

# Osservazioni sulla natura della luce e loro implicazioni fisiche

## 1. Problemi posti dalla teoria elettromagnetica di Maxwell

Nella seconda metà dell'Ottocento il grande matematico e fisico scozzese James Clerk Maxwell (1831-1879) sistematizzò le leggi dell'elettricità e del magnetismo, rendendole coerenti fra di loro, in alcune famose equazioni per il campo elettrico e per il campo magnetico. Scrive Albert Einstein in un articolo divulgativo apparso nell'aprile 1950<sup>[2]</sup>:

Queste equazioni implicavano l'esistenza di onde, le cui proprietà corrispondevano a quelle della luce per come erano conosciute a quel tempo.

In particolare, Maxwell mostrò che queste onde, *radiazioni elettromagnetiche*, possedevano nel vuoto una velocità

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \quad (1)$$

dove  $\mu_0$  e  $\epsilon_0$  sono le due costanti fondamentali dell'elettromagnetismo, la permeabilità magnetica e la costante dielettrica del vuoto. ( $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ N/A}^2$  ;  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2/\text{Nm}^2$ ). Ora, il valore ottenuto per  $c$  (circa  $2,998 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ ) era appunto vicino a quello conosciuto per la luce.

Tale scoperta incorpora l'ottica nell'elettromagnetismo, legando direttamente la luce in quanto radiazione elettromagnetica al concetto di campo. Tuttavia, ciò pone due problemi:

- si rende necessario introdurre un mezzo di propagazione per questa 'onda', da sostituire al 'vuoto' in cui la luce mostra di potersi propagare (si è parlato di 'etere');
- la relatività galileiana, applicata ai fenomeni elettromagnetici (luce compresa) li rende dipendenti dal sistema di riferimento considerato, inserendoli in un sistema di trasformazioni basato sulla composizione additiva delle velocità. Ciò è in contrasto con i risultati di Maxwell, che risultano indipendenti dal sistema di riferimento inerziale scelto (*sistema inerziale: sistema di riferimento in cui tutti i punti materiali non sottoposti a forze si muovono a velocità costante*), e in particolare con la costanza della velocità della luce in tutti i sistemi inerziali, che esperimenti come quello di Michelson e Morley (1887) andavano sempre più confermando come dato acquisito.

## 2. 1905: la soluzione einsteiniana

Nel 1905 Albert Einstein pubblicò un articolo, *Sull'elettrodinamica dei corpi in movimento*, in

cui - all'incirca contemporaneamente al collega Poincaré - procedeva alla risoluzione di questo secondo problema (e indirettamente anche del primo) operando teoricamente sui concetti fondamentali della fisica e ricavandone quella che è nota come *teoria della relatività speciale*.

Alcuni studiosi di filosofia hanno ravvisato in queste riflessioni einsteiniane delle intuizioni già formulate da G.W.F. Hegel nella sua *Filosofia della Natura*<sup>[4]</sup> (1817-1830) , nei paragrafi 275 - 278 dedicati alla luce; è lo studioso sudafricano J. N. Findlay (1903-1987) a constatare “*undoubtedly a flavour of relativity physics in some of the things Hegel says about light*” (“indubbiamente un sapore di fisica relativistica in alcune delle cose che Hegel dice sulla luce”)<sup>(\*)</sup>. Seguiremo allora queste riflessioni, sul piano strettamente concettuale, da entrambi i punti di vista, avvalendoci delle annotazioni dello studioso di Hegel Dieter Wandschneider (1938-viv.)<sup>[5][6]</sup>, ricordando però con lui che “*Naturalmente sarebbe del tutto assurdo supporre che non Einstein, ma già Hegel abbia in verità sviluppato la teoria della relatività, che è una teoria fisico-matematica, di cui Hegel non poteva avere alcuna idea. Bisognerà però dire che a partire da Hegel è divenuta possibile una interpretazione filosofica (di filosofia della natura) del dato di fatto centrale che è alla base della teoria della relatività.*”<sup>[6]</sup>

### 3. “La velocità assoluta”

Hegel, spiega Wandschneider, attribuisce alla luce una *posizione particolare* rispetto al resto della materia, e per due motivi:

- “*Il suo essere è la velocità assoluta*” (*Enc. § 275, Aggiunta*)
- essa è “*l'assolutamente leggero*”, cioè non ha massa inerziale (*Enc. § 276*)

Si tratta di due capisaldi della moderna concezione della luce, cui Hegel giunge, essenzialmente, ipotizzando che se il *movimento relativo* dei corpi (quello inerziale galileiano) è legato a ciò che conosciamo come ‘*inerzia della massa*’, può esistere un ‘*non-corpo*’ (come lo definisce Wandschneider) che invece non sia interessato da questo movimento relativo, ma da una *quiete assoluta* (che non è fisicamente concepibile) o da un *movimento assoluto*; dunque tale ‘non-corpo’ in movimento assoluto non sarebbe in quiete relativa per nessun corpo inerziale.

Ciò significa, uscendo dal linguaggio hegeliano, che esso sarebbe in moto rispetto a qualunque sistema di riferimento inerziale, che è proprio ciò che Einstein attribuisce alla luce: l’aver velocità indipendente dal sistema di riferimento inerziale e l’essere questa velocità irraggiungibile per un corpo dotato di massa inerziale.

(\*) J. N. Findlay, *Hegel, a re-examination*, London 1964, cit. in [5]

Hegel stesso chiama ‘luce’ questo ‘non-corpo’, privo di massa inerziale e dunque “*assolutamente leggero*”, aggiungendo però che è necessaria una prova fisica per poter affermare che questa luce è effettivamente quella che intendiamo empiricamente come ‘luce’.

Di ciò si è (inconsapevolmente) occupata la fisica: come risulta dal lavoro di Maxwell, la luce è radiazione elettromagnetica, vale a dire oscillazione del campo elettrico e del campo magnetico che si propaga nello spazio senza bisogno di un ‘mezzo’; ciò conferma, *en passant*, l’intuizione di Hegel secondo cui l’elettricità e il magnetismo avevano natura omogenea alla luce, e soprattutto la critica hegeliana alla concezione corpuscolare della luce (legata al nome di Newton) e a quella ondulatoria in senso tradizionale, cioè come oscillazione di materia, propagantesi in un mezzo (legata al nome di Huygens).

#### 4. L’apporto goethiano

Tale critica si inserisce in modo assai originale nel panorama scientifico-filosofico coevo, già alla ricerca di alternative all’interpretazione newtoniana (soprattutto attraverso la rivalutazione di Huygens e Hooke). Quello che giova qui ricordare, per comprendere il senso della prospettiva hegeliana e della “*posizione particolare*” della luce, è il contributo, come studioso di ottica, di J. W. Goethe il quale, introducendo la sua meticolosa e affascinante *Teoria dei colori* (*Farbenlehre*)<sup>[3]</sup> del 1810, così parla della luce in rapporto ai colori:

“Die Farben sind Taten des Lichts, Taten und Leiden. In diesem Sinne können wir von denselben Aufschlüsse über das Licht erwarten. Farben und Licht stehen zwar untereinander in dem genauesten Verhältnis, aber wir müssen uns beide als der ganzen Natur angehörig denken: denn sie ist es ganz, die sich dadurch dem Sinne des Auges besonders offenbaren will.” (*Farbenlehre, Vorwort*)

I colori sono azioni della luce, azioni e passioni; in questo senso, possiamo attendere schiarimenti sulla luce. È ben vero che un rapporto dei più precisi lega colori e luce, ma noi dobbiamo pensarli tutti e due come appartenenti alla totalità della natura, perché è la natura nella sua interezza che, per mezzo loro, intende rivelarsi al senso della vista. (*Teoria dei Colori, Premessa*, trad. Bruno Maffi)

Centrale agli effetti del nostro discorso è l’ultima frase, che introduce il concetto di luce come indissolubile dallo stesso meccanismo dell’osservazione, che è alla base dell’intera scienza fisica. Non è molto lontano Hegel quando scrive, trattando dei rapporti della *figura* con la luce (§ 317):

“I colori sono così in parte interamente soggettivi, fatti apparire per incanto dall’occhio - un effetto di una chiarezza o oscurità, e una modificazione del loro rapporto

nell'occhio; al che tuttavia appartiene certo anche una luminosità esterna. Schultz<sup>(\*\*)</sup> ascrive al fosforo che si trova nel nostro occhio una peculiare luminosità: pertanto spesso è difficile dire se la luminosità o oscurità e il loro rapporto si trovano in noi o no.”

Quel che c'è da cogliere in sintesi è che entrambi gli autori fanno riferimento alla luce in primo luogo come *presupposto* dell'osservazione, (“*La luce è essa stessa il porre l'essere-per-altro*”, *Enc. § 275, Aggiunta*) e solo successivamente come ente in sé studiabile (“*In che modo è visibile la visibilità? [...] - il sole, il corpo per sé luminoso.*”, *ibid.*). Addirittura Goethe, che era in primo luogo il poeta che conosciamo, allarga per un attimo il discorso a comprendere i vari mezzi con cui l'io si rapporta al non-io, alla natura:

“[...] ist es nur die Natur, die spricht, ihr Dasein, ihre Kraft, ihr Leben und ihre Verhältnisse offenbart, so dass ein Blinder, dem das unendlich Sichtbare versagt ist, im Hörbaren ein unendlich Lebendiges fassen kann.” (*Farbenlehre, Vorwort*)

[...] è soltanto la natura che parla, che svela il suo essere, il suo potere, la sua vita, i suoi rapporti, cosicché un cieco, al quale l'infinitamente visibile è precluso, può cogliere nell'udibile un infinitamente vivo. (*Teoria dei Colori, Premessa*)

## 5. Conseguenze immediate: l'esperimento dell'“orologio a luce”

In sintesi, siamo arrivati a concepire la luce come:

- presupposto dell'osservazione fisica
- ‘non-corpo’ privo di massa inerziale
- radiazione elettromagnetica, dalla velocità indipendente dal sistema di riferimento inerziale dell'osservatore, propagantesi nel vuoto e avente (secondo quanto previsto da Maxwell) una certa energia.

Prendendo in considerazione quest'ultimo punto vediamo in conclusione come una simile concezione sia in grado di modificare i concetti fondamentali di spazio e tempo, riflessione che è al centro del lavoro di Einstein cui si è fatto riferimento.

Consideriamo il seguente esperimento ideale:

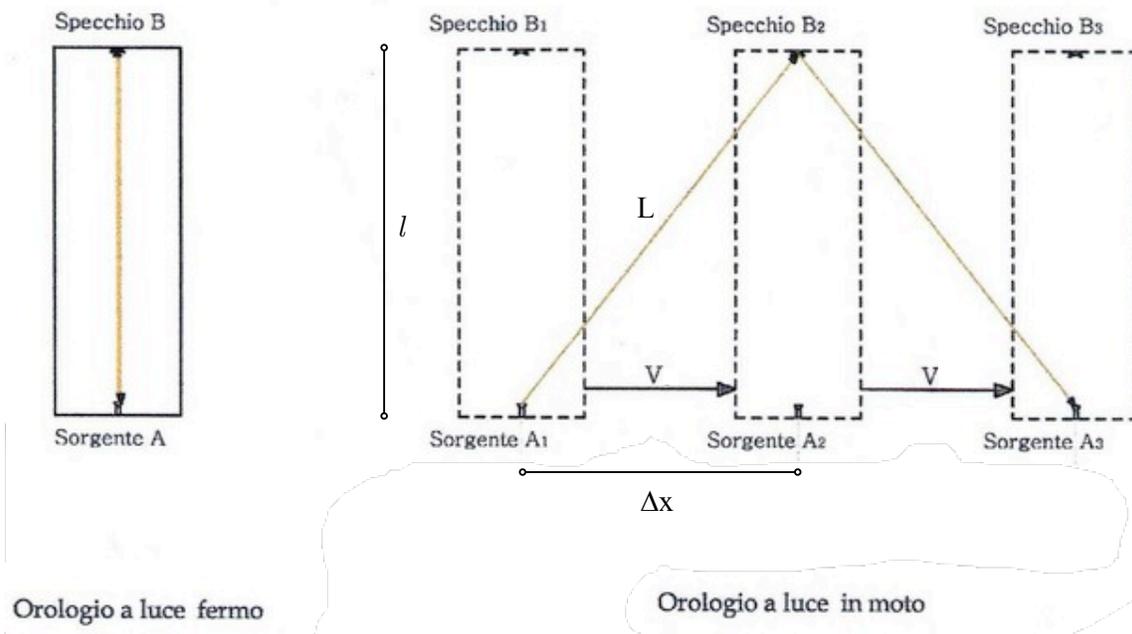
(\*\*) C. F. L. Schultz (1781-1834), alto funzionario all'Università di Berlino, studioso di ottica e perciò in contatto epistolare con Goethe.

- un fotone, particella fondamentale della luce (da non identificarsi con il corpuscolo newtoniano: il fotone è considerato ad oggi una particella priva di massa) esce da una sorgente luminosa A, riflette su uno specchio piano B posto perpendicolarmente al raggio luminoso a distanza  $l$ , e torna al punto di partenza sempre con traiettoria rettilinea. L'osservatore è fermo rispetto al sistema  $S_0$  sorgente-specchio (cioè all' "orologio a luce"). Il tempo impiegato per andare da A a B e di nuovo ad A sarà

$$\Delta\tau = \frac{2l}{c} \quad (2)$$

dove  $c$  è la velocità della luce.

- Allo stesso esperimento assiste un osservatore rispetto al quale il sistema sorgente-specchio è in moto inerziale. In  $S_1$  (il sistema di riferimento dell'osservatore) il fotone va dal punto  $A_1$  al punto  $B_2$  al punto  $A_3$ :



Non è cambiata la velocità del fotone, come avrebbe previsto la relatività galileiana, poiché si è detto che  $c$  è costante. Se è così, il tempo impiegato sarà

$$\Delta t = \frac{2L}{c} \quad (3)$$

ovvero

$$\Delta t^2 = \frac{4L^2}{c^2} = \frac{4l^2}{c^2} + \frac{4\Delta x^2}{c^2} = \Delta\tau^2 + \frac{(2\Delta x)^2}{c^2} \quad (4)$$

Ciò significa che proprio  $\Delta\tau$ , la distanza fra i due eventi “partenza” e “arrivo” che nel sistema  $S_0$  hanno le stesse coordinate spaziali, è tale che

$$\Delta\tau^2 = \Delta t^2 - \frac{(2\Delta x)^2}{c^2} = \Delta t^2 \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right) \quad (5)$$

dove  $v$  è la velocità di  $S_0$  rispetto a  $S_1$  (ricordiamo nuovamente che si tratta di sistemi inerziali). Ciò significa che la *distanza spazio-temporale* fra i due eventi è invariante rispetto al sistema di riferimento scelto, poichè da qualunque di questi sistemi, noto

$$\beta = \frac{v}{c} \quad (6)$$

e misurando  $\Delta t$ , si ricava invariabilmente  $\Delta\tau$ , il “*tempo proprio*” del viaggio del fotone.

La “posizione privilegiata” della luce, confermata dalla riflessione teorica e sperimentale (Michelson e Morley) sulla teoria di Maxwell, va dunque ad influenzare la concezione di spazio e tempo di un fenomeno fisico osservato, rendendo possibile concepire una *distanza fra due eventi nello spazio-tempo* ( $\Delta\tau$ ) indipendente dal sistema di riferimento dell’osservatore. Viceversa, affinché questa distanza abbia carattere di *invariante*, sono le coordinate spaziali e temporali in sé a non essere invarianti, cioè sono *relative* ( $\Delta t$  nel nostro caso, che dipende da  $\beta$ ). Si tratta però non semplicemente della relatività galileiana, con la composizione additiva delle velocità (‘trasformazione classica’), ma della *relatività speciale*, secondo la quale vi sono nuove leggi di trasformazione, le trasformazioni di Lorentz.

In esse non solo lo spazio, ma anche il tempo è relativo al sistema inerziale dell’osservatore, in cui si misura il nostro  $\Delta t$ . Scrivono Einstein e Leopold Infeld nel loro libro *L’evoluzione della fisica*<sup>[1]</sup>:

[...] nella fisica classica [...] avevamo leggi di trasformazione per lo spazio, ma non per il tempo, che era lo stesso in tutti gli SC [*sistemi di coordinate*]. [...] nella teoria della relatività [...] il tempo non è più invariante. [...] nella trasformazione di Lorentz esso si comporta in certo qual modo come la coordinata spaziale nell’antica trasformazione.

Risulta infine risolto, grazie a queste considerazioni, il problema posto nel par. 1, ovvero che i fenomeni elettromagnetici descritti da Maxwell non risultano invarianti (come invece dovrebbero) nella trasformazione classica.

Infatti:

Si può provare che le equazioni di Maxwell, vale a dire le leggi del campo, sono invarianti rispetto alla trasformazione di Lorentz, così come le leggi della meccanica sono invarianti rispetto alla trasformazione classica.

#### BIBLIOGRAFIA:

- [1] A. Einstein e L. Infeld, *L'evoluzione della fisica*, Bollati Boringhieri, Torino 1965  
(*Dal capitolo* Tempo, distanza, relatività)
- [2] A. Einstein, *On the Generalized Theory of Gravitation*, Scientific American, VOL. 182, NO. 4, aprile 1950
- [3] J. W. Goethe, *Teoria dei colori*, trad. B. Maffi, in *Opere vol. V*, Sansoni, Firenze 1962
- [4] G. W. F. Hegel, *Filosofia della Natura* (Parte Seconda dell'*Enciclopedia delle scienze filosofiche in compendio*), redazione del 1830 integrata con Aggiunte, a cura di Valerio Verra, UTET, Torino 2002
- [5] D. Wandschneider, *Spazio, tempo e relatività nella prospettiva della 'Filosofia della Natura' di Hegel*, trad. G. Ursi, Bibliopolis 1984
- [6] D. Wandschneider, *Aspetti filosofici delle teorie della relatività speciale e della relatività generale di Einstein*, trad. G. Ursi, IISF 1989