

## CONTRIBUTI

### ALGAROTTI E LA DIVULGAZIONE DELL'OTTICA DI NEWTON

MAURO MURZI

Roma

#### **I** *Dialoghi sopra la luce*

Il libro *Dialoghi sopra la luce* di Algarotti è stato pubblicato nel 1737<sup>1</sup>. Per il mio articolo ho usato l'edizione del 1739, stampata a Napoli, intitolata *Il newtonianismo per le dame, ovvero dialoghi sopra la luce, i colori, e l'attrazione*, indicata come "Novella Edizione emendata ed accresciuta", dedicata alla "Sacra Imperial Maestà di tutte le Russie". Nelle *Opere* di Algarotti il libro è riprodotto con il titolo *Dialoghi sopra l'ottica newtoniana*, con dedica a Federico il Grande.

Il libro è scritto come se fosse la relazione di alcuni colloqui che Algarotti avrebbe avuto con una marchesa, di cui sappiamo solo l'iniziale del nome, E. Durante una villeggiatura di sei giorni presso la marchesa, Algarotti le descrive l'ottica di Newton. Gli argomenti trattati nei dialoghi sono:

- 1) la confutazione della teoria cartesiana della luce;
- 2) l'ottica di Newton;
- 3) l'evidenza sperimentale a favore dell'ottica di Newton;
- 4) l'applicazione all'ottica della teoria dell'attrazione universale.

I *Dialoghi* sono stati ispirati, come dichiara Algarotti nella prefazione, dal libro *Entretiens sur la pluralité des mondes (Conversazioni sulla pluralità dei mondi)* dello scrittore francese Bernard le Bovier de Fontenelle, pubblicato nel 1686. Nell'opera di Fontenelle s'immagina un dialogo tra l'autore e una nobildonna, avente per argomento la divulgazione della cosmologia eliocentrica. La differenza più evidente tra il libro di Fontanelle e quello di Algarotti, rilevata da Algarotti nella prefazione, è che Fontanelle evita ogni questione di fisica sperimentale, mentre Algarotti descrive dettagliatamente alcuni esperimenti che convalidano l'ottica di Newton. "Molte sono – osserva Algarotti – e difficili le minuzie, e le particolarità di Scienza, a cui io sono stato obbligato di discendere; ed i miei argomenti sono ... esperienze ... che

---

<sup>1</sup> L'obiettivo dell'articolo è mostrare, attraverso alcuni esempi tratti dai **Dialoghi sopra la luce** di Francesco Algarotti, come la lettura di un'opera letteraria divulgativa possa consentire l'approfondimento – anche in ambito didattico – d'importanti temi di filosofia della scienza.

vogliono essere esposte con tutta la precisione immaginabile"<sup>2</sup>. Algarotti descrive esperimenti che convalidano l'ottica newtoniana e confutano le teorie rivali. Gli esperimenti sono narrati in prosa, invece di essere illustrati con figure e diagrammi, perché Algarotti ha deciso che "le linee e le figure sono affatto sbandite, come quelle, che darebbono a questi Discorsi un'aria troppo dotta, e che mettrebbon paura"<sup>3</sup>. È interessante confrontare la descrizione di Algarotti di un qualche esperimento con la corrispondente descrizione nell'**Ottica** di Newton. Quell'esperimento che Newton spiega in poche righe con l'aiuto di una figura, Algarotti descrive in alcune pagine di prosa, riuscendo comunque a farsi comprendere. Ciò mostra non solo la qualità della prosa di Algarotti ma anche la superiorità di una figura ben disegnata rispetto a pagine di testo prive d'immagini.

### L'argomento dei *Dialoghi*

Algarotti finge di scrivere "la Storia d'una Villeggiatura" (p. 1) trascorsa un'estate presso la Marchesa di E. Una storia "tutta Filosofica, e composta di alcuni Discorsi ... sopra la Luce e i Colori" (p. 2). Il palazzo della marchesa è "sulla cima ... d'un vago colle" (p. 2), lungo il corso del Mincio, il fiume che defluisce dal lago di Garda, bagna Mantova e s'immette nel Po. Dal palazzo si vede la "Penisoletta di Sirmione, Patria del vezzoso Catullo" (p. 2). Il palazzo, quindi, è in prossimità del lago di Garda. Algarotti descrive il luogo con espressioni poetiche: "L'odor degli aranci che le rive d'intorno, e l'aere gentilmente profuma, la frescura de' Boschetti, il mormorio delle fontane, il veleggiar su pel cristallino Lago delle pronte barchette" (p. 2). Il lettore potrebbe chiedersi come mai Algarotti, in vacanza in un "ameno luogo" (p. 3), intrattenga la marchesa con discorsi di fisica teorica e sperimentale, materie poco consone al luogo e alla stagione estiva. La conversazione con la marchesa aveva come primo argomento la poesia. Algarotti era intento a elogiare la poesia inglese. Cita i versi di Pope

*Mentre con tarde e allungate note  
Il profondo, solenne, e maestoso  
Organo soffia (5)<sup>4</sup>*

---

<sup>2</sup> F. Algarotti, *Lettera al signor Bernardo di Fontenelle, che tiene luogo di Prefazione*, in **Dialoghi**, cit., senza numero di pagina, nella terza pagina della prefazione. Le citazioni, salvo diversa indicazione, sono tratte da **Il newtonianismo per le dame, ovvero dialoghi sopra la luce, i colori, e l'attrazione**, Napoli: 1739; nel testo indico tra parentesi i numeri di pagina.

<sup>3</sup> *Ibid.*

<sup>4</sup> Alexander Pope, dall'*Ode in onore di Santa Cecilia*, traduzione di Algarotti.

che dipingono così appropriatamente il suono dell'organo che pare sentirlo suonare. Confronta poi queste strofe con versi nei quali si descrive, in modo scialbo e abusato, una mano *bianca*, una fronte *serena* e occhi *soavi*. La marchesa, per rimarcare la scarsa qualità di alcune descrizioni poetiche, cita le strofe

*O dell'aurata  
Luce settemplice  
I varioardenti, e misti almi colori*

nelle quali si descrive la luce come *settemplice*: "non sarebb'egli – ella chiede retoricamente – un geroglifico della Cina?" (p. 6)<sup>5</sup>. Algarotti risponde che il verso è corretto, perché la luce è composta di sette colori. La marchesa s'incuriosisce e non resta paga di quest'affermazione. Vuole conoscere la natura della luce e sapere come sia possibile che la luce bianca sia composta di sette colori<sup>6</sup>. Nell'impossibilità di offrire alla marchesa una risposta breve, Algarotti decide di spiegarle la teoria newtoniana dell'ottica.

### Sul metodo

Prima di esporre l'ottica, Algarotti premette alcune considerazioni sul metodo scientifico e sull'origine della fisica. Pur non essendo particolarmente originali, esse sono di un qualche interesse, sia per inquadrare la concezione filosofica di Algarotti (orientata in senso empirista e anti-cartesiano) sia per un confronto con il punto di vista di Benedetto Croce, filosofo molto più noto di Algarotti.

La prima considerazione di Algarotti è un riassunto dei principi metodologici della scienza newtoniana. Per evitare di costruire un sistema filosofico<sup>7</sup> che sarà presto smentito dai fatti, è necessario "avere esattamente osservato tutto ciò, che in quella tal cosa è osservabile" (p. 17). Si può

---

<sup>5</sup> Il testo è tratto dall'ode *In lode della signora Laura Bassi*, dello stesso Algarotti (cfr. **Opere scelte, Volume secondo**, Milano: 1823, pp. 541-542).

<sup>6</sup> L'ipotesi che la luce bianca sia composta di sette colori non è intuitiva; anzi, a prima vista, sembrerebbe assurda. Hegel sostenne che tale ipotesi ha la medesima legittimità dell'asserzione che l'acqua pura consiste di sette diversi tipi di terra (**Enciclopedia delle scienze filosofiche in compendio, Volume secondo, Filosofia della natura**, 1830, §320), ammonendo contro gli errori e la disonestà degli esperimenti di Newton.

<sup>7</sup> Si osservi che, secondo la bimillenaria consuetudine abbandonata nel ventesimo secolo, il termine 'filosofico' non si riferisce soltanto alla filosofia propriamente intesa ma anche a quel tipo di conoscenza che oggi chiamiamo 'scientifica'.

commentare quest'affermazione, rivolti agli studenti del liceo, osservando che essa, presa alla lettera, è falsa. È interessante, nella prospettiva didattica adottata nel mio contributo, capire perché essa è falsa. Non si può osservare *tutto ciò che è osservabile*, se non si dispone di una teoria che indichi *cosa sia possibile osservare* (in tal mondo definendo il campo dell'osservabile, altrimenti mai si saprebbe se è stato osservato tutto ciò che è osservabile) e *cosa sia rilevante osservare* (altrimenti lo scienziato dovrebbe osservare ogni fenomeno, perdendosi in un mare di osservazioni non correlate tra loro). L'affermazione di Algarotti è smentita dalla sua stessa descrizione dell'ottica di Newton. Dopo aver spiegato alcuni aspetti teorici (ossia, non osservabili) dell'ottica newtoniana, Algarotti descrive gli esperimenti che la supportano e, nel medesimo tempo, confutano le teorie alternative. Algarotti non descrive tutto ciò che è osservabile nell'ottica, ma descrive alcune osservazioni cruciali per determinare quale teoria, tra quelle proposte, sia corretta. Non si deve dunque osservare tutto ciò che è osservabile, ma soltanto ciò che è pertinente nella valutazione di una teoria. L'osservazione è guidata dalla teoria. Quale fenomeno osservare, poiché pertinente al problema dato e ricadente nell'ambito di ciò che è effettivamente osservabile, è stabilito dalla teoria.

La seconda considerazione riguarda l'origine della fisica. Dice Algarotti: "io credo, che l'*Ottica*, che è quella parte di Fisica, che appartiene alla luce e ai colori, e generalmente tutta la fisica sia nata tra gli uomini insieme coll'ozio, posteriore in vero a qualche sorta di Morale e di Geometria, necessarie di buon'ora agli uomini per li più stringenti bisogni loro" (p. 10). La fisica non nasce come risposta a problemi pratici ma come contemplazione della natura, in un momento di libertà dagli affanni quotidiani. Non sfuggirà, ai lettori di questa rivista, che il significato che Algarotti attribuisce a 'ozio' è diverso da quello odierno. Ozio è "il tempo libero dai *negotia* (le occupazioni della vita politica e gli affari pubblici), dedicato alle cure domestiche e della proprietà, oppure agli studi"<sup>8</sup>. È istruttivo paragonare quest'affermazione di Algarotti con la concezione di Benedetto Croce, filosofo ben più noto e ammirato. Secondo Croce, la fisica fornisce soltanto risposte a domande pratiche. Le leggi della fisica sono come le ricette di un libro di cucina, utili per raggiungere in modo economico un risultato pratico, ma prive di contenuto conoscitivo. A supporto di questa tesi, Croce sostiene, nella *Logica come scienza del concetto puro*, che i concetti fisici sono concreti ma non universali. Come esempio di concetto fisico, offre ai lettori il concetto di casa, ignorando totalmente la meccanica, la termodinamica, l'elettromagnetismo, la relatività e la fisica atomica. Se si pensa che Algarotti nel diciottesimo secolo divulgava la fisica descrivendo i fenomeni ottici, si capisce come sia

---

<sup>8</sup> Voce *Ozio* nella versione online dell'Enciclopedia Treccani, <http://www.treccani.it/enciclopedia>.

imperdonabile che Croce, nel ventesimo secolo, asserisca che 'casa' è un tipico concetto fisico<sup>9</sup>.

Algarotti sostiene una concezione dell'esperienza simile a quella professata da Galileo e Locke. Egli accetta la distinzione tra qualità primarie e qualità secondarie. Le qualità secondarie dei corpi sono quelle qualità che dipendono non dall'oggetto in sé ma dai sensi dell'uomo e dalle circostanze esterne. I colori sono qualità secondarie. Un oggetto appare di un certo colore, diciamo rosso, non per la propria intrinseca natura, ma per i nostri sensi, che generano in noi la sensazione del rosso, e per circostanze esterne, quali ad esempio la luce che lo illumina (se mancasse la componente rossa nella luce ambientale, l'oggetto apparirebbe nero). Il colore di un oggetto dipende da tre elementi:

- 1) la proprietà intrinseca dell'oggetto di riflettere un determinato colore;
- 2) il senso della vista di colui che percepisce l'oggetto, che produce determinate sensazioni;
- 3) la luce ambientale.

Un oggetto che appare di un colore a un essere vivente apparirà di un colore diverso a un essere di una specie diversa. Due esseri umani, pur percependo il medesimo oggetto nelle medesime condizioni, potrebbero percepire colori diversi. Il medesimo oggetto visto dal medesimo soggetto in condizioni diverse (per esempio, nella luce del giorno e nella penombra notturna) appare di colori diversi.

Algarotti torna sul metodo della ricerca scientifica all'inizio del quarto dialogo, dal titolo *Elogio della Fisica Sperimentale, ed Esposizione del Sistema dell'Ottica Newtoniano*. Cito ampiamente la parte più interessante dell'argomentazione di Algarotti, non solo per il suo interesse filosofico e didattico ma anche per la sua qualità letteraria:

Io mi figuro questi Filosofi<sup>10</sup>, come quegli Eruditi, che ristabiliscono qualche passo corrotto, e tronco di un Autore antico. Chi ne dà una lezione, chi un'altra, accompagnate tutte dai più belli ragionamenti del Mondo, e dalle lodi de' Giornalisti, e de' Letterati. Un antico manuscritto di quell'Autore, viene alla fine dalla polvere e dalle tenebre tratto di una Biblioteca, e le belle lezioni degli eruditi, e il tempo che in ritrovarle vi spesero, se ne vanno nella Luna dell'Ariosto

---

<sup>9</sup> Esercizio per gli studenti liceali: fare un elenco di concetti fisici e discutere se siano concreti ma non universali, come sosteneva Croce. Suggerimento: energia cinetica, energia potenziale, lavoro, campo gravitazionale, entropia, energia interna, calore, temperatura assoluta, campo elettro-magnetico. Sembrarebbero concetti non concreti ma universali.

<sup>10</sup> È opportuno ribadire che i 'Filosofi', secondo il significato che si attribuiva a tale parola, non sono solo gli studiosi di filosofia ma anche gli scienziati. In questo passo Algarotti si riferisce proprio agli scienziati.

a raggiungere le altre cose perdute. I manoscritti originali, ed autentici della Natura sono le osservazioni e le sperienze, le quali col rovesciar che hanno<sup>11</sup> fatto tanti bei sistemi, c'istruiscono tutto giorno a dovervi pensare il meno, che sia possibile; il che io metto in conto di un gran benefico, che fanno al genere umano alleggerendolo di non picciola fatica. Ma gli uomini per isventura loro si ostinano a non riconoscerlo, e a voler perdere il tempo inutilmente. (p. 143)

La raffigurazione della natura come un libro da leggere non è originale: la mente corre immediatamente all'analogo punto di vista di Galileo<sup>12</sup>. Tuttavia, anche in mancanza di una profonda originalità, vi sono due aspetti sui quali è opportuno soffermarsi. Il primo è il bel paragone tra la ricerca scientifica e l'attività degli studiosi che cercano di ricostruire un passo corrotto o perduto di un'opera letteraria. Algarotti sottolinea l'impossibilità d'individuare un'unica interpretazione. Ciò è facilmente comprensibile. Qua e là qualche frammento di parola (se si è fortunati, anche qualche parola intera) è ancora leggibile. Ci sono molti modi diversi per riempire le lacune, in maniera coerente con i frammenti sopravvissuti e con il significato complessivo dell'opera. Ogni studioso è in grado di difendere, argomentando razionalmente, la propria particolare ricostruzione del testo mancante. Il testo sopravvissuto è insufficiente per individuare un'unica interpretazione: ricostruzioni tra loro incompatibili sono compatibili con il testo residuo. Questo bell'esempio di Algarotti può offrire, nell'ambito didattico che questo mio saggio si propone, un ottimo spunto per spiegare il problema della sottodeterminazione delle teorie da parte dell'esperienza. I dati osservativi disponibili non individuano un'unica teoria compatibile con i dati stessi. Al contrario, da un punto di vista logico, esistono infinite teorie compatibili con i dati osservativi; da un punto di vista storico, teorie tra loro incompatibili sono state elaborate per spiegare gli stessi dati osservativi.

È possibile illustrare il problema della sottodeterminazione anche tramite un esempio geometrico. Si consideri un grafico cartesiano sul quale sono indicati due punti distinti  $y_1$  e  $y_2$ . Si supponga che questi punti rappresentino l'esito della misurazione di una grandezza fisica, diciamo  $y$ , al variare del parametro

---

<sup>11</sup> Ho modernizzato la grafia delle voci del verbo avere, inserendo la lettera *h* in luogo dell'accento; nell'originale "ânno".

<sup>12</sup> "La filosofia è scritta in questo grandissimo libro che continuamente ci sta aperto innanzi a gli occhi (io dico l'universo), ma non si può intendere se prima non s'impara a intender la lingua, e conoscer i caratteri, ne' quali è scritto. Egli è scritto in lingua matematica, e i caratteri son triangoli, cerchi, ed altre figure geometriche, senza i quali mezzi è impossibile a intenderne umanamente parola; senza questi è un aggirarsi vanamente per un oscuro laberinto". (**Il Saggiatore**, cap. VI).

indipendente  $x$ . Si supponga che  $y$  sia una funzione incognita di  $x$ :  $y = f(x)$ . Il compito del ricercatore sia quello di determinare la funzione  $f$ . Avendo a disposizione due punti, l'ipotesi più semplice è supporre che la funzione  $f$  sia rappresentata da una retta. Sfruttando la nota proprietà che asserisce che per due punti distinti passa una e una sola linea retta, il ricercatore può determinare l'equazione della retta:  $y = ax + b$ , per opportuni valori di  $a$  e  $b$ . Tuttavia, la funzione  $f$  è sottodeterminata dai due punti  $y_1$  e  $y_2$ . Esistono infatti infinite funzioni  $g$ , che rappresentano curve diverse dalla linea retta (ad esempio, la parabola) passanti per  $y_1$  e  $y_2$ . Esistono dunque infinite curve  $y = g(x)$  che soddisfano le restrizioni imposte dalle misurazioni. La situazione non cambia, da un punto di vista logico, se si aumentano i punti. Se, ad esempio, sono stati misurati  $n$  valori di  $y$  al variare di  $x$ , esistono infiniti polinomi  $f$  di grado  $m > n$  che passano per gli  $n$  punti misurati. Quindi, la misurazione dei valori di  $y$  in corrispondenza dei valori di  $x$  non determina univocamente la funzione  $f$  che esprime la dipendenza di  $y$  da  $x$ .

Quest'esempio geometrico è semplice e si presta a una facile visualizzazione grafica. L'esempio di Algarotti, tuttavia, ha un maggiore valore euristico e didattico, non richiedendo la minima conoscenza della geometria e delle proprietà dei polinomi. È intuitivo comprendere che la ricostruzione di un testo parzialmente corrotto non può essere univoca: molte ricostruzioni sono compatibili con i frammenti sopravvissuti.

Che cosa accadrebbe se si scoprisse una copia integra del testo? Accadrebbe – dice Algarotti – che "le belle lezioni degli eruditi, e il tempo che in ritrovarle vi spesero, se ne vanno nella Luna dell'Ariosto a raggiungere le altre cose perdute" (p. 143). Le ipotesi fatte dagli studiosi, sulla base del testo sopravvissuto, possono essere facilmente controllate, una volta che sia stata ritrovata una copia integra. Quella sola copia è in grado di fare chiarezza sul testo originale. Per quanto una ricostruzione sia elegante, convincente e sostenuta con argomenti apparentemente ineccepibili, deve cedere dinanzi all'incontrastabile realtà del testo ritrovato. Il significato metodologico che Algarotti vuole indicare è questo: teorie compatibili con le osservazioni oggi disponibili possono diventare incompatibili con nuove osservazioni; in tale caso, devono essere abbandonate senza rimpianto, indipendentemente dalla loro eleganza, forza argomentativa e persuasiva.

Il secondo aspetto interessante riguarda un evidente contrasto tra Galileo e Algarotti. Per Galileo, la natura è un libro scritto in simboli matematici. Per Algarotti, "i manoscritti originali, ed autentici della Natura sono le osservazioni e le sperienze" (p. 143). Per Galileo, la matematica è indispensabile per comprendere la natura. Per Algarotti, le osservazioni sperimentali<sup>13</sup> sono indispensabili. La differenza non è di poco conto.

---

<sup>13</sup>Quest'affermazione di Algarotti può essere, nell'ottica didattica che mi propongo, l'occasione per presentare agli studenti la differenza tra

Riguarda l'importanza relativa della matematica e dell'esperienza. Da un lato vi è la tesi – cosiddetto platonismo – che la matematica sia l'elemento essenziale per comprendere la realtà. Conosciamo soltanto ciò che possiamo esprimere in termini matematici. Il platonismo pone vari interrogativi:

1) com'è possibile che la matematica, costruita *a priori*, si applichi alla realtà empirica, sia anzi l'elemento necessario per conoscere la natura? È questo il problema di Kant: come sono possibili giudizi sintetici a priori (ossia, come si può applicare la matematica alla natura)?

2) le discipline che non riescono a matematizzarsi (ad esempio, le scienze umane e la psicologia) sono scienze legittime?

3) se la matematica è essenziale per comprendere la natura, perché spesso si manifesta una scarsa rispondenza tra la realtà e la sua descrizione matematica?<sup>14</sup>

---

osservazione ed esperienza. *Osservo* in modo passivo ciò che la natura mi offre: il volo degli uccelli, la caduta dei corpi, il moto di una freccia che si alza nell'aria e poi ricade. *Sperimento* in modo attivo ciò che la natura non offre, ma io costruisco artificialmente: il moto di una pallina solida lungo un piano inclinato, ben levigato, dove ho segnato le diverse distanze, misurando il tempo con un orologio.

<sup>14</sup>La scarsa rispondenza tra la realtà fisica e la sua descrizione matematica è stata sottolineata da Mario Ageno, il più importante biofisico italiano del ventesimo secolo, con il quale ebbi la fortuna di studiare fisica. Benché i risultati delle misurazioni fisiche siano sempre numeri razionali – osserva Ageno –, lo scienziato assume che le grandezze fisiche siano continue nel campo dei numeri reali. In particolare, per consentire l'applicazione del calcolo infinitesimale, lo scienziato suppone che le funzioni matematiche rappresentative di grandezze fisiche siano continue e derivabili: tale supposizione non ha tuttavia alcun senso dal punto di vista operativo. Per esempio, la velocità istantanea è di solito definita come il limite della velocità media quando l'intervallo di tempo nel quale si misura la velocità media tende a zero. Si tenta così di giustificare l'introduzione della velocità istantanea come il risultato del passaggio al limite di un'operazione fisicamente possibile. Questa presunta giustificazione è errata: "se ci si riferisce a intervallini di tempo via via sempre più brevi, i valori che si ottengono per il rapporto incrementale non tendono affatto a un limite ben definito, ma al contrario variano erraticamente tra limiti sempre più ampi" (M. Ageno, **Le origini della irreversibilità**, Torino: Bollati Boringhieri, 1992, p. 15). La velocità istantanea è un'astrazione che non corrisponde ad alcuna operazione fisicamente possibile; anzi, è fisicamente priva di senso. A proposito della continuità delle funzioni matematiche che rappresentano grandezze fisiche, Ageno scrive: "l'ipotesi della continuità non ha alcun senso, dal punto di vista fisico-operativo [...] L'ipotesi della continuità appartiene alla metafisica

Dall'altro lato vi è la tesi – sostenuta da Algarotti – che l'esperienza sia l'elemento indispensabile per la conoscenza. Conosciamo soltanto ciò su cui possiamo sperimentare (ossia, su cui possiamo agire in condizioni controllate preparate in anticipo). Questa visione pone anch'essa alcuni pressanti interrogativi:

1) le discipline che non possono sperimentare, ma sono obbligate a osservare passivamente (attendendo che gli eventi accadano, senza possibilità di produrli) sono scientifiche? L'astronomia, la prima disciplina a raggiungere un adeguato livello di scientificità, non è forse puramente osservativa?

2) quale rapporto può esistere tra un sistema fisico reale e un modello sperimentale costruito artificialmente? Perché i risultati validi per il modello sperimentale dovrebbero valere anche per il sistema reale?<sup>15</sup>

---

scientifico, e serve solo a rendere possibile l'uso di teorie matematiche semplici e potenti. È un'ipotesi di schematizzazione, generalmente (ma non sempre) innocua" (*ibid*). Un secondo esempio della discrepanza tra la realtà e la sua descrizione matematica è offerto – sostiene Ageno – dal fatto che le formule matematiche sono risolvibili rispetto a una grandezza qualsiasi, mentre dal punto di vista operativo le grandezze indipendenti e quelle dipendenti sono sempre ben distinte. Ageno discute l'esempio della formula che collega il periodo di oscillazione  $T$  di un pendolo alla sua lunghezza  $l$ :  $T = 2\pi\sqrt{l/g}$ , ove  $g$  è l'accelerazione di gravità. È matematicamente possibile risolvere tale formula rispetto a una qualsiasi variabile, per esempio rispetto alla lunghezza  $l$ , facendo quindi dipendere matematicamente la lunghezza  $l$  dal periodo  $T$ . Da un punto di vista fisico, ciò non ha senso. Il periodo  $T$  dipende dalla lunghezza  $l$  (se lo scienziato modifica la lunghezza  $l$ , per esempio accorciando il filo, il periodo  $T$  cambia) mentre la lunghezza  $l$  è fisicamente indipendente dal periodo  $T$  (se lo scienziato modifica il periodo  $T$ , per esempio spostando il pendolo a una diversa altezza dal suolo, la lunghezza  $l$  del pendolo non cambia). Un terzo esempio della discrepanza tra la matematica e la realtà fisica è rintracciabile nella sostituzione della frequenza di un evento con la sua probabilità. In questo caso, lo scienziato sostituisce implicitamente un singolo sistema fisico con una famiglia astratta, potenzialmente infinita, di sistemi fisici analoghi. Questa sostituzione rischia causare una grande confusione, ad esempio attribuendo una probabilità a eventi singoli.

<sup>15</sup> Ageno ha studiato il modo in cui lo scienziato usa i modelli per descrivere la realtà. Nelle teorie scientifiche – scrive Ageno – s'incontrano tre diversi tipi di sistemi: "i sistemi concreti 'reali' (nel senso della realtà dell'uomo della strada), che attraggono l'attenzione dello scienziato, i sistemi idealizzati che lo scienziato pone a base delle proprie teorie e i sistemi schematizzati ch'egli usa effettivamente per poter procedere facilmente nei successivi sviluppi deduttivi" (Ageno, **Le origini della irreversibilità**, cit., p. 9.) Lo scienziato

## La teoria cartesiana

Nel secondo dialogo Algarotti presenta i due principali "accidenti" (p. 67) cui è soggetta la luce: la riflessione e la rifrazione. "La *Riflessione* succede quando i globetti della luce urtando nelle parti solidi de' corpi ... rimbalzano indietro, come una palla fa, quando urta la terra ... La *Rifrazione* succede, quando i globetti della luce passando per esempio dall'aria nell'acqua, o nel

---

studia un determinato sistema reale: per esempio, un gas racchiuso in un contenitore il cui volume può variare tramite un pistone. Nella teoria scientifica, il sistema reale è sostituito con un sistema ideale, costituito da piccole sfere solide che si urtano tra loro e con le pareti del contenitore nel modo previsto dalla meccanica classica. Spesso, il sistema ideale non è trattabile con metodi matematici: gli elementi del modello potrebbero essere troppi; i calcoli potrebbero essere troppo complessi; il sistema di equazioni potrebbe non ammettere soluzioni note. In tal caso, lo scienziato sostituisce il sistema ideale con un sistema schematizzato, introducendo nuove ipotesi che riducono la complessità matematica, con l'obiettivo di definire un sistema che soddisfi gli assiomi di un'opportuna teoria matematica. Il sistema schematizzato è un modello logico di una teoria matematica, della quale si possono usare sia i procedimenti deduttivi sia i teoremi. Tra il sistema ideale originariamente proposto dallo scienziato e il sistema schematizzato che rende possibile lo studio matematico esistono differenze essenziali. Il sistema ideale non è isomorfo a quello schematizzato, altrimenti sarebbero entrambi un modello logico della medesima teoria matematica e non sarebbe necessario né utile sostituire il sistema ideale con quello schematizzato. Il sistema ideale e quello schematizzato hanno una differente struttura logica: qualche aspetto essenziale è diverso nei due sistemi. Compito dello scienziato, spesso trascurato – osserva Ageno –, è quello di verificare che la sostituzione del sistema ideale con quello schematizzato non introduca alterazioni significative nell'ambito del problema che si vuole risolvere. Lo scienziato sostituisce il sistema ideale con quello schematizzato. Quest'ultimo è scelto tra i modelli logici di un'opportuna teoria matematica. La struttura logica del sistema schematizzato è necessariamente diversa da quella del sistema ideale (se non fosse così, non avrebbe senso eseguire la sostituzione). Quindi, i teoremi dimostrati nel sistema schematizzato potrebbero non essere validi nel sistema ideale. È perciò necessario verificare sempre la legittimità della sostituzione del sistema ideale con quello schematizzato, nei limiti del problema specifico studiato dallo scienziato. Nella pratica scientifica, questa verifica è spesso trascurata ed è lasciata all'intuizione, causando frequentemente una "scarsa rispondenza tra la concreta realtà dei fatti empirici e le rappresentazioni matematiche, faticosamente e un po' goffamente schematizzate, che riusciamo a darne" (*ivi*, p. 66).

vetro, ... vi passano attraverso, così però che il raggio ... devia dalla sua strada" (p. 67). Algarotti ricorda brevemente le leggi della riflessione e della rifrazione, "ch'eran note benché molto imperfettamente agli Antichi" (p. 70): l'angolo di riflessione è uguale all'angolo d'incidenza; il raggio rifratto si avvicina alla normale (rispetto alla superficie del mezzo) maggiormente dell'angolo d'incidenza.

Il terzo dialogo presenta la confutazione dell'ottica cartesiana; in particolare, Algarotti cerca di provare l'impossibilità di determinare la natura ontologica della luce. Questo è un punto molto interessante in una prospettiva didattica. Algarotti considera due diverse versioni dell'ottica cartesiana:

a) quella originale di Cartesio, secondo il quale la luce è composta di particelle solide indeformabili, il cui urto contro la retina produce la sensazione dei colori;

b) quella modificata da Malebranche, per il quale la luce è composta di elementi oscillanti, in maniera simile al suono, le cui differenti velocità di vibrazione producono le diverse sensazioni dei colori.

Algarotti cerca di dimostrare che entrambe le ipotesi sono false, avvalendosi di esperienze facilmente realizzabili. Egli conclude che non è possibile determinare la natura della luce. Sarebbe possibile – secondo Algarotti – stabilire le leggi fenomeniche della luce, quali quelle della riflessione e della rifrazione, ma sarebbe impossibile stabilire la natura ontologica della luce. Una corretta teoria della luce è quindi capace di determinare le leggi fenomeniche, ma non è in grado di determinare la natura ontologica della luce. Una teoria può dunque essere vera sul piano dei fenomeni e, al tempo stesso, essere priva di portata ontologica. La teoria newtoniana è – secondo Algarotti – una teoria di questo tipo. È una teoria fenomenica senza impegno ontologico. Vediamo in modo più preciso come si articola il discorso di Algarotti.

L'ipotesi cartesiana è che la luce sia composta di particelle solide indeformabili, che Algarotti chiama "globetti". Un raggio di luce è una fila di queste particelle, l'una dopo l'altra, senza alcun vuoto tra loro. Le particelle hanno un moto di rotazione intorno al proprio asse. Raggi di colore diverso sono formati da globetti che hanno una diversa rotazione. Quando un globetto colpisce la retina, produce una sensazione di colore. Il colore percepito dipende dalla rotazione del globetto. Ciascun raggio di luce è caratterizzato da globetti aventi una determinata rotazione. I raggi di colore rosso, ad esempio, differiscono dai raggi di colore blu perché la rotazione delle particelle di cui sono costituiti è diversa dalla rotazione delle particelle dei raggi blu. Questa teoria permette, in prima approssimazione, di spiegare le leggi della riflessione e della rifrazione. I globetti rimbalzano su una superficie riflettente come una palla contro la sponda di un tavolo da biliardo: come l'angolo formato dalla traiettoria della palla incidente con la normale alla sponda è uguale all'angolo formato dalla traiettoria della palla dopo il rimbalzo con la

normale alla sponda, così l'angolo d'incidenza della luce è uguale a quello di riflessione. Nella teoria cartesiana, la riflessione della luce è spiegata ricorrendo alle leggi della meccanica classica. Più complesso è spiegare la rifrazione. La teoria cartesiana suppone l'esistenza di rarefazioni della materia dei corpi. Passando attraverso tali rarefazioni, le particelle incontrano resistenze diverse, che causano la variazione della direzione del moto. Per questo, l'angolo di rifrazione non è uguale a quello d'incidenza. L'aspetto più interessante della teoria cartesiana, almeno ai fini didattici del presente articolo, è che la teoria si basa su un modello fisico, avente portata ontologica, che spiega le leggi fenomeniche. La teoria di Cartesio asserisce che la luce è composta di particelle fisiche dotate di determinate proprietà fisiche (solidità, indeformabilità e rotazione). La teoria asserisce che il modello non è un espediente per semplificare o rendere possibile la descrizione della luce, ma è la descrizione corretta della reale costituzione della luce (in termini aristotelici, il modello descrive correttamente l'essenza della luce). Il primo passo della teoria, dunque, è di proporre un'ipotesi ontologica sulla luce. Il secondo passo della teoria consiste nel ridurre le proprietà delle particelle di luce a quelle delle particelle materiali studiate dalla meccanica. Le leggi della meccanica relative al moto e agli urti sono quindi applicabili alle particelle di luce. Il terzo e ultimo passo consiste nel dedurre il comportamento delle particelle di luce applicando le leggi della meccanica classica, spiegando in tal modo le leggi fenomeniche della riflessione e della rifrazione. Teorie di questo tipo sono logicamente composte di tre elementi:

- 1) un modello fisico del sistema studiato che, secondo la teoria, è una descrizione corretta dell'essenza del sistema studiato;
- 2) la riduzione delle proprietà fisiche degli elementi del modello alle proprietà fisiche di oggetti studiati da una teoria scientifica nota;
- 3) la derivazione, tramite le leggi della teoria nota, delle proprietà del modello, spiegando così il comportamento fenomenico del sistema studiato.

Storicamente, questo tipo di metodologia è stato applicato a modelli microscopici dei sistemi macroscopici, riducendo le proprietà del modello microscopico a quelle delle particelle materiali macroscopiche della meccanica classica. Per questo motivo storico, si riteneva (almeno fino agli inizi del ventesimo secolo) che un buon modello dovesse essere un modello meccanico. In realtà, non esiste alcun motivo logico per il quale sia necessario limitarsi a modelli meccanici. Con la nascita della fisica non classica (relatività e meccanica dei quanti), che ha evidenziato i limiti della meccanica classica, è stata lentamente abbandonata l'idea di dover necessariamente costruire modelli meccanici.

A fini didattici, nell'ottica che si propone questo saggio, è interessante osservare le affinità esistenti tra la teoria di Cartesio e il modello dell'atomo dei primi decenni del ventesimo secolo. L'atomo d'idrogeno, formato di un protone e un elettrone, era schematizzato come un sistema solare in miniatura.

L'elettrone ruota intorno al protone, in un'orbita circolare, come un pianeta ruota intorno al Sole. L'analogia era suggerita dall'identità matematica tra la legge di attrazione gravitazionale e la legge di Coulomb che descrive l'attrazione tra due cariche elettriche di segno diverso. Quando si scoprì che una migliore descrizione dell'atomo d'idrogeno richiedeva l'introduzione di altri numeri quantici, il modello fu perfezionato ammettendo orbite ellittiche: il nuovo numero quantico fu interpretato come una misura dello schiacciamento dell'orbita dell'elettrone. Gli altri numeri quantici, necessari per descrivere meglio lo spettro dell'idrogeno, ebbero un'interpretazione meccanica in termini dell'inclinazione dell'orbita dell'elettrone e di rotazione dell'elettrone. L'elettrone ruota su sé stesso come una trottola (si osservi l'analogia con l'ipotesi di Cartesio sulla rotazione dei globetti di luce) e il nuovo numero quantico fu interpretato la misura del momento angolare dell'elettrone.

Algarotti propone un argomento che confuterebbe la teoria cartesiana della luce. La disposizione sperimentale è la seguente. Algarotti e la marchesa sono in posizioni diverse nella stessa stanza. La marchesa guarda un dipinto in cui prevale il colore rosso. Algarotti, tramite una piccola apertura nella parete, guarda il mare azzurro. Data la posizione di Algarotti e della marchesa, il raggio di luce che proviene dal mare e raggiunge gli occhi di Algarotti interseca il raggio di luce che parte dal dipinto rosso e raggiunge gli occhi della marchesa. Poiché i due raggi di luce sono composti di particelle poste l'una a contatto con l'altra, senza alcun vuoto intermedio, nel punto d'intersezione dei due raggi vi deve essere una particella che appartiene a entrambi i raggi, a quello rosso e a quello blu. Questa particella, secondo la teoria di Cartesio, deve avere una rotazione su sé stessa di un certo tipo, perché appartiene al raggio rosso, e un'altra rotazione su sé stessa di tipo diverso, perché appartiene al raggio blu. Come dice Algarotti: "Bisognerà, che il medesimo globetto, duro com'egli è, avesse anco nel medesimo tempo due differenti moti di rotazione, quello che si richiede per eccitar l'idea di rosso in voi ... e quel moto di rotazione che si richiede per eccitar l'idea del colore azzurro in me" (p. 129). L'affermazione di Algarotti è la conseguenza dell'ipotesi che i raggi di luce siano composti di particelle che si susseguono a contatto l'una dell'altra senza vuoti intermedi. Poiché una particella non può avere che un solo moto di rotazione intorno al proprio asse, l'ipotesi di Cartesio è falsa<sup>16</sup>.

---

<sup>16</sup>Esercizio per gli studenti liceali: ammettendo l'esistenza di vuoti tra le particelle che compongono un raggio di luce, si potrebbe salvare la teoria cartesiana? Suggerimento: quando aumentano gli esseri umani nella stanza, aumentano anche i punti d'intersezione tra i raggi luminosi; quindi, si devono ammettere sempre più vuoti tra le particelle, per accomodare particelle con diverse rotazioni. Se il numero delle persone tende all'infinito, anche il

Malebranche tentò di risolvere il problema rimanendo fedele allo spirito della teoria cartesiana. Egli sostituì le particelle solide con "vortici picciolissimi" (p. 139) caratterizzati da continue vibrazioni. La luce è composta, nel modello di Malebranche, da elementi microscopici che vibrano. Le differenti velocità di vibrazione producono le diverse sensazioni dei colori. Il modello della luce è costruito prendendo come esempio il suono e la sua propagazione nell'aria. Il suono è l'effetto sull'orecchio delle vibrazioni dell'aria; le diverse velocità di vibrazione determinano le diverse sensazioni sonore. Il fatto che le persone possono udire suoni provenienti da fonti diverse, anche se i percorsi rettilinei dalle sorgenti agli osservatori s'incrociano, dimostra la non applicabilità dell'obiezione riferita da Algarotti.

La teoria di Malebranche è anch'essa, come quella cartesiana, basata sulla costruzione di un modello microscopico, di cui si asserisce la piena corrispondenza alla realtà. Le proprietà del modello sono ridotte alle proprietà di una teoria nota (in questo caso, la teoria della propagazione del suono) in modo da sfruttarne le conoscenze acquisite. Algarotti non ha tuttavia difficoltà nell'additare un difetto della teoria di Malebranche. "Se noi fossimo al piè di questa collina, e che dalla parte opposta di essa suonasse alcuno un corno da caccia ... noi non lasceremmo di sentirne il suono; benché tra il corno da caccia, e il nostro orecchio tutta questa collina frapposta fosse" (p. 139). L'osservazione riferita da Algarotti è elementare: il suono supera gli ostacoli, la luce no. Sento la voce di una persona dietro un angolo, ma non vedo una persona dietro un angolo. Se la luce fosse composta di vibrazioni di un mezzo simili alle vibrazioni dell'aria, essa dovrebbe superare gli ostacoli materiali, così come il suono li supera. La teoria di Malebranche non può essere vera<sup>17</sup>.

---

numero dei punti d'intersezione tende all'infinito. Quindi, al limite, si avranno infiniti vuoti. Gli esseri umani, in questo allestimento sperimentale, sono necessari? In una stanza senza esseri umani, non vi sono comunque infiniti raggi luminosi con infiniti punti d'intersezione? In ogni punto un raggio luminoso è intersecato da infiniti altri raggi luminosi (questo deriva da una proprietà della geometria euclidea: per un punto dato passano infinite rette); quindi, in ogni punto del raggio luminoso dovrebbe esserci un vuoto tra le particelle. Dunque, vi sono solo vuoti e mai particelle.

<sup>17</sup>Esercizio: nel corso dell'Ottocento la luce è stata concepita come composta di vibrazioni dell'etere; eppure nessuno ha cercato di confutare tale teoria appellandosi all'argomento riferito da Algarotti. Perché? L'elettromagnetismo classico concepisce la luce come composta dalle vibrazioni del campo elettromagnetico; tuttavia, la luce non supera gli ostacoli: perché? Suggestione: nel mare, un'onda che s'infrange contro uno scoglio non passa oltre; se la medesima onda s'infrange contro un'imbarcazione grande – diciamo, una nave da crociera – non passa oltre; se invece s'infrange contro una barchetta, l'onda si forma nuovamente poco dopo la barchetta. Ulteriore

Da un punto di vista puramente logico, la conclusione di Algarotti non segue logicamente dell'ipotesi che la luce sia composta di vibrazioni di un mezzo; altrimenti, non sarebbe stato possibile proporre le teorie in voga nell'Ottocento, secondo le quali la luce era prodotta dalle vibrazioni dell'etere. La conclusione di Algarotti segue logicamente dall'ipotesi più forte che la luce sia composta di vibrazioni aventi le medesime proprietà delle vibrazioni sonore. Se il modello di Malebranche fosse interpretato come un modello euristico (ossia, applicabile alla luce in modo limitato, perché non del tutto corretto ma utile per dedurre certi risultati), non sarebbe possibile confutarlo tramite l'argomento riferito da Algarotti. In tal caso il modello non assumerebbe alcun impegno ontologico, ossia non descriverebbe l'essenza della luce. Se il modello di Malebranche fosse interpretato come una descrizione corretta della luce, il modello sarebbe confutabile tramite l'argomento riferito da Algarotti.

Abbiamo appena incontrato un secondo tipo di modello, quello euristico, delle teorie scientifiche. È un modello privo d'impegno ontologico, che spiega gli aspetti fenomenologici del sistema fisico studiato senza pretendere di descriverlo in modo corretto. In caso di confutazione del modello, si potrebbe asserire che la confutazione deriva logicamente da aspetti del modello di cui si può fare a meno, poiché privi di controparte fisica. In tal modo, il modello del sistema fisico è estremamente maneggevole, consentendo di rimuovere eventuali elementi di ostacolo. Tale possibilità trova comunque un limite: se un elemento del modello è necessario per spiegare le leggi fenomeniche ma produce conseguenze che confutano il modello, il modello deve essere abbandonato.

Lo studente liceale potrebbe trovare interessante sapere che alcune correnti di filosofia della scienza contemporanea difendono il realismo scientifico sostenendo che i modelli scientifici sono per la maggiore parte del tipo euristico. Il ragionamento di questi filosofi è più o meno il seguente.

Il modello euristico non corrisponde pienamente alla realtà. Esso ha alcune conseguenze valide e altre non valide. Le conseguenze valide derivano da elementi del modello che hanno corrispondenza fisica, mentre quelle non valide derivano da altri elementi che non hanno corrispondenza fisica. Nel tempo, i modelli cambiano, ma alcuni elementi sono conservati. Questi elementi che sopravvivono sono quelli responsabili del successo delle teorie scientifiche. Dunque:

- a) i modelli scientifici sono, a rigore, falsi, perché non descrivono in modo corretto il sistema fisico studiato;
- b) alcuni elementi del modello contribuiscono in modo decisivo alla correttezza delle previsioni e delle spiegazioni;

---

suggerimento: le onde radio hanno una lunghezza d'onda maggiore della luce; le onde radio superano gli ostacoli meglio della luce.

c) gli elementi del modello che contribuiscono in modo decisivo alla correttezza delle previsioni e delle spiegazioni sono conservati nel corso del progresso scientifico;

d) questi elementi conservati corrispondono a qualcosa di reale;

e) il progresso della scienza consiste nell'accumularsi di questi elementi<sup>18</sup>.

Semberebbe che l'argomentazione di Algarotti abbia dimostrato l'impossibilità sia di una teoria corpuscolare della luce sia di una teoria ondulatoria. Che non possa essere così, è tuttavia evidente: teorie corpuscolari e ondulatorie della luce sono state in voga dal diciottesimo al ventesimo secolo; la fisica classica contemporanea accetta una teoria ondulatoria della luce. Per comprendere dove nasca l'equivoco, si deve esaminare più a fondo il ruolo dei modelli fisici. Si consideri un sistema fisico  $S$  e un modello  $M$  di  $S$ . Può accadere che ogni proprietà del modello  $M$  abbia una corrispondente proprietà nel sistema fisico  $S$ . In tal caso, chiamerò il modello  $M$  *veritiero*. Un modello veritiero è un modello le cui proprietà fisiche, nessuna esclusa, corrispondono a proprietà fisiche del sistema studiato. Se questa condizione non è soddisfatta, il modello  $M$  non è veritiero; poiché l'espressione 'modello non veritiero' ha una connotazione negativa, la sostituirò con l'espressione 'modello euristico'. Quindi, un modello  $M$  del sistema fisico  $S$  è veritiero se e solo se ogni proprietà di  $M$  corrisponde a una proprietà di  $S$ ; altrimenti  $M$  è un modello euristico. Cosa si può dire della relazione inversa, ossia della corrispondenza tra le proprietà del sistema  $S$  e le proprietà del modello  $M$ ? Se ogni proprietà di  $S$  corrisponde a una proprietà di  $M$  (ossia, se ogni proprietà del sistema fisico è rappresentata nel modello), il modello  $M$  è detto *completo*; altrimenti è detto *incompleto*. Combinando tra loro le due proprietà, la verità e la completezza, sono possibili quattro tipi di modelli:

a) il modello è veritiero e corretto, ossia le proprietà del modello sono tutte e sole le proprietà del sistema fisico;

---

<sup>18</sup>Esercizio: gli elementi dei modelli scientifici conservati durante l'evoluzione delle teorie corrispondono al noumeno di Kant? Suggerimento: è necessario che gli elementi conservati siano materiali o è possibile che siano immateriali (in particolare, formali)? Nell'evoluzione della fisica si conservano le ipotesi sull'ontologia materiale (esempi: la luce è composta di vibrazione dell'etere, l'etere è incompressibile) o le formule matematiche (esempio: l'angolo di riflessione è uguale a quello d'incidenza)? Se si conservano le formule matematiche, forse gli elementi conservati non riguardano proprietà materiali di oggetti ma proprietà formali di relazioni matematiche.

Esercizio: il fatto che nell'evoluzione delle teorie scientifiche si conservano alcuni elementi delle teorie precedenti indica che questi elementi sono reali oppure indica che gli scienziati agiscono in maniera economica (non buttano via nulla, ma usano tutto quello che hanno a disposizione)?

b) il modello è veritiero e incompleto, ossia tutte le proprietà del modello sono anche proprietà del sistema fisico, ma qualche proprietà del sistema fisico è assente nel modello;

c) il modello è euristico e completo, ossia tutte le proprietà del sistema fisico sono rappresentate nel modello, che tuttavia contiene alcune proprietà estranee al sistema fisico;

d) il modello è euristico e incompleto, ossia accade sia che il modello contenga proprietà estranee al sistema fisico sia che qualche proprietà del sistema fisico non sia descritta nel modello.

Il caso d) è il più frequente. Come esempio, consideriamo il modello planetario dell'atomo. Tale modello non è veritiero: esistono proprietà del modello che non hanno corrispondenza nel sistema fisico. Una di queste, per esempio, è la velocità dell'elettrone lungo la propria orbita. Mentre tale velocità è essenziale nella meccanica planetaria (vedi per esempio la seconda legge di Keplero, che asserisce che la velocità del pianeta varia in modo tale che in tempi uguali il segmento che unisce il pianeta al Sole percorre aree uguali), nella fisica dell'atomo essa non ha alcuna corrispondenza. Un'altra proprietà del modello dell'atomo assente nel sistema fisico è l'esatta localizzazione dell'elettrone. Il modello, inoltre, è incompleto; ad esempio, nessuna delle proprietà ondulatorie dell'elettrone è rappresentata nel modello.

Dopo queste precisazioni, torniamo all'argomento di Algarotti e ai modelli di Cartesio e Malebranche. Nelle intenzioni dei due autori, questi modelli sono veritieri: ogni proprietà del modello descrive una qualche proprietà della luce. È incerto se Cartesio e Malebranche ritenessero i loro modelli completi. È probabile di no, perché entrambi avrebbero potuto accettare l'esistenza di fenomeni ottici che richiedessero l'aggiunta di altre proprietà ai loro modelli. In ogni caso, entrambi ambivano al carattere veritiero dei modelli. Gli argomenti presentati da Algarotti dimostrano che non è possibile fornire un modello veritiero della luce tramite modelli meccanici corpuscolari o ondulatori. Sia  $M$ , ad esempio, un modello meccanico corpuscolare veritiero della luce. Allora, l'argomento di Algarotti dimostra che, nel punto d'intersezione di due raggi luminosi di colori diversi, la particella dovrebbe avere stati fisici incompatibili; ma questo è impossibile per una particella meccanica. Sia  $M$ , invece, un modello meccanico ondulatorio veritiero della luce. L'argomento di Algarotti dimostra che la luce dovrebbe avere caratteristiche tipiche delle onde che si propagano in un mezzo, non dissimili dalle caratteristiche delle onde sonore; tuttavia, la luce non ha tali caratteristiche. La confutazione dei modelli della luce, operata da Algarotti, vale per i modelli che hanno le due caratteristiche seguenti:

- 1) i modelli sono (o meglio, pretendono di essere) veritieri;
- 2) i modelli sono meccanici.

Queste due caratteristiche sono essenziali. Se si accetta che il modello della luce non sia veritiero, ossia che alcune proprietà del modello non abbiano

alcuna corrispondenza nel sistema fisico, allora si potrebbe sostenere che le proprietà del modello usate nella confutazione di Algarotti non si applicano alla luce. Se invece si accettano modelli non meccanici (ossia, che seguono leggi diverse da quelle della meccanica classica), non si può stabilire la contraddittorietà delle conseguenze dedotte. Ad esempio, una particella non classica potrebbe nello stesso tempo avere stati fisici incompatibili (come nel caso di particelle quantistiche in stati sovrapposti). Il modello odierno della luce, in fisica classica, non è un modello meccanico, perché le onde elettromagnetiche si propagano nel vuoto (nella meccanica classica, un'onda richiede sempre un substrato fisico, poiché un'onda è l'oscillazione delle particelle del mezzo). Quindi, l'argomento di Algarotti confuta i sistemi di Cartesio e Malebranche, i cui modelli intendono essere veritieri; l'argomentazione è tuttavia inefficace contro modelli euristici o non meccanici della luce.

A conclusione di questa sezione, vorrei sottolineare come, commentando un testo divulgativo settecentesco che critica alcuni semplici aspetti della teoria della luce di Cartesio e Malebranche, sia possibile esplorare un settore importante della filosofia della scienza quale il ruolo dei modelli nella ricerca scientifica.

### **L'osservazione sperimentale e l'ottica di Newton**

Algarotti ha spiegato alla marchesa che, mentre la fisica di Cartesio si pone come primo obiettivo quello di determinare la natura ontologica (l'essenza) della luce, l'ottica di Newton desidera accertare le leggi fenomeniche della luce, senza entrare nella questione circa la sua reale costituzione. Newton non vuole rispondere alla domanda "cos'è la luce?"; vuole rispondere alla domanda "quali sono le leggi che regolano la riflessione e la rifrazione della luce?" La marchesa chiede come Newton possa determinare il comportamento della luce senza sapere cosa sia la luce. "Come potremmo noi, – ella obietta – in grazia, conoscer le proprietà della luce, e de' colori, senza stabilir, che cosa e' sieno, come mi dite che il Signor Newton fa, e senza spiegarne prima la natura?" (p. 152). L'obiezione della marchesa è questa: non è possibile conoscere le proprietà di un oggetto senza conoscerne la natura. Quest'obiezione trae la sua forza dalla tradizione aristotelica mediata dall'interpretazione di Porfirio.

Nel terzo secolo, assecondando la richiesta di un proprio allievo, il filosofo neoplatonico Porfirio scrisse un'introduzione alle *Categorie* di Aristotele. Il lavoro di Porfirio, ammirato per la grande chiarezza, ha esercitato un'estesa influenza sulla filosofia scolastica. Nel Medioevo è servito come un'introduzione allo studio della filosofia. Il testo, scritto originariamente in greco con il titolo di *Isagoghe (Introduzione)*, è stato tradotto in latino nel quarto secolo (questa traduzione è andata perduta) e nel sesto secolo dal filosofo cristiano Boezio. Ha esercitato una rilevante influenza anche sulla

filosofia araba, tramite una traduzione siriana e quindi araba (ottavo secolo).

L'*Introduzione* mira a spiegare le nozioni aristoteliche di genere, differenza, specie, proprietà e accidente. Circa il genere e la specie, è sufficiente, in questo contesto, dire che esse sono classi di oggetti che hanno alcune caratteristiche comuni. Il genere è più ampio della classe: un genere può comprendere più classi. Una classe può essere un genere, se in essa si possono distinguere sottoclassi significative. Ad esempio, il genere degli esseri viventi è composto dalle classi delle piante e degli animali. La classe degli animali è un genere, composto, ad esempio, dalle classi pesci, mammiferi e insetti. La classe dei mammiferi è un genere nel quale si distinguono le specie cane, gatto, orso, pecora e uomo. Queste specie non sono ulteriormente divisibili in altre specie: esse sono *specie infime* (ossia, del più basso livello possibile). Secondo l'interpretazione di Porfirio, ciascuna specie è definita mediante due elementi:

- a) il genere cui appartiene;
- b) la differenza che la distingue dalle altre specie di quel genere.

L'esempio della definizione di uomo è notissimo: l'uomo è un animale (genere) razionale (differenza).

Avendo sinteticamente spiegato le nozioni di genere, specie e differenza, resta da vedere cosa siano le proprietà e gli accidenti. Questi ultimi non presentano alcuna difficoltà. Un accidente è un attributo che può appartenere o non appartenere a un oggetto, senza alterarne l'essenza. Il colore nero del corvo è un accidente, anche se i corvi fossero tutti neri. La natura di un corvo non cambierebbe se esso fosse bianco. Un corvo albino è un corvo. Il colore della pelle di un essere umano è un accidente. Un essere umano è un essere umano, indipendentemente dal colore della pelle. Gli accidenti ammettono variazioni graduali. La pelle di un essere umano può essere più o meno chiara, più o meno scura, con un graduale passaggio dal nero al bianco, senza che ciò influenzi la natura umana.

Le proprietà, al contrario degli accidenti, sono connesse con l'essenza. Si consideri – l'esempio è di Porfirio – la proprietà di ridere. Solo gli esseri umani possono ridere. Ridere, dunque, è una proprietà caratteristica degli esseri umani. Gli esseri umani sono sia animali razionali sia animali che possono ridere. In simboli,  $\{ x \mid x \text{ è un animale razionale} \} = \{ x \mid x \text{ è un animale che può ridere} \}$ . Tuttavia, solo la differenza può essere usata per definire una specie. Non è possibile spiegare in poche righe perché Porfirio sostenga che una specie può essere definita tramite una differenza ma non tramite una proprietà. Semplificando molto, si può dire che – per Porfirio – la proprietà può essere una *caratteristica disposizionale* della specie, mentre la differenza è sempre una *caratteristica categorica*. Secondo la tradizione coeva, le caratteristiche disposizionali non sono adatte a definire l'essenza degli oggetti.

Nella versione di Porfirio della filosofia di Aristotele, per studiare le proprietà di un oggetto è necessario prima conoscerne l'essenza. Seguendo questa tradizione filosofica, la marchesa ha ragione a chiedere come Newton possa pretendere di conoscere le proprietà della luce senza stabilire quale sia la natura della luce. Prima dovrebbe essere determinata la natura della luce; solo dopo, si potrebbero studiare le sue proprietà. Newton, al contrario, procede dalle proprietà, senza peraltro mai risalire alla natura della luce. Come potrebbe farlo?

La risposta di Algarotti è che si possono studiare le proprietà della luce, ignorando la sua natura, tramite osservazioni sperimentali ben costruite. Le osservazioni sperimentali rivelano le proprietà della luce, ma lasciano *volutamente* ignota la sua natura.

Concediamo ad Algarotti di introdurci nell'ottica newtoniana:

Un raggio di luce, ripigliai io, siccome l'altro giorno avea incominciato a dirvi, per quanto sottile egli sia, altro non è che un fascetto d'infiniti altri raggi, i quali non son già tutti del medesimo colore, benché tutto il raggio ci paja bianco; ma alcuni sono rossi, alcuni altri [a]ranci, altri gialli, altri verdi, altri azzurri, altri indachi, altri violetti, con infiniti gradi colori intermedj tra gli uni e gli altri di questi sette principali. Questi raggi adunque di differenti colori che si chiamano primitivi ovvero omogenei mescolati insieme compongono un raggio omogeneo, e composto, com'è un raggio del Sole di colore bianco, o piuttosto di un colore, che pende all'aureo ... In somma, un raggio riguardar puossi come una fibra composta d'infinita fibrette, o filamenti, ciascuno de' quali ha un particolare, proprio ed inalterabile colore, cui egli non lascerebbe di mostrare, se veduto esser potesse separato dagli altri, i quali con esso insieme a formare il colore bianco, o aureo della luce concorrono. (pp. 153-155).

Da un punto di vista didattico, questa citazione è interessante perché mostra un contrasto tra due diversi tipi di ontologia. Per Cartesio, un raggio di luce è composto di particelle solide indeformabili. Per Newton, un raggio di luce è composto d'infiniti altri raggi di luce. Nell'ontologia adottata da Cartesio, il raggio di luce e gli elementi che lo costituiscono sono su piani diversi. Il raggio di luce è fatto di particelle, che sono entità qualitativamente diverse dal raggio stesso. Nell'ontologia adottata da Newton, il raggio di luce è composto di altri raggi di luce: gli elementi che compongono il raggio sono qualitativamente identici al raggio stesso. Questa differenza si manifesta in un altro fondamentale aspetto. Mentre l'ontologia cartesiana richiede di determinare gli elementi ultimi che costituiscono la luce, per evitare un regresso all'infinito, l'ontologia newtoniana non richiede di determinare gli elementi ultimi che costituiscono la luce, poiché un raggio è composto di altri

raggi, ciascuno dei quali è composto di raggi composti di raggi composti di raggi, e così via all'infinito, senza alcuna necessità di un elemento ultimo su cui appoggiarsi. In termini moderni, l'ontologia newtoniana è ricorsiva, senza alcun limite alla profondità della ricorsione.

Da buon letterato, Algarotti accompagna la descrizione del principio base dell'ottica newtoniana, ossia che la luce bianca è la sovrapposizione dei sette colori fondamentali, con una citazione poetica, che trae dall'*Orlando furioso* di Ludovico Ariosto:

*Che di molti colori un color resta,  
Quando un Pittor ne piglia di ciascuno  
Per imitar la carne, e ne riesce  
Un differente a tutti quei, che mesce.* (p. 154)

Ma come poté Newton accertare che la luce bianca è composta di sette colori? Qui – dice Algarotti – la natura viene in nostro soccorso. Sarebbe stato impossibile separare i diversi colori che, mescolati tra loro, formano la luce bianca, se non fosse stato per il fatto che i diversi raggi, passando da un mezzo all'altro, subiscono una rifrazione diversa. Quando un raggio di luce solare, che penetra in una stanza oscurata per una piccola fessura, incontra un prisma di vetro, la luce bianca si scompone nei diversi raggi, formando sul muro della stanza una "figura ... molte volte più lunga, che larga, e variata tutta d'infiniti colori, tra' quali spiccano i sette principali" (p. 156).

Per non restare a corto di citazioni poetiche, Algarotti questa volta si affida alla *Gerusalemme liberata* di Torquato Tasso, al fine d'illustrare l'esperimento del prisma:

Né il superbo Pavon sì vago in mostra  
Spiega la pompa dell'occhiate piume,  
Né l'Iride sì bella indora, e innostra  
Il curvo grembo, e rugiadoso al lume. (p. 156)

Nell'espone l'ottica newtoniana, Algarotti è assai equilibrato: subito dopo aver spiegato l'esperimento di Newton e avergli tributato il giusto merito cita, con indubbia onestà intellettuale, un'obiezione contro questo esperimento:

Per ispiegare questo grande cangiamento, continuai io, una di queste due cose, converrà dire, o che la luce sia composta di raggi diversamente colorati, e diversamente rifrangibili, cosicché il prisma altro non faccia, che separarli l'un dall'altro ... ovvero che la luce acquisti passando per lo prisma de' colori, ch'ella non avea innanzi, e di più che ogni raggio si dissipi, si dilati, e si disperga in molti altri raggi divergenti tinti di diverso colore (p. 157).

Passando la luce attraverso il prisma, accadrebbero – sostiene che si oppone all’interpretazione di Newton dell’esperimento del prisma – due fenomeni:

1) la luce bianca acquisterebbe i sette colori fondamentali, che sarebbero quindi il prodotto del prisma;

2) i raggi di luce bianca, contaminati dai diversi colori, si disperderebbero, formando l’immagine allungata e colorata visibile sulla parete della stanza oscura (ipotesi di Grimaldi).

È interessante, dal punto di vista didattico assunto nel mio contributo, spiegare agli studenti liceali che l’obiezione è legittima. Come si può essere certi che l’esito di un esperimento descriva il sistema fisico e non sia invece l’artefatto dell’apparato sperimentale? Quest’obiezione era stata avanzata contro l’uso del telescopio di Galileo: come si poteva sapere che, ad esempio, i satelliti di Giove, mostrati per la prima volta dal telescopio, erano reali e non erano invece il frutto di un’illusione prodotta dal telescopio? Che l’obiezione sia legittima è mostrato da ciò che è accaduto nel corso del 2011, quando un gruppo di scienziati del CERN ha annunciato, dopo anni di ricerca, che i neutrini si muovono con velocità superiore a quella della luce, salvo poi accorgersi che la velocità superluminale era un effetto spurio dovuto a un apparato sperimentale difettoso. La velocità dei neutrini misurata nel corso di esperimenti ripetuti per anni con la massima attenzione in un centro di ricerca all’avanguardia era l’artefatto dell’apparato sperimentale.

Da un punto di vista logico, non è possibile garantire che l’esito di un esperimento non sia un artefatto dell’apparato sperimentale. Quale tattica, dunque, potrebbe seguire un sostenitore di Newton? Più in genere, come si può ragionevolmente mostrare che un esperimento non ha interferito con il sistema sul quale si sperimentava? È utile sintetizzare il discorso di Algarotti in difesa di Newton.

Algarotti riporta il seguente ragionamento. Si supponga che abbia ragione Grimaldi: il prisma che intercetta la luce bianca la contamina con i diversi colori e, al tempo stesso, disperde i raggi, formando un’immagine colorata più lunga che larga. Se si facessero passare i raggi prodotti dal prisma attraverso un secondo prisma opportunamente orientato, si dovrebbe produrre un’immagine colorata allargata, invece che allungata. Dovrebbero inoltre comparire nuovi colori. Se si realizza l’esperimento, si osserva che l’immagine non è allargata; inoltre, non compaiono nuovi colori.

La tattica usata è molto semplice. Non è possibile dimostrare che il prisma non interferisce con la luce. Si può tuttavia mostrare, tramite esperimenti ben progettati, che le obiezioni specifiche contro il prisma implicano conseguenze che non avvengono. Quindi, o l’obiezione contro il prisma è un’obiezione di principio, priva di reale contenuto empirico; oppure l’obiezione propone una spiegazione alternativa. Nel primo caso, l’obiezione è logicamente insuperabile ma scientificamente irrilevante. Nel secondo caso, l’obiezione ha

un contenuto empirico e può essere controllata sperimentalmente. Anche se non è possibile escludere che il prisma interferisca con la luce, è possibile controllare se il meccanismo della presunta interferenza sia quello ipotizzato da Grimaldi. L'esperienza dimostra che il meccanismo ipotizzato da Grimaldi non occorre.

Per lo studente può essere interessante comprendere che, in tal modo, non si dimostra la validità della teoria di Newton; si dimostra, invece, che la teoria alternativa di Grimaldi è errata. Non si prova dunque la validità di una teoria, ma la non validità di una teoria rivale.

### Commiato

Sono giunto alla fine del mio articolo. Credo di avere raggiunto l'obiettivo di questo contributo, ossia mostrare come un'opera letteraria divulgativa del Settecento possa essere utilmente usata per affrontare interessanti questioni di filosofia della scienza. Al di là dell'intrinseco valore di tale risultato, vorrei sottolineare un ultimo aspetto. Leggere, commentare e spiegare in un liceo un'opera come i *Dialoghi* di Algarotti richiederebbero la collaborazione tra i docenti di letteratura italiana, storia della filosofia e fisica. Tale collaborazione sarebbe tuttavia ostacolata da alcune particolarità del programma d'insegnamento. Ad esempio, mentre in filosofia si studia Platone e Aristotele, in fisica si studia la meccanica classica. L'anno dopo, in filosofia si studia Galileo, Cartesio, Newton e Locke, mentre in fisica si studia la termodinamica. I programmi degli insegnamenti di filosofia e di fisica sembrano progettati da persone che ritengono non vi sia alcun legame tra le due materie. Non sarebbe utile un qualche raccordo più coerente?

---

### BIBLIOGRAFIA

- Algarotti, F., **Il newtonianismo per le dame, ovvero dialoghi sopra la luce, i colori, e l'attrazione**, Napoli: 1739 [1737].
- Algarotti, F., **Opere**, a cura di F. Aglietti, Venezia: Carlo Palese, 1791-94, 17 volumi.
- De Fontenelle, B., **Entretiens sur la pluralité des mondes**, Parigi: Ménard et Desenne, 1828 [1686].
- Newton, I., **Opticks**, Londra: Innys, 1730<sup>4</sup> [1704].
- Porfirio, **Isagoge**, a cura di Adolfus Busse, Berlino: Georg Reimer, 1887 (testo greco e traduzione latina di Boezio).