

# RELATIVISMO ED ETERE DI LORENTZ

FRANCO SELLERI

Università di Bari

## 1. La fisica del buon senso

Le teorie della relatività speciale e generale hanno avuto grande successo nella spiegazione dei fenomeni conosciuti e nella predizione di effetti nuovi e inattesi. Costituiscono dunque importanti avanzate nella nostra conoscenza del mondo e restano per sempre consegnate alla storia delle scienze della natura, come la meccanica di Newton e l'elettromagnetismo di Maxwell. Tuttavia è difficile credere che siano forme di conoscenza finale, non più modificabile. Al contrario, se c'è una lezione da imparare dall'epistemologia (Popper, Lakatos, Kuhn) riguarda proprio la natura provvisoria e migliorabile delle basi delle teorie fisiche del Novecento.

Nel 1949, rispondendo all'amico M. Solovine che gli aveva inviato una affettuosa lettera di auguri per il settantesimo compleanno Einstein aveva scritto: «Tu immagini che io guardi all'indietro sul lavoro della mia vita con calma soddisfazione. Ma da vicino la cosa appare ben diversa. Non c'è un solo concetto di cui io sia convinto che resisterà stabilmente». Einstein non nascondeva la probabile transitorietà delle sue creazioni. Il suo ultimo articolo (1955) raggiunse l'editore dopo la notizia del decesso. Era una breve prefazione a una raccolta di articoli di autori italiani scritti per celebrare il 50° anniversario della relatività. L'articolo terminava affermando che la fisica era ben lontana dal possedere una base concettuale in qualche modo affidabile. Si può parlare di solenne dichiarazione di fallimento, ma si resta ammirati dalle dimensioni non solo scientifiche, ma anche etiche del grande scienziato, che dopo gli sforzi sovrumani di una vita intera per raggiungere le verità più profonde della natura, giunto alla fine, dichiarava ai posteri: «non ce l'ho fatta».

I successi delle teorie relativistiche sono notissimi. La reciproca convertibilità di energia e massa, gli effetti della velocità e della gravitazione sul passo degli orologi, il peso della luce e la precessione del moto dei pianeti danno solo un quadro parziale delle grandi conquiste della fisica einsteiniana. E tuttavia sarebbe sbagliato concludere che ogni confronto delle teorie relativistiche con gli esperimenti si sia invariabilmente concluso con un perfetto accordo fra le due parti. La fisica è un'attività umana e da noi prende il difetto di sbandierare i successi e di nascondere le difficoltà e i fallimenti. Così un grande silenzio ha circondato l'effetto Sagnac (del 1913) per il quale esiste una vera e propria incapacità esplicativa delle due teorie relativistiche, nonostante i tentativi di Langevin, Post, Landau e Lifshitz. Inoltre ci sono le mezze spiegazioni dell'aberrazione della luce stellare e del paradosso dei gemelli, fenomeni per i quali il formalismo matematico della teoria riproduce le osservazioni, al prezzo però di distorcere i significati al di là del lecito.

Non bisognerebbe mai dimenticare che dietro alle equazioni di una teoria c'è una enorme struttura qualitativa fatta di risultati empirici, generalizzazioni, ipotesi, scelte filosofiche, condizionamenti storici, gusti personali, convenienze. Quando si prende atto di questa realtà confrontandola con il ritrattino della fisica tramandato dall'empirismo logico, che vale meno di una caricatura, si comprende facilmente che la relatività, accanto ai suoi innegabili successi, non solo può presentare punti deboli, ma può anche sopravvivere ad alcuni suoi fallimenti. La correttezza del formalismo matematico non è sufficiente a omologare una struttura scientifica come coerente e non contraddittoria. Aggiungo che neanche centinaia di fisici incondizionatamente favorevoli a una data teoria costituiscono una garanzia sufficiente dell'assenza di problemi irrisolti, perché quasi sempre i pensieri vengono orientati fin dagli studi universitari verso un'accettazione acritica della teoria dominante. Razonalità e consenso sono due cose diverse anche nel mondo della ricerca.

In realtà le due teorie relativistiche sono piene zeppe di paradossi. Proviamo a fare un elenco, senza pretese di completezza: la velocità di un segnale luminoso che la teoria considera identica per gli osservatori immobili e per quelli che lo rincorrono con velocità  $0.99c$ ; l'idea che la simultaneità di eventi spazialmente separati non esista in natura e vada perciò stabilita da una convenzione umana; la relatività della contemporaneità secondo cui due eventi simultanei per un osservatore inerziale in generale non sono più tali per un altro; la contrazione degli oggetti in moto e il ritardo degli orologi in moto, fenomeni per i quali la teoria non sa fornire una descrizione in termini di oggettività; l'invecchiamento asimmetrico di due gemelli in moto relativo in una teoria che fa del relativismo la sua bandiera; l'universo iperdeterministico della relatività che fissa nei minimi dettagli il futuro di ogni osservatore; il contrasto fra la trasformabilità reciproca di massa ed energia e l'ideologia del relativismo che dichiara perfettamente equivalenti tutti gli osservatori inerziali così privando l'energia della sua piena fisicità; la presenza di una discontinuità fra i sistemi di riferimento inerziali e quelli dotati di bassissima accelerazione; le propagazioni dal futuro verso il passato generate nella teoria dalla possibile esistenza di segnali superluminali.

Come è possibile che autorevoli esperti neghino che questi siano veramente dei paradossi? La risposta non è difficile e ruota tutta attorno al concetto di «buon senso». Questa del buon senso è un'espressione traducibile senza difficoltà in ogni lingua neolatina, ma assente in altre lingue. Gli inglesi usano «common sense» che però è una cosa completamente diversa perché il senso comune è quello della maggioranza degli uomini e nelle cose della scienza la storia insegna che la maggioranza ha raramente ragione. Da noi per fortuna il «buon senso» si collega alle «sense esperienze» di galileiana memoria. Bene, se il buon senso ci dice che una certa predizione di una teoria è irragionevole vi sono due possibilità. La prima è che il buon senso ci inganni, la seconda è che nella teoria si annidino ipotesi contro natura che danno un significato fuorviante alle sue predizioni. È noto che molti fisici del Novecento hanno seguito la moda di dichiarare il buon senso obsoleto, ma la seconda strada è facilmente percorribile e permette di eliminare i paradossi della relatività.

Naturalmente non è affatto ovvio a priori che si possano eliminare i paradossi preservando i successi della teoria; non è ovvio a priori ma è un fatto che la teoria

descritta in questo articolo, basata sulle «trasformazioni inerziali», non solo spiega tutto ciò che spiega la relatività, ma registra successi anche là dove quest'ultima non arriva. Sa spiegare l'effetto Sagnac, per esempio.

## 2. La velocità della luce è considerata convenzionale

Einstein affermò in modo esplicito la natura convenzionale del postulato di invarianza della velocità della luce. Nel suo fondamentale articolo del 1905 si legge: «Finora abbiamo definito solo un “tempo  $A$ ” e un “tempo  $B$ ”. Non abbiamo definito un “tempo” comune per  $A$  e  $B$ , perché quest'ultimo non può affatto essere definito a meno che non stabiliamo *per definizione* che il “tempo” richiesto dalla luce per viaggiare da  $A$  a  $B$  eguagli il “tempo” richiesto per viaggiare da  $B$  ad  $A$ » [AM, p. 136]. Questa frase è notevole per due motivi che tradiscono le simpatie positivistiche del fondatore della relatività. In primo luogo perché accetta l'idea di Poincaré che la velocità della luce non sia misurabile e possa dunque solo essere definita; in secondo luogo perché la parola tempo, che appare cinque volte, è sempre fra virgolette quasi che fosse un concetto pericoloso da prendere con le molle. La convenzionalità della velocità della luce fu riaffermata nel 1916, a proposito del punto mediano  $M$  di un segmento  $AB$  gli estremi del quale sono colpiti «simultaneamente» da due fulmini: «Il fatto che la luce impieghi lo stesso tempo per percorrere  $AM$  e  $BM$  è solo una convenzione arbitrariamente stabilita per ottenere una definizione di simultaneità, e non un'ipotesi sulla natura della luce sotto l'aspetto fisico» [RD, p. 31].

La sincronizzazione relativistica viene realizzata al modo seguente. Siano dati due orologi identici nei punti  $A$  e  $B$ , distanti  $l$  l'uno dall'altro. Un impulso di luce parte da  $A$  verso  $B$  quando l'orologio in  $A$  segna il tempo zero; l'orologio in  $B$  viene regolato sul tempo  $l/c$  all'arrivo dell'impulso. Dal metodo di sincronizzazione al concetto di simultaneità relativistica il passo è breve. Due eventi istantanei e puntiformi che hanno luogo in  $A$  e  $B$  negli istanti  $t_A$  e  $t_B$  (segnati dai rispettivi orologi) sono definiti simultanei se  $t_A = t_B$ . Naturalmente un bravo positivista non si chiede se i due eventi siano «davvero» simultanei: per lui non ha senso pensare a un'oggettività del tempo e ciò che conta sono solo le manipolazioni umane.

Pertanto la nozione di simultaneità relativistica dipende da decisioni umane e non da proprietà della natura. Non funziona un altro concepibile metodo per rendere sincroni due orologi lontani: accordarli quando sono vicini e poi portarli nei punti desiderati. Il fatto stesso di dar loro una velocità altera il movimento delle lancette nel quadrante, così come altera qualsiasi movimento periodico si pensi di usare per misurare il tempo. Così Poincaré e Einstein decisero che la «sincronizzazione» poteva essere fatta seguendo criteri arbitrari purché capaci di portare a un'identificazione non ambigua degli eventi. L'autore della relatività scelse la via più semplice assumendo che tutti gli orologi vadano sincronizzati in modo che la velocità della luce abbia lo stesso valore in ogni direzione di ogni sistema inerziale.

Qui ci interessa sottolineare che la convenzionalità della sincronizzazione relativistica degli orologi – e quindi della nozione di simultaneità relativistica di eventi lontani – apre prospettive molto interessanti. Vediamo perché. In generale il tem-

po sarà diverso in due diversi sistemi di riferimento inerziali  $S_0(x_0, y_0, z_0, t_0)$  e  $S(x, y, z, t)$ , e il «ritardo»  $t - t_0$  (positivo, nullo o negativo) di  $S$  su  $S_0$  dipenderà non solo dal tempo  $t_0$ , ma anche dal punto geometrico in cui ci si mette. Ciò accade in TRS, dato che la trasformazione di Lorentz del tempo contiene anche una coordinata spaziale. In altre parole (e più in generale) il tempo  $t$  mostrato da un orologio di  $S$  può dipendere anche dalle coordinate  $x, y, z$  del punto in cui l'orologio è piazzato, almeno finché non si trovino ragioni per il contrario (io le ho trovate, vedi oltre).

Discutendo questo problema H. Reichenbach (1925) esaminò la situazione seguente: nel sistema  $S$  un lampo di luce parte dal punto  $A$  al tempo  $t_1$ , viene riflesso all'indietro da uno specchio nel punto  $B$  al tempo  $t_2$  e infine torna in  $A$  al tempo  $t_3$ . Naturalmente i tempi  $t_1$  e  $t_3$  sono segnati da un orologio vicino ad  $A$  mentre  $t_2$  è segnato da un altro orologio vicino a  $B$ . Il problema è come sincronizzare i due orologi. Nella TRS si assume che la velocità della luce nel percorso di andata  $A - B$  sia la stessa che in quello di andata e ritorno  $B - A - B$ , per cui si ha

$$t_2 - t_1 = \frac{1}{2} (t_3 - t_1) \quad (1)$$

La (1) definisce il tempo  $t_2$  dell'orologio  $B$  in funzione dei tempi  $t_1$  e  $t_3$  dell'orologio  $A$ . È proprio la scelta (1) che determina la presenza di  $x$  nella trasformazione di Lorentz del tempo. Reichenbach commentò che la (1) è essenziale per la TRS, ma non è necessaria. Una regola diversa avente la forma

$$t_2 - t_1 = \varepsilon (t_3 - t_1) \quad (2)$$

con qualunque  $0 < \varepsilon < 1$  sarebbe del tutto adeguata e non potrebbe essere considerata falsa. E aggiunse: «Se la teoria ristretta della relatività preferisce la prima definizione, ossia pone  $\varepsilon$  eguale a  $1/2$ , lo fa per la semplice ragione che questa definizione porta a relazioni più semplici» [HR, p. 150].

Nel 1979 Max Jammer ridiscusse il coefficiente di Reichenbach ribadendo che una delle idee fondamentali su cui si basava l'edificio della relatività era l'aspetto convenzionale della simultaneità di eventi distanti. Poi aggiunse: «La tesi della convenzionalità della simultaneità di sistemi distanti [...] consiste dell'affermazione che non è necessario che il valore numerico di  $\varepsilon$  sia  $1/2$ , ma che può essere un qualsiasi numero dell'intervallo aperto fra 0 e 1, cioè  $0 < \varepsilon < 1$ , senza mai portare ad alcun conflitto con l'esperienza» [TF, p. 205].

Ho dedicato anni di lavoro alla conferma pratica di questa intuizione. La conferma c'è stata, larga ma non totale (vedi più avanti). Comunque c'è un importante spazio logico per valori diversi di  $\varepsilon$ , cioè in ultima analisi per teorie alternative alla TRS! È per questa ragione che dopo un secolo di relativismo si possono aprire le porte a una fisica diversa senza entrare in contrasto con l'enorme mole di risultati sperimentali accumulati finora.

Un tentativo di difendere una qualche oggettività della simultaneità relativistica è stato fatto dal filosofo M. Friedman, ma la sua posizione è molto debole perché basata soltanto sulla semplicità strutturale dello spazio di Minkowski, che nessuno nega. La vera questione è di vedere se con qualche leggera complicazione si possa ottenere una descrizione migliore della realtà. Si dimostra che è proprio così e che

la natura convenzionale della simultaneità relativistica rende possibile un'altra teoria che si accorda con gli esperimenti anche meglio della TRS.

### 3. Due importanti fatti empirici

La Terra si muove nello spazio con una velocità di 2-300 km/sec (circa l'uno per mille della velocità della luce) perché partecipa con il Sole alla rotazione della Via Lattea che è una galassia a spirale (la rivoluzione attorno al Sole e la rotazione diurna della Terra hanno velocità rispettivamente dieci e mille volte inferiori). Secondo le formule di Galilei-Newton in un laboratorio terrestre la velocità della luce dovrebbe dipendere dalla direzione di propagazione. Infatti, sia  $\vec{c}$  la velocità di un segnale luminoso puntiforme rispetto al sistema privilegiato. Se  $\vec{c}'$  è la velocità rispetto al laboratorio terrestre, che è in moto nello spazio con velocità  $\vec{v}$ , si dovrebbe avere  $\vec{c}' = \vec{c} - \vec{v}$ . Si vede così che se la fisica classica fosse corretta  $\vec{c}'$  passerebbe da  $c - v$  a  $c + v$  al cambiare della direzione di propagazione da parallela ad antiparallela a  $\vec{v}$ .

A prima vista può sembrare che questi effetti dell'ordine di  $v/c$  siano facili da osservare. A questo punto bisogna però ripetere che fin da prima che apparisse la teoria della relatività Poincaré aveva affermato che è impossibile misurare la velocità di un sistema che si propaga fra due punti distinti. Per vedere meglio le motivazioni di questa spiacevole conclusione consideriamo un segnale luminoso che viaggia fra  $A$  e  $B$ . Se in  $B$  c'è uno specchio che al tempo  $t_2$  riflette all'indietro il segnale verso  $A$  basta avere un orologio vicino ad  $A$  che misura gli istanti  $t_1$  e  $t_3$  di partenza e di ritorno. La velocità del segnale è allora determinata dalla sua stessa definizione:

$$c_{ar} = 2d_{AB} / (t_3 - t_1)$$

dove  $d_{AB}$  è la distanza fra  $A$  e  $B$  che può essere misurata riportando il regolo di lunghezza unitaria tante volte quante bastano a coprirlo. Tuttavia *questa è una velocità di andata e ritorno* e non è detto che coincida con le velocità del segnale da  $A$  a  $B$  e da  $B$  ad  $A$ . Per misurare queste ultime servirebbero due orologi sincronizzati, uno vicino ad  $A$  e l'altro vicino a  $B$ . Purtroppo, come abbiamo detto, nel Novecento nessuno sapeva come sincronizzare due orologi lontani. Ogni metodo immaginato faceva nascere grosse difficoltà.

Discutendo l'indipendenza della velocità della luce dalla direzione di propagazione Poincaré scriveva: «Questo è un postulato senza il quale sarebbe impossibile iniziare una qualsiasi misura di questa velocità. Resterà per sempre impossibile verificare sperimentalmente la validità di questo postulato». L'ultima frase potrebbe essere chiamata «la maledizione di Poincaré». Trovando impossibile risolvere il problema per via empirica Einstein decise di risolverlo per decreto, assumendo l'invarianza della velocità della luce: questo è il secondo postulato della TRS. Come abbiamo visto egli considerava questa ipotesi solo una comoda convenzione.

Ciò detto resta pur sempre vero che  $c_{ar}$  è misurabile. La fisica classica prevede una variazione dovuta al movimento della Terra molto più piccola di quella della velocità di sola andata. Più precisamente, se nel laboratorio terrestre si cambia la

direzione di propagazione, prevede che  $c_{ar}$  abbia variazioni del secondo ordine, cioè dell'ordine di  $v^2/c^2 \approx 10^{-6}$ .

Una delle misure più precise di  $c_{ar}$  è stata fatta nel 1978 da un gruppo inglese e ha dato il risultato:

$$c_{ar} = (299\,792,4588 \pm 0,0002) \text{ km/sec}$$

valore confermato da altri esperimenti successivi (1987). Dunque  $c_{ar}$  è nota con un errore percentuale di  $10^{-9}$ , mille volte più piccolo di quanto necessario per rivelare effetti del secondo ordine dovuti al movimento della Terra. Eppure prima e dopo il 1978 non si è mai vista una dipendenza della velocità della luce dalla direzione di propagazione, in accordo con una serie di misure più indirette fatte per rivelare l'esistenza del sistema dell'etere. Ecco dunque il primo fondamentale dato empirico:

*DI. Entro un piccolo errore la velocità della luce di andata e ritorno è invariante perché non cambia né con la direzione di propagazione né con l'epoca in cui viene misurata.*

Nel loro famoso esperimento del 1887 Michelson e Morley conclusero che non esistevano spostamenti delle figure di interferenza dovuti al movimento della Terra. Per spiegare ciò Fitzgerald e Lorentz supposero che il moto attraverso l'etere con velocità  $v$  generasse un accorciamento nella direzione della velocità per il fattore

$$R = \sqrt{1 - v^2/c^2} \quad (3)$$

L'idea della contrazione dovuta al movimento non era campata in aria. Usando la fisica classica Lorentz aveva dimostrato che il moto di una carica elettrica puntiforme attraverso l'etere modifica il campo elettrico che la circonda, schiacciandolo verso il piano perpendicolare alla direzione del moto, e che il grado di schiacciamento aumenta con la velocità. Ne consegue che un elettrone legato a un protone non forma più un normale atomo di idrogeno, ma un atomo con movimento orbitale schiacciato e con periodo di rivoluzione modificato. Ci si deve quindi attendere che ogni oggetto (costituito di atomi) si accorci nella direzione del movimento.

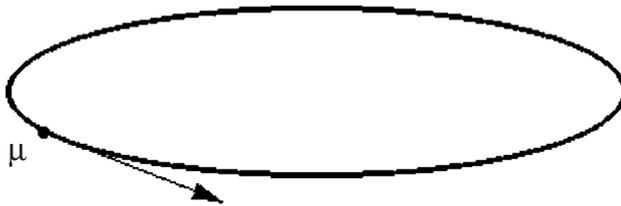


Fig. 1 Nell'anello d'accumulazione del CERN, delle particelle instabili («muoni») erano fatte circolare con velocità inferiore a quella della luce per sole sei parti su diecimila. Si osservò che i muoni si disintegravano dopo una vita media 29,33 volte maggiore di quella dei muoni a riposo.

Oggi il ritardo è molto ben stabilito. Uno degli esperimenti più convincenti e precisi è del 1977: le vite medie di muoni furono misurate nell'anello di accumulazione del CERN. Muoni con velocità pari a  $0.9994c$ , corrispondente a un  $R=0.0346$ , circolavano in un anello di  $14m$  di diametro con un'accelerazione centripeta di  $10^{18}g$ . La misura della vita media  $\tau$  diede un risultato in ottimo accordo con la formula  $\tau = \tau_0/R$ , dove  $\tau_0$  è la vita media dei muoni a riposo.

La lezione che impariamo da questo esperimento riguarda la trasformazione del tempo: in fondo un muone è un piccolo orologio che fa «tic-tac», anche se una volta sola. Fa «tic» quando nasce, «tac» quando si disintegra. Una naturale ipotesi di universalità porta subito a credere che un identico rallentamento si verificherebbe per qualsiasi processo periodico in un sistema che effettuasse lo stesso movimento dei muoni. Del resto la cosa ha ricevuto importanti conferme.

Un esperimento con orologi macroscopici è stato compiuto nel 1972 da due ricercatori americani, Hafele e Keating usando sei sensibilissimi orologi atomici al cesio. Gli orologi furono accuratamente sincronizzati, dopo di che:

- 1) due furono caricati su aerei di linea ordinari e gli fu fatto compiere un giro completo del pianeta verso est;
- 2) altri due furono caricati su altri aerei di linea e gli fu fatto compiere un giro completo del pianeta verso ovest;
- 3) gli ultimi due rimasero a terra nel laboratorio in cui l'esperimento era stato preparato.

Dopo i voli gli orologi che avevano viaggiato furono confrontati con quelli rimasti a terra. Si osservò che rispetto a questi ultimi il viaggio verso ovest aveva generato una perdita di  $59\pm 10$  nanosec., mentre quello verso est aveva generato un anticipo di  $273\pm 7$  nanosec. Questi risultati erano in eccellente accordo con la solita formula  $\tau = \tau_0 R^{-1}$  purché:

- a) si calcolassero tre diversi  $R^{-1}$  per le tre coppie di orologi. Il più grande (piccolo) era quello degli orologi che avevano viaggiato verso est (ovest) per i quali la velocità dell'aereo si sommava (si sottraeva) alla velocità di rotazione della Terra. Cioè bisognava riferire i movimenti non alla superficie terrestre, ma a un sistema con l'origine nel centro della Terra e assi orientati verso direzioni fisse del cielo;
- b) si tenesse conto dell'effetto del campo gravitazionale terrestre che è diverso alle diverse quote e altera quindi in modo diverso il ritmo degli orologi che viaggiano rispetto a quelli rimasti al suolo.

L'esperimento di Hafele-Keating è stato molto criticato perché non tutto era sotto controllo durante i voli attorno al globo. Tuttavia i suoi risultati sono stati confermati dal sistema di satelliti del GPS (*Global Positioning System*) [OQ, pp. 81-90]. Questo sistema consiste di una rete di 24 satelliti in orbita intorno alla terra, distribuiti su sei piani orbitali inclinati di  $55^\circ$  rispetto al piano equatoriale. Ogni satellite si muove con una velocità di  $3.9$  km/sec e ha a bordo quattro orologi atomici che segnano il tempo con un errore di pochi nanosecondi al giorno (ns/giorno). Da ogni punto della superficie terrestre almeno quattro satelliti sono sempre visibili. Concepito all'inizio per obiettivi militari, il GPS è stato successivamente utilizzato per scopi di diversa natura: telecomunicazioni, navigazione satellitare, meteorologia.

La teoria della relatività generale predice che gli orologi atomici del GPS vadano più rapidi per circa 45.900 ns/giorno rispetto agli orologi sulla superficie terrestre perché si trovano in un campo gravitazionale più debole. Il fattore dovuto alla velocità predice invece che gli stessi orologi vadano più lenti per 7.200 ns/giorno per il movimento orbitale. Dunque la predizione complessiva è un guadagno di circa 38.700 ns/giorno. Per evitare confronti basati su differenze così grandi si è preferito rallentare tutti gli orologi di 38.700 ns/giorno in modo tale che una volta in orbita segnassero sempre lo stesso tempo di quelli al suolo. I ricchissimi dati raccolti mostrano che, dopo aver applicato tale correzione, gli orologi in orbita segnano davvero lo stesso tempo degli orologi al suolo. Dunque le predizioni teoriche sono confermate, in particolare quella relativa all'effetto della velocità orbitale: da questo punto di vista c'è pieno accordo fra i satelliti del GPS e i muoni del CERN!

Possiamo quindi affermare che è disponibile il seguente secondo fondamentale dato empirico:

*D2. Un orologio in moto con velocità  $v$  subisce un rallentamento del ritmo con cui scandisce il tempo per un fattore  $R$  [dato dalla (3)].*

Abbiamo lasciato nel vago la questione del sistema di riferimento rispetto al quale va calcolata  $v$ ; comunque nel prossimo paragrafo prenderemo D1 e D2 come fatti empirici fondamentali e usciremo dal vago facendo un'ipotesi precisa che porterà a pieno accordo con gli esperimenti di fisica relativistica.

#### 4. Trasformazioni equivalenti e trasformazioni inerziali

Secondo Mansouri e Sexl [MS] le trasformazioni di Lorentz contengono un termine puramente convenzionale, privo di base empirica, il coefficiente della  $x$  nella trasformazione del tempo. Nel riconsiderare la faccenda ho riformulato le trasformazioni dello spazio e del tempo fra sistemi inerziali [FS] a partire da ipotesi generali. Così ho ottenute le «trasformazioni equivalenti» che contengono come termine indeterminato,  $e_1$ , proprio il coefficiente di  $x$  nella trasformazione del tempo: vedi le (4) qui sotto.

La struttura del ragionamento che porta alle trasformazioni equivalenti è la seguente. Dati i sistemi inerziali  $S_0$  e  $S$  si possono sempre scegliere due sistemi di coordinate cartesiane ortogonali (vedi Fig. 2) e assumere:

- (i) che lo spazio sia omogeneo e isotropo e che il tempo sia omogeneo, almeno se giudicati da osservatori a riposo in  $S_0$ ;
- (ii) che in  $S_0$  la velocità della luce sia « $c$ » in ogni direzione; quindi gli orologi di  $S_0$  possono essere sincronizzati e ogni velocità relativa a  $S_0$  è misurabile;
- (iii) che gli assi di  $S$  e  $S_0$  coincidano per  $t = t_0 = 0$ ;
- (iv) che l'origine di  $S$ , osservata da  $S_0$ , sia vista muovere con velocità  $v < c$  parallela all'asse  $+x_0$ , cioè secondo l'equazione  $x_0 = vt_0$ ;

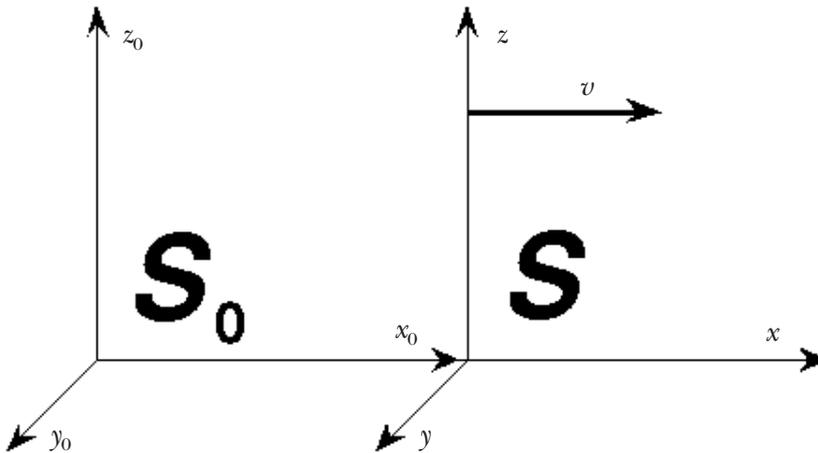


Fig. 2 Un sistema inerziale  $S$  con coordinate  $(x, y, z)$  si muove con velocità  $v < c$  rispetto al sistema isotropo  $S_0$  con coordinate  $(x_0, y_0, z_0)$ . I due sistemi si sovrappongono a  $t_0 = t = 0$ .

Le ipotesi (i) e (ii) non sono esposte a obiezioni sia da parte della TRS che da ogni plausibile teoria basata su un sistema privilegiato; per la TRS sono vere in tutti i sistemi inerziali, nel secondo caso sono assunte per il sistema privilegiato stesso.

Ora si aggiungono le due conclusioni D1 e D2 del paragrafo precedente che, come abbiamo visto, sono dotate di solide basi empiriche:

(v) la velocità della luce di andata e ritorno è la stessa in tutte le direzioni e in tutti i sistemi inerziali;

(vi) il rallentamento degli orologi in moto ha luogo con il solito fattore  $R$  rispetto al sistema isotropo  $S_0$ . Ora eliminiamo ogni ambiguità specificando che  $R$  in  $\tau = \tau_0/R$  vada calcolato in  $S_0$ .

Si può dimostrare [FS] che le (i)-(vi) riducono le trasformazioni da  $S_0$  a  $S$  alla forma

$$\left\{ \begin{array}{l} x = \frac{x_0 - vt_0}{R} \\ y = y_0 \quad ; \quad z = z_0 \\ t = Rt_0 + e_1 (x_0 - vt_0) \end{array} \right. \quad (4)$$

dove  $R$  è dato dalla (3). Il residuo parametro indeterminato  $e_1$  può essere fissato scegliendo una procedura di sincronizzazione degli orologi nei sistemi inerziali diversi da  $S_0$ . Pertanto la denominazione appropriata per  $e_1$  è «parametro di sincronizzazione». Dalle (4) è facile vedere che il «ritardo»  $t - t_0$  di un orologio in  $S$  rispetto all'orologio di  $S_0$  che gli sta passando accanto dipende non solo da  $t_0$ , ma anche dal punto  $x$  di  $S$  in cui detto orologio è collocato. Solo se  $e_1 = 0$  tale complicazione è assente.

La TRS viene recuperata per  $e_1 = -v/Rc^2$ , valore che introduce una ben nota simmetria fra variabili spaziali e tempo, costringendo quest'ultimo a un ruolo geometrico in uno spazio a quattro dimensioni. Per dirla con Minkowski: «Le concezioni dello spazio e del tempo [...] esprimono una tendenza radicale. D'ora in poi lo spazio da solo e il tempo da solo svaniranno del tutto come ombre e solo una specie di unione fra i due manterrà ancora una realtà indipendente» [EL, p. 75].

Diversi valori di  $e_1$  corrispondono a diverse teorie dello spazio e del tempo, teorie che sono empiricamente equivalenti in larga misura. Ho verificato con calcoli espliciti [FS] che i dati empirici sono molto spesso insensibili al valore di  $e_1$  (Römer, Bradley, Fizeau, Michelson-Morley, Doppler, ...). Pertanto in linea di principio esistono infinite teorie che possono spiegare egualmente bene i risultati di questi esperimenti. È notevole che tutte le teorie si basano sull'esistenza di un sistema di riferimento privilegiato. Solo la relatività fa eccezione.

La conclusione sembra dunque in accordo con l'idea che la sincronizzazione degli orologi sia convenzionale. Si è visto però [FS] che esistono situazioni empiriche di altro genere (accelerazioni lineari, piattaforme ruotanti, segnali superluminali) che permettono di determinare la sincronizzazione preferita dalla natura (che non è quella della TRS ma è definita da  $e_1 = 0$ ). Ovviamente questa conclusione è molto importante, ma per ragioni di spazio non posso qui articolarla nemmeno per sommi capi. Tutte le argomentazioni necessarie sono presentate in dettaglio nell'ultimo capitolo del libro [FS].

Ho proposto che le (4) con  $e_1 = 0$  siano chiamate *trasformazioni inerziali*. Permettono la piena liberazione del tempo dal ruolo meramente geometrico cui era stato costretto nello spazio di Minkowski della TRS. Implicano che la velocità della luce relativa a un sistema diverso da quello privilegiato non sia isotropa. Lo stesso vale per il parametro  $\varepsilon$  di Reichenbach.

## 5. Il problema dell'energia

Gli ultimi paragrafi, a partire da questo, sono dedicati ad altrettanti settori della fisica che la TRS non descrive in modo soddisfacente. Solo in un caso (effetto Sagnac) si può parlare di disaccordo della teoria con gli esperimenti, mentre negli altri si ha a che fare con l'impossibilità di dare ai simboli teorici un ragionevole significato fisico. Cominciamo dall'equivalenza massa-energia.

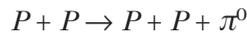
La teoria della relatività ha portato alla conclusione che un oggetto, la cui quantità di materia è misurata dalla massa, e il movimento puro, misurato dall'energia, sono trasformabili l'uno nell'altro e debbono quindi essere considerati forme diverse di una stessa realtà. Questa conclusione, ottenuta nel 1905 da Einstein, ha ricevuto un numero enorme di conferme, tanto che può essere considerata una conquista irreversibile della fisica. L'equivalenza massa-energia è espressa dalla nota formula  $E = mc^2$ . L'idea fu così descritta: «Secondo la teoria della relatività non c'è differenza essenziale fra massa ed energia. *L'energia possiede massa e la massa rappresenta energia*. In luogo di due leggi di conservazione ne abbiamo una sola: la legge di conservazione della massa-energia» [EI, p. 207].

La nuova conquista era piena di conseguenze, per esempio implicava una pie-

na continuità fra quella forma di energia diffusa nello spazio che viene chiamata «campo» e le sorgenti materiali che le danno origine: «La teoria della relatività insegna che la materia rappresenta un enorme serbatoio di energia, e che energia significa materia. In questa situazione non c'è separazione qualitativa fra materia e campo, perché la distinzione fra massa ed energia non è affatto qualitativa. [...] La materia c'è là dove esiste una grande concentrazione di energia, il campo esiste dove la concentrazione di energia è piccola. Ma se le cose stanno così la distinzione fra materia e campo è quantitativa piuttosto che qualitativa» [mia traduzione dell'originale tedesco; vedi anche EI, p. 252].

Dal punto di vista pratico l'equivalenza massa-energia significa che un oggetto materiale può essere trasformato in movimento (energia cinetica) di altri oggetti e, viceversa, che è possibile creare della materia spendendo solo del movimento. Queste trasformazioni avvengono secondo le leggi rigorose della conservazione dell'energia e della quantità di moto.

Si tratta di processi assolutamente concreti: è possibile far collidere due protoni di alta velocità per ritrovare nello stato finale gli stessi due protoni con le stesse identiche proprietà (massa, carica elettrica, ...) e, in aggiunta, uno o più pezzetti di materia, ad esempio dei mesoni  $\pi$ , che sono apparsi quasi dal nulla al momento dell'urto. Cioè, sembrano apparsi dal nulla a chi pensa che la materia non possa essere né creata né distrutta. In realtà, se si paragonano le energie cinetiche dello stato iniziale e di quello finale si trova che è scomparsa esattamente la quantità di energia cinetica necessaria a produrre la nuova massa dello stato finale. Un noto esempio è la seguente reazione:



che si legge così: due protoni che si urtano ( $P + P$ ) generano ( $\rightarrow$ ) una nuova configurazione fisica in cui sono presenti due protoni e un mesone  $\pi$  neutro ( $P + P + \pi^0$ ). Il mesone  $\pi$  ha una massa a riposo 264 volte quella dell'elettrone.

Esistono anche i processi inversi, quelli in cui energia viene creata a spese di massa. Sono di questo tipo le reazioni nucleari di fissione dell'uranio. Si vede così quanto falsa fosse la credenza del passato che la materia non possa essere né creata né distrutta. In realtà non esiste alcuna legge di conservazione della materia: ciò che si conserva sempre è l'energia assieme alla sua figlia vettoriale, la quantità di moto. Sono perciò queste le grandezze basilari della realtà, mentre la stabilità della materia è solo apparente e deriva dal fatto che viviamo in un mondo di basse energie: si alzi l'energia e si vedrà materia sparire! Infatti al centro del sole la temperatura è di 15-20 milioni di gradi, l'energia dell'agitazione termica è notevole e ogni secondo quattro milioni di tonnellate di materia si trasformano in energia radiante.

È fuori di dubbio che le conquiste della relatività sul rapporto energia-massa che abbiamo appena descritto appartengano di diritto al campo del realismo. E tuttavia il positivismo non è sparito, anzi cerca di imporre il suo dominio alla stessa nozione di energia, come vedremo subito.

L'energia avrebbe tutte le carte in regola per essere considerata una specie di sostanza fondamentale dell'universo: è indistruttibile, entra in tutti i processi dina-

mici e la stessa materia deve essere considerata una sua forma localizzata. Naturalmente un «materialismo energetico» di questo tipo sarebbe ben diverso dall'energetismo antiatomistico proposto da Ostwald alla fine dell'Ottocento. Tuttavia la stessa TRS nega un ruolo fondamentale dell'energia con il suo relativismo. Ogni osservatore inerziale attribuisce una diversa velocità, e quindi una diversa energia, a una data particella. La formula relativistica dell'energia totale  $E$  (energia cinetica più energia di massa) di un corpuscolo avente massa a riposo  $m$  e dotato di velocità  $u$  rispetto a un sistema di riferimento  $S$  è

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - u^2/c^2}}$$

dove  $c$  è come al solito la velocità della luce. La formula precedente vale in tutti i sistemi inerziali  $S, S', S'', \dots$  purché si usi la velocità della particella  $u, u', u'', \dots$  relativa a ciascuno di essi. Se ci si chiede quale sia il vero valore dell'energia, la risposta della teoria è che tutti gli osservatori sono equivalenti e che le loro risposte sono tutte egualmente valide. E siccome ciascuno attribuisce all'energia un valore diverso, nell'impossibilità di scegliere uno di questi come «più vero» degli altri si conclude che non esiste un valore ben definito dell'energia. Così l'energia viene spogliata della proprietà più importante, quella di avere un ben definito valore.

Un argomento molto simile fu usato nel 1943 da J. Jeans contro l'oggettività delle forze. Per lui l'essenza di ogni spiegazione fisica è che ogni particella è sottoposta all'azione di una forza definita. Questa forza dovrebbe essere oggettiva sia rispetto alla quantità che alla qualità e perciò la sua misura dovrebbe sempre dare lo stesso risultato qualunque siano gli strumenti usati per misurarla – proprio come un oggetto reale deve avere sempre lo stesso peso, qualunque sia il tipo di bilancia con cui viene pesato. Ma la TRS dimostra che se si attribuiscono movimenti alle forze, queste forze saranno valutate diversamente, sia per la quantità che per la qualità, da osservatori che si muovano con velocità diverse: si pensi alla forza di Lorentz in elettrodinamica. Inoltre tutte le valutazioni dei diversi osservatori debbono essere considerate egualmente valide. Pertanto – conclude Jeans – le forze non possono avere un'esistenza oggettiva ma sono solo concetti che costruiamo nel tentare di comprendere il funzionamento della natura. Naturalmente Jeans fu subito in grado di generalizzare il suo argomento a ogni grandezza fisica: forza, energia, quantità di moto eccetera. Ecco le sue parole:

Ma la teoria fisica della relatività ha ora reso evidente [...] che le forze elettriche e magnetiche non sono affatto reali; sono mere costruzioni mentali che ci facciamo, e risultano dai nostri sforzi maldestri di comprendere i movimenti delle particelle. Lo stesso vale per la forza di gravitazione newtoniana, e per energia, momento e altri concetti che furono introdotti per aiutarci a comprendere le attività del mondo. Tutti mostrano di essere costruzioni mentali che nemmeno superano l'esame dell'oggettività. Se si costringessero i materialisti a dire quanta parte del mondo essi ora affermano essere materiale, la loro sola possibile risposta sarebbe: la materia stessa. Così la loro intera filosofia si riduce a una tautologia perché ovviamente la materia deve essere materiale. Ma il fatto che tanta parte di quello che si pensava possedesse un'esistenza fisica oggettiva mostri ora di consistere solo di

costruzioni mentali soggettive deve sicuramente essere considerato un passo importante nella direzione del mentalismo [JJ, p. 200].

Con un'impostazione del genere non può sorprendere che Jeans approdi nel più schietto idealismo filosofico: «Esiste oggi un largo accordo, che sul versante fisico della scienza quasi raggiunge l'unanimità, che la corrente della conoscenza si dirige verso una realtà non meccanica. L'universo comincia ad apparire più come un grande pensiero che come una grande macchina. La mente non sembra più un'intrusa accidentale nel regno della materia. Dovremmo piuttosto salutarla come creatrice e regina del regno della materia» [cit. in PF, p. 235].

Per sfuggire a queste sgradevoli conclusioni c'è un solo modo, rinunciare al relativismo che in TRS nasce dalla simmetria delle trasformazioni di Lorentz e che indubbiamente costituisce l'interpretazione più naturale della teoria einsteiniana. Il recupero dell'oggettività dell'energia e delle altre grandezze fisiche deve puntare piuttosto sull'inequivalenza dei diversi sistemi di riferimento. Ma questo è proprio ciò che fanno le trasformazioni inerziali che, basandosi sull'esistenza di un sistema privilegiato, restituiscono all'equivalenza massa-energia tutta la sua grande importanza concettuale [FS]. C'è un valore dell'energia che è più fondamentale di tutti gli altri, quello calcolato rispetto al sistema di riferimento privilegiato.

## 6. Einstein e il problema dell'etere

Vogliamo ora discutere la famosa «abolizione» dell'etere che accompagnò la nascita delle due teorie relativistiche. Ad esempio nel lavoro del 1905 si affermava che l'introduzione di un etere luminifero poteva essere considerata superflua, perché alla nuova teoria non serviva uno spazio assolutamente stazionario corredato di particolari proprietà, né un mezzo nel quale fare avvenire i processi elettromagnetici come la propagazione della luce. Negli anni del passaggio dal positivismo al realismo Einstein cominciò a riconsiderare tutta la questione dell'etere [LK] e ammise che in fondo era possibile continuare a pensarlo esistente, anche se solo per designare particolari proprietà dello spazio. Affermò che nel corso dell'evoluzione della scienza la parola etere aveva più volte cambiato significato e che anche la relatività poteva limitarsi a questo.

Una posizione autocritica era ormai matura, e infatti nel 1919 Einstein scrisse a Lorentz: «Sarebbe stato più corretto se nelle mie prime pubblicazioni mi fossi limitato a sottolineare l'irrealtà *della velocità* dell'etere, invece di sostenere soprattutto la sua non esistenza. Ora comprendo che con la parola etere non si intende nient'altro che la necessità di rappresentare lo spazio come portatore di proprietà fisiche» [cit. in LK, p. 12].

Il cambiamento di opinione di Einstein cominciò, come è naturale, dal distacco dalla filosofia di Mach che tanta influenza aveva avuto su di lui nel periodo della formulazione della TRS e che lo aveva portato fino a credere che spazio e tempo fossero concetti metafisici e antiscientifici. Ecco come più tardi Einstein descrisse le ragioni del suo distacco:

Oggi riconosco la grandezza di Mach nel suo scetticismo incorruttibile e nella sua indipendenza; ma negli anni della mia giovinezza rimasi influenzato molto profondamente anche dalla sua impostazione epistemologica, che oggi mi sembra sostanzialmente insostenibile. Infatti egli non mise nella giusta luce la natura essenzialmente costruttiva e speculativa del pensiero, e più particolarmente del pensiero scientifico; condannò quindi la teoria proprio in quei punti in cui il suo carattere costruttivo-speculativo appare manifesto, come ad esempio nella teoria cinetica dell'atomo [AE, p. 18].

È a questo punto che Einstein riscoprì tutta l'importanza degli argomenti favorevoli all'esistenza di un mezzo etereo, per esempio la genesi delle forze inerziali nei sistemi accelerati. Per spiegare questo fondamentale fenomeno non si poteva invocare un'azione a distanza delle stelle fisse (come aveva fatto Mach), ma bisognava ricorrere a ben definite proprietà dello spazio, magari generate da tutta la materia dell'universo, ma comunque attive qui e ora. Perciò egli scrisse: «D'altra parte a favore dell'ipotesi dell'etere gioca un argomento molto importante. Negare l'etere significa, in ultima istanza, supporre che lo spazio vuoto non possieda alcuna proprietà fisica, il che è in disaccordo con le esperienze fondamentali della meccanica» [OS, pp. 512-513].

Einstein pensava che l'etere non andasse concepito come qualcosa di diverso dallo spazio quadridimensionale dotato di proprietà fisiche reali. Non aveva molto senso per lui supporre che preesistesse uno spazio geometrico assolutamente vuoto e che ci fosse poi una sostanza, l'etere, in grado di riempirlo e di dotarlo di proprietà fisiche. Perciò: «Lo spazio fisico e l'etere sono soltanto termini diversi per dire la stessa cosa; i campi sono stati fisici dello spazio. In realtà se non si attribuisce all'etere alcuno stato particolare di moto non c'è nessuna ragione di farlo figurare accanto allo spazio come un'entità di natura speciale» [cit. in LK, p. 169]. Considerando la natura meccanica dell'etere di Lorentz, Einstein affermò, quasi scherzando, che l'immobilità era l'unica proprietà che Lorentz gli aveva lasciato, ma che la TRS (riletta nella sua nuova chiave basata sull'etere) aveva generato un mutamento radicale consistente proprio del privare l'etere anche di questa sua ultima proprietà meccanica, cioè dell'immobilità: «Una più ponderata riflessione ci suggerisce che la negazione dell'etere non è necessariamente richiesta dal principio di relatività ristretta. L'esistenza dell'etere può essere ammessa, purché si rinunci ad attribuirgli un determinato stato di moto; bisogna cioè togliergli per astrazione l'ultima caratteristica meccanica lasciatagli da Lorentz» [OS, p. 511]. Il concetto venne ribadito con le seguenti parole: «Quanto alla natura meccanica dell'etere di Lorentz, si potrebbe dire, un po' per celia, che l'immobilità sia l'unica proprietà meccanica che Lorentz gli abbia lasciato. Il mutamento radicale che la teoria della relatività ristretta apportò nella concezione dell'etere consisteva nel privarlo anche di questa sua ultima proprietà meccanica, cioè dell'immobilità» [OS, p. 510].

Anche nella relatività generale l'etere di Einstein era privo di ogni tipo di movimento, quindi anche della possibilità di essere immobile. Aveva insomma delle proprietà radicalmente nuove che impedivano di immaginarlo composto di parti o di corpuscoli che si trovassero in un qualsiasi stato di movimento. Questa nuova descrizione era inevitabile se l'etere doveva apparire esattamente lo stesso in tutti i sistemi di riferimento inerziali. Così nacque l'idea di un etere compatibile con la teoria della relatività, di un etere relativistico. In fondo questa idea può essere considera-

ta un tentativo di compromesso fra il positivismo della TRS e il realismo dell'etere. Ma questa volta nessuno prese sul serio il grande fisico tedesco: a molti piaceva il diavolo, a qualcuno l'acqua santa, ma erano tutti d'accordo che non andassero mescolati.

Che dire, oggi, dell'etere relativistico di Einstein? Beh, in primo luogo che il ritorno all'etere è un'operazione dettata dal buon senso: lo spazio vuoto dotato di proprietà fisiche può benissimo essere chiamato «etere», una guerra sulle parole essendo priva di significato scientifico. In secondo luogo bisogna però aggiungere che è strano privare l'etere di ogni tipo di movimento. La cosa doveva sembrare inevitabile a Einstein per difendere il relativismo della TRS, ma oggi, grazie alle trasformazioni inerziali che ammettono un sistema privilegiato, è possibile un pieno ritorno a un etere dotato di movimento, cioè proprio all'etere di Lorentz [FS].

## 7. Il problema del paradosso dei gemelli

Ripetiamo il famoso paradosso dei gemelli, formulato come tale da Langevin per illustrare le caratteristiche del tempo della relatività ristretta, sottolineando che si tratta in realtà di una proprietà della natura ormai accertata con ragionevole certezza. Di due fratelli gemelli, Ferruccio (**F**) e Geltrude (**G**), il primo decide di diventare astronauta e di affrontare un viaggio interstellare, mentre la seconda resta sulla Terra ad aspettarne il ritorno. La partenza avviene quando i due hanno vent'anni. L'astronave di **F** accelera molto rapidamente fino a raggiungere il 99% della velocità della luce, dopo di che spegne i motori e viaggia fino a Mira Ceti, una famosa stella variabile distante 32 anni luce. Qui giunto **F** frena, si ferma, compie rapidamente alcuni studi scientifici, poi riaccelera verso la Terra raggiungendo ben presto di nuovo la velocità costante di  $0.99 c$ . Dopo quanto tempo sarà di ritorno? Per **G** la risposta è facile, si tratta di circa 64.6 anni (trascuriamo il tempo speso per accelerare e frenare). Le cose sono diverse per **F** che è sottoposto sia dal punto di vista tecnologico che biologico al rallentamento dei processi fisici. Sull'astronave in moto tutto va più piano, dagli orologi ai calcolatori e al ritmo cardiaco degli astronauti. Si può quasi dire che il tempo rallenti per il solito fattore  $R$ , che per **F** vale  $R \cong 0.141$ . Quindi per **F** il viaggio dura in realtà  $64.6 \times 0.141 \cong 9$  anni. Quando alla fine del viaggio **F** rientra sulla Terra egli ha 29 anni, mentre **G** è ultraottuagenaria.

Questa conclusione sembra paradossale solo perché non vediamo nulla del genere nella nostra esperienza quotidiana, cosa peraltro naturale dato che le velocità massime raggiunte dall'uomo sono molto piccole rispetto a  $c$  e quindi danno  $R \cong 1$ . Tuttavia un esperimento che simula la situazione del paradosso dei gemelli è stato compiuto da Hafele e Keating, come abbiamo visto, e i loro risultati sono stati confermati dai satelliti in orbita attorno alla Terra. Bisogna dire che tutti questi risultati sono in eccellente accordo con alcune formule relativistiche, ma ben poco con il relativismo della TRS. In fisica bisogna sempre fare attenzione che vi sono due logiche presenti, quella matematica delle formule e quella qualitativa del significato dei simboli usati. Un accordo numerico può non bastare se non risulta corretto il significato della predizione teorica. Ebbene, la differenza fra i tempi dei due voli nell'esperimento di Hafele e Keating era spiegabile dal fatto che nel volo verso

est la velocità dell'aereo si sommava alla velocità della rotazione terrestre, mentre nel volo verso ovest le si sottraeva, di modo che *rispetto allo spazio circostante* un volo era molto più veloce dell'altro. Il relativismo imporrebbe invece di considerare solo il moto relativo alla superficie terrestre, ma allora i voli verso est e verso ovest sarebbero simmetrici e non dovrebbero esistere differenze tra le due corrispondenti coppie di orologi. Per affermare che questi risultati sono in accordo con la TRS, come fanno diversi autori, bisogna dimenticare il relativismo che fonda la teoria, e fare i conti spensieratamente rispetto al sistema inerziale in cui il baricentro terrestre è istantaneamente a riposo. Il problema sparisce con le trasformazioni inerziali per le quali il relativismo è inapplicabile, dato che ammettono un sistema privilegiato [FS]. Dei due gemelli in moto relativo alla fine risulta più giovane sempre quello che più ha subito gli effetti del movimento assoluto.

## 8. Il problema dell'aberrazione

Il fenomeno dell'aberrazione della luce stellare, scoperto da Bradley nel 1725, è molto importante in fisica relativistica, tanto che Einstein lo discusse nel suo famoso primo articolo sulla TRS. Dalla deviazione angolare della luce di una stella, osservata nel corso di un anno, è possibile risalire alla velocità della luce. Poiché la luce compie un percorso unidirezionale, dalla stella alla Terra, si potrebbe credere che l'aberrazione permetta di misurare la velocità di sola andata, ma in realtà non è così perché tutte le trasformazioni equivalenti predicono lo stesso angolo di aberrazione.

Consideriamo la propagazione di un impulso luminoso localizzato  $P$  dal punto di vista del sistema di riferimento privilegiato  $S_0$  delle teorie equivalenti relativamente al quale la velocità della luce è la stessa in tutte le direzioni.

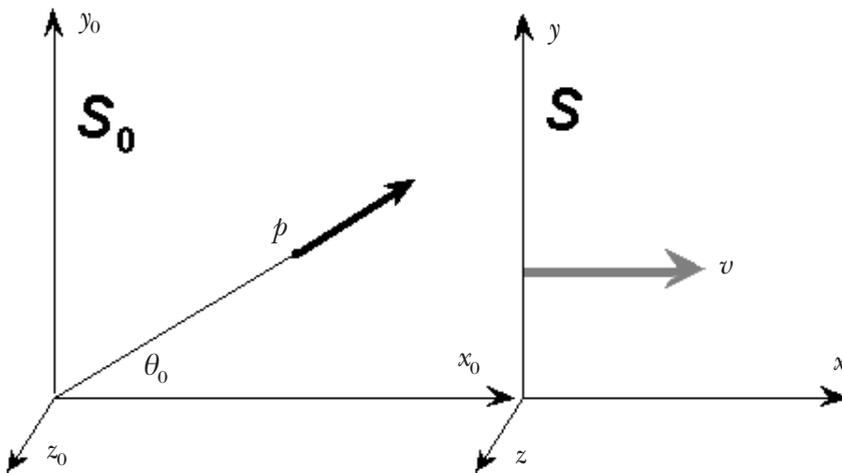


Fig. 3 Un impulso luminoso localizzato  $P$  si propaga nel sistema di riferimento inerziale isotropo  $S_0$ , relativamente al quale la velocità della luce è la stessa in tutte le direzioni. Si cerca la descrizione del movimento di  $P$  nel sistema  $S$ .

Se  $\theta_0$  è l'inclinazione rispetto all'asse  $x_0$  della traiettoria di  $P$  e  $\theta$  è l'inclinazione della stessa traiettoria giudicata in  $S$ , si dimostra [FS] una formula dell'aberrazione che è matematicamente identica a quella della relatività, cioè:

$$\tan \theta = \frac{cR \operatorname{sen} \theta_0}{c \cos \theta_0 - v} \quad (5)$$

Tutte le grandezze che entrano nel secondo membro della (5) sono relative al sistema isotropo  $S_0$  per il quale tutte le teorie equivalenti ammettono lo stesso valore della velocità della luce, e dunque la stessa sincronizzazione degli orologi. Chiaramente tutte le trasformazioni equivalenti (fra cui naturalmente c'è quella di Lorentz) concordano sui valori numerici di  $\theta_0$  e  $v$ . Pertanto predicano esattamente lo stesso valore dell'angolo di aberrazione  $\theta$ , e questo per un arbitrario sistema di riferimento  $S$ . Questo basta per concludere che esiste una spiegazione completa dell'aberrazione nell'ambito delle trasformazioni equivalenti.

La spiegazione dell'aberrazione in termini di movimento assoluto che abbiamo ora dato risolve un annoso problema dell'approccio relativistico. Einstein dedusse la formula dell'aberrazione (5) dall'idea che la velocità sia la velocità *relativa* del sistema stella/Terra. Questa idea fu ripetuta da molti autori, ad esempio da Møller, perché usare la velocità relativa è la cosa assolutamente più naturale quando si ragiona nell'ambito della TRS. Tuttavia se immaginiamo le stelle come molecole di un gas in movimento disordinato dobbiamo ammettere che la velocità relativa alla Terra possa variare da stella a stella, mentre invece l'angolo di aberrazione misurato è sempre lo stesso. Nel 1950 Ives sottolineò che l'esistenza di stelle binarie genera, in modo più preciso, la stessa difficoltà per la TRS, notando che esistono binarie spettroscopiche con parametri orbitali noti (ricostruiti) e velocità attorno al centro di massa simili a quella della Terra sulla sua orbita. Dunque le componenti di un sistema binario in certi momenti possono avere velocità relative alla Terra molto diverse l'una dall'altra; e tuttavia si osserva che queste componenti hanno sempre la stessa aberrazione, fra l'altro non diversa da quella delle stelle singole. Il punto fu sviluppato da Eisner e da Hayden che si trovarono d'accordo con Ives e ne rafforzarono le conclusioni.

La questione è completamente risolta, in particolare, dalle trasformazioni inerziali per le quali la  $v$  che entra nella (5) non è una velocità relativa, ma la velocità assoluta della Terra e il fenomeno dell'aberrazione è dovuto alle variazioni generate dal movimento orbitale del nostro pianeta.

## 9. Il problema dell'effetto Sagnac

L'esperimento di Sagnac del 1913 fu realizzato con una piattaforma che ruotava intorno a un asse perpendicolare al suo piano. Sulla piattaforma era montato un sistema ottico che permetteva a due fasci luminosi, prodotti da una stessa sorgente, di propagarsi in direzioni opposte lungo uno stesso percorso chiuso, alla fine del quale si sovrapponevano. La figura d'interferenza così ottenuta, registrata su una lastra fotografica, è strettamente legata al ritardo con cui un fascio luminoso giun-

ge sul rivelatore rispetto all'altro. Sagnac osservò uno spostamento delle frange d'interferenza che dipendeva solo dalla velocità di rotazione, una volta fissato il percorso della luce, e annunciò la sua scoperta alla comunità scientifica con due articoli (in francese) dai titoli *L'esistenza dell'etere luminifero dimostrata per mezzo dell'effetto di un vento d'etere relativo in un interferometro in rotazione uniforme* e *Sulla prova della realtà dell'etere luminifero con l'esperimento dell'interferometro ruotante*.

L'esperimento fu ripetuto molte volte con la piena conferma del risultato di Sagnac. Famosa è la realizzazione di Michelson e Gale nel 1925 per le dimensioni davvero enormi del tubo a vuoto percorso dalla luce (un rettangolo di 650m x 360m circa); in quel caso fu utilizzata come piattaforma la stessa Terra e l'esperimento permise di constatare gli effetti della rotazione diurna.

Sorprendentemente i teorici si occuparono poco dell'effetto Sagnac, quasi non ponessero grossi problemi concettuali. Einstein non ne parla mai, ad esempio. Un articolo di Langevin del 1921 è tanto categorico nelle affermazioni quanto poco convincente nella sostanza. Una delle frasi di apertura è questa: «Mostrerò come la teoria della relatività generale spieghi in modo quantitativo i risultati dell'esperimento di Sagnac». Langevin argomenta che l'esperimento di Sagnac è del primo ordine e che tutte le teorie (relativistiche o prerelativistiche) debbono concordare sia qualitativamente sia quantitativamente, dato che la precisione raggiunta non permette di rivelare effetti del secondo ordine. Perciò, sempre secondo Langevin, questo esperimento non può produrre evidenze né pro né contro alcuna teoria. Dopo di che passa a mostrare che un'applicazione della cinematica *galileiana* spiega le osservazioni di Sagnac! Lo fa con un approccio appena un po' velato da simboli e parole della relatività, ma in sostanza al 100% classico. L'impressione che Langevin, al di là delle parole di circostanza, non potesse essere molto soddisfatto

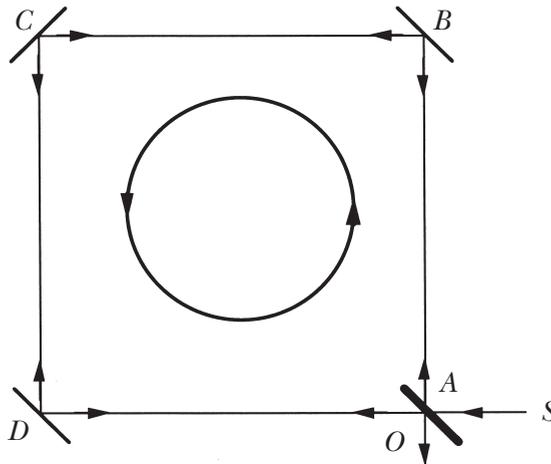


Fig. 4 Configurazione semplificata dell'apparato di Sagnac. La luce della sorgente  $S$  viene divisa in due parti dallo specchio semitrasparente  $A$ . La prima parte segue il percorso  $ABCDAO$  concorde con la rotazione del disco, la seconda parte segue  $ADCBAO$  discorde con la rotazione. Le due parti interferiscono in  $O$ .

della sua spiegazione è rafforzata da un suo secondo articolo del 1937 in cui si propongono al lettore due (!) trattazioni relativistiche. La prima è ancora quella del 1921, questa volta appoggiata alla strana idea che il tempo da adottare sulla piattaforma sia quello del centro della rotazione, che è immobile nel laboratorio. La seconda definisce il tempo in modo tale da forzare la velocità della luce costante e uguale a partire da un differenziale non totale, cadendo così in pieno in un problema di discontinuità per un giro attorno al disco [FS].

Nel 1963 esce il notissimo articolo di rassegna di Post che aderisce all'idea che due dimostrazioni della deducibilità relativistica dell'effetto Sagnac siano meglio di una. La prima (nel testo) fa ricorso alla trasformazione del tempo  $t' = tR$  dove  $R$  è la solita radice quadrata qui scritta con la velocità di rotazione. La seconda (in appendice) si basa sulle trasformazioni di Lorentz  $t' = (t + \vec{v} \cdot \vec{r}/c^2)/R$ , ma fa sparire il secondo termine con la scelta (arbitraria) di  $\vec{r}$  perpendicolare a  $\vec{v}$ . La grossolana tendenza a cancellare le variabili spaziali nella trasformazione del tempo è comune a Langevin e a Post e dimostra l'impossibilità di spiegare la fisica sulla piattaforma ruotante con la TRS. Il risultato finale non può essere che una grande confusione, al punto che Hasselbach e Nicklaus, descrivendo un loro esperimento sull'effetto Sagnac, elencano una ventina di spiegazioni alternative dell'effetto e commentano: «Questa grande varietà (se non disparità) nella derivazione dello sfasamento di Sagnac costituisce una delle tante controversie [...] che hanno circondato l'effetto Sagnac fin dai primissimi giorni». La tendenza di Langevin e Post a eliminare la velocità nella trasformazione del tempo anticipa in qualche modo l'approccio basato sulle trasformazioni inerziali che sono le sole fra tutte le trasformazioni equivalenti a fornire una rigorosa spiegazione qualitativa e quantitativa dell'effetto Sagnac [FS].

## Bibliografia

- [AE] A. Einstein, *Autobiografia scientifica*, Boringhieri, Torino 1981.  
 [AM] J. Stachel (a c. di), *L'anno memorabile di Einstein, i cinque scritti che hanno rivoluzionato la fisica del Novecento*, Dedalo, Bari 2001.  
 [EI] A. Einstein e L. Infeld, *L'evoluzione della fisica*, Boringhieri, Torino 1965.  
 [EL] A. Einstein, H.A. Lorentz et al., *The Principle of Relativity*, Dover, New York 1923.  
 [FS] F. Selleri, *Lezioni di relatività da Einstein all'etere di Lorentz*, Progedit, Bari 2003.  
 [HR] H. Reichenbach, *La filosofia dello spazio e del tempo*, Feltrinelli, Milano 1977.  
 [JJ] J. Jeans, *Physics and Philosophy*, Cambridge Univ. Press, Cambridge 1943.  
 [LK] L. Kostro, *Einstein e l'etere*, Andromeda, Bologna 1987.  
 [MS] R. Mansouri e R. Sexl, in «General Relat. Gravit.», 8, 497, 515, 809 (1977).  
 [OQ] T. Van Flander, *What the Global Positioning System Tells Us about Relativity*, in *Open Questions in Relativistic Physics*, a c. di F. Selleri, Apeiron, Montreal 1998, pp. 81-90.  
 [OS] A. Einstein, *Opere scelte*, a c. di E. Bellone, Bollati Boringhieri, Torino 1988.  
 [PF] P. Frank, *Philosophy of Science*, Prentice-Hall, Englewood Cl. 1957.  
 [RD] A. Einstein, *La relatività (esposizione divulgativa)*, Newton Compton, Roma 1970.  
 [TF] M. Jammer, *Some Fundamental Problems in the Special Theory of Relativity*, in *Problems in the Foundations of Physics*, a c. di G. Toraldo di Francia, Società Italiana di Fisica, Bologna e Amsterdam 1979.