

LA LUCE

UN PERCORSO DIDATTICO

di Lorenzo Mazzoni

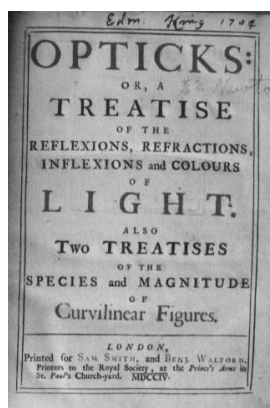
Nell'insegnamento della Fisica ci sono aspetti della realtà che vengono esaminati più volte con diverse modalità e con diversi approcci teorici. È importante, prima di tutto nel docente, e poi, attraverso l'attività didattica, nell'allievo, la consapevolezza di un percorso che illustri il modo di procedere della scienza. La natura e il comportamento della luce si prestano a questa ripresa a più livelli: l'autore propone un percorso didattico sul «fenomeno luce» che arriva fino alle acquisizioni della fisica del Novecento.

La consapevolezza da parte dell'insegnante della dimensione storica, e la sua applicazione didattica, è profondamente connessa con l'immagine di scienza fisica, e più in generale di scienza, che viene trasmessa agli allievi.

Un insegnamento che tenga presente la dimensione storica permette di sottolineare come una teoria nasca da un punto di vista particolare, abbia in sé fin dall'origine ipotesi limitative, e costituisca quindi una risposta non assoluta, ma provvisoria, e tuttavia in grado di descrivere efficacemente alcuni aspetti della realtà. Permette inoltre di segnalare i momenti di svolta non come messa in discussione del sapere scientifico, ma come scoperta di un nuovo punto di vista che consente di esplorare un orizzonte più ampio.

Il «fenomeno luce» è un esempio che si presta in modo particolare a illustrare l'importanza della dimensione storica, innanzitutto come punto di riferimento per l'insegnante, ma anche come possibilità di una esplicita traduzione didattica. Il percorso risponde alla necessità di impostare un insegnamento rispettoso delle dimensioni conoscitiva e sperimentale, riconosciute come peculiari del metodo di indagine, proprio della scienza fisica. Ma esso può risultare anche espressivo del carattere di storicità di ogni sapere scientifico. È possibile rendersi conto, attraverso lo studio del «fenomeno luce», che la scienza fisica non procede se non in un ininterrotto dialogo con il proprio passato, così che da un lato costruisce percorsi che affondano le loro radici in scelte già compiute e dall'altro si presenta come un ponte lanciato verso il futuro.

Il percorso didattico presentato è in qualche modo trasversale, rispetto alla linearità temporale dello svolgimento dei programmi. Esso potrà



venire svolto in più tappe: oltre che nello studio della tradizionale ottica fisica, il «fenomeno luce» ricompare a proposito delle onde elettromagnetiche, nel problema dell'etere che è alla radice della formulazione della relatività, nella nascita della fisica quantistica (effetto fotoelettrico e concetto di fotone), e infine, nella forma del fotone virtuale, nel nuovo concetto di forza nella teoria quantistica dei campi. Queste tappe verranno ora illustrate sinteticamente.

Che cos'è la luce?

Questa domanda può essere introdotta attraverso la storia della ricerca filosofica e scientifica: prendendo avvio dalle prime risposte tentate dagli atomisti (teoria dei simulacri), si possono toccare alcune tappe significative quali i contributi degli studiosi arabi in epoca medioevale, che raccolgono l'eredità della cultura greca, la tradizione degli artigiani del Quattrocento e del Cinquecento, costruttori delle «lenticchie» e dei primi apparati ottici. Questi oggetti pratici vanno poi acquisendo con Leonardo da Vinci e Giovanbattista Della Porta un contenuto eminentemente teorico, preparando l'ottica di Galileo e di Keplero.

Il passaggio alla scienza moderna: le «affezioni» galileiane

La domanda «cos'è la luce», non rientra «immediatamente» nella logica del procedimento scientifico. Il punto di partenza della scienza è lo studio delle sue «affezioni» galileiane, ponendo domande su aspetti particolari e misurabili.

La prima domanda: la luce è un fenomeno di propagazione?

La risposta può apparire scontata (anche gli atomisti ritenevano che fosse un fenomeno di propagazione di atomi), ma non lo è da un punto di vista scientifico: un'affermazione di buon senso comune diventa una affermazione scientifica se è possibile sottoporla a una verifica sperimentale; e in questo caso ci possono essere anche delle sorprese.

Per dire che la luce è un fenomeno di propagazione, occorre quindi una misura della sua velocità, o quantomeno l'osservazione di un ritardo fra l'emissione di un lampo di luce e la sua ricezione. I primi tentativi (Galileo e i suoi allievi) di una tale misura a distanze terrestri fallirono miseramente. Anche questo fallimento è importante, perché è un esempio di un fattore fondamentale del metodo scientifico: la precisione della misura presuppone l'invenzione di strumenti e procedure che non solo danno alla ricerca sperimentale un contributo tecnologico, ma che implicano anche un aspetto di lavoro teorico talora essenziale.

Non a caso la prima risposta viene da una misura indiretta che coinvolge molteplici conoscenze, e un'elaborazione teorica dei dati, cioè dal



Ole Christensen Roemer
(1644-1710)

metodo astronomico di misura della velocità della luce, ideato e realizzato dall'astronomo danese Roemer.

La seconda domanda: come si propaga la luce?

Le prime acquisizioni sul comportamento della luce (leggi della riflessione e della rifrazione) permettono un primo livello di modellizzazione, quello dell'ottica geometrica. Si tratta di un modello di tipo geometrico appunto, in cui non viene fatta alcuna ipotesi esplicita sulla natura della luce; in questo senso si tratta di una teoria in qualche modo autonoma, resa efficace dalla purezza del linguaggio geometrico.

Le ipotesi fondamentali sono quella della propagazione rettilinea della luce e quella del raggio di luce, cioè della possibilità di rappresentare un fascio di luce con una retta della geometria euclidea.

La seconda ipotesi è particolarmente critica perché si fonda su un procedimento limite: la possibilità cioè di ottenere un fascio di luce sottile quanto si vuole, pur di disporre di un apparato sperimentale sufficientemente raffinato, così da giustificare la rappresentazione di un fascio con una retta dell'ottica geometrica (il raggio).

Questa operazione di passaggio al limite rispetto alle effettive situazioni sperimentali non è nuova nella scienza. Già Galileo aveva enunciato il principio di inerzia, giustificandolo sperimentalmente con gli esperimenti sui piani inclinati, che non eliminavano completamente l'attrito, ma permettevano di costruire un procedimento che, raffinato indefinitamente, poteva produrre, almeno in via di principio, una situazione senza attrito.

Il problema che si pone non è quindi tanto sulla validità logica dell'ipotesi, quanto dei suoi limiti di applicabilità. È solo un problema di strumentazione che limita la possibilità di rendere sempre più sottile un fascio di luce? O ci sono limiti di validità intrinseci all'ipotesi stessa?

Questa domanda apre la possibilità di una riconsiderazione dell'impianto teorico dell'ottica geometrica, una volta che si sia introdotta la natura ondulatoria della luce.

Christiaan Huygens
(1629-1696)



I modelli sulla natura della luce

Le ipotesi dell'ottica geometrica non costituiscono ancora un modello fisico sulla natura della luce. La domanda: «cos'è la luce?» rimane implicita, ma sempre presente, in attesa di una risposta.

Conviene allora esporre i due modelli disponibili alla fine del Seicento: il modello corpuscolare di Newton e il modello ondulatorio di Huygens. Una prima ipotesi, dovuta a Newton, è che un raggio di luce sia un fascio di particelle piccolissime che si muovono in base alle leggi della meccanica newtoniana. Il modello corpuscolare di Newton rappresenta un tentativo di estensione della meccanica al mondo microscopico. Anche se il modello è stato poi abbandonato, non è inutile mostrarne il

valore predittivo nei fenomeni di riflessione e rifrazione. Inoltre tale modello ipotizza un aspetto della natura della luce che, visto dall'oggi, è rivalutato, sia pure all'interno di un contesto concettuale completamente diverso, quello della meccanica quantistica, con il concetto di fotone. Come è noto, il modello ondulatorio di Huygens, basato sui concetti di fronte d'onda e di onda elementare, permette, almeno a livello elementare, di descrivere il comportamento di un'onda. L'ipotesi ondulatoria della luce pone tuttavia alcuni problemi.

Il primo è quello del mezzo. Dobbiamo ricordare che il termine «onda» significa, fino alla fine dell'Ottocento, onda meccanica, cioè una perturbazione (energia) che si propaga in un mezzo materiale avendo come supporto le oscillazioni delle particelle del mezzo. Ora, dato che la luce proviene dal sole e dalle stelle, qual è il «mezzo» che riempie lo spazio interstellare? Per la meccanica classica nello spazio interstellare c'è una densità di materia così trascurabile da poter affermare che lo spazio è vuoto. Se la luce è un'onda, bisogna rivedere questo concetto e supporre l'esistenza di una nuova forma di materia, l'«etere», così tenue da non influenzare il moto dei pianeti, dato che in esso non v'è traccia di attrito. Questa ipotesi pone un grave interrogativo alla teoria ondulatoria, dato che è un'ipotesi *ad hoc*, senza alcuna evidenza sperimentale. Tale interrogativo permane ovviamente anche quando viene provato, fuor di ogni dubbio, che la luce è un'onda. Il problema della natura della luce costituisce un esempio, trattabile anche a livello didattico, del metodo che prevede per le teorie il banco di prova dei dati sperimentali.

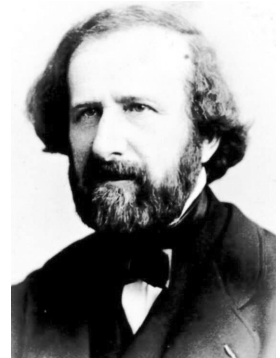
Si può rilevare che un dato decisivo poteva essere la misura della velocità della luce in un mezzo materiale: se fosse risultata superiore a quella nel vuoto, si sarebbe confermata la previsione del modello corpuscolare di Newton, altrimenti si sarebbe confermata la previsione del modello ondulatorio. In questo secondo caso si poteva inoltre controllare se è verificata la formula che in tale modello prevede che l'indice di rifrazione assoluto sia dato dal rapporto fra la velocità della luce nel vuoto e quella nel mezzo materiale.

Tale esperimento poté essere effettuato nel 1849 da Armand H. L. Fizeau, quando ormai si era già affermato il modello ondulatorio, e quindi ne costituì solo una conferma.

Si passa quindi alla esposizione di quegli esperimenti che mostrano direttamente la natura ondulatoria della luce, in particolare l'esperimento di interferenza di Young, che è possibile interpretare in modo semplificato applicando il principio di Huygens.

Si afferma così in modo indiscutibile la validità del modello ondulatorio, e la necessità di abbandonare l'ipotesi corpuscolare di Newton.

Da questa esperienza e altre consimili si possono trarre tutte le conseguenze che permettono una migliore conoscenza dei fenomeni luminosi: la misura della lunghezza d'onda, la risoluzione del problema dei colori, eccetera. Anche in questo caso, come per il più semplice model-



Armand Hippolyte Louis Fizeau (1819-1896)

Thomas Young (1773-1829)



lo dell'ottica geometrica, sarà opportuno far rilevare sia il valore conoscitivo del modello, che permette l'interpretazione di un gran numero di fenomeni collegati con la propagazione della luce, sia il suo limite, quello di non essere spiegazione esaustiva della realtà.

Questo secondo aspetto può essere esemplificato con le domande che emergono dall'accettazione del modello ondulatorio: quelle sulla natura delle vibrazioni luminose (sono veramente onde meccaniche?), sulla natura del mezzo in cui si propagano, sulla natura delle sorgenti di luce e del meccanismo di emissione. Domande di questo tipo preparano i successivi sviluppi dello studio del «fenomeno luce», che compaiono nella trattazione di tematiche che si affrontano nell'ultimo anno di liceo.

La luce come onda elettromagnetica

Il percorso storico che porta al superamento dell'interpretazione della luce come onda meccanica passa attraverso l'elettromagnetismo. Il concetto di campo, nuovo ente fisico che si afferma nell'Ottocento, permette di introdurre un nuovo tipo di onda, l'onda elettromagnetica.

Per quello che riguarda la domanda sulla natura della luce, la risposta è costituita dalla sua identificazione con un'onda elettromagnetica. Sarà così importante a conclusione della trattazione dell'elettromagnetismo, non tanto dilungarsi in improbabili calcoli espliciti dalle equazioni di Maxwell (1860) all'equazione delle onde, quanto cogliere l'importanza delle conclusioni anche per quello che riguarda la natura della luce, evidenziando il potere di sintesi delle leggi dell'elettromagnetismo.

Un'ulteriore domanda si traduce nel famoso problema dell'esistenza dell'«etere», e schiude le porte allo studio della propagazione della luce nell'ambito della relatività ristretta. L'identificazione della luce con un'onda richiede infatti l'esistenza di un mezzo di propagazione, l'etere, e nasce quindi tutta una serie di problemi sia sulla natura del mezzo stesso, sia sulle conseguenze che ne derivano sulla relatività galileiana: l'esistenza dell'etere comporta un sistema di riferimento assoluto, privilegiato rispetto agli altri sistemi inerziali. Con l'esperimento di Michelson del 1887, e con i postulati della relatività ristretta di Einstein, il concetto stesso di etere viene abbandonato. Non solo nasce una nuova concezione dello spazio e del tempo, ma anche una nuova affermazione sul comportamento della luce: la velocità della luce è la stessa in tutti i sistemi di riferimento inerziali ed è una velocità limite nell'universo.

Questa svolta, originata dal problema della propagazione della luce, è estremamente importante, almeno per due motivi.

Viene dato un colpo definitivo al meccanicismo: non esiste alcun mezzo materiale supporto della propagazione dell'onda elettromagnetica, ma è il campo stesso che costituisce il mezzo e l'ente che si propaga.

Scompare il concetto di spazio euclideo assoluto contenente gli oggetti,

Albert Abraham Michelson
(1852-1931)



con un tempo che scorre in modo indipendente dall'osservatore: la struttura dello spazio-tempo è qualcosa di più complesso, che è possibile descrivere solo in uno spazio quadridimensionale.

Il fotone

La terza domanda (sulla natura delle sorgenti e sul meccanismo di emissione) ci porta alla fisica atomica, alla individuazione della emissione della luce da parte di sorgenti costituite da elettroni in rapida oscillazione, al problema degli spettri di emissione, in ultima analisi alla fisica atomica e quantistica.

Occorrono due osservazioni preliminari: dal momento in cui la luce viene identificata con una particolare onda elettromagnetica, il problema della luce viene sostituito dal più generale problema della natura e del comportamento della radiazione elettromagnetica.

In secondo luogo il problema dell'interazione della radiazione con la materia sposta la tematica dell'elettromagnetismo dal contesto circuitale, macroscopico, al contesto atomico, microscopico: assistiamo ancora una volta a un tentativo, come sempre rischioso, di estensione di leggi fisiche acquisite a un ambito nuovo.

Il costante richiamo al limite di validità intrinseco in ogni modello aiuta a comprendere l'importante passaggio costituito dall'effetto fotoelettrico, con l'introduzione del concetto di fotone nel 1905.

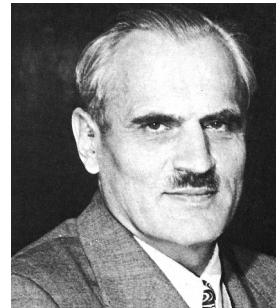
Nell'introdurre il concetto di fotone è opportuno far rilevare che l'aspetto corpuscolare della luce nasce in modo nuovo, non riconducibile alla meccanica newtoniana, e si situa quindi all'inizio di un nuovo orizzonte concettuale per concepire la materia a livello atomico e subatomico. L'aspetto corpuscolare della luce viene introdotto per interpretare i risultati dell'effetto fotoelettrico, in particolare l'esistenza della «frequenza di soglia» e la relazione lineare fra l'energia cinetica degli elettroni espulsi e la frequenza della radiazione incidente.

L'esperimento non prova in modo definitivo l'esistenza dei fotoni, ma solo l'assorbimento di energia in quantità discrete (così come l'interpretazione di Planck dello spettro del corpo nero ne provava l'emissione in quantità discrete). Solo l'effetto Compton può considerarsi una prova in tal senso, mostrando che i fotoni obbediscono alle leggi dell'urto elastico.

Con l'introduzione del fotone il problema della natura della luce si riapre in forma in qualche modo drammatica: l'aspetto ondulatorio e quello corpuscolare sono entrambi punti di vista irrinunciabili e intrinsecamente connessi alla natura della luce: le nuove particelle sono qualcosa di diverso dai corpi della meccanica classica, visto che anche nella definizione delle loro caratteristiche corpuscolari (energia: $E = hf$, quantità di moto: $q = h/\lambda$) compaiono grandezze proprie delle onde.

Quindi possiamo tranquillamente dire che la luce è composta di parti-

Arthur Holly Compton
(1892-1962)



celle, senza con ciò negare nulla dell'interpretazione ondulatoria, da Huygens a Maxwell: il comportamento ondulatorio è già interno alla nuova concezione di particella! Per esempio il principio di indeterminazione (nel caso in cui ne sia prevista l'esposizione) permette di reinterpretare l'esperimento classico della diffrazione come una semplice conseguenza del principio sul comportamento delle particelle.

Il fotone come particella di interazione

Ma l'«avventura» della luce non finisce qui. Da un punto di vista didattico sarà ben difficile trattare l'ultimo aspetto della luce, quello del fotone come particella di interazione; si potrà forse fare qualche accenno alla problematica. Un'onda, che è la perturbazione o variazione rapida di un campo, è un fenomeno di propagazione che trasporta energia. Nella visione del dualismo onda-corpuscolo questo significa anche la propagazione di una particella di campo: per esempio, una rapida variazione del campo elettromagnetico costituisce un'onda elettromagnetica, oppure, in modo equivalente, un fascio di fotoni. Oltre questi fotoni, che trasportano energia, o fotoni «reali», esistono, per il principio di indeterminazione, anche fotoni «virtuali»; infatti, per tale principio, occorre un tempo minimo Δt per misurare una energia ΔE ; in formule si ha: $\Delta E \Delta t > h/2\pi$. Per un tempo minore questa energia può esistere, per esempio come fotone che si propaga, violando il principio di conservazione dell'energia: si tratta di un fotone virtuale, che deve «sparire» entro il tempo Δt , e non è quindi osservabile.

Ci si può chiedere: se non è neppure osservabile, come si fa a dire che esiste? Ebbene, proprio l'ipotesi di fotoni virtuali dà origine a un nuovo concetto di forza; la forza elettromagnetica, per esempio, si spiega, nella teoria quantistica dei campi, con lo scambio di fotoni virtuali: le evidenze sperimentali confermano la teoria e quindi, sia pure indirettamente, l'esistenza dei fotoni virtuali.

Il comportamento della luce, sotto forma di fotone, apre quindi nuove prospettive: secondo le teorie più recenti tutte le forze sono dovute a particelle virtuali, a raggio di azione infinito come la forza elettromagnetica (il fotone ha massa a riposo nulla, quindi la sua energia può essere resa piccola quanto si vuole e la sua vita lunga quanto si vuole), o a raggio di azione limitato come la forza nucleare, che si avvale di particelle di massa a riposo non nulla. ❖

INDICAZIONI BIBLIOGRAFICHE

- E. Agazzi, *La dimensione storica nell'educazione scientifica*, in *Cultura e interdisciplinarietà*, La Scuola, Brescia 1995.
 F.T. Arecchi, I. Arecchi, *I simboli e la realtà*, Jaca Book, Milano 1990.
 F. Bevilacqua, M.G. Ianniello, *L'ottica dalle origini all'inizio del '700*, Loescher, Torino 1982.
 R.P. Feynman, *QED la strana teoria della luce e della materia*, Adelphi, Milano 2003.
 M.G.J. Minaert, *Light and color in the outdoors*, Springer-Verlag, New York 1993.
 V. Weisskopf, *Perché il cielo è azzurro*, in *La rivoluzione dei quanti*, Jaca Book, Milano 1989.
 M. E. Bergamaschini, L. Mazzoni, P. Marazzini, *L'indagine del mondo fisico*, Signorelli, Milano 2001.