



Spigolature astronomiche★

A cura di Annibale D'Ercole

INAF · Osservatorio Astronomico di Bologna

Lanterne, cannoni e ruote dentate

Claudio Elidoro

IN questo 2015, dichiarato dall'UNESCO "Anno internazionale della luce", è quasi doveroso occuparci – seppur come spigolatura – della caratteristica più gettonata del fenomeno luminoso: la sua velocità. Già nell'antichità classica il filosofo Empedocle di Agrigento (490-435 a.C.) si poneva la domanda su quale fosse la velocità della luce. La sua idea era che, per compiere il suo movimento, alla luce occorresse un certo tempo, dunque si propagasse con velocità finita. Prima di raggiungere l'occhio, osservava Empedocle, la luce del Sole arriva nello spazio intermedio.

Non la vedeva così, un secolo più tardi, Aristotele di Stagira (384-322 a.C.), discepolo del sommo Platone, per il quale la luce non era qualcosa di fisico e dunque la sua trasmissione doveva essere istantanea. Sulla medesima linea risulta apparentemente inoppugnabile la "prova" di Erone d'Alessandria (I secolo d.C.), che suggeriva di aprire e chiudere gli occhi mentre si osservava il cielo notturno: l'istantaneità con la quale si vedevano le lontanissime stelle era la dimostrazione della velocità infinita della luce.

È noto che le idee di Aristotele vennero considerate verità inoppugnabili per molti secoli, ma già intorno all'anno Mille alcuni sapienti del mondo Arabo non concordavano affatto con l'idea che la luce si propagasse con velocità infinita. Sia il medico, filosofo e matematico Ibn Sina (980-1037), noto in Occidente come Avicenna, sia l'eclettico e geniale Abu Ali al-Hasan (Alhazen, 965-1039), considerato tra i fondatori dell'ottica

moderna, sostenevano infatti l'idea di una velocità finita della luce.

Al di là delle considerazioni filosofiche che sorreggevano sia le conclusioni di chi voleva la luce in moto istantaneo, sia di chi la considerava caratterizzata da un movimento finito, seppur molto rapido, la diatriba poteva risolversi solamente riuscendo nell'ardua impresa di misurare tale movimento. Il primo a provarci fu probabilmente l'olandese Isaac Beeckman (1588-1637), che nel 1629 ideò e realizzò un esperimento che si affidava allo sparo di un cannone e all'osservazione del conseguente lampo di luce. Beeckman collocò alcuni specchi a differenti distanze dal cannone e chiese ad attenti osservatori di rilevare possibili differenze nei tempi in cui il lampo di luce veniva riflesso verso i loro occhi dai vari specchi. Non è difficile intuire che l'esperimento si mostrò del tutto inconcludente. Non è neppure difficile scorgere qualcosa di familiare in questo esperimento: tutto sommato è infatti molto simile a quell'esperimento ideale suggerito da Galileo Galilei (1564-1642) nel suo libro *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze*, pubblicato a Leida nel 1638. L'idea – quasi banale in sé, ma di difficilissima realizzazione – era quella di costringere la luce a percorrere distanze sufficientemente lunghe da permettere all'osservatore di individuare un suo ritardo. Questa la descrizione dell'esperimento che il pisano affida alle parole di Salviati:

Voglio che due pigliano un lume per uno, il quale, tenendolo dentro lanterna o altro ricetto, possano andar coprendo e scoprendo, con l'interposizione della mano, alla vista del compagno, e che, ponendosi l'uno incontro all'altro in distanza di poche braccia, vadano addestrandosi nello scoprire ed occultare il lor lume alla vista del compagno, sì che quando l'uno vede il lume dell'altro, immediatamente scuopra il suo [...]

Pongansi i due medesimi compagni con due simili lumi in lontananza di due o tre miglia, e tornando di notte a far l'istessa esperienza, vadano osservando attentamente se le risposte delle loro scoperte ed occultazioni seguono secondo l'istesso tenore che facevano da vicino; che seguendo, si potrà assai sicuramente concludere,

* Questa rubrica si propone di presentare in modo sintetico e, per quanto possibile, autoconsistente argomenti che stanno alla base della conoscenza astronomica, spesso trascurati nella letteratura divulgativa, in quanto ritenuti di conoscenza generale oppure troppo difficili o troppo noiosi da presentare ad un pubblico non specialistico. Questi "fondamenti di astronomia", volutamente trattati in uno spazio limitato, possono essere letti a due livelli; eventuali approfondimenti per i lettori che desiderino ampliare la conoscenza dell'argomento vengono esposti in carattere corsivo e incorniciati. Si suggerisce questa rubrica, quindi, a studenti dei vari tipi e livelli di scuole. Le *Spigolature astronomiche* si possono trovare anche in rete, nel sito Web del «Giornale di Astronomia», www.bo.astro.it/sait/giornale.html.



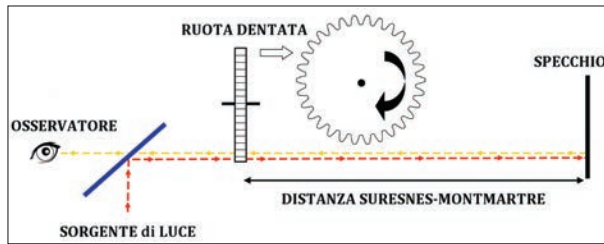


FIG. 1. Schema del dispositivo di Fizeau (vedi testo).

l'espansion del lume essere istantanea: ch  quando ella ricercasse tempo, in una lontananza di tre miglia, che importano sei per l'andata d'un lume e venuta dell'altro, la dimora dovrebbe esser assai osservabile.

Esperimento ideale, si diceva, dato che lo stesso Galileo confess  di averlo provato solo per distanze molto pi  brevi, giungendo comunque sempre all'identica conclusione: propagazione «se non istantanea, velocissima, e direi momentanea». A qualcuno potr  sfuggire un sorriso, ma forse l'unica colpa che possiamo addossare a Galileo fu quella di aver sottovalutato l'importanza cruciale dei tempi di reazione individuali. Al di l  dell'abilit  delle due persone coinvolte nell'esperimento, per ottenere un risultato apprezzabile le distanze in gioco avrebbero dovuto essere incredibilmente pi  elevate, come vedremo tra poco provando a fare un paio di conti.

Riserviamo solo una rapida citazione allo studio di Ole Christensen R mer (1644-1710), basato sulle osservazioni di Io, satellite di Giove, cui viene generalmente attribuito l'onore della prima determinazione della velocit  della luce. Del suo lavoro – e della mancanza in esso di un valore concreto per tale velocit  – si   dettagliatamente occupato Fabrizio B noli nel numero di dicembre di questo «Giornale».

Dedichiamo invece un po' pi  di attenzione alla prima determinazione attendibile della velocit  della luce, quella effettuata nel 1849 a Parigi da Hippolyte Fizeau (1819-1896). Possiamo considerare l'esperimento di Fizeau una rilettura in chiave pi  moderna dell'idea originale di Galileo. Oltre alla possibilit  di giungere a un valore numerico, che   poi il succo di ogni esperimento, Fizeau eliminava completamente l'incognita dei tempi di reazione. Nel suo apparato, infatti, il fisico francese sostituiva alle due persone dotate di lanterna che caratterizzavano l'esperimento ideale di Galileo una pi  efficiente e affidabile ruota dentata rotante. Non meno importante – questo l'aveva ben compreso lo stesso Galileo – la scelta della distanza in gioco: Fizeau compi le sue misurazioni tra Suresnes, paesino sul Mont Val rien (una collinetta di 160 metri a ovest di Parigi), e la collina di Montmartre a quel tempo non ancora inglobata nella capitale francese, distanti tra loro 8633 metri.

Quasi elementare il principio dell'esperimento. Proviamo a seguirne la dinamica aiutandoci con uno schema (vedi FIG. 1).

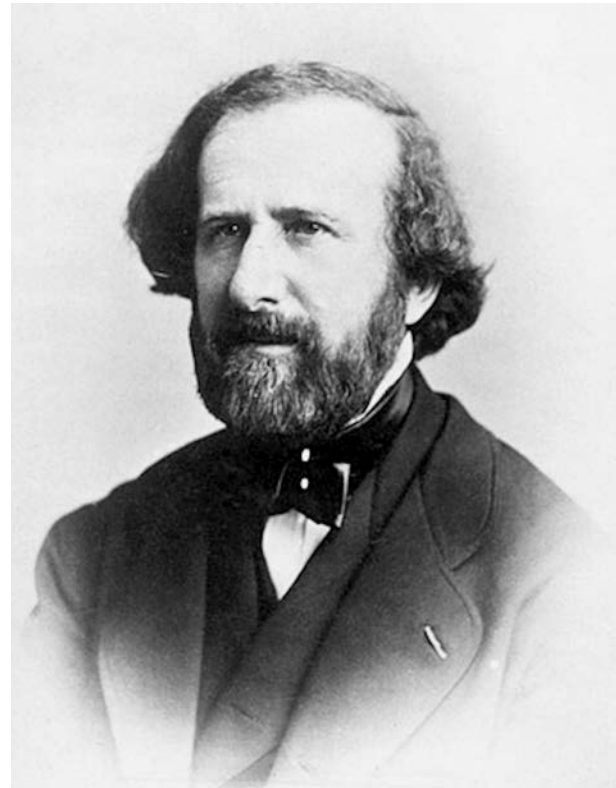


FIG. 2. Hippolyte Fizeau (1819-1896).

Un fascio luminoso viene convogliato verso una ruota dentata in rotazione, che riesce a superare solo in corrispondenza di una tacca (la presenza di un dente, infatti, blocca il passaggio della luce). Superato l'ostacolo, l'impulso luminoso continua il suo viaggio finch , a una distanza accuratamente misurata, incontra uno specchio che lo rimanda indietro verso la ruota dentata. Di nuovo, se la luce riflessa incappa in un dente viene bloccata, ma se si imbatte in una tacca pu  proseguire il suo cammino raggiungendo l'occhio dell'osservatore. Conoscendo il numero di denti della ruota, la sua velocit  di rotazione e la distanza percorsa dall'impulso luminoso, Fizeau riusc  a determinare la velocit  con la quale quell'impulso si era propagato, ottenendo un apprezzabile valore di $3,133 \times 10^8$ m/s.

Qualche anno pi  tardi – nel 1862 – Léon Foucault (1819-1868), impiegando uno specchio rotante al posto della ruota dentata e riducendo enormemente le distanze percorse dal fascio luminoso, avrebbe ottenuto il valore di $2,98 \times 10^8$ m/s. La fondamentale caccia alla determinazione della velocit  della luce era dunque iniziata. Oggi la velocit  della luce   nota con grande precisione e il suo valore   stato fissato in $299.792.458$ m/s. Dal 1983, inoltre, a seguito della decisione della 17^a *Conférence générale des poids et mesures*,   proprio questo valore che viene utilizzato per definire il metro come «la distanza percorsa dalla luce nel vuoto in un intervallo di tempo pari a $1/299\,792\,458$ di secondo».

Quasi doveroso iniziare il nostro approfondimento dalla valutazione dell'importanza dei tempi di reazione nell'esperimento ideale suggerito da Galileo. Una persona normale ha tempi di reazione minimi che si attestano intorno ai 20 centesimi di secondo. Ovviamente, si tratta di una caratteristica individuale ed estremamente variabile da persona a persona: c'è chi riesce a reagire in tempi più brevi e chi non riesce a scendere sotto i 30 centesimi di secondo. Si tratta comunque di una caratteristica migliorabile, come ben sa chi vuole cimentarsi in gare di corsa veloce. Gli appassionati, inoltre, sanno benissimo che tempi di reazione troppo rapidi non sono neppure contemplati: nelle gare di atletica, per esempio, un tempo di reazione inferiore ai 10 centesimi di secondo decreta una falsa partenza e la conseguente squalifica dell'atleta. Generalmente si considera eccellente un tempo di reazione che si attesta intorno ai 15 centesimi di secondo. Proviamo dunque a utilizzare questi tempi per valutare le distanze coinvolte nel cammino di un impulso luminoso.

Sappiamo infatti che anche per la luce vale la relazione $s = c t$, nella quale s indica lo spazio percorso, t il tempo impiegato e, secondo una convenzione abituale in fisica, c indica la velocità della luce.

Impiegando questa relazione, possiamo dunque risalire alle distanze percorse. Risparmiando al lettore il calcolo, possiamo ad esempio ottenere che in un tempo di 0,20 s (dunque 20 centesimi di secondo) la luce percorre circa 60 mila km (per l'esattezza, 59958,49 km), mentre in un tempo di 0,15 s (15 centesimi di secondo) lo spazio percorso dalla luce ammonta a quasi 45 mila km (precisamente a 44968,86 km).

Questo significa che, con le distanze suggerite da Galileo per il suo esperimento, i tempi che voleva misurare (cioè quelli relativi al cammino dell'impulso luminoso) erano incredibilmente più esigui di quelli imposti dalla reazione umana. Per valutare ancor meglio l'abisso che li separa, proviamo a fare un ulteriore semplice calcolo. Immaginiamo che un osservatore particolarmente addestrato abbia un tempo di reazione, davvero eccellente, di 13 centesimi di secondo. Immaginiamo anche – con la fantasia tutto è possibile – di aver disposto un sistema di specchi che permette all'impulso di luce di compiere il giro completo del nostro pianeta (un percorso che, misurato all'equatore, ammonta a

circa 40075 km) e, quando tutto è pronto, diamo il via all'impulso di luce.

Ebbene: nello stesso tempo che occorre all'osservatore per reagire all'evento, l'impulso luminoso riesce a completare l'intero giro del pianeta. Infatti, possiamo verificare che per percorrere i 40075 km dell'Equatore la luce impiega solamente 0,1337 secondi.

Visto che la calcolatrice è ancora accesa, proviamo a ripercorrere anche l'esperimento e i calcoli di Fizeau. Supponiamo dunque che la ruota abbia N denti (e altrettante tacche, ovviamente): questo comporta che i denti (come gli spazi vuoti) sono separati da un angolo, espresso in radianti, pari a $\theta = 2\pi / N$.

Sappiamo che, trovata la strada libera, per effettuare il percorso di andata e ritorno da Suresnes a Montmartre l'impulso di luce impiegherà un tempo pari a $t = 2d / c$ (dove si è indicata con d la distanza tra le due località e con c la velocità della luce).

Affinché l'osservatore possa percepire l'impulso di luce sarà necessario che la rotazione della ruota dentata abbia permesso alla luce di transitare per la tacca adiacente. Questo avviene se la velocità angolare della ruota ha un valore di $\omega = \theta / t$ vale a dire (effettuando un semplice passaggio algebrico) $\omega = \pi c / Nd$.

Indicando con n la frequenza di rotazione della ruota (cioè il numero di giri che compie al secondo) e ricordando che il legame tra n e ω è $\omega = 2\pi n$, otteniamo che per osservare l'impulso luminoso si dovrà verificare che $2\pi n = \pi c / Nd$.

Risolviendo rispetto a c possiamo ottenere che $c = 2 n N d$.

Ora si tratta di mettere in quest'ultima espressione i dati reali dell'esperimento condotto da Fizeau nel 1849 e fare un semplice calcolo. Tenendo dunque conto che la ruota usata dal francese aveva 720 denti ($N = 720$), la sua rotazione era di 25,2 giri al secondo ($n = 25,2$) e la distanza tra Suresnes e Montmartre era di 8633 m ($d = 8633$), possiamo ottenere anche noi per la velocità della luce il valore di $3,133 \times 10^8$ m/s.

Benché la velocità ottenuta sia circa il 4% più elevata del valore noto attualmente, l'esperimento del 1849 può a pieno titolo essere considerato un'autentica pietra miliare nella storia della scienza. Fizeau ha dunque ben meritato che il suo nome venisse scritto, con quello di altri 71 illustri francesi (soprattutto scienziati), sotto la prima balconata della Tour Eiffel.

Claudio Elidoro si è laureato in Astronomia presso l'Università di Bologna con una tesi riguardante i corpi minori del Sistema solare e si è diplomato al Master in Comunicazione Scientifica presso l'Università di Milano. È insegnante di Matematica in una scuola professionale di Cremona e svolge attività di divulgazione astronomica scrivendo articoli per riviste del settore. Ha curato la prima parte della versione online delle Spigolature Astronomiche. Nel dicembre 2006 il Minor Planet Center ha assegnato il suo nome all'asteroide (43956) Elidoro.