

Quando la velocità della luce divenne finita

Introduzione

Nella definizione di Newton (*Principia*, 1686), la determinazione del tempo non dipende da nessun osservatore: "il tempo assoluto, vero e matematico, in sé e per sua natura scorre uniformemente, senza riferimento ad alcun oggetto esterno". L'analisi einsteiniana del 1905 ha mostrato che il tempo assoluto di Newton presuppone l'esistenza di agenti fisici infinitamente veloci, in contraddizione con il fatto che in natura la velocità della luce (nel vuoto) è insuperabile. [1]

Per questo la verità poetica della commossa descrizione di Garcia Lorca: "Eran le cinque in punto della sera... eran le cinque a tutti gli orologi!" si scontra con una impossibilità fisica. La sincronizzazione assoluta evocata da Lorca richiede infatti segnali orari infinitamente rapidi, e perciò capaci in un balzo di raggiungere, simultaneamente, gli orologi disseminati nello spazio. Segnali che annullerebbero le distanze e la mobilità degli orologi, inducendo una sincronia pantopica, universale.

L'esperienza suggerisce che non esiste questa specie di messaggeri e che è invece assoluta, indipendente dal moto della sorgente e di qualunque osservatore, la velocità della

luce, così che la misura del tempo risulta inesorabilmente relativa.

Fa notare Einstein nella sua Autobiografia scientifica (1948) che della relatività del tempo "ci saremmo resi conto molto prima se la luce, dato l'alto valore della sua velocità, non ci fosse apparsa nell'esperienza quotidiana come il mezzo per asserire la simultaneità assoluta": vale a dire, come un messaggero istantaneo.

Catene causali, che in un attimo connettono punti distanti nello spazio, denotano fantasie di cui il nucleo dimorò a lungo "ancorato nell'inconscio, senza che noi ce ne accorgessimo", prosegue Einstein.

Due osservatori in moto relativo valutano diversamente la durata dell'intervallo temporale fra due eventi, e un semplice esperimento concettuale ci rivelerà direttamente il rapporto tra i tempi misurati dai due osservatori. Il linguaggio matematico richiesto è molto modesto. E, in effetti, una delle caratteristiche più sorprendenti della Relatività einsteiniana è la semplicità del linguaggio matematico.

1 - Se "c" è finita e assoluta, il tempo è relativo

Immaginiamo un treno alla velocità v , costante rispetto ai binari e confrontabile con quella della luce, e.g.: $v = 240.000 \text{ Km/s} = (8/10)c$ (c d'ora in poi designa la velocità costante della luce nel vuoto). Un passeggero S_0 invia un flash da un riflettore fissato al pavimento del vagone verso uno specchio solidale al soffitto (fig. 1a, 1b). Per un osservatore S a terra la luce segue il cammino obliquo ABC (fig. 1c, 1d), che è più lungo del cammino AB-BA (con $A \equiv C$, fig. 1b) misurato da S_0 . Poiché la velocità della luce

è assoluta, eguale per S e S₀, l'orologio in corsa di S₀ registra, tra la partenza e il ritorno del lampo, un tempo minore del corrispondente intervallo che misurano i due orologi a terra, sincronizzati da S.

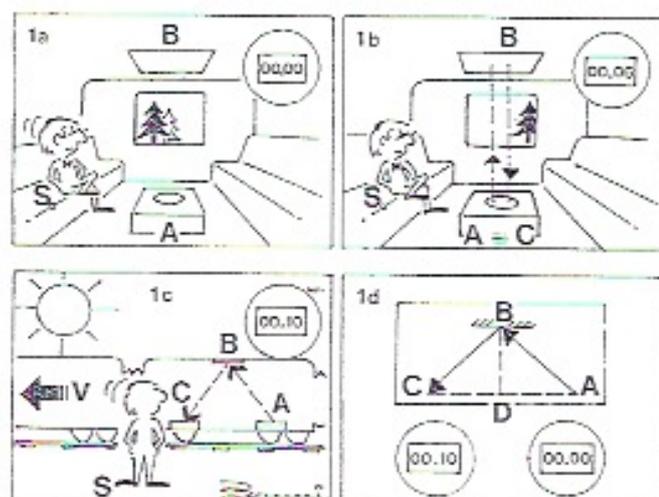


Figura 1

Se T₀ è il tempo luce misurato da S₀, si ha:
 $T_0 = 2BD/c$ (1).

L'altezza BD del vagone si trova con la relazione pitagorica (fig. 1d):

$$BD = \sqrt{AB^2 - AD^2} = (1/2) \sqrt{[(AB + BC)^2 - AC^2]} \quad (2).$$

Infine il cammino della luce misurato da terra è:

$$ABC = AB + BC = c \cdot T \quad (3),$$

dove T è il tempo in cui il treno si sposta tra i due orologi a terra, percorrendo la distanza:

$$AC = v \cdot T \quad (4)$$

Sostituendo (3) e (4) in (2) e confrontando con (1), si ottiene il rapporto:

$$T:T_0 = 1: \sqrt{1 - v^2/c^2} \quad (5)$$

Quando $v = 240.000 \text{ Km/s}$, risulta $1: \sqrt{1 - v^2/c^2} = 10:6$. Perciò il rapporto tra la durata di un ciclo di andata e ritorno della luce misurata sul treno (T₀) e la corrispondente durata misurata a terra (T) è di 6 a 10.

Anche il sistema flash-riflettore-specchio si può considerare un orologio (a luce).

Sembra dunque che gli orologi in moto rallentino il loro ritmo, sotto il controllo di orologi stazionari sincronizzati.

È il punto più controverso della teoria; ma i fisici delle alte energie possono quotidianamente confrontare nel laboratorio la vita di qualche -one ("muone", "pione") instabile, accelerato a velocità prossime a c, con la vita dello stesso -one quando decade in quiete. Le particelle veloci non solo vanno più lontano, ma vivono più a lungo di quelle lente, secondo il rapporto (5), e questo vale anche per i ritmi biologici degli orologi viventi.

È opportuno osservare, riesaminando l'esperimento e in particolare la (5), che il tempo relativistico e il tempo ordinario del senso comune tendono a coincidere ogni qualvolta si può trascurare v in confronto a c.

In quel che segue, vedremo che la relatività del tempo comporta anche la relatività delle distanze; ma prima esamineremo come si fece strada la nozione della finitezza di c, ed anche la concreta possibilità di ritorni all'antico pregiudizio della istantaneità.

2 - I primi modelli dei fenomeni luminosi

Quando fu che la velocità della luce divenne finita?

Per il sapere del senso comune, ancorato nell'inconscio dove "nulla può essere portato a termine, nulla è trascorso o dimenticato" (Freud, *L'interpretazione dei sogni*), questa trasformazione non è mai completamente avvenuta. Quando accendiamo una lampada, o "facciamo

entrare il sole" ci sembra evidente che la luce si trovi immediatamente dappertutto; e il "colpo d'occhio" seguita a scandire per noi la più breve misura del tempo, l'attimo senza spessore né durata. Ordinariamente, vedendo un oggetto distante, non ci preoccupiamo della sua lontananza nel tempo; e quando regoliamo l'orologio sul segnale orario, a buon diritto trascuriamo la nostra distanza dall'emittente. Vedremo che anche i fisici mostrano la stessa convinzione, quando dimenticano a casa il sapere professionale.

A grandi linee, l'ottica del senso comune è stata codificata da Aristotele, come pure la meccanica. "Far luce" significava per lo Stagirita portare istantaneamente alla realtà quei colori che esistono potenzialmente sulla superficie dei corpi. Né egli concepiva la luce come un flusso di particelle, o un irraggiamento, ma piuttosto come uno stato di "chiarezza", che in presenza di particolari corpi infuocati come il sole, rende possibile la percezione dei colori del mondo.

Ma nell'antichità classica il modello più diffuso della visione fu il modello emissivo, nato fra i Pitagorici. In esso si assume che sia l'occhio a emanare raggi visuali, diretti a tastare le cose; la stessa funzione dei raggi ha il bastone per il cieco. Si notano subito le manchevolezze di questa metafora tattile della percezione visiva: gli aspetti fisici della propagazione luminosa risultano rimossi dal mondo esterno e inglobati nell'attività dell'occhio. Ma il modello ha i suoi pregi; si associa naturalmente allo studio della prospettiva, e fu adottato da insigni geometri come Euclide, Erone, Archimede, Tolomeo che, nel concetto di raggio rettilineo, nella legge della riflessione e in una embrionale legge della rifrazione trovarono i fondamenti della scienza dell'ottica geometrica [2].

Un altro motivo di interesse per il modello emissivo è offerto dall'odierno insegnamento

dell'ottica.

Noi apprendiamo spontaneamente, con l'attività dei nostri primi anni, una grande quantità di rudimenti di fisica; ed ogni nuovo bambino finisce per costruirsi uno schema ottico di tipo emissivo, che si conserva nelle stratificazioni della crescita e può sempre essere recuperato come strumento cognitivo; consapevolmente, e più spesso inconsapevolmente. E accade che un giovane studente si ponga l'imbarazzante quesito: "Se la luce va così dannatamente forte, come faccio io a vederla?" ("con i miei raggi visivi", è sottinteso); e che sostenga di poter "vedere al buio" il televisore per la sola virtù dell'occhio, indipendentemente dalla luminescenza dello schermo [3].

Noi non ci scandalizzeremo per tanto naturale ego-centrismo, riconoscendo la riedizione di antiche teorie, molte volte studiate con il dovuto rispetto nella storia del pensiero. Si tratta di corrispondenze tra storia e psicogenesi assai estese e significative, come si mostra nel lavoro [4].

La sopravvivenza del modello pitagorico è certificata, nella iconografia dei fumetti, dalla raffigurazione dell'occhio illusionistico di Mandrake o della supervista laser di Superman. Ma è il dizionario ad attestare nel modo più convincente che l'occhio, organo in sé telericettore, è vissuto alternativamente come emettitore. Il linguaggio ordinario pullula di metafore, che una parte inconscia di noi si ostina a prendere alla lettera, e che descrivono l'attività proiettiva dell'occhio (e del mal-occhio): lo sguardo penetra, fulmina, *esprime* gli affetti universalmente compresi [*ex-primere*, spremere]. specularmente, gli occhi introiettano avidamente gli oggetti del desiderio, divorano, seducono [*se-ducere*, portar via], si accattivano il mondo [*captivus*, prigioniero]. Muovendo le finestre degli occhi, il bambino può cancellare il mondo e ricrearlo, con illusoria onnipotenza; e

ancora al gioco del nascondino “vedere” equivale a “prendere”. Il principio di realtà impone a ciascuno di ridimensionare il mondo magico e poetico della visione, riconoscendo infine che gli occhi possono sì cogliere le percezioni, ma non gli oggetti, che pure sembrano offrirsi nella loro materialità. E però, sotto l’impulso della fantasia, talvolta l’illusione voyeuristica torna a balenare intatta dal nostro profondo.

Fra gli antichi esisteva un modello ricettivo della visione, duale di quello emissivo. Questo modello fu proprio dei pensatori atomisti, per i quali la visione era eccitata da minuscole copie dei corpi, i “simulacri”, instancabili nel lasciare i corpi e infilarsi negli occhi. Fino a ferirli, come i dardi del sole: così si legge in Lucrezio. Lucrezio denomina i simulacri di volta in volta *effigiae*, *imagines*, *figurae*, *membranae*, *cortex*, *species*. Questa immaginosità del poeta denuncia altresì l’indefinizione del concetto fisico significato, e i molti problemi riguardanti il moto e la conformazione dei simulacri in rapporto all’occhio.

Da quel che si è visto fin qui, si può già intuire che l’apprendimento dell’ottica elementare è meno semplice e lineare di quanto insinuano solitamente i testi di studio. Perché persiste, negli allievi come pure nei docenti, una inconsapevole mescolanza fra il sapere spontaneo, che è primo nella storia e nella psicogenesi, e il sapere istituito [5].

3 - La propagazione istantanea

Non ha molto senso interrogarsi sulla finitezza o meno della velocità della luce, quando non sia ancora operante la distinzione tra gli aspetti soggettivi, psicofisiologici, e gli aspetti fisici dei fenomeni luminosi.

Tenendo ben presente questa riserva, si può dire che gli antichi tendevano a considerare istantanea la propagazione, interpretando l’esperienza nel modo più immediato. Per il

modello emissivo, il pregiudizio poté essere razionalizzato argomentando che all’occhio il mondo appare tutto in una volta, e perciò i raggi devono trovarsi simultaneamente ovunque.

Questa inferenza non si applica al modello ricettivo; e infatti la scuola araba degli atomisti Alkindi ed Alhazen sostenne vigorosamente la finitezza della propagazione delle “scorze” materiali emesse dai corpi in direzione dell’occhio. Agli atomisti arabi sembrava infatti contraddittorio il moto istantaneo di un corpuscolo, che così procedendo finirebbe per occupare simultaneamente tutte le posizioni sulla sua traiettoria, sopra una estensione spaziale arbitrariamente grande. La scuola di Alkindi rappresentò una eccezione: solitamente anche per gli antichi atomisti fu naturale considerare la pan-oramica della visione rapida quando si vuole.

Le opere di Euclide e degli altri geometri furono tradotte in latino nel XII secolo, assicurando ancora una certa prevalenza al modello emissivo. I medioevali distinsero accuratamente l’aspetto soggettivo della visione, che chiamarono “lux”, dell’agente fisico, detto “lumen” (nel volgare di Dante, rispettivamente “luce” e “lume”, distinzione conservata fino a Galileo e oltre).

Ma avvenne che ci si occupasse separatamente dell’uno o dell’altro aspetto, scindendo fisica e psico-filosofia, ricomposte poi in una “metafisica della luce” suggestiva ma largamente arbitraria (Roberto Grossatesta).

Agli inizi dell’età moderna emerse una concezione ben più solida dei fenomeni luminosi, con i contributi notevoli di F. Maurolico (1494-1570), G.B. Della Porta (1595-1651), Giovanni Keplero (1571-1638).

Il *lumen*, quale che fosse la sua natura, risultava emesso dai corpi in linea retta e in tutte le direzioni, e andava incontro a diffusione, riflessione, rifrazione, assorbimento; concentrato sulla retina, stimolava il nervo ottico e la

visione.

E tra i sostenitori della propagazione istantanea, che erano sempre stati una qualificata maggioranza, si annoveravano ancora le eminenti personalità di Keplero e Cartesio, contemporanei di Galileo.

4 - Galileo e la luce

Il problema della velocità della luce fu posto nei suoi termini propriamente fisici nei *Discorsi*, ultima e massima opera di Galileo (1638).

Il cannocchiale galileiano potrebbe far pensare che lo scienziato possedesse estese cognizioni ottiche; ma non è così. La spiegazione del funzionamento delle lenti e del cannocchiale secondo l'ottica geometrica si trova negli scritti di Keplero; né Galileo si interessò mai a fondo a quei teoremi.

Egli procedette con il cannocchiale in modo radicalmente empirico, per prove ed errori. Nondimeno, la fiducia che riponeva nella fedeltà dello strumento con cui esplorava i cieli, contestata sulle prime da molti avversari, era giustificata da ripetute e minuziose calibrazioni sopra oggetti noti. E, più ancora, dal principio epistemologico copernicano, per cui il dominio delle leggi naturali deve potersi estendere dalla terra a tutti i corpi celesti.

L'indagine sulla essenza della luce, "di che sono stato sempre in tenebre", come scriveva già cieco a Fortunio Liceti, era stata per lo scienziato pisano "disperata cognizione", ricerca senza speranza. Ma il suo contrastato rapporto con luce e visione non gli aveva impedito di definire la questione della velocità del lume, affidandola al verdetto della sensata esperienza.

Il modus operandi è così prescritto da Galileo-Salviati (*Discorsi*, p. 52): "Voglio che due pigliano un lume per uno, il quale tenendolo dentro lanterna o altro ricetto, possino andar

coprendo e scoprendo, con l'interposizione della mano, alla vista del compagno".

Dopo aver fatto pratica a piccole distanze, i due potranno allontanarsi di due o tre miglia — fino a otto o dieci, con il cannocchiale — per costatare se esiste un ritardo "tra l'andata di un lume e il ritorno dell'altro".

Se "l'espansione del lume" non è istantanea, e neppure troppo rapida, quel ritardo può risultare sensibile. Salviati asserisce di aver fatto esperienza sulla distanza di nemmeno un miglio (= 1.5 km) e di non aver potuto accertare se "la comparsa del lume opposto sia istantanea"; e conclude che "se non istantanea, velocissima e direi momentanea è ella" (dove *momentum* designa l'atomo di tempo).

Dall'esperimento, sia stato o no realmente eseguito, si deduce che il ritardo passa inosservato quando: $c > 2 \times 1.5 / 0.1 = 30$ km/s, valutando ottimisticamente la risoluzione temporale in 0.1 secondi (come per il celebre esperimento con il piano inclinato nei *Discorsi*, p. 179: "un decimo di battuta di polso").

E' certo che la prova fu eseguita dagli accademici fiorentini del Cimento, che nei loro *Saggi di Naturali Esperienze* (Firenze, 1663) annotarono: "La luce corre uno spazio di sei miglia senza tempo osservabile"; e questo porta il confine inferiore di c a 90 km/s, trecento volte la velocità del suono nell'aria, che vale circa 0.3 km/s.

Cartesio, postillando i *Discorsi*, ritenne superflua la proposta galileiana. Se si suppone che durante un'eclissi lunare, la luce debba coprire la distanza Terra-Luna in un'ora, (alla velocità di circa 100 km/s, che sfuggirebbe al dispositivo galileiano) la Luna si oscurerebbe un'ora dopo l'eclissi geometrica, quando Sole, Terra e Luna risultano allineati. L'eclisse ottica sarebbe osservata sulla Terra con un'altra ora di ritardo, e intanto l'angolo Sole-Terra-Luna sarebbe aumentato oltre i trenta gradi: ma la

luna si è sempre occultata sull'eclittica in opposizione al sole.

Cartesio escludeva comunque velocità finite; cosicché Huyghens, che della luce aveva una concezione ondulatoria e finita, seppe ritorcere l'argomento: la radiazione poteva ben percorrere la distanza Terra-Luna in un minuto, anziché in un'ora, e in questo caso nessun effetto della propagazione finita sarebbe stata osservabile. La velocità della luce saliva in questa ipotesi ad almeno ventimila volte quella del suono e parve "incredibile" allo stesso Huyghens (lettera a Römer, [7]).

5 - Un orologio Gioviare per la misura di c .

Nel gennaio 1610, Galileo aveva scoperto quattro delle sedici lune di Giove, che chiamò pianeti Medicei; né a lui poteva sfuggire l'importanza delle effemeridi di quegli astri per la determinazione della longitudine, nelle carte e soprattutto in mare. I contatti con gli Spagnoli prima, e poi con gli Olandesi, non andarono a buon fine; come del resto la costruzione dell'orologio a pendolo, che avrebbe permesso di trasportare per mare l'ora del luogo di riferimento della longitudine. A questo provvide Huyghens, di lì a poco; e le tavole delle osservazioni galileiane furono rielaborate dall'eminente astronomo nizzardo Gian Domenico Cassini.

Nel 1699 Cassini fu chiamato a dirigere l'Osservatorio parigino, dove due anni dopo lo raggiunse il giovane danese Olaus Römer, anche lui interessato ai satelliti di Giove.

Il primo dei satelliti, Io (gli altri sono Europa, Ganimede, e Callisto) aveva mostrato delle irregolarità nella successione delle eclissi; nuove osservazioni permisero al danese di predire che il 16 novembre 1676 l'emersione del pianeta dall'ombra di Giove sarebbe avvenuta con dieci minuti di anticipo sulle previsioni correnti.

E' quel che gli astronomi parigini poterono controllare, ed è la prima prova pubblica della velocità finita della luce, che Römer consegnò ad una nitida memoria per l'Accademia francese delle Scienze [6], [7]; da qui ha inizio la nostra attuale concezione del tempo.

Nel diagramma römeriano di fig. 2 Giove, il cui periodo è di 12 anni, è supposto in quiete rispetto al Sole. Il periodo T_I di rivoluzione di Io è costante, rispetto a Giove, ma varia quando è misurato dalla Terra.

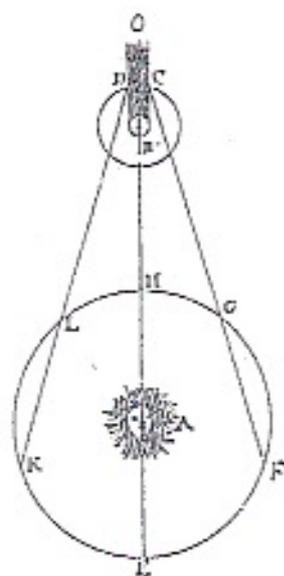


Figura 2

Riproduzione del diagramma di Römer. Il Sole (A) illumina Giove (B), proiettando una lunga ombra O. Io entra nell'ombra in C ed emerge in D. La Terra è in E, F, G, H, L, K, a diverse distanze da Giove.

Durante la metà dell'anno in cui questa aumenta la sua distanza da Giove (H - L - K - E), anche l'intervallo tra due eclissi consecutive di Io diviene maggiore di T_I . Infatti ad ogni nuova occultazione la luce, *se viaggia a velocità finita*, impiega un tempo crescente per portare alla Terra il messaggio dell'evento. Reciprocamente, il periodo diminuisce quando la Terra si avvicina a Giove. In un anno ritardi e anticipi nelle eclissi si compensano, cosicché T_I è misurato dalla media annuale delle determinazio-

ni terrestri (si ottiene: $T_I = 42h\ 29'$).

Nel tempo T del trasferimento della Terra dal punto H ("opposizione") al punto E ("congiunzione"), la distanza tra la Terra e Giove aumenta tanto quanto si estende il diametro HE della orbita terrestre. E se N è il numero delle rivoluzioni di Io in questa metà dell'anno, la differenza: $\tau = T - NT_I$ misura il tempo necessario alla luce a coprire il diametro HE; per convincersene, basta considerare come un'unica eclisse di durata $T_I = NT_I$ la successione delle N eclissi, con inizio in H e termine in E.

La velocità della luce è perciò: $c = HE/\tau$. Con i valori aggiornati: $HE = 2,98 \times 10^8$ km; $\tau = 990$ S, si calcola: $c = 3,00 \times 10^5$ km/s, valore esatto entro una parte su mille. Valore che è di circa un milione di volte la velocità del suono, molto più di quanto Huyghens avesse osato immaginare. E nasce il problema: quali sono le straordinarie caratteristiche meccaniche del mezzo che propaga la luce a tale velocità, posto che esista? In piena ascesa del meccanicismo, si vede già una piccola nube sul suo programma.

Römer ottenne dall'osservazione $\tau = 1320$ s, e conosceva anche un accurato valore del diametro HE, ottenuto da Cassini ed altri qualche anno prima. Ma non si soffermò a dedurre il valore di c . Il suo compito primario era di ottenere il consenso della comunità scientifica sulla finitezza di c ; né mancavano gli oppositori, gli indispensabili avvocati del diavolo. Cassini fu in prima fila in Francia, insieme con i Cartesiani, al cui sistema del mondo veniva inferto un duro colpo; in Inghilterra svolse con impegno quel ruolo Robert Hooke, il rivale di Newton.

Newton invece contribuì a migliorare il valore di 210.000 km/s, che Huyghens aveva dedotto dai dati di Römer, portandolo a 243.000 km/s.

Le successive misurazioni terrestri di Fizeau (1850) e Cornu, con la ruota dentata, e di Foucault, con lo specchio girevole, senza far torto

a Cartesio si possono leggere come realizzazioni aggiornate dello schema galileiano per la misura del tempo di volo della luce.

Le misurazioni hanno seguito a succedersi, fino a produrre un valore di c con dieci significative. Il 20 ottobre 1983, il Comitato Internazionale per i Pesi e Misure ha definito la velocità della luce con la convenzione [*cum-venire*, venire insieme]:

$$c \equiv 299792458 \text{ m/s}$$

Il secondo resta l'unità di tempo (definito in rapporto alla frequenza della radiazione del Cesio), e così il metro è stato ridefinito, in subordine, come la lunghezza del cammino percorso nel vuoto dalla luce, nel tempo di $1/(299792458)$ di secondo.

L'invarianza di c , da tutti accettata, permette di fissarne convenzionalmente il valore, mettendo fine a misurazioni sempre più laboriose, e di istituire un termine naturale di confronto per tutte le velocità fisiche.

6 - Una svista collettiva

La relatività della simultaneità porta con sé anche la relatività delle misure di lunghezza.

Riprendiamo il treno ad altissima velocità v del paragrafo 1, e prepariamoci a misurare dal treno la lunghezza della pensilina di una stazione, che ci viene incontro con una velocità che è anch'essa v , ma in senso opposto alla marcia del treno.

Se T_0 è il tempo in cui tutta la pensilina sfilava davanti al nostro orologio, diremo che la sua lunghezza è, per definizione:

$$L \equiv v \cdot T_0 \quad (1).$$

L'osservatore a terra ha la pensilina in quiete, e può misurarne come al solito la lunghezza L_0 con una fettuccia metrica. Se due

orologi sincronizzati e posti agli estremi della pensilina registrano il tempo di passaggio di un punto qualsiasi del treno (e.g.: la parte anteriore) sull'estensione L_0 , si ha:

$$L_0 = v \cdot T \quad (2).$$

Ricordando il rapporto di dilatazione temporale $T: T_0 = 1: \sqrt{1 - v^2/c^2}$ (3), dividendo (1) con (2), e confrontando con (3), segue $L: L_0 = T_0: T = \sqrt{1 - v^2/c^2}: 1$. Quando $v = 240.000 \text{ km/s}$, $L:L_0 = \sqrt{1 - v^2/c^2} = 0.6$, e la lunghezza della pensilina misurata dal treno in corsa si riduce ai 6/10 della ordinaria lunghezza in quiete.

E' il fenomeno della "contrazione di Lorentz": la misura della lunghezza di un corpo in movimento risulta accorciata, secondo il fattore $\sqrt{1 - v^2/c^2}$, nella direzione del moto.

Nel 1959 destò non poca sorpresa e qualche imbarazzo un articolo di J. Terrell in cui si osserva che "da quando Einstein ha presentato la sua teoria della relatività (1905), sembra che si sia generalmente creduto che la contrazione di Lorentz fosse visibile all'occhio" [8], [9].

O, se si vuole, fotografabile; si tratta di un singolare lapsus collettivo che non risparmiò neppure il creatore della teoria della relatività. Abbastanza sorprendentemente, venne dimenticato il fatto che gli impulsi luminosi, che dalle diverse zone dell'oggetto-sorgente concorrono alla formazione dell'immagine, devono raggiungere simultaneamente il ricevitore fotosensibile (occhio od obiettivo).

Pertanto non può essere simultaneo l'invio di luce dalle singole parti della sorgente se non, eccezionalmente, quando queste, all'atto dell'emissione, sono equidistanti dal ricevitore: e solo allora è visibile la contrazione di Lorentz (razzo C2 in fig. 3). In generale, la simultaneità dell'emissione equivale alla simultaneità nella ricezione solo quando si trascura il *tempo di volo degli impulsi luminosi*.

Quindi, se l'oggetto è in moto, se ne riceve una immagine distorta, perché l'oggetto si trovava in posizioni diverse quando le diverse sue parti hanno emesso la luce che compare nell'immagine.

La situazione è illustrata in fig. 3: sulla riga A si trovano le immagini non distorte di un'astronave viste da O, supponendo $c = \infty$, come vuole il senso comune. Sulla riga B sono le immagini derivanti dalla sola contrazione di Lorentz, secondo l'erronea aspettativa 1905-1960. Sulla riga C si trovano le immagini corrette, che Duguay e Mattick (1971) hanno verificato con la fotografia ultrarapida.

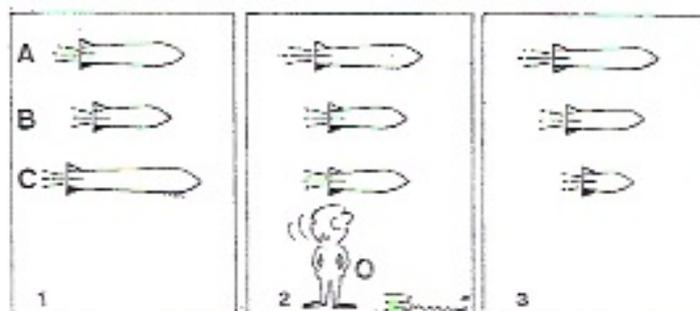


Figura 3

Immagini successive di un'astronave osservata in O.

In C1 è visibile l'allungamento che si genera per l'invio anticipato di luce dalla coda prima che dalla testa del veicolo spaziale: è la condizione perché i due segnali possano giungere insieme in O. Questo allungamento sovracompensa la contrazione di Lorentz; in C3 invece i due effetti cospirano, per la partenza anticipata della luce dalla testa, che ora dista da O più della coda del veicolo. La contrazione di Lorentz è fortemente rinforzata dall'effetto rømeriano della propagazione finita. Eccezionalmente, in C2 opera la sola contrazione lorentziana, per la simmetria delle condizioni di osservazione e in questa posizione limite si può effettivamente fotografare l'astronave Lorentz - contratta. E

quel che il solo Lorentz correttamente sostenne in un lavoro del 1914, che però sembra sfuggito all'attenzione degli interessati [8], [9].

7 - Conclusione: qualche implicazione pedagogica

La teoria della relatività schiudeva tali prospettive che fu accolta piuttosto rapidamente, per lo meno da un'élite di fisici. Ma ovviamente ha richiesto, e richiede ad ogni nuovo studioso, un lungo lavoro di elaborazione, perché il sapere del senso comune è incompatibile con il paradigma relativistico tutte le volte che la velocità della luce non si può considerare praticamente infinita. Tanto che lo stesso Lorentz oppose al postulato einsteiniano "la nostra capacità di immaginare velocità arbitrariamente grandi", giudicando "alquanto temeraria l'asserzione che non sia mai possibile superare la velocità della luce. Essa contiene una restrizione ipotetica di ciò che è accessibile al pensiero" (del senso comune, si deve intendere).

Il sapere del senso comune merita tutto il nostro rispetto: è scienza di ieri, come la fisica aristotelica; ma è anche scienza fatta in casa veicolata dal linguaggio ordinario. Ridistillata dai media, e surrettiziamente, dall'insegnamento scolastico, muove efficacemente la nostra prassi di tutti i giorni.

Il problema della formazione scientifica sta nel trovare i modi di allentare la presa del sapere quotidiano, per far posto a una reciproca e consapevole delimitazione tra le diverse cornici di riferimento della conoscenza.

La consapevolezza dei presupposti adottati è la sola che permetta di determinarne il dominio di validità, evitando la giustapposizione di paradigmi incommensurabili. All'origine di contraddizioni che possono sembrare insolubili e permangono per tempi talvolta insostenibili, e di taluni insuccessi scolastici, è proprio l'intreccio di riferimenti eterogenei e incompatibili.

li.

Il fisico che pretende di osservare con i suoi occhi la contrazione di Lorentz sta inconsapevolmente mescolando postulati relativistici con il millenario pregiudizio sulla propagazione istantanea della luce.

E l'errore condiviso dei fisici ci dice anche un'altra cosa: che il conflitto delle interpretazioni riguardante la natura della contrazione non era stato sufficientemente elaborato, e nella comunità era subentrata una collusione inconscia, volta proprio a scansare il conflitto.

Come ha documentato L. Viennot [10], è quel che accade quando un insieme di docenti si trova pressoché unanime nel promuovere insieme con gli allievi la banalizzazione e l'evitamento dei conflitti tra sapere spontaneo e sapere istituito. Conflitti irrisolti per gli stessi docenti, e che andrebbero invece gestiti a largo raggio, su tutto il campo dei contenuti di conoscenza trasmessi.

L'insegnamento sarebbe così caratterizzata da una ricerca che non è solo disciplinare, ma è sostanziata da incursioni nel campo della storia e della psicologia genetica ricercando una consapevole epistemologia. Consapevole, perché tutti abbiamo una epistemologia, più o meno coerente; ma che non sempre riconosciamo, come il gentiluomo di Molière. La rilevanza dell'epistemologia è nel fatto che la trasmissione di contenuti di conoscenza avulsi dai metodi del conoscere è intrinsecamente contraddittoria: *ora io ti dico una cosa che tu non potrai mai sapere.*

A nessun bambino, curioso di cucina, dovrebbe essere mai detto: "mangia e taci": le cose buone comportano le ricette per prepararle.

Ringraziamenti

Le illustrazioni del testo si devono alla perizia del signor Angelo Bruni, che ringrazio

per la generosa collaborazione.

Desidero ancora ringraziare la signora Fiorella Luciani per la paziente interpretazione del manoscritto.

Bibliografia

[1] M. Guidone, *La barriera della luce - Atti del VII Cong. Naz. di Storia della Fisica*, a cura di F. Bevilacqua, Napoli, 1987.

[2] V. Ronchi, *Storia dell'Ottica*, Laterza, 1983.

[3] D.M. Watts, *Students preconceptions of light*, *Phys. Education*, 20, 183, 1985.

[4] E. Fedeli, M. Guidone, *Osservazioni sulla storia e la psicogenesi delle nozioni cinematiche*, *Atti del IX Cong. Naz. di Storia della Fisica*, a cura

di F. Bevilacqua, Urbino, 1988.

[5] W. Jung, *Le rappresentazioni mentali in Ottica*, *La Fisica nella Scuola*, XIX, 2, 1986.

[6] A. Wroblewski: *De Mora luminis...*, *Am. J. Phys.* 53, 620, 1985.

[7] M. Francesio ed altri, *De Mora luminis, sive...*, *La Fisica nella Scuola* XII, 3, 1979. Contiene la memoria di Römer e il carteggio Huyghens - Römer.

[8] J. Terrell, *Invisibility of the Lorentz contraction*, *Phys. Rev.*, 57, 9, 1959.

[9] M. Guidone, *L'effetto Terrell*, *Atti del X Cong. Naz. di Storia della Fisica*, a cura di F. Bevilacqua, Cagliari, 1989.

[10] L. Viennot, *Obstacle Epistemologique et Raisonnement en Physique*, C.I.R.A.D.E., Montreal, Sept. 1988.