

TEMPO RELATIVO E SIMULTANEITÀ ASSOLUTA

1. Il rallentamento degli orologi in moto

Oggi il rallentamento degli orologi in moto è molto ben stabilito da una ricca evidenza sperimentale, tanto che possiamo considerarlo un ben definito fenomeno della natura e non una fantasia teorica di incerta validità. Uno degli esperimenti più precisi e convincenti al riguardo è del 1977, se si considerano le particelle subatomiche come piccoli orologi naturali. In questo esperimento furono misurate le vite medie di muoni positivi e negativi usando l'anello di accumulazione del CERN [1]. Ogni muone è una particella instabile che in media dopo due milionesimi di secondo si disintegra spontaneamente in un elettrone e in due diversi neutrini. Muoni aventi una velocità pari a $0.9994c$, corrispondente a un fattore $\gamma \approx 30$, circolavano in un anello di 14 m di diametro con un'accelerazione centripeta pari a $10^{18}g$, g essendo l'accelerazione di gravità. Si trovò un accordo eccellente con la formula

$$\tau_0 = \frac{\tau_{\text{sp}}}{\sqrt{1-\beta^2}} = \gamma \tau_{\text{sp}} \approx 30 \tau_{\text{sp}} \quad (1)$$

dove τ_0 è la vita media dei muoni osservata nelle condizioni dette, τ_{sp} è la vita media dei muoni a riposo e $\beta = v/c$, v essendo la velocità dei muoni sulla loro orbita circolare.

L'informazione che possiamo ottenere da questo esperimento riguarda la trasformazione del tempo data da (1): l'intervallo temporale Δt_0 fra due eventi che avvengono in una stessa posizione di un sistema in moto (evento iniezione ed evento disintegrazione del muone, nell'esempio discusso) nel laboratorio viene osservato dilatato per il solito fattore γ , se confrontato con l'intervallo temporale corrispondente Δt misurato dall'osservatore del sistema in moto:

$$\Delta t_0 = \frac{\Delta t}{\sqrt{1-\beta^2}} \quad (2)$$

Oltre a questo importante esperimento c'è una ricchissima evidenza di altro genere, ma dallo stesso significato: centinaia e centinaia di misure fatte su fasci di particelle instabili (muoni, pioni, iperoni, ...) hanno dimostrato che la vita media, fino all'istante della disintegrazione spontanea, dipende dalla velocità proprio come previsto dalla (1). Questi esperimenti sono stati tanto numerosi ed accurati che non esiste più alcun ragionevole dubbio sul fatto che il rallentamento degli orologi in moto in accordo con la (2) sia una vera proprietà della natura e non un parto fantastico della fantasia dei fisici. La sola alternativa disponibile sarebbe di ammettere la validità di (1) per le disintegrazioni, ma di negare che (2) sia vera per tutte le possibili coppie di eventi, il che eliminerebbe l'universalità del rallentamento dei processi che avvengono in sistemi in moto. Per fortuna non c'è la minima indicazione che questa strada sassosa debba essere percorsa.

L'evidenza empirica ci dice un'altra cosa importante, che l'accelerazione non gioca alcun ruolo nel modificare il ritmo degli orologi. Infatti a parità di velocità viene rallentata allo stesso modo la vita media dei fasci rettilinei di muoni (privi di accelerazione) e quella dei muoni nell'anello di accumulazione che possiedono un'accelerazione enorme.

Un altro esperimento sul rallentamento degli orologi in moto è stato realizzato nel 1972 da Hafele e Keating [2] usando alcuni sensibilissimi orologi atomici al cesio. Questi furono inizialmente accuratamente sincronizzati, poi caricati su aerei di linea ordinari e gli fu fatto compiere un giro completo del pianeta. Un volo era verso est, l'altro verso ovest. Dopo ciascun volo gli orologi furono

confrontati con orologi simili che erano rimasti a terra, nel laboratorio dei due fisici. Si osservò che rispetto a questi ultimi orologi il viaggio verso ovest aveva generato una perdita di 59 ± 10 nanosecondi, mentre quello verso est aveva generato un anticipo di 273 ± 7 nanosecondi. Questi risultati erano in eccellente accordo con la solita formula (2), ma molto meno con la filosofia del relativismo (filosofia da tener ben distinta dalla teoria della relatività per le ragioni che stiamo dicendo e per quelle che diremo). Infatti la differenza fra i tempi dei due voli era spiegabile principalmente 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 al centro della Terra un volo era molto più veloce dell'altro. Lo spirito del relativismo imporrebbe invece di considerare solo il moto relativo alla superficie terrestre, ma allora i voli verso est e verso ovest sarebbero del tutto simmetrici e non si sarebbe dovuto riscontrare alcuna differenza.

2. Il paradosso dei gemelli

Esistono moltissimi lavori che parlano del famoso paradosso dei gemelli, e si possono dividere in due filoni principali: (a) Quelli che riconoscono nella velocità del gemello che viaggia la causa del rallentamento dei suoi processi biologici; (b) Quelli che invece cercano di attribuire lo stesso rallentamento alle accelerazioni subite dal gemello viaggiante alla partenza, all'arrivo, e al momento dell'inversione della direzione di marcia. Ovviamente gli autori del secondo filone cercano di salvare la perfetta simmetria dei movimenti rettilinei e uniformi richiesta dal principio di relatività speciale, ma la loro posizione è indifendibile, come fu dimostrato da Builder [3] in lavori bellissimi, anche se poco conosciuti. Il suo argomento è molto semplice: in fisica si può riconoscere la causa di un fenomeno variandola e verificando l'esistenza di corrispondenti variazioni dell'effetto. Nel caso dei gemelli che qui ci interessa, se quello che viaggia raddoppia la lunghezza dei percorsi di moto rettilineo uniforme lasciando inalterati i processi di accelerazione e frenamento egli trova raddoppiata la sua differenza di età da quello che è rimasto sulla Terra: perciò la velocità e non l'accelerazione deve essere la causa dell'invecchiamento asimmetrico. Oggi si può naturalmente aggiungere che la conclusione di Builder è in accordo perfetto col fatto già ricordato che nell'esperimento del CERN l'enorme accelerazione dei muoni non aveva alcun effetto sulla vita media.

Herbert Dingle, professore di Storia e Filosofia della Scienza a Londra, combattè negli anni 50 e nei primi anni 60 un'epica battaglia contro alcuni aspetti della teoria della relatività, in particolare contro l'invecchiamento asimmetrico di cui si parla nel paradosso dei gemelli. Credeva che il ritardo degli orologi in moto non esistesse in natura e che tutta la faccenda fosse pura fantasia. Questa sua idea è stata smentita da tutte le evidenze sperimentali dirette raccolte dopo la sua uscita di scena. Tuttavia le sue ricerche ci lasciano una perla rara, il sillogismo che va sotto il suo nome. Poichè il sillogismo è il modello tecnico di perfetta deduzione le sue conclusioni sono assolutamente inevitabili.

Il sillogismo di Dingle nella sua formulazione originale è il seguente [4]:

1. (Premessa maggiore) Secondo il postulato di relatività se due corpi (ad esempio due orologi identici) prima si separano poi si riuniscono non c'è alcun fenomeno osservabile che possa mostrare in senso assoluto che uno si è mosso anzichè l'altro.
2. (Premessa minore) Se dopo il riavvicinamento un orologio fosse ritardato di una quantità dipendente dal movimento relativo, e l'altro no, questo fenomeno mostrerebbe che il primo si è mosso e non il secondo.
3. (Conclusione) Pertanto, se il postulato di relatività è vero, gli orologi debbono essere egualmente ritardati, o non esserlo affatto: in ogni caso i loro quadranti debbono mostrare lo stesso tempo dopo la riunione se lo mostravano prima della separazione.

Oggi possiamo dire che il comportamento asimmetrico dei due orologi è una certezza empirica (muoni dei raggi cosmici, esperimento con l'anello di accumulazione del CERN, fasci di particelle instabili, esperimento di Hafele e Keating). Pertanto, a norma del terzo punto del sillogismo, è il postulato di relatività che va in qualche modo rifiutato. E infatti negli ultimi tempi sembra abbastanza acquisito negli ambienti scientifici che "teoria della relatività" è più che altro un nome da non prendere troppo alla lettera. Il totale relativismo di cui la teoria sembrerebbe portatrice è un'illusione. Insomma non tutto è relativo nella relatività: essa contiene anche qualcosa che relativo non è, qualcosa di assoluto! Come scriveva Dingle: "Dovrebbe essere ovvio che se c'è un effetto assoluto che è funzione della velocità, allora la stessa velocità deve essere assoluta. Nessuna manipolazione di formule e nessun concepimento di ingegnosi esperimenti può alterare questo semplice fatto." [4]

3. Lorentz e la relatività speciale

Einstein fu il primo a concludere che tutti gli orologi in moto debbono rallentare concordemente con la formula (2): questa era una delle implicazioni della teoria della relatività speciale. La sua posizione nel 1905 era grosso modo la seguente: l'etere non esiste, quindi non ha alcun senso parlare di movimento rispetto al nulla. Ha senso concepire ogni spostamento solo relativamente agli oggetti concreti. La contrazione dei regoli e il rallentamento degli orologi sono sempre relativi a sistemi di riferimento ben definiti, e c'è simmetria perfetta (fisica e filosofica) fra le conclusioni dei diversi osservatori inerziali. Dato un regolo in moto che gli osservatori inerziali O_1, O_2, \dots, O_n vedono muovere con velocità rispettive v_1, v_2, \dots, v_n , la lunghezza da loro misurata risulta accorciata per i fattori

$$\sqrt{1 - v_1^2 / c^2}, \sqrt{1 - v_2^2 / c^2}, \dots, \sqrt{1 - v_n^2 / c^2}$$

Una domanda che sembra legittima è: "Ma cosa succede realmente al regolo, qual'è la sua vera lunghezza?" La risposta relativistica è che la domanda non ha alcun senso e che i punti di vista di tutti i diversi osservatori O_1, O_2, \dots, O_n sono egualmente, anche se limitatamente, validi. E' la filosofia del relativismo e del soggettivismo che si afferma in fisica per le tipiche constatazioni degli osservatori in moto.

Ehrenfest sentì molto acutamente l'esistenza di questo genere di problemi. La teoria di relatività speciale basata sulla negazione dell'etere richiede la completa equivalenza degli osservatori in moto relativo uniforme, perchè non c'è ragione che siano inequivalenti, dato che si muovono rispetto al nulla. Tuttavia se si adotta il principio d'equivalenza che Einstein formulò nel 1916 e su cui basò la teoria di relatività generale, si conclude che l'inerzia ha la sua origine negli effetti gravitazionali delle masse lontane, effetti mediati da campi fisici presenti nello spazio vuoto. Ma la parola etere e la parola campo indicano all'incirca la stessa cosa, un vuoto dotato di proprietà fisiche. Questa contraddizione angustiava Ehrenfest che nel 1919 scrisse ad Einstein:

"Ora non si può più dire che si muovono rispetto al nulla, perchè si muovono rispetto a un enorme qualcosa! ... Einstein, il mio stomaco disturbato odia la tua teoria - quasi odia anche te! Come posso educare i miei studenti? E cosa posso rispondere ai filosofi?!" [5]

E in effetti possiamo dire che il rallentamento degli orologi in moto è del tutto incomprensibile (tranne che come fenomeno apparente ed irreale - ma l'esperimento dei muoni è lì a dimostrare che non è così) se non c'è una causa concreta che generi il rallentamento stesso.

E' certo che la teoria della relatività inizialmente non aveva convinto alcun esperto che l'etere dovesse essere eliminato. E' noto che lo stesso Einstein finì per cambiare parere dopo il 1920, forse anche sotto lo stimolo di Ehrenfest, oltre che sotto l'impatto della sua stessa formulazione del principio d'equivalenza. Inoltre Poincaré continuò sempre a parlare tranquillamente dell'etere, come

ad esempio nel 1912 in una conferenza fatta alla Società francese di fisica intitolata "I rapporti fra la materia e l'etere" [6].

Anche Lorentz continuava a muoversi sulla stessa linea favorevole all' etere. Nel 1909 pubblicò un libro in cui la sua diversa formulazione della fisica relativistica veniva organicamente sviluppata. L'idea era ancora una volta di partire dalle implicazioni della fisica classica e di postularne la validità generale. Lorentz fece tre ipotesi:

1. Ogni regolo in moto rispetto all'etere con velocità v parallela alla lunghezza si accorcia di un fattore $\sqrt{1 - v^2 / c^2}$;
2. Ogni orologio in moto rispetto all'etere con velocità v rallenta il suo ritmo (cioè la velocità di avanzamento delle lancette) per un fattore $\sqrt{1 - v^2 / c^2}$;
3. E' valida la convenzione di Einstein per sincronizzare gli orologi, cioè la velocità della luce può essere definita eguale a c in ogni direzione e in ogni sistema di riferimento inerziale.

Va tuttavia ricordato che Lorentz concepiva abbastanza asimmetricamente la contrazione degli oggetti (che considerava fenomeno fisico reale) ed il rallentamento degli orologi (che considerava un'utile convenzione). Il tempo delle sue trasformazioni veniva da lui chiamato "tempo locale", ma solo "allo scopo di facilitare il nostro modo di esprimerci".

Le tre ipotesi precedenti gli permisero di sviluppare una teoria formalmente equivalente alla relatività speciale, ma basata sull'idea dell'etere: la differenza filosofica non era dunque di poco conto, anche se il sistema privilegiato, assunto esistente fin dall'inizio, perdeva ogni peculiarità nel formalismo della teoria nascondendosi, per così dire, nell'insieme di tutti gli altri sistemi di riferimento inerziali. Ecco come Lorentz descrisse la situazione:

"I suoi risultati [di Einstein] riguardanti i fenomeni elettromagnetici ed ottici ... concordano generalmente con quelli che abbiamo ottenuto nelle pagine precedenti, la differenza principale essendo che Einstein semplicemente postula quello che noi abbiamo dedotto, con qualche difficoltà e non del tutto soddisfacentemente, dalle equazioni fondamentali del campo elettromagnetico. Nel fare questo egli può certamente prendersi il merito di averci fatto vedere nel risultato negativo di esperimenti come quelli di Michelson, Rayleigh e Brace, non la fortuita compensazione di effetti opposti, ma la manifestazione di un principio generale e fondamentale.

Tuttavia, penso, qualcosa può anche essere detto a favore della forma in cui io ho presentato la teoria. Dato che può essere sede di un campo elettromagnetico con la sua energia e con le sue vibrazioni l'etere non posso che considerarlo dotato di un certo grado di sostanzialità, per quanto diverso possa essere dalla materia ordinaria. Su questa linea di pensiero sembra naturale non assumere fin dall'inizio che non possa mai fare alcuna differenza che un corpo si muova o no attraverso l'etere, e misurare le distanze e gli intervalli temporali per mezzo di regoli e di orologi che hanno una posizione fissa relativamente all'etere." [7]

Dato che non era possibile distinguere sperimentalmente la formulazione di Lorentz da quella di Einstein le differenze concettuali sembrarono essere di natura metafisica. In teoria ogni fisico avrebbe potuto scegliere il punto di vista che più gli piaceva; in pratica il dilagare di ideologie negative nella cultura europea degli anni 20 e 30 favorì grandemente l'accettazione del relativismo. D'altra parte la struttura stessa della teoria di Lorentz prestava il fianco a facili critiche da parte dei fisici antirealisti. Ad esempio Heisenberg scrisse:

"Dato che tutti i sistemi di riferimento che sono in moto traslatorio uniforme l'uno rispetto all'altro sono equivalenti per la descrizione della natura, non ha significato affermare che c'è una sostanza,

l'etere, che è a riposo in uno solo di questi sistemi." [8]

Fu in sostanza l'affermarsi delle concezioni di Copenaghen in meccanica quantistica che a partire dalla metà degli anni 20 portò ad una riunificazione filosofica della maggioranza dei fisici su basi idealistiche. E in questo quadro l'abbandono dell'etere e l'accettazione del relativismo soggettivistico diventò la grande e stabile moda del nostro secolo.

4. La sincronizzazione degli orologi in relatività

Come abbiamo visto il punto centrale della teoria della relatività speciale del 1905 fu il rifiuto dell'etere, sotto la ben documentata influenza del positivismo di Mach. Recentemente si è anche scoperto che più tardi Einstein cambiò parere e che scrisse numerosi articoli in cui si dichiarava favorevole ad uno spazio dotato di proprietà fisiche, da lui stesso chiamato più volte ancora "etere" [9]. Fu però la sua posizione iniziale a diventare notissima, come abbiamo visto anche grazie al sostegno assicurato dagli esponenti delle scuole di Copenaghen e Göttingen a tutte le importanti concezioni antirealistiche della fisica moderna. E' per questo che la maggioranza dei fisici contemporanei crede che la relatività abbia portato ad una liquidazione definitiva dell'idea che il vuoto sia permeato da un mezzo "luminifero".

Il tempo della relatività è stato fatto dipendere dal significato di "simultaneità": è per questo che riferirsi all'ordine temporale di due eventi senza specificare in quale sistema di riferimento inerziale le coordinate temporali vengano misurate è considerato privo di significato. Il famoso metodo di sincronizzazione degli orologi di Einstein (basato sul postulato di invarianza della velocità della luce) è non solo compatibile col principio di relatività, ma può essere visto come la sua conseguenza più diretta. Infatti le equazioni di Maxwell fuori dalle cariche implicano la validità di quella equazione di d'Alembert per i campi che descrive la propagazione di onde elettromagnetiche aventi velocità costante c indipendente dallo stato di moto della sorgente. Se le equazioni di Maxwell debbono valere in ogni sistema di riferimento inerziale, così come è richiesto dal principio di relatività, anche il valore numerico della velocità della luce deve rimanere invariato. Einstein sentì il bisogno di postulare separatamente la costanza della velocità della luce, perchè le sue ricerche del 1905 sulle interazioni della radiazione elettromagnetica lo avevano convinto della reale esistenza di corpuscoli nella luce e pertanto della limitata validità delle equazioni di Maxwell che non ne tenevano conto. D'altra parte egli dimostrò in più occasioni di avere ben chiaro il carattere convenzionale del postulato di invarianza della velocità della luce, ad esempio nel 1916 scrivendo 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." [10]

D'altra parte ben prima della formulazione della relatività (nel 1898) Poincaré discuteva l'indipendenza della velocità della luce dalla direzione di propagazione e 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." [11]

E in effetti tutta la faccenda della simultaneità relativistica dipende fortemente dal procedimento arbitrario della sincronizzazione degli orologi. Consideriamo le coordinate spaziali x, y, z e il tempo t di un sistema inerziale S . Non funziona il metodo che viene subito alla mente per sincronizzare due orologi in punti lontani: sincronizzarli quando sono vicini e poi portarli nei punti desiderati. Non funziona perchè è ormai chiarissimo che il trasporto, cioè il fatto stesso di possedere una velocità,

altera il movimento delle lancette nel quadrante, così come altera qualsiasi movimento periodico che si pensi di utilizzare per misurare il tempo. Lo spostamento di un orologio può essere fatto in poco tempo a grande velocità, o in molto tempo a bassa velocità, ma si può dimostrare che c'è sempre un ritardo finito ineliminabile che viene generato dallo spostamento. Tanto vale quindi che la "sincronizzazione" sia fatta arbitrariamente, seguendo criteri di qualsiasi genere purchè portino ad un' identificazione non ambigua degli eventi. Pertanto si può pensare che il tempo sia diverso in due sistemi di riferimento inerziali $S(x, y, z, t)$ ed $S'(x', y', z', t')$, e che il "ritardo" $t' - t$ (che a priori potrà essere positivo, nullo o negativo) dipenda non solo dal tempo t , ma anche dal punto geometrico in cui ci si mette. Scriviamo perciò

$$t' = \eta(x', y', z', t) \quad (5)$$

In altre parole il tempo t' mostrato da un orologio T' di S' può differire dal tempo t mostrato dall'orologio T di S che gli sta passando vicino di una quantità dipendente non solo da t ma anche dal punto in cui T' è posto. Infatti la η (che è la "funzione di sincronizzazione") informa su come t' dipende, oltre che da t dal punto x', y', z' dello stesso sistema S' in cui si considera t' . Data una funzione di più variabili in generale basta che alcune cambino perchè cambi il suo valore. Perciò, considerati due eventi simultanei in S (stesso t), ma che avvengono in punti distinti (diversi x', y', z'), la (5) implica che in generale non siano più simultanei in S' . Questo e non altro è la relatività della simultaneità.

Naturalmente la scelta di η è in larga misura convenzionale, dato che dipende dalle procedure con cui vengono sincronizzati gli orologi posti in punti diversi di S' . Tuttavia η non è totalmente convenzionale, in particolare perchè la sua dipendenza da t dà luogo agli importanti effetti di ritardo degli orologi in moto [12].

Nel 1925 Reichenbach considerò la situazione seguente: in un sistema inerziale S un lampo di luce parte dal punto A al tempo t_1 , è riflesso all'indietro nel punto B al tempo t_2 , e giunge di nuovo in A al tempo t_3 . Il problema è come sincronizzare l'orologio vicino a B con l'orologio vicino ad A . Nella teoria della relatività si assume che la velocità della luce abbia lo stesso valore da A a B e da B ad A , di modo che $t_3 - t_2 = t_2 - t_1$, per cui il tempo dell'orologio B t_2 può essere scritto in termini dei due tempi dell'orologio A t_1 e t_3 , come segue:

$$t_2 = t_1 + \frac{1}{2}(t_3 - t_1) \quad (6)$$

Reichenbach commentò:

"Questa definizione è essenziale per la teoria della relatività speciale, ma non è epistemologicamente necessaria. Se dovessimo seguire una regola arbitraria solamente limitata alla forma

$$t_2 = t_1 + \varepsilon(t_3 - t_1), \quad 0 < \varepsilon < 1$$

sarebbe similmente adeguata e non potrebbe essere chiamata falsa. Se la teoria della relatività speciale preferisce la prima definizione, cioè pone $\varepsilon = 1/2$, lo fa perchè questa definizione porta a relazioni più semplici." [13]

Nel 1979 Jammer discutendo il coefficiente di Reichenbach e ricordò che:

"Una delle idee più fondamentali su cui si basa l'edificio concettuale della relatività, come sottolinearono ripetutamente Hans Reichenbach e Adolf Grünbaum, è l'aspetto convenzionale della simultaneità di sistemi distanti." Più avanti aggiunse: "La "tesi della convenzionalità della simultaneità di sistemi distanti" o brevemente la "tesi della convenzionalità" consiste

dell'affermazione che il valore numerico di e non deve necessariamente essere $1/2$, ma può essere un qualsiasi numero dell'intervallo aperto fra 0 e 1 , cioè $0 < e < 1$, senza mai portare ad alcun conflitto con l'esperienza." [14]

Chiaramente diversi valori di e corrispondono a diversi valori della velocità della luce su un percorso di sola andata (per i percorsi di andata e ritorno la velocità può essere misurata con un solo orologio e il problema della sincronizzazione non si pone). Perciò la libertà di scelta del parametro e implica una corrispondente libertà per la velocità della luce!

Ovviamente se una affermazione scientifica è vera non si può che accettarla, ma se è solo convenzionale diventa invece interessante la ricerca di alternative basate su convenzioni diverse da quella normalmente usata. In particolare, se la costanza della velocità della luce è una pura convenzione priva di base empirica deve essere legittimo studiare teorie in cui tale costanza non vale. Ma nel fare questo si violerà anche il principio di relatività, almeno nella sua accezione forte, quella usata per dedurre le trasformazioni di Lorentz. Questo può solo significare che lo stesso principio di relatività è almeno in gran parte un'utile convenzione umana e non un fatto della natura. Infatti una "verità" riconosciuta come convenzionale (la costanza della velocità della luce) non potrebbe essere conseguenza necessaria del principio di relatività se questo fosse una proprietà oggettiva della natura. Premesse oggettive possono solo portare a conseguenze altrettanto oggettive!

5. La simultaneità assoluta

L'ipotetica indifferenza della realtà fisica rispetto alla sincronizzazione degli orologi esiste solo finché si trascurano le accelerazioni. Infatti mentre un corpo accelera si può dire che sia istantaneamente a riposo in un diverso sistema inerziale in ogni diverso intervallo di tempo infinitamente piccolo. E' quindi impossibile in quel sistema inerziale adottare una procedura come quella di Einstein che richiede un tempo finito per sincronizzare due orologi posti in punti diversi. E tuttavia gli eventi fisici accadono e la sincronizzazione è fissata in qualche modo dalla natura stessa. Vedremo ora come questo avviene [15].

Due astronavi identiche **A** e **B** sono inizialmente a riposo sull'asse delle x_0 del sistema inerziale S_0 a una distanza d_0 l'una dall'altra. Gli orologi che si trovano al loro interno sono sincronizzati con quelli di S_0 . Al tempo $t_0 = 0$ le astronavi cominciano ad accelerare nella direzione $+x_0$, e continuano a farlo nello stesso identico modo, in modo tale da avere entrambe la velocità $v(t_0)$ in ogni istante t_0 di S_0 , finché al tempo $t_0 = \bar{t}_0$ raggiungono una velocità assegnata $v = v(\bar{t}_0)$ parallela a $+x_0$. Per tutti i $t_0 \geq \bar{t}_0$ le astronavi possono essere considerate a riposo in un diverso sistema inerziale S in moto con velocità v , che esse concretamente costituiscono.

Si può facilmente dimostrare che la trasformazione collegante S_0 ed S non può essere quella di Lorentz perché il ritardo fra i tempi segnati dagli orologi di S e quelli di S_0 non dipende dalla posizione, naturalmente se non si opera alcuna risincronizzazione degli orologi per correggere quello che la natura stessa ha generato durante la fase di accelerazione delle due astronavi. Poiché **A** e **B** hanno in ogni istante esattamente la stessa velocità, i loro orologi accumulano esattamente lo stesso ritardo rispetto a quelli a riposo in S_0 . Pertanto due eventi simultanei in S_0 debbono essere tali anche in S , anche se avvengono in punti diversi dello spazio. Chiaramente si verifica allora una situazione di simultaneità "assoluta" che non ha riscontro quando si applicano le trasformazioni di Lorentz.

Possiamo aggiungere che non solo la simultaneità assoluta è concretamente realizzata nel sistema in moto delle due astronavi, ma che si possono trovare convincenti prove che essa dà la descrizione più naturale della realtà fisica. Per vederne una supponiamo che nelle astronavi vi siano due passeggeri

P_A e P_B , che sono gemelli. Naturalmente nulla può impedirgli di risincronizzare gli orologi una volta che l'accelerazione è cessata e che le due astronavi sono a riposo in S . Tuttavia se lo fanno trovano di avere diverse età biologiche allo stesso tempo (risincronizzato) di S , anche se hanno iniziato la gita spaziale esattamente allo stesso tempo di S_0 e con la stessa velocità, come stipulato sopra. Tutto avviene regolarmente, invece, se non operano alcuna modificazione asimmetrica del tempo mostrato dai loro orologi.

Infatti abbiamo già visto che gli orologi di **A** e **B** sono ritardati allo stesso modo e che la trasformazione $S-S_0$ non può essere quella di Lorentz. Anche l'invecchiamento dei gemelli in **A** e **B** deve essere lo stesso dato che in ogni istante prima, durante e dopo la fase accelerativa si trovano nelle stesse identiche condizioni fisiche. Pertanto i due gemelli hanno la stessa identica età biologica quando i tempi mostrati dai loro orologi sono gli stessi se questi sono stati sincronizzati in S_0 prima della partenza e mai più risincronizzati dopo. Naturalmente essi si possono informare vicendevolmente sulle loro età biologiche scambiandosi delle fotografie (per esempio via telefax, o con altro simile metodo) in cui è registrato il tempo in cui sono state scattate: il gemello che riceve una foto può controllare nei suoi archivi che al tempo mostrato nella fotografia di suo fratello egli aveva esattamente la stessa apparenza, e dunque la stessa età.

Naturalmente i gemelli P_A e P_B possono usare una diversa sincronizzazione degli orologi, se vogliono, per esempio la sincronizzazione di Einstein che porta alla validità delle trasformazioni di Lorentz fra S ed S_0 . Per farlo debbono inviare un segnale luminoso, per esempio da **A** a **B**, e debbono regolare almeno un orologio. Possiamo anche supporre che ogni gemello abbia due orologi e che tenga il primo sul tempo naturale, e che regoli il secondo mediante una sincronizzazione alla Einstein. Più esattamente assumiamo che:

P_A ha un primo orologio	T_A che segna il tempo naturale	t_A
P_A ha un secondo orologio	\hat{T}_A che segna il tempo di Einstein	\hat{t}_A
P_B ha un primo orologio	T_B che segna il tempo naturale	t_B
P_B ha un secondo orologio	\hat{T}_B che segna il tempo di Einstein	\hat{t}_B

Dopo un certo tempo iniziale in cui $t_A = \hat{t}_A = t_B = \hat{t}_B$ si risincronizza \hat{t}_B al modo seguente. A un tempo prestabilito un segnale luminoso è inviato da **A** a **B**. La convenzione che la velocità della luce in S sia c in tutte le direzioni ("sincronizzazione di Einstein") obbliga l'osservatore in **B** a spostare le lancette del suo orologio \hat{t}_B in modo tale che il tempo di percorrenza della distanza **A-B** diventi proprio d/c come richiesto.

Chiaramente dopo la risincronizzazione a uno stesso tempo t_0 di S_0 si avrà

$$t_B - t_A = 0 \quad (8)$$

mentre

$$\hat{t}_B - \hat{t}_A = -\frac{(x_B - x_A)\beta}{c} \quad (9)$$

La simultaneità di \hat{t}_A e \hat{t}_B è chiaramente diversa da quella di T_A e T_B ! Se P_A e P_B si scambiano fotografie personali in cui sono mostrati anche i tempi segnati dagli orologi T e \hat{t} , essi scoprono di avere avuto la stessa età allo stesso tempo t , ma diverse età allo stesso tempo \hat{t} . Questo fatto dà una chiara prevalenza alle trasformazioni inerziali rispetto a quelle di Lorentz. E' la natura stessa che sembra scegliere le trasformazioni inerziali per descrivere le proprietà fisiche di sistemi inerziali

concretamente esistenti. D'altra parte esistono anche altri fenomeni che danno nette indicazioni dello stesso tipo, ad esempio l'effetto Sagnac sul quale non possiamo fermarci per ragioni di spazio. Queste considerazioni fanno ormai vedere con chiarezza il punto d'arrivo, una nuova teoria in cui il rallentamento degli orologi non è più relativo ma dipendente soltanto dalla velocità rispetto ad un sistema privilegiato. Questo fa sparire tutti i paradossi del relativismo. Viene poi recuperata la simultaneità assoluta: tutti gli osservatori inerziali hanno lo stesso presente. Infine l'esistenza del vuoto dotato di proprietà fisiche concrete diventa pienamente accettabile. Naturalmente un problema è anche quello di verificare sperimentalmente questa teoria, ma in un certo senso la verifica è già stata fatta dalla natura almeno nel caso dell'effetto Sagnac. [15]

Bibliografia

[1] J. Bailey, K. Borer, F. Combley, H. Drumm, F. Krienen, F. Lange, E. Picasso, W. von Ruden, F.J.M. Farley, J.H. Field, W. Flegel e P.M. Hetttersley, Nature, **268**, 301-305 (1977).

[2] J.C. Hafele e R.E. Keating, Science, **177**, 166 (1972).

[3] G. Builder, Austral. Jour. Phys., **11**, 279 (1958); *ibid.* **11**, 457 (1958).

[4] H. Dingle, Nature, **179**, 866 e 1242 (1957); H. Dingle, *Introduction*, in: Henri Bergson, DURATION AND SIMULTANEITY, pp. xv-xlii, The Library of Liberal Arts, Indianapolis (1965).

[5] M. Klein, PAUL EHRENFEST (North-Holland, Amsterdam, 1970), p. 315.

[6] H. Poincaré, Jour. Phys. Théor. Appl., 5^e série, vol. **2**, p. 347 (1912).

[7] H.A. Lorentz, THE THEORY OF ELECTRONS AND ITS APPLICATIONS TO THE PHENOMENA OF LIGHT AND RADIANT HEAT (Dover, New York, 1952); La frase citata è alle pp. 229-230.

[8] W. Heisenberg, PHYSICS AND PHILOSOPHY (Harper, New York, 1962), p. 114.

[9] L. Kostro, *An Outline of the History of Einstein's Relativistic Ether Concept*, in: STUDIES IN THE HISTORY OF GENERAL RELATIVITY, J. Eisenstaedt & A.J. Kox, eds., vol. **3**, pp. 260-280 (1992).

[10] A. Einstein, LA RELATIVITÀ (ESPOSIZIONE DIVULGATIVA), Newton Compton, Roma (1970). La frase citata è a p. 31.

[11] H. Poincaré, Rev. Metaphys. Morale, **6**, 1 (1898). Cit. da: A.A. Tyapkin, RELATIVITÀ SPECIALE (Jaca Book, Milano, 1993), p. 67.

[12] F. Selleri, Physics Essays, **8**, 342 (1995).

[13] H. Reichenbach, THE PHILOSOPHY OF SPACE & TIME (Dover Publ., New York, 1958). La frase citata è a p. 127.

[14] M. Jammer, *Some fundamental problems in the special theory of relativity*, in PROBLEMS IN THE FOUNDATIONS OF PHYSICS, G. Toraldo di Francia, ed., pp. 202-236 (Società Italiana di Fisica, Bologna, and North Holland, Amsterdam, 1979).

[15] F. Selleri, Found. Phys. **26** (1996); Found. Phys. Letters, **9**, 43 (1996).

[*] Università di Bari - Dipart. di Fisica; INFN - Sezione di Bari; Via Amendola 173, I-70126 Bari