche sono in tal caso lievemente diverse da quelle di sei mesi prima (o dopo), quando le si può osservare di notte: p.es. la stella A di fig.1.3 appare durante

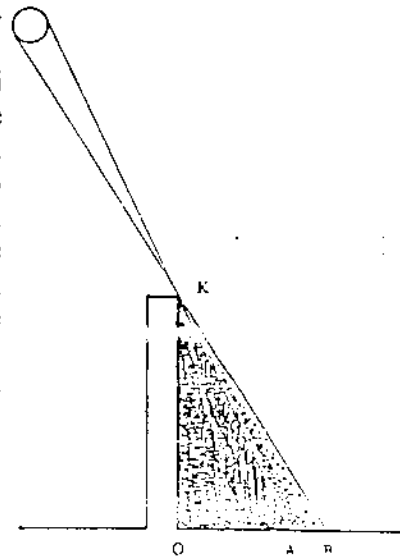


Figura 1.2

l'eclisse nella posizione A' , più vicina alla stella B (*). Il fenomeno

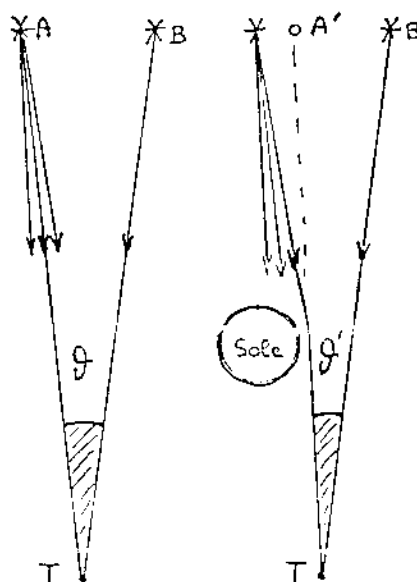


Figura 1.3

viene spiegato dalla teoria della relatività, secondo cui la luce viene deflessa quando passa vicino alla massa del Sole (**). Ma ciò significa che su scala astronomica la luce *non* va diritta: l'esperimento contraddice proprio l'ipotesi di fondo su cui (apparentemente!) si basa il modello corpuscolare!

• Se si guarda attraverso una fenditura molto sottile (p.es. fra le dita della mano tenute molto vicine) verso una zona molto luminosa (p.es. il cielo di giorno) ci si aspetterebbe di vedere lo spazio della fenditura uniformemente illuminato: invece nella striscia di luce si vedono delle righe scure, parallele ai bordi.

Questo fenomeno (chiamato di interferenza per diffrazione, §19.7.5)

mostra che anche su scala molto piccola la luce *non* va diritta, che essa si comporta come un'onda, per l'interferenza e la diffrazione.

La diffrazione non si può spiegare col modello corpuscolare, mentre il modello ondulatorio ne offre una facile spiegazione (§19.7.1). Perciò questo esperimento (ed altri simili) suggerisce che la luce si comporti come una onda: esso addirittura distrugge il nostro modello!

La spiegazione alla diffrazione (e quindi anche alla deflessione della luce) su scala umana, che il semplice modello corpuscolare non riesce a spiegare i fatti né su scala astronomica né su "piccola" scala (***)

La "convincione" che la luce si propaghi in linea retta è il risultato delle esperienze che la specie umana ha fatto durante la propria evoluzione, che hanno programmato il senso della vista per "vedere" (cioè cercare) la sorgente di una luce sul prolungamento rettilineo della direzione di provenienza, perché su scala umana avviene sempre così. Vi fanno eccezione solo alcune situazioni poco frequenti, e perciò non importanti per l'evolui-

(*) In realtà, durante un'eclisse solare, si vede una stella B invece di una stella A, perché la luce di A viene deflessa dal Sole. In questo caso, da $\theta = \angle ATB$ a $\theta' = \angle A'TB$.

(**) In realtà il fenomeno fu cercato solo dopo essere stato previsto da A. Einstein con la sua teoria della relatività. La verifica durante l'eclisse solare del 1916 fu un trionfo della teoria.

(***) Si tratta però di specificare "piccola" rispetto a che cosa. Vedi al §19.7.6.

zione, come la rifrazione nell'acqua (quando è limpida e ferma) e la riflessione sulla sua superficie; esse ci "illudono otticamente", perché fanno vedere un oggetto là dove esso non è (*).

1.2.4 La scelta del modello corpuscolare

Ma perché perdere tempo con il modello corpuscolare, una volta constatato che esso non descrive bene la realtà? Non conviene usare subito il modello "vero", quello ondulatorio?

La risposta è no, per svariati motivi:

- entro i suoi limiti di validità (che coprono una gamma vastissima di fenomeni, fra cui tutti quelli di interesse quotidiano) il modello corpuscolare è molto più semplice ed intuitivo dell'altro: p.es. la riflessione della luce si immagina molto più facilmente con particelle (come rimbalzo elastico su una superficie liscia) che con onde (§19.7.3);
- anche il modello ondulatorio, oltre ad essere più laborioso nell'uso, ha i suoi limiti; p.es. non è capace di spiegare l'effetto fotoelettrico e tutta la fotochimica, che sono invece di facile comprensione con un modello corpuscolare, completato con la quantistica. Per chi, come un biologo, è interessato soprattutto ai fenomeni fotochimici della luce il modello corpuscolare è di gran lunga il più utile, mentre l'effetto ondulatorio ha un ruolo solo marginale.
- è luogo comune parlare di "dualismo onda-corpuscolo", del "paradosso" del fotone che ha contemporaneamente la natura di un'onda e di una particella. Ma si tratta di un falso mistero, la domanda di quale delle due sia la "vera natura" della luce è senza senso perché entrambi sono solo dei modelli, ciascuno utile nel proprio campo di validità, ma entrambi insufficienti a descrivere completamente la luce; nessuno dei due è "giusto" o "sbagliato", semplicemente perché il fotone non è né un corpuscolo né un'onda, è un'altra cosa;
- la teoria elettromagnetica è la migliore descrizione disponibile della luce, ma è di difficile visualizzazione ed ingombrante nell'uso: indispensabile per ogni calcolo completo, essa non favorisce la comprensione intuitiva, come invece fanno i modelli.

(*) Anche l'avvicinarsi fra due stelle durante un'eclisse di sole è un'illusione ottica: si "vede" A in A' (fig.1.3) prolungando in linea retta all'indietro il raggio che arriva ai nostri occhi, perché la nostra mente non riesce a concepire che un raggio di luce possa incurvarsi. Invece il senso dell'udito non è così rigidamente programmato a cercare l'origine di un suono in linea retta, perché nel caso del suono i fenomeni di diffrazione sono cospicui anche sulla scala delle dimensioni umane, e siamo abituati a suoni che aggirano gli ostacoli; perciò non siamo affatto così categorici nel localizzare la sorgente di un suono nella direzione da cui esso ci perviene.

Continueremo perciò in questa prima parte del corso ad usare il modello a particelle. Le chiameremo da adesso in avanti col loro nome tecnico di *fotoni*, anche se in questo corso esso resterà un semplice nome, senza un chiaro significato specifico (*).

1.3 Il principio di sovrapposizione

Introducendo il modello corpuscolare abbiamo parlato di un'unica sorgente (che abbiamo poi fatto diventare puntiforme). Ma che succede se ce ne sono più d'una? Si disturbano a vicenda? I fotoni da loro emessi "reagiscono" fra di loro?

Facciamo qui l'ipotesi (plausibile ma non scontata) che la luce proveniente da più sorgenti si sommi semplicemente, che p.es. mille lampadine facciano esattamente mille volte più luce di una sola; ciò permette di considerare ogni sorgente estesa come l'insieme, la "sovrapposizione" di tantissime sorgenti puntiformi.

Questo presuppone che i fotoni non si influenzino l'un l'altro, che luci da sorgenti diverse non si ostacolino né si rinforzino a vicenda.

L'ipotesi della somma, con il nome storico di *principio di sovrapposizione*, facilita enormemente ogni descrizione formalizzata perché permette di operare con la più abberdabile delle matematiche, quella delle equazioni lineari. Useremo questo principio ripetutamente, non solo in ottica ma durante tutto il corso (**).

Ma non si deve mai dimenticare che, come qualsiasi ipotesi, essa condiziona i risultati i quali vanno perciò tutti rivisti qualora essa non risultasse soddisfatta (***)).

(*) I fotoni sono delle particelle piuttosto singolari per il senso comune, perché viaggiano permanentemente a velocità c , hanno massa a riposo zero, ma trasportano energia e quantità di moto. Essi diventano comprensibili solo con la meccanica quantistica, come quanti del campo elettromagnetico.

(**) Per il principio di sovrapposizione in generale vedi al §A.5.1, ed in ottica, al §19.5. Ben più frequentemente però in natura non c'è linearità, ma si hanno p.es. effetti di *sinergia* (vedi al §A.5.1).

(***) Non si può pensare che la luce sia un campo elettrico (ed uno magnetico associato) oscillante, per il quale vale il principio di sovrapposizione. Nei singolari fenomeni di interferenza della luce esso non sembra valere, ma solo perché quella che si presenta è l'intensità della luce, che è energia, la quale è proporzionale al quadrato del campo (§19.3), e poiché la sovrapposizione vale per i campi, essa non può valere per i loro quadrati!

1.4 Elementi di fotometria

Nelle scienze prima di iniziare *qualsiasi* studio sistematico è necessario chiarire i concetti con cui si opera, le grandezze sperimentali che vi corrispondono, e specificare come le si misura. A tale scopo si deve

- 1) individuare le variabili più opportune per il discorso da fare, le "variabili buone";
- 2) darne una definizione che permetta di caratterizzarle univocamente, e di misurarle;
- 3) fissare una procedura di misura e delle unità, per esprimere numericamente le osservazioni e poter fare confronti quantitativi fra misure prese in condizioni diverse.

Per individuare i concetti con cui studiare la luce ci appoggeremo fortemente al modello corpuscolare, ciò che non è strettamente necessario, ma è molto utile per l'intuizione.

1.4.1 Le grandezze fotometriche fondamentali

Nello studio della luce si ha sempre a che fare con

- a) una sorgente luminosa che emette della luce, la quale
- b) si propaga nello spazio, dove viene in vari modi deviata, diffusa o concentrata, assorbita, fino a che
- c) colpisce, illuminandolo, un oggetto.

a) La sorgente

La prima esigenza per chi deve descrivere una sorgente luminosa è quella di caratterizzarne la "forza" (*) e di misurarla.

Dalla sorgente esce un *flusso luminoso*; nel modello corpuscolare esso è un flusso di fotoni, che si misura determinandone il numero emesso nell'unità di tempo (p.es. durante un secondo; l'unità di misura sarà allora il *numero/secondo*, n/s). Se invece si descrive la luce come un flusso di energia (dato che, come vedremo in seguito, insieme alla luce viaggia energia) la "forza" della sorgente si specifica con l'energia emessa per unità di tempo, una grandezza nota come *potenza*, che si misura in *watt* = joule/secondo: $1 \text{ J/s} = 1 \text{ W}$ (**).

(*) Per l'uso di questo termine, vedi al §5.1.

(**) Per la convenzione sull'uso di maiuscole e minuscole per le unità di misura, vedi al §A.1.

L'unità n/s è la più naturale se si misura con contatori di fotoni (i fotomoltiplicatori), che sono i rivelatori usati per livelli di luce estremamente bassi; l'unità watt è più naturale se si usano misuratori di energia, che vengono usati per intensità più elevate.

La grandezza misurata nell'uno o l'altro di questi modi si chiama *flusso totale* uscente dalla sorgente; la indichiamo con la lettera Φ_{tot} .

In genere la luce non si espande in modo uniforme in tutte le direzioni dello spazio, cioè il flusso luminoso di una sorgente ha intensità che varia con l'angolo, non è *isotropo*.

P.es. lo specchio parabolico di una torcia elettrica concentra in avanti il flusso emesso dalla lampadina, schermando tutte le altre direzioni. Non è isotropa neanche l'emissione di un fotone di luce da un atomo.

Per caratterizzare una sorgente è perciò necessaria una seconda variabile, l'*intensità luminosa*, che descriva come il numero di fotoni al secondo che esce dalla sorgente varia con la direzione:

$$I = I(\text{direzione})$$

Matematicamente una direzione nello spazio viene individuata specificando una coppia di angoli di Eulero, θ e φ (§4.2.2). Perciò la scrittura formalizzata è $I = I(\theta, \varphi)$.

La definizione operativa dell'intensità si ottiene stabilendo come essa è collegata con il concetto di flusso.

Si immagini di "affettare" lo spazio in un gran numero di coni, tutti di ampiezza uguale e coi vertice nella sorgente puntiforme.

Se la sorgente è isotropa l'intensità è la stessa in tutti i direzioni; entro ciascuna cono fluisce allora lo stesso numero di fotoni al secondo, proporzionale all'angolo solido Ω (*) che ne misura l'apertura, con fattore di proporzionalità I .

$$\Phi = I\Omega \quad (\text{sorg. isotropa})$$

Se invece la sorgente è anisotropa il flusso sarà diverso da una direzione all'altra, cioè da cono a cono. Se l'apertura di un cono non è piccola la variabilità del flusso può essere grande anche al suo interno, nel qual caso il rapporto fra Φ ed Ω fornisce solo un'intensità media per quel cono.

$$\Phi = \bar{I}\Omega \quad (\text{sorg. anisotropa})$$

(*) L'angolo solido si misura in *steradiani*, *sr* (§A.2.2). Osservare che il ragionare su coni di luce presuppone che i raggi di luce siano linee rette!

e si può solo dire che il flusso è una funzione crescente dell'apertura del cono.

Suddividendo però lo spazio in coni sempre più piccoli la variabilità del flusso all'interno del singolo conetto si riduce finché, giunti a livello infinitesimo, non è più necessario il concetto di "medio"

$$d\Phi = I d\Omega$$

La costante di proporzionalità I varia con la direzione; ma con ciò essa ha esattamente la proprietà dell'intensità che cerchiamo. In conclusione l'intensità luminosa è definita operativamente dal rapporto

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega}$$

come la *densità di flusso per angolo solido*; le sue unità di misura sono evidentemente

$$\frac{\text{watt}}{\text{sterad}} = \frac{\text{W}}{\text{sr}} \quad \text{oppure} \quad \frac{\text{lm/s}}{\text{sr}}$$

Se si conosce $I(\theta, \varphi)$ si può calcolare il flusso entro qualsiasi cono finito (p.es. entro un ottante dello spazio) semplicemente sommando il contributo di tutti i conetti che lo compongono, cioè integrando l'espressione infinitesima per $d\Phi$:

$$\Phi = \int I d\Omega \quad \left(= \int \frac{d\Phi}{d\Omega} d\Omega = \int d\Phi \right)$$

P.es. il flusso totale uscente dalla sorgente è

$$\Phi_{\text{tot}} = \int_{4\pi} I d\Omega$$

con l'integrale esteso all'angolo solido di tutto lo spazio. Se il flusso è *isotropo*, cioè uguale in tutte le direzioni, l'integrazione fornisce

$$\Phi_{\text{tot}} = 4\pi I_{\text{tot}} \quad \rightarrow \quad I_{\text{tot}} = \frac{\Phi_{\text{tot}}}{4\pi}$$

La relazione di definizione dell'intensità, $I = d\Phi/d\Omega$, può far perdere di vista che la grandezza fisicamente e concettualmente primaria è il flusso, mentre l'intensità è solo un modo utile ma formale di descrivere come il flusso si distribuisce nello spazio. Quella che si misura è l'intensità media in una direzione, misurando il flusso Φ entro un angolo solido Ω intorno a tale direzione:

$$\bar{I} = \frac{\Phi}{\Omega}$$

b) La propagazione nello spazio

Durante la fase di transito fra sorgente di luce ed oggetto illuminato la trasmissione rettilinea della luce può esser perturbata in vari modi: diffusa o assorbita da ostacoli opachi o poco trasparenti, rifratta da materiali trasparenti, riflessa da specchi etc. (§2.2). Inoltre quasi sempre (fuorché per fasci molto ben collimati) la luce "diminuisce" con la distanza dalla sorgente.

Questa fase non può essere oggetto di misure ma solo di teoria, perché per misurare si deve intercettare il raggio con una superficie che raccolga la luce, cioè interrompere (o per lo meno disturbare) il flusso luminoso: cosa avvenga durante il transito si può solo inferire dalla misura del flusso al momento dell'arrivo su un oggetto (rivelatore), facendo l'ipotesi che fra sorgente e ricevitore il numero dei fotoni resti costante, cioè che non ne nascano né ne muoiano per strada.

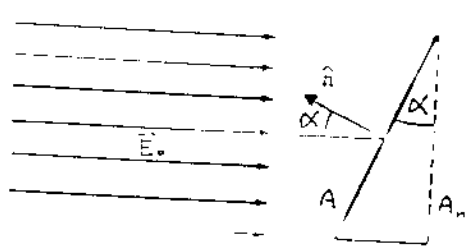
Nel cap.2 vedremo la più semplice delle teorie sulla propagazione della luce nello spazio, l'ottica geometrica.

c) L'illuminazione di un oggetto

L'unica cosa che si possa misurare è sempre solo il flusso, preso il momento di tempo in secondo che terminano la loro corsa sulla superficie di un oggetto (il ricevente).

Il numero dei fotoni raccolti da una superficie (il *flusso incidente*) dipende da come questa viene "vista" dalla luce, cioè dal suo orientamento rispetto alla direzione di propagazione (pensare a come si deve orientare uno scritto "verso la luce" per riuscire a leggerlo di notte con una sorgente "a vista"). L'illuminazione è massima se la superficie è ortogonale alla direzione dei raggi, cala con l'inclinazione e diviene zero se è parallela ai raggi, perché la luce la sfiora di taglio senza toccarla.

L'inclinazione si misura con l'angolo α fra la direzione di propagazione della luce ed il vettore \hat{n} della normale alla superficie; è facile convincersi (fig.1.4) che il numero di fotoni raccolti sull'area A è uguale a quello che raccoglierebbe la sua proiezione ortogonale



$$A_n = A \cos \alpha$$

Figura 1.4

Il flusso incidente sulla superficie è palesemente una funzione crescente dell'area A_n . Con ragionamento analogo si può dimostrare

punto a), diminuendo Λ_n la relazione fra Φ ed Λ_n tende sempre più a divenire di proporzionalità, fino ad esserlo completamente a livello infinitesimo

$$\begin{aligned} d\Phi &\propto d\Lambda_n = E_0 d\Lambda_n \\ &= E_0 \cos\alpha d\Lambda \end{aligned}$$

Il fattore di proporzionalità E_0 si interpreta come la "quantità di luce presente" davanti a $d\Lambda$, detta la *densità di illuminazione* (o *illuminazione perpendicolare*). Essa è la terza variabile necessaria per caratterizzare i fenomeni luminosi, e varia in genere da punto a punto dello spazio. Trattandosi di un flusso luminoso per unità di superficie la si misura ovviamente in $(n/s)/m^2$, oppure in W/m^2 .

Integrando la relazione infinitesima si ottiene il flusso luminoso che arriva su una superficie finita S :

$$\Phi = \int_S E_0 d\Lambda_n$$

Come suggerisce la fig. 1.4 \vec{E}_0 (*) è una grandezza vettoriale, perché deve specificare tanto la quantità di luce presente in un dato punto dello spazio quanto la direzione in cui essa viaggia (**).

Poiché qualsiasi misura di luce si riduce ad una misura di flusso, e questa si può realizzare esclusivamente intercettando i fotoni con la superficie di un misuratore, quella che abbiamo appena scritta è la vera *definizione operativa* del flusso luminoso, vettoriale a tutta la fotometria (**).

A futura memoria la riscriviamo usando il completo formalismo vettoriale

$$\begin{aligned} d\Phi &= \vec{E}_0 \cdot \hat{n} dA \\ \Phi &= \int_S \vec{E}_0 \cdot \hat{n} dA \end{aligned}$$

perché il concetto di "flusso di un vettore" (in questo caso, di \vec{E}_0) ci servirà ripetutamente durante il corso.

Ogni volta che si parla di flusso di qualcosa (che nell'ottica sono fotoni, oppure energia; più avanti incontreremo il flusso di un liquido, §12.3.2, il flusso di cariche elettriche (cioè la corrente elettrica) §13.3, ma anche il flusso del campo elettrico, §15.1, e del campo magnetico, §16.3) il "qual-

(*) Per prevenire equivoci futuri segnaliamo che il simbolo E usato tradizionalmente per l'illuminazione è casualmente lo stesso che si usa per il vettore "campo elettrico".

(**) La densità di illuminazione \vec{E}_0 coincide con il vettore di Poynting, $\vec{S} = \vec{E} \times \vec{B}/\mu_0$, che descrive la densità di energia che viaggia con un'onda elettromagnetica con il prodotto vettoriale fra campo elettrico e campo magnetico (vedi una nota del §19.3).

(***) Notare che all'inizio del paragrafo avevamo dato sia il concetto che le unità di misura per il flusso, ma glissato sulla procedura di misura, cioè sulla sua definizione operativa.

cosa" è sempre descritto da un vettore. P.es. per descrivere rispettivamente il flusso di fotoni o quello di energia si usano i vettori (vedi al §12.3.2)

$$\vec{\Gamma}_0 = n\vec{v} \quad \text{oppure} \quad \vec{E}_0 = \rho_E \vec{v}$$

con \vec{v} la velocità dei fotoni (cioè della luce) nel punto a cui $\vec{\Gamma}_0$ si riferisce, n la densità numerica di fotoni (n/m^3) e ρ_E la densità di energia (J/m^3) (*). Questi vettori danno veste formale all'idea di "quanta luce c'è" in un dato punto.

Nella pratica si usa spesso l'*illuminazione*, la quantità di luce E che arriva effettivamente sull'unità di superficie del ricevente, tenuto conto anche della sua inclinazione. Palesemente E è la proiezione di \vec{E}_0 sulla normale alla superficie

$$E = E_0 \cos \alpha \\ = \vec{E}_0 \cdot \hat{n}$$

Γ_0 è il concetto più significativo per la teoria, ma E è quello più pratico, utilitaristico, perché mette in relazione le grandezze che si misurano effettivamente, $d\Phi$ e dA :

$$d\Phi = \Gamma_0 \cos \alpha dA \quad \left\{ \begin{array}{ll} = E_0 dA_0 & \text{punto di vista fisico} \\ = E dA & \text{punto di vista della misura} \end{array} \right.$$

Per evitare di dover tener conto nell'elaborazione delle misure anche dell'estensione delle sorgenti, cioè di aver sempre a mente che la luce non arriva perpendicolarmente sul ricevitore, un buon misuratore di intensità luminosa deve avere la superficie ricevente a calotta sferica, al cui centro va posta la sorgente.

12.3.3 Sorgenti puntiformi

Per completezza aggiungiamo che in fotometria si deve tener conto anche dell'estensione delle sorgenti, che non sono mai puntiformi; per questo serve ancora una quarta variabile, la *brillanza* o *splendore*, misura del flusso emesso per unità di superficie della sorgente.

Il concetto è l'esatto equivalente in emissione di quello di illuminazione in ricezione. Non ce ne occupiamo qui perché ci limitiamo alle sorgenti puntiformi, per le quali il problema non si pone.

* Per un'analisi più completa delle sorgenti puntiformi (e non puntiformi) si veda il capitolo 12.3.3.

$$|\Gamma_{\text{EL}}| = \left[\frac{E L}{r^3} \frac{r}{t} \right] = \left[\frac{E L}{t} \frac{1}{r^2} \right] = \left[\frac{\Phi}{r^2} \right] \\ |\text{nv}| = \left[\frac{n}{r^3} \frac{m}{t} \right] = \left[\frac{n}{t} \frac{1}{r^2} \right] = \left[\frac{\Phi}{r^2} \right] = |\Gamma_0|$$

1.4.2 La legge del quadrato delle distanze

Torniamo ora al punto b), la propagazione della luce nello spazio fra sorgente e ricevitore. Mentre nei capitoli 2 e 3 faremo la teoria di cosa avviene della luce in presenza di materia, con il modello corpuscolare possiamo già ora spiegare l'osservazione empirica che "c'è meno luce" man mano che ci si allontana dalla sorgente: con la distanza aumenta anche la distanza fra i fotoni, cioè se ne diluisce la densità.

Affinché ciò avvenga effettivamente servono però due ipotesi:

- che i fotoni non varino di numero una volta usciti dalla sorgente (questo non è che un modo di esprimere la conservazione dell'energia, dell'energia associata ai fotoni), e che
- essi non cambino direzione ma procedano in linea retta (*).

Per trovare la legge secondo cui la luce diminuisce con la distanza dalla sorgente si deve tradurre l'idea della diluizione in linguaggio matematico.

"Meno luce" significa che $E_0(r)$ è una funzione decrescente della distanza r , la cui forma precisa si ottiene con una a scelta di tre dimostrazioni, lievemente diverse ma tra loro equivalenti:

1) Il modo più pragmatico, da sperimentali, è di mettere a confronto le situazioni a distanze diverse dalla sorgente.

Se si pensa di avvolgere la sorgente entro tante superfici chiuse, tante "bucce" una sopra l'altra (la cui forma può essere qualsiasi!), il flusso totale attraverso ciascuna di esse ha lo stesso valore perché (prima ipotesi) si tratta sempre degli stessi fotoni che, emessi dalla sorgente, le attraversano una dopo l'altra: il flusso totale, su qualsiasi "buccia" o sensore, è una costante del fenomeno

$$\Phi_{\text{tot}} = \int_{S_1} \vec{E}_0(r) \cdot \hat{n} dA = \int_{S_2} \vec{E}_0(r) \cdot \hat{n} dA = \dots$$

Se si considera un cono di apertura infinitesima $d\Omega$ col vertice nella sorgente puntiforme, esso ritaglia sulle varie bucce delle superficie infinitesime dA_i , la cui superficie aumenta man mano che ci si allontana. Se la luce va dritta (seconda ipotesi) i fotoni emessi entro il cono non ne escono, ed altri non vi entrano, cioè la costanza stabilita per il flusso totale vale anche per il flusso entro il singolo conetto

(*) Entrambi le ipotesi valgono solo se la luce viaggia nel vuoto. Invece nella materia i fotoni "muoiono" se ci sono fenomeni di assorbimento (cap.3), cambiano direzione nei fenomeni di riflessione, per cui in entrambi i casi la legge del quadrato delle distanze non vale.

