

E la luce fu

Angelo Tartaglia

Intervento del 07 novembre del 2017

Potrei cominciare col porre una domanda circa la natura della luce e, parafrasando Benedetto Croce, potrei rispondere: “alla domanda che cos’è” la luce “si potrebbe rispondere celiando, e non sarebbe una celiaccia, che” la luce “è ciò che ciascuno sa che cosa sia”. Croce parlava in realtà dell’arte, ma direi che l’approccio è abbastanza appropriato anche nel nostro caso. In effetti tutti sanno che cos’è la luce anche se non sono magari in grado di darne una descrizione analitica razionale. La luce è ovunque, vi siamo immersi, permea ogni cosa. Può essere più intensa o più attenuata; si manifesta in vari colori. Temiamo il suo opposto, la tenebra, anche se è dubbio che vi sia qualche contesto in cui, al di là delle nostre capacità percettive, la luce sia veramente del tutto assente. La luce insomma ci è familiare e, quando ci pensiamo, la luce ci affascina.

Per cercare di capire qualcosa di più proverò a partire dal racconto biblico della creazione. Ci colpisce immediatamente un fatto curioso: la luce compare il primo giorno, mentre i “luminari celesti”, cioè il sole e le stelle (c’è anche la luna che però oggi sappiamo non brillare di luce propria) vengono creati solo il quarto giorno. Insomma, le sorgenti di luce compaiono *dopo* la luce stessa. Incongruenza di un racconto allegorico? In realtà vedremo che la cosmologia moderna dice appunto che la luce è nata *prima* delle stelle.

La luce quindi assume il carattere di ingrediente primordiale e pervasivo dell’universo, a prescindere da quelle che ora consideriamo le sue sorgenti.

Il carattere universale della luce e il suo provenire generalmente dalla volta celeste ha poi, fin dai primi tempi, portato gli umani a vederla come un tramite, un messaggero tra il cielo e la terra, tra il divino e l’umano. Nella mitologia greca Iris, l’arcobaleno (la quintessenza della luce), è messaggera di Zeus, padre degli dei. Nell’antico Egitto il faraone eretico Ekhnaton (Amenophis IV) venera e impone di venerare una sola divinità: il disco del sole Aton. In bassorilievi e pitture della sua capitale Amarna si vede il disco del sole da cui scaturiscono raggi all’estremità di ciascuno dei quali vi è una piccola mano, a indicare come Aton venga in soccorso degli umani per il tramite proprio della luce.

L’immagine della luce messaggera ha continuato ad essere presente in molte altre culture e nell’arte. Innumeri rappresentazioni pittoriche contengono fasci di luce che illuminano i fedeli a partire dalla colomba che rappresenta lo Spirito Santo. Un’annunciazione del Beato Angelico risalente al 1424-25 accompagna l’angelo che porta l’annuncio a Maria con un fascio di luce proveniente dalla mano stessa di Dio.

Tutto questo coinvolge l’intuizione e l’emozione umane. Quando entra in gioco in modo sistematico la ragione, come avvenne a partire dal VI-V secolo a.C. in Grecia, a quanto accennato più su si accompagna anche un’analisi molto più prosaica (ed anche utilitaristica) dei fenomeni luminosi. Si osserva e si studia il comportamento locale e quotidiano della luce, il suo rifrangersi attraverso corpi trasparenti, il suo essere il tramite materiale che determina il meccanismo della visione umana. La convinzione che si consolida, a partire da Democrito per continuare poi fino a Tolomeo e oltre, è che la luce sia costituita da un flusso di minutissimi corpuscoli che promanano dai corpi luminosi e si propagano in linea retta. Ogni corpuscolo riproduce in sé le caratteristiche cromatiche e geometriche della sorgente. Nell’occhio la visione ha origine attraverso un senso simile al tatto: manipolando le particelle luminose in corrispondenza della retina si recupera l’informazione circa forma e colore dell’oggetto originario. Ci sono molte varianti di questa basilare interpretazione circa la natura della luce, inclusa quella che ipotizza che dall’occhio fuoriescano dei raggi visivi che incontrano a mezz’aria gli “atomi” di luce, percependone la qualità e la consistenza.

In parallelo all'elaborazione dei filosofi naturali del tempo si sviluppa e si accumula anche un sapere empirico/pratico sulla luce che vede la realizzazione di specchi non solo piani ma anche sferici (famosi gli specchi ustori di Archimede), la descrizione del meccanismo alla base della camera oscura e anche la fabbricazione di lenti. Al riguardo, tra le rovine dell'antica Nimrud (anteriori al VII secolo a.C.) è stato trovato un piccolo oggetto di cristallo di rocca lavorato che pare proprio essere nient'altro che una lente.

Il sapere empirico-pratico della cultura greca si estende a tutto il medioevo e viene ripreso e rilanciato dalla civiltà araba dei secoli d'oro, mentre se ne colgono echi (o forse sono elaborazioni autonome ma convergenti) fino in estremo oriente e in Cina.

È con l'avvio in Occidente della scienza moderna che compaiono nuove sistematizzazioni e sviluppi. Galileo non si interessa della natura della luce salvo porsi, invano, il problema di misurarne la velocità di propagazione. Newton, con la sua *Ottica*, pubblicata per la prima volta nel 1704, riprende l'idea di una luce fatta di corpuscoli che si muovono ad altissima velocità provenendo dai corpi luminosi, ma stabilisce, per via di esperimento, che il colore non è una proprietà dei corpi, bensì della stessa luce: i corpi appaiono colorati in quanto assorbono o rimandano preferenzialmente i raggi di questo o di quel colore. Per la verità Newton immagina anche che lo spazio tra i corpi, tanto celesti che terrestri, così come i corpi stessi, sia riempito da un qualche *etere* e che le particole luminose, attraversandolo, lo facciano vibrare. Certi fenomeni, che si manifestano ad esempio in quelli che noi oggi chiamiamo anelli di Newton e che suggeriscono un comportamento ondulatorio, sarebbero dovuti al fatto che, nei corpi rifrangenti (come vetro, acqua, cristalli trasparenti) i corpuscoli luminosi vengono rallentati e si trovano a viaggiare più lentamente di quelle stesse onde cui danno origine nell'etere: la luce quindi trova davanti a sé condizioni di rifrazione diverse modulate dalle onde dell'etere e viene perciò deviata in modo vario generando le frange chiare e scure che si osservano.

La teoria newtoniana della luce rimane dominante nella scienza dell'epoca dei lumi per almeno un secolo, finché nei primi anni dell'800 una serie di accurati nuovi esperimenti dovuti a Thomas Young in Inghilterra e a Augustin-Jean Fresnel in Francia mostrano che fasci di particelle non sarebbero in grado di produrre gli effetti evidenziati, mentre essi sono più semplicemente interpretabili come fenomeni di interferenza e diffrazione di onde. La teoria corpuscolare viene abbandonata e la luce acquisisce lo stato di onda; ma di che?

Bisogna arrivare alla seconda metà del XIX secolo con James Clerk Maxwell per veder nascere una vera e propria teoria in cui trova un ruolo coerente la luce. Maxwell riunificò in un quadro matematico completo e raffinato due classi di fenomeni noti fin dall'antichità e denominati separatamente "elettrici" e "magnetici". Era nata la teoria dell'elettro-magnetismo o, se vogliamo, del campo elettro-magnetico. Il suddetto "campo" si presentava come una entità matematica più che fisica in sé. Sta di fatto però che le equazioni di Maxwell dicevano che quel campo era in grado di propagare al suo interno delle onde elettromagnetiche, in cui cioè le due componenti vettoriali del campo, quella elettrica e quella magnetica, viaggiavano mantenendosi fra loro perpendicolari e oscillando come fanno le onde sonore in un gas. Una novità era che queste oscillazioni erano anche perpendicolari alla direzione di propagazione: le onde elettromagnetiche, insomma, a differenza di quelle di etere cui aveva pensato Newton e che poi avevano considerato altri dopo di lui, non erano longitudinali ma *trasversali*. La teoria consentiva di *calcolare* la velocità di propagazione a partire dal valore di un paio di costanti (costante dielettrica ϵ_0 e permeabilità magnetica μ_0) caratteristiche dei campi elettrico e magnetico nel vuoto. Il risultato dava un valore c molto alto e pari a

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = 299.792.458 \text{ m/s}$$

Certamente una velocità elevatissima ma coerente con risultati ottenuti da osservazioni astronomiche e poi da esperimenti di laboratorio. Oggi la velocità delle onde elettromagnetiche non è più una grandezza da misurare, quanto piuttosto una costante universale a partire dalla quale si ridefiniscono il metro e il secondo. Che c'entra la luce con tutto ciò? La luce è semplicemente l'insieme di quelle onde elettromagnetiche la cui

frequenza è compresa in un intervallo di valori relativamente ristretto, a cui sono sensibili i nostri occhi. Lo *spettro* completo è molto più ampio, ma ci vuole un insieme di strumenti adatti per percepirlo tutto.

A questo punto, sia pure a costo di una certa dissacrazione, abbiamo trovato una risposta alla domanda su cosa sia la luce, anche se ovviamente il fascino di una atmosfera luminosa reso da un'opera d'arte certamente non può essere espresso mediante una serie di equazioni differenziali.

Per la verità la situazione non era del tutto chiara neppure dopo l'innalzamento di quella cattedrale della fisica classica costituita dalla teoria di Maxwell. Ho accennato al fatto che il "campo" al tempo aveva una connotazione molto meno "corposa" e molto più formale di quanto non avvenga nella fisica contemporanea. Insomma l'idea di onda elettromagnetica lasciava ancora risuonare la domanda riguardo a che cosa fosse ciò che fisicamente oscillava. Sembrava naturale pensare ad un mezzo che permeasse l'intero universo, prontamente battezzato, come più volte già in passato, *etere* con in più la qualifica di *luminifero*. Il guaio è che tale etere luminifero, per reggere e giustificare onde *trasversali* e velocissime come quelle luminose, avrebbe dovuto essere *solido* e per di più rigidissimo: sono i solidi che possono ospitare onde trasversali e la velocità di propagazione risulta essere tanto più elevata quanto più il mezzo è rigido. Nell'etere però risulterebbero essere immersi tutti i corpi celesti (e anche quelli intorno a noi) eppure questo rigidissimo etere sembra non frapporre alcun ostacolo o impedimento ai loro movimenti. Lasciando sullo sfondo il problema, ci si pose quello più adatto all'esperimento, che era trovare la velocità di un laboratorio terrestre rispetto all'etere.

Il ragionamento funzionava più o meno così. La velocità c data dalle equazioni di Maxwell si riferisce all'etere. Se io cerco di misurarla in un laboratorio in moto rispetto a quel medesimo etere, dovrei trovare risultati diversi a seconda della direzione in cui effettuo la misura in quanto la velocità rispetto all'osservatore sarà una combinazione, al modo previsto da Galileo, della velocità della luce e di quella dell'apparato di misura. Avrò risultati minori di c se misuro nel senso del moto e maggiori di c se misuro in senso opposto. Ciò detto si misero in piedi dei veri esperimenti: quelli di Michelson e Morley, ripetuti più volte, e poi anche di altri. Risultato: nulla, la velocità della luce sembra essere la stessa in tutte le direzioni.

Il nodo fu sciolto, o sarebbe meglio dire tagliato, da un giovanotto, impiegato, a quel tempo, presso l'ufficio brevetti di Berna: si chiamava Albert Einstein e correva l'anno 1905. Il nostro argomentò che se i risultati sperimentali dicevano che la velocità della luce era sempre c in tutte le direzioni voleva dire che *per natura* essa doveva essere la stessa per tutti gli osservatori (inerziali, cioè non sottoposti all'azione di alcuna forza) a prescindere dal moto relativo degli uni rispetto agli altri. D'un tratto non c'era più bisogno di alcun etere rispetto al quale definire la velocità di propagazione.

Da questa baldanzosa assunzione scaturivano però una quantità di conseguenze riguardo a spazio e tempo che venivano scalzati dal loro trono di entità assolute, in cui erano stati insediati fin dall'antichità e fino a Newton e successori. L'assoluto diveniva ora un ente di natura geometrica in quattro dimensioni, lo spazio-tempo, mentre le misure separate di grandezze spaziali (lunghezze etc.) e temporali (durate) venivano a dipendere dal moto relativo degli osservatori. Era nata la teoria della relatività ristretta o speciale che dir si voglia; teoria che suscitò fin da subito, vista la sua caratteristica largamente controintuitiva, reazioni di esecrazione (che a volte durano fino ai nostri giorni) da parte di alcuni e di esaltazione da parte di altri.

In tutta questa vicenda la natura della luce svolge tutto sommato un ruolo marginale; prima donna è solo la velocità di propagazione, in un certo senso a prescindere dalla natura del fenomeno. Nello stesso mirabile anno 1905, il giovanotto di cui sopra diede però anche un contributo fondamentale per definire il modo di essere della luce. C'era un fenomeno che recalcitrava alle spiegazioni cercate nell'ambito dell'elettromagnetismo di Maxwell: l'effetto fotoelettrico, cioè l'emissione di particelle cariche (elettroni) da parte di una piastrina di metallo alcalino investita da raggi di luce di lunghezza d'onda adeguata. Einstein mise a posto le cose (e questo risultato gli fruttò il premio Nobel qualche anno dopo) ipotizzando che non solo l'emissione di luce da parte di un corpo luminoso dovesse avvenire per "dosi" discrete, come aveva

proposto Planck nel 1900, ma anche l'assorbimento della luce avesse luogo solo nelle medesime quantità discrete. Questa "quantizzazione" dei processi di emissione ed assorbimento di energia elettromagnetica è stata in qualche misura l'antesignano della vera e propria teoria dei quanti (che per la verità ad Einstein continuò negli anni a non piacere). In definitiva risultava che vi erano fenomeni che si potevano spiegare pensando a urti tra quanti di luce e corpuscoli di materia (qualche anno dopo emergeranno casi ancor più nettamente leggibili come urti relativistici tra particelle che non lo stesso effetto fotoelettrico). D'altra parte quantità meccaniche associate ai quanti (che anni dopo verranno battezzati *fotoni*), come la quantità di moto e l'energia (cinetica) risultavano proporzionali alla frequenza della radiazione di riferimento, cioè alla grandezza che governa i fenomeni di interferenza e di diffrazione cui pure la luce dà luogo. La luce in definitiva si presenta come un fascio di particelle, alla maniera di Newton, negli esperimenti atti a evidenziare le proprietà meccaniche delle particelle, e come un'onda negli esperimenti atti a far emergere la natura ondulatoria della radiazione.

Tutto ciò nulla toglie alla pervasività e universalità del fenomeno luminoso e al ruolo della luce come veicolo di informazione a scala cosmica (non unico, ma certamente dominante). La generalizzazione della relatività ad includere l'interazione gravitazionale non riduce il ruolo della luce, la quale ci permette di mettere in evidenza proprietà anche dello spazio-tempo curvo (quello appunto in cui si manifesta l'interazione gravitazionale). La luce, ad esempio, cade (cosa che avevano già ipotizzato Michell e Laplace nel '700 ma con previsioni diverse da quelle della relatività generale) originando effetti di lente gravitazionale osservabili.

La luce è valsa anche a dar ragione ad Einstein, nonostante Einstein. Mi riferisco all'espansione universale che all'inizio Einstein non riteneva sensata nonostante la indicassero le sue stesse equazioni. Osservando la luce proveniente da galassie sempre più lontane si nota che lo spettro di emissione risulta spostato e stirato verso maggiori lunghezze d'onda (verso il rosso). L'effetto è tanto più marcato quanto più la sorgente è lontana. La spiegazione si trova prendendo come riferimento l'ordinario effetto Doppler che dice che un'onda (anche sonora) viene percepita con una lunghezza d'onda tanto maggiore quanto maggiore è la velocità di allontanamento da noi. In questo caso però il fenomeno non è dovuto di per sé alla velocità di una galassia rispetto a ciò che le sta intorno, ma al fatto che lo spazio stesso tra le galassie si espande come la superficie di un palloncino che qualcuno sta gonfiando.

È la luce ad informarci circa i moti celesti, la natura delle stelle, la dinamica delle nubi di gas a grande scala, l'espansione stessa dell'universo. Insomma moltissime cose che riguardano la natura e il comportamento delle sorgenti di luce. Se pensiamo però, guardando il cielo, di sottrarre in qualche modo tutte le sorgenti, che cosa rimane? Potremmo dire il buio, ma al riguardo già nel 1826 con l'astronomo tedesco Olbers (per la verità anche prima da parte di diversi pensatori) era stato osservato che il ragionamento non filava, quanto meno se si assume un universo eterno (in stato stazionario), infinito e omogeneo. In qualunque direzione guardiamo, prima o poi il nostro sguardo dovrebbe incontrare la superficie di una stella, per remota che sia, e dunque il cielo dovrebbe apparire uniformemente luminoso. Per giustificare il buio occorre che vengano meno una o più delle ipotesi iniziali: stazionarietà, infinità spaziale, omogeneità.

Per la verità però, se immaginiamo materialmente di fare l'operazione di rimozione di tutte le sorgenti di luce celesti, resta sì il buio per i nostri occhi, ma non per i nostri strumenti. Questi percepiscono una radiazione elettromagnetica proveniente uniformemente da tutto il cielo. Questa radiazione appartiene al settore microonde dello spettro elettromagnetico, corrispondente a lunghezze d'onda dell'ordine del millimetro. Usando il modello cosmologico standard (basato sulla relatività generale einsteiniana) troviamo anche che la comparsa di questo sfondo a microonde è collocabile a circa 13,8 miliardi di anni fa e a 380.000 anni dopo la singolarità iniziale prevista dalla teoria. Vediamo anche che la distribuzione in frequenza di questa radiazione è quella di un "corpo nero" (un corpo idealmente in grado di assorbire ed emettere radiazione di tutte le lunghezze d'onda) in equilibrio ad una temperatura di circa 2,7 K (circa - 270 °C). Mettendo in conto lo spostamento verso il rosso dovuto all'espansione cosmica siamo però in grado, per così dire, di attualizzare la lunghezza d'onda percepita oggi riportandola al valore al tempo dell'emissione. Occorre dividere

la lunghezza d'onda misurata ora per 1100 ed ecco che a questo punto lo sfondo ritorna nel campo del visibile e corrisponde ad un mezzo emittente ad una temperatura di circa 3000 K. A quel tempo l'universo era pieno di un plasma caldissimo la cui temperatura si riduceva man mano che procedeva l'espansione cosmica. Quando si scese al di sotto della soglia dei 3000 gradi cominciarono a legarsi stabilmente tra loro protoni ed elettroni formando atomi di idrogeno neutro; la luce smise di essere emessa e riassorbita poco più in là: l'universo divenne trasparente e la radiazione poté propagarsi nello spazio e nel tempo, giungendo fino a noi, sia pure molto "stirata", fino a non essere più percepibile a occhio nudo.

Se immaginiamo lo sfondo del cielo riportato a lunghezze d'onda visibili troviamo una distribuzione di luminosità estremamente uniforme; per la verità però, come per un vecchio dagherrotipo estremamente sbiadito, se ricorriamo a qualche artificio per aumentare il contrasto (dobbiamo moltiplicarlo almeno per 100.000), vediamo emergere delle disomogeneità che corrispondono a differenze (minime) di densità e temperatura da un luogo all'altro. Da queste disomogeneità i fisici traggono una quantità di informazioni riguardo a quello che è avvenuto dopo e anche a quanto è avvenuto prima.

Come che sia, abbiamo per così dire verificato il racconto biblico: la luce è nata prima delle stelle.

Guardando nel remoto passato a un certo punto troviamo una sorta di cortina luminosa oltre la quale non riusciamo più a distinguere nulla come se tutto fosse immerso in una nebbia risplendente. L'origine dell'universo è nascosta da quella cortina. Le nostre teorie possono dedurre qualcosa circa quanto avviene *prima*, ma non ci sono messaggeri che ce ne diano diretta testimonianza (a parte un tipo di onde gravitazionali molto più deboli di quelle che al momento abbiamo mostrato di essere in grado di rivelare).

Guardando questa cortina luminosa possiamo citare il paradiso della Divina Commedia quando a Dante è consentito di affondare lo sguardo nell'essenza divina:

*Nel suo profondo vidi che s'interna,
legato con amore in un volume,
ciò che per l'universo si squaderna:*

*sustanze e accidenti e lor costume
quasi conflati insieme, per tal modo
che ciò ch'io dico è un semplice lume*

In questa immagine poetica un fisico potrebbe cogliere qualche eco della teoria detta, poco romanticamente, dell'inflazione cosmica in cui si considera una fase di temperatura e densità elevatissime al punto che le interazioni che conosciamo (forza forte, nucleare; forza debole, nucleare anch'essa; elettromagnetismo – la gravità è un caso a parte irrisolto) risultano indistinguibili l'una dall'altra, finché col diminuire della densità e della temperatura a un certo punto le diverse forze, e i loro quanti, si separano divenendo distinguibili e dando luogo alla amplissima varietà di stati e forme oggi riconoscibili intorno a noi.

Mi rendo conto che il discorso diventa sempre più complicato e meno trasparente. Torniamo dunque alla luce con tutto il suo fascino espresso molto spesso e molto bene dall'arte. La luce è in effetti un messaggero universale e primigenio che collega tutto con tutto nell'universo. Possiamo aggiungere una peculiarità sorprendente che alla luce attribuisce la teoria della relatività. Se ricordate, in relatività la misura del tempo non è assoluta ma dipende dallo stato di moto dell'osservatore. Perché dunque non chiedersi come scorra il tempo per la luce stessa con la sua universale velocità c . Ebbene per la luce semplicemente il tempo non passa. Per la luce tutto è contemporaneo. Per un fotone la cortina luminosa del fondo a microonde, la civiltà egizia, le guerre napoleoniche e gli accadimenti del nostro quotidiano sono tutti contemporanei. La luce è un vero e proprio tessuto connettivo universale letteralmente onnipresente.

Ho cominciato con un riferimento biblico. Pensando a immagini di oggi che le moderne tecnologie ci permettono di fissare e riprodurre, come i barconi stracarichi di migranti, le scene di bombardamenti nel vicino oriente, le immagini di scontri a fuoco che la televisione ci presenta continuamente, concluderò con una citazione dal vangelo di Giovanni:

**la luce splende nelle tenebre,
ma le tenebre non l'hanno accolta**