



Tempo relativistico, tempo evolutivo e ritmo di marcia degli orologi reali

Claudio Borghi
Liceo Scientifico Belfiore, Mantova
c.borghi@teletu.it

Abstract

This paper proposes a critical synthesis about different theories of time in physics and a new interpretation of its operational reality. We built it on two, deeply analyzed, fundamental ideas: the mathematical nature of Newtonian and relativistic time and the consequent need to build physical theories of time starting from the measurements obtained by real clocks. We observe that relativistic theories refer to axiomatic assumptions about clocks, probably not verified by experiments if we use clocks of different construction. We propose the concept of evolutionary internal time and we conclude that a new interpretation of the nature of physical time should arise from a deep and accurate reflection about the rate of clocks. We believe that this approach to the question could open new theoretical perspectives about the evolution of physical systems.

1. Introduzione

Il presente lavoro propone un contributo critico circa la definizione operativa di tempo in fisica, con particolare riguardo alla misura delle durate. Le diverse sezioni sono riconducibili al seguente schema sintetico:

- considerazioni generali sulla definizione operativa di tempo nelle teorie di Newton ed Einstein (sezione 2);
- analisi dell'effetto orologi alla luce delle teorie di Selleri ed Einstein (sezioni 3-9);
- considerazioni teoriche sul concetto di tempo evolutivo interno e sulla necessità di un nuovo approccio critico al concetto di tempo fisico, a partire dall'analisi dei processi che caratterizzano il funzionamento degli orologi atomici e radioattivi (sezioni 10-14).

Il riferimento esplicito dei rilievi proposti in questa sede sono da una parte la teoria einsteiniana della relatività ristretta e generale, dall'altra una teoria relativistica ad essa alternativa, quella di Franco Selleri, un cui punto di divergenza, rispetto a quella einsteiniana, riguarda la causa delle diverse durate che gli orologi, a parità di eventi iniziale e finale, devono misurare al variare del cammino. Si è scelto di analizzare tale teoria in quanto costituisce il tentativo recente più articolato di rielaborazione del pensiero di Poincaré, Lorentz, Builder, Dingle, Reichenbach e altri fisici ed epistemologi che hanno proposto osservazioni critiche (o teorie autonome, come nel caso di Mansouri-Sexl) di un certo interesse alla teoria di Einstein. Questo lavoro, tuttavia, non intende proporre una comparazione tra teorie relativistiche antagoniste, quanto rilevare in esse la mancanza o la carenza di adeguate giustificazioni teoriche circa la variazione delle misure di tutti gli orologi al variare della velocità o del potenziale. Da tali rilievi critici verranno dedotte nuove considerazioni generali circa il problema della misura del tempo in fisica. Come risulterà chiaro dall'analisi sviluppata nelle sezioni conclusive, i processi fisici che distinguono gli orologi radioattivi dagli orologi atomici implicano una profonda differenza qualitativa tra le misure che tali strumenti consentono di ottenere. Il funzionamento degli orologi radioattivi, che misurano un intervallo di tempo quantificando la massa di sostanza decaduta, è legato a un processo irreversibile, diversamente dagli orologi atomici, in cui la misura è legata alla variazione reversibile del dislivello energetico fra due fissati stati quantici in funzione del potenziale. Poiché i processi evolutivi (il decadimento delle particelle instabili, l'invecchiamento biologico degli organismi viventi) sono caratterizzati dall'irreversibilità, il possibile disaccordo tra le misure fornite dagli orologi radioattivi e le previsioni della teoria einsteiniana li rende strumenti in grado di quantificare durate temporali che, con buona probabilità, sfuggono al quadro concettuale di tale teoria. Se orologi aventi diversa struttura, caratterizzati da processi interni reversibili (come gli atomici) o irreversibili (come i radioattivi), forniscono misure di durate tra loro incommensurabili, occorre concludere che in fisica convivono definizioni operative di tempo di natura diversa. Il lavoro ha quindi lo scopo esplicito di dare concretezza argomentativa all'idea fondamentale che ne anima le riflessioni, per cui solo il tempo legato all'evoluzione irreversibile di un sistema ha un'effettiva realtà fisica, laddove il tempo newtoniano o relativistico, come emergerà nello sviluppo dell'argomentazione, è una grandezza la cui realtà operativa risulta essere diversa da quella del tempo evolutivo interno, di cui i paragrafi finali intendono esplorare il significato teorico e sperimentale.

2. Tempo e movimento in Newton e Einstein

Nelle teorie di Newton e Einstein (e, come vedremo in seguito, anche in quella di Selleri, da intendersi come paradigmatica delle teorie relativistiche alternative a quella einsteiniana) la definizione operativa di tempo implica la natura matematica di tale grandezza. A ben vedere, la teoria di Newton non ne propone alcuna, in quanto si limita a risolverlo in un'astrazione concettuale (la durata), la cui misura può essere ottenuta tramite strumenti che ne simulano lo scorrere.

Nello Scolio ai *Principia* (1687, trad. it. 104-107), Newton scrive:

Absolute, true and mathematical time, of itself, and from its own nature flows equably without regard to anything external, and by another name is called duration: relative, apparent and common time is some sensible and external (whether accurate or unequable) measure of duration by the means of motion, which is commonly used instead of true time.

Esistono quindi un tempo matematico («absolute, true and mathematical time») e un tempo «comune», che misurano gli orologi. Quest'ultimo è una misura della durata «by the means of motion», di cui ci serviamo non potendo misurare il tempo «vero». Un orologio newtoniano è quindi un dispositivo all'interno del quale un moto periodico consente di misurare in unità opportune (o semplicemente comode) la durata di un fenomeno, contando oscillazioni o frazioni di esse. La teoria di Einstein, nata dalla necessità di costruire, in sede di relatività speciale, un fondamento concettuale coerente alle teorie dei fenomeni meccanici ed elettromagnetici, non si discosta, circa l'identità implicita tempo-movimento in relazione alla quantificazione operativa delle durate, dalla teoria di Newton. Semplicemente, partendo dall'ipotesi dell'invarianza di c , deduce la necessità di ancorare le misure delle durate agli osservatori. Non è possibile, in relatività ristretta, rilevare la diversa vita media di un campione di muoni se almeno per un osservatore tale campione non si trova in movimento: la dilatazione delle durate è una conseguenza del moto relativo degli osservatori. La meccanica di Newton e la relatività speciale di Einstein sono indifferenti alla possibile misura del cambiamento interno dei corpi: il fatto che esista è una mera constatazione che lasciano fuori dal loro ambito concettuale. Il progresso einsteiniano consiste nel superamento degli assoluti newtoniani e nell'acquisizione di un'emozionante idea di durata non invariante, senza esplorare la possibilità che i punti-eventi della varietà quadridimensionale, di cui la teoria si serve come substrato concettuale-sostanziale per spiegare i fenomeni, si riferiscano a corpi reali aventi una struttura interna e una

evoluzione propria, indipendente dal cammino descritto nello spaziotempo. Questo aspetto, ritenuto dai più di poco conto, è considerato fondamentale nel presente lavoro, in cui si propone una nuova area di indagine teorica all'interno della quale dibattere, in forma rinnovata, il problema del dualismo tra tempo matematico e tempo evolutivo. Questa idea può aiutare a dirimere una questione che affonda le radici in una regione speculativa sostanziata di pensiero epistemologico oltre che fisico. Un'analisi dettagliata delle teorie relativistiche consente di capire che la diversa quantificazione delle durate, fornita dagli orologi in funzione del cammino, si fonda su assunzioni assiomatiche senza un'adeguata giustificazione sperimentale, quindi arbitrarie, in quanto in tali teorie, seppur in momenti diversi, si postula implicitamente che tutti gli orologi, indipendentemente dalla loro struttura interna, debbano fornire misure fra loro equivalenti. In Einstein, in particolare, il problema della diversa quantificazione delle durate richiede l'apparato concettuale della relatività generale, in quanto solo in tale ambito teorico è possibile analizzare il comportamento degli orologi reali.

3. Effetto orologi-gemelli. Teoria di Selleri

Il riferimento empirico-teorico dell'analisi critica proposta in questo paragrafo, da cui si dirama l'argomentazione complessiva sviluppata nel lavoro, è il noto effetto orologi-gemelli, intorno al quale nel secolo scorso è fiorita una notevole varietà di interpretazioni di diversa natura. Per semplicità consideriamo che il gemello B, inizialmente nello stesso stato di moto rettilineo uniforme di A, accelera, quindi mantenga costante la velocità raggiunta, infine decelererà fino a ricongiungersi con A. Franco Selleri (2009) osserva, riprendendo argomentazioni di Geoffrey Builder¹ (1958), che, se il gemello viaggiatore modifica la lunghezza dei percorsi di moto rettilineo uniforme mantenendo immutata la velocità e lasciando inalterati i processi di accelerazione e decelerazione, trova corrispondentemente modificata la sua differenza di età da quello che non ha variato lo stato di moto. Ne deduce che la velocità, non l'accelerazione, deve essere la causa dell'invecchiamento asimmetrico. Questa constatazione concorda con

¹ Laddove nel quadro concettuale della relatività ristretta, nella formulazione originale di Einstein del 1905, l'invecchiamento asimmetrico è riconducibile alla diversa velocità dei gemelli, l'interpretazione che del fenomeno ha fornito Paul Langevin (1911) implica che la diversità delle misure delle durate sia dovuta alle fasi di accelerazione e decelerazione. A tale interpretazione si contrappone Builder, che Selleri riprende in sede di analisi critica dell'effetto orologi.

l'interpretazione einsteiniana, ma Selleri propone un'ulteriore osservazione critica di notevole importanza, facendo proprie anche le obiezioni di Herbert Dingle (1957, 1129), secondo il quale, rilevata sperimentalmente la diversa quantificazione delle durate, occorre ammettere che, se un effetto assoluto è funzione della velocità, la stessa velocità deve essere assoluta: «nessuna manipolazione di formule o concepimento di ingegnosi esperimenti può alterare questa semplice evidenza empirica». Secondo Selleri, un continuo incremento della lunghezza del tratto percorso da B a velocità costante causa un rallentamento del ritmo di marcia e una progressiva diminuzione della durata misurata dal suo orologio rispetto a quello di A (che quindi invecchia di più), posta le necessità, per avere l'asimmetria, della presenza di accelerazioni e decelerazioni di B rispetto ad A, la cui entità e durata risultano però essere ininfluenti. La teoria relativistica di Selleri si differenzia profondamente da quella einsteiniana in quanto, in particolare, postula l'esistenza di un riferimento assoluto, ritiene anisotropa la velocità della luce relativa a un sistema diverso da quello privilegiato, ammette i segnali superluminali, ritiene (in accordo con Poincaré) convenzionale la sincronizzazione relativistica degli orologi e la nozione di simultaneità relativistica di eventi lontani, considera assoluti i fenomeni di contrazione delle lunghezze e dilatazione del tempo. Dati due sistemi inerziali S e S₀, i cui assi coincidono per t = t₀ = 0, con S in moto con velocità v rispetto a S₀ in modo che l'origine di S, osservata da S₀, si muova parallelamente all'asse delle ascisse, secondo Selleri: a) lo spazio è omogeneo e isotropo e il tempo è omogeneo, almeno se giudicati da osservatori a riposo in S₀; b) in S₀ la velocità della luce è c in ogni direzione, per cui gli orologi di S₀ possono essere sincronizzati e ogni velocità relativa a S₀ è misurabile; c) la velocità della luce di andata e ritorno è la stessa in tutte le direzioni e in tutti i sistemi inerziali; d) un orologio in moto con velocità v subisce un rallentamento del

ritmo di marcia per un fattore $R = \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$.

Selleri introduce le trasformazioni inerziali delle coordinate tra i sistemi S e S₀. Si tratta di trasformazioni equivalenti a quelle di Lorentz per quanto riguarda le leggi di trasformazione delle coordinate spaziali:

$$\begin{cases} x = \frac{x_0 - vt_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \\ y = y_0 \\ z = z_0 \end{cases} \quad (1)$$

mentre la legge di trasformazione delle coordinate temporali (fondata, secondo Selleri, su solide basi empiriche) è data da:

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

Riteniamo che il punto debole del modello di Selleri (in cui spazio e tempo non formano un continuum, non essendo postulata l'invarianza di c) sia la necessità di ammettere assiomaticamente che ogni orologio debba registrare una variazione della sua frequenza propria in dipendenza dalla sua velocità rispetto allo spazio assoluto, lasciando nel vago sia il concetto di orologio sia l'analisi teorica del legame tra il periodo proprio di strumenti aventi diversa struttura interna e la velocità.

4. Effetto orologi: interpretazione di Einstein

Nel quadro concettuale della teoria di Einstein (che non riteniamo in questa sede di dover esporre, in quanto senz'altro nota al lettore), l'effetto orologi, in generale, può essere interpretato come un effetto di velocità o un effetto di potenziale. Se si osserva l'orologio B in un sistema di riferimento solidale con l'orologio gemello A, dal quale B si allontana, la relatività ristretta interpreta la diversa misura di B come dovuta alla sua velocità rispetto ad A. Se si osserva B in un riferimento solidale con tale orologio, la relatività generale interpreta la diversa misura ottenuta da quest'ultimo come una conseguenza del diverso potenziale gravitazionale o pseudo gravitazionale, dovuto all'accelerazione del riferimento. Le verifiche sperimentali della legge einsteiniana della dilatazione delle durate, effettuate a partire dagli anni 40, hanno provato che la durata non propria, che per un osservatore intercorre tra due eventi (ad esempio l'emissione e il decadimento di una particella) che si verificano in due punti distinti dello spazio, risulta dilatata del fattore $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}$ rispetto alla durata propria, misurata da un osservatore per il quale i due eventi si producono nello stesso punto. Esperienze di questo tipo, in accordo con i postulati alla base della cinematica relativistica (omogeneità e isotropia dello spazio, omogeneità del tempo, invarianza della velocità della luce nel vuoto e principio di relatività), portano a dedurre una precisa relazione tra le durate senza che queste vengano direttamente misurate: non consentono, quindi, di concludere alcunché circa le possibili diverse misure rilevate da orologi reali. Un'analisi accurata degli esperimenti (Bonizzoni e Giuliani, 2000), realizzati tra gli anni quaranta e

gli anni sessanta, mostra infatti che la legge della dilatazione è stata dedotta indirettamente a partire da misure di distanze, velocità, campi elettrici, raggi di orbite circolari descritte da particelle cariche sparate in campi magnetici, lunghezze d'onda, effettuate dall'osservatore A, ricorrendo anche a leggi estranee alla teoria (nel caso delle particelle instabili, per misurare la vita media propria, alla legge del decadimento radioattivo). In esperimenti in cui si voglia testare l'effetto orologi occorre invece confrontare le misure di durate ottenute con orologi reali che, inizialmente sincronizzati, vengano separati lungo linee di universo non equipollenti e infine confrontati nello stesso sistema di riferimento. Nel quadro teorico einsteiniano, se l'orologio B, prima di ricongiungersi con A, percorre a velocità costante un tratto rettilineo più o meno lungo, supponendo trascurabili le accelerazioni e le decelerazioni, deve misurare una durata minore di quella quantificata da A senza che il suo periodo proprio sia variato: la riduzione dell'intervallo di tempo misurato da B è una conseguenza della minore lunghezza della linea di universo descritta dall'orologio viaggiatore nello spaziotempo.

5. Il problema degli orologi reali

Da questa analisi preliminare emerge con evidenza, nella teoria di Einstein come in quella di Selleri, la necessità di assumere che debbano esistere orologi che forniscono misure in accordo con i postulati, o con le leggi che da questi postulati si possono dedurre. Accettare come spiegazione dell'effetto orologi la diversa lunghezza dei cammini nello spaziotempo può suonare come tautologico, in quanto risolve (coerentemente) il problema all'interno della teoria, mentre le obiezioni di Dingle, che Selleri riprende, sono legate implicitamente alla possibile verifica sperimentale dell'effetto con orologi reali: l'invecchiamento asimmetrico dei gemelli implica la diversa misura di orologi che descrivono due non equipollenti linee di universo. Rispetto alla teoria di Einstein, quella di Selleri, oltre a non proporre una convincente soluzione in sede operativa, rimane chiusa nell'asserto assiomatico legato all'equazione (2), senza la possibilità di allargare l'analisi all'influenza del potenziale gravitazionale e pseudo gravitazionale sul ritmo di marcia degli orologi. Riteniamo quindi opportuno, nel seguito del lavoro, salvo in sede di sintesi conclusiva, riferirci alla sola teoria einsteiniana. In ogni caso, pare inevitabile osservare che nelle teorie relativistiche gli orologi sono degli utili comprimari senza identità strutturale: devono fornire misure coerenti delle durate, salvo prova contraria in sede sperimentale. E tale prova, a tutt'oggi, è limitata agli

orologi atomici e ad altri dispositivi elettromagnetici ad essi equivalenti², come si desume dalla seguente analisi teorica dell'esperimento di Hafele e Keating.

6. Esperimento di Hafele e Keating. Analisi teorica di Hafele

Nell'esperimento di Hafele e Keating(1972), la diversa quantificazione delle durate può essere interpretata come una conseguenza della variazione del ritmo di marcia degli orologi sull'aereo³ che, secondo un osservatore corotante, è dovuta al potenziale gravitazionale e pseudo gravitazionale. Si dimostra che: a) la maggior quota dell'orologio B (viaggiante) rispetto ad A (rimasto a terra) implica un aumento del suo potenziale gravitazionale, quindi una diminuzione del suo periodo proprio; b) l'accelerazione centripeta del riferimento corotante implica la presenza anche di un potenziale pseudo gravitazionale che, sommandosi a quello gravitazionale, giustifica le diverse misure di B rispetto ad A (sappiamo che B ritarda o anticipa, rispetto ad A, a seconda che si consideri il moto verso est o verso ovest). A partire dalla legge⁴:

$$\Delta E = \Delta E_0 \sqrt{1 + \frac{2\chi}{c^2}} \quad (3)$$

che esprime la differenza di energia tra due fissati livelli in un atomo, osservato in quiete, in funzione del potenziale gravitazionale o pseudo gravitazionale χ , si ottiene (Bonizzoni e Giuliani 2000, 43) che il periodo proprio di un orologio atomico a bordo è esprimibile secondo la formula:

$$T(R + h) = T_0 \left\{ 1 + \frac{1}{c^2} \left[\frac{GM}{R+h} + \frac{1}{2} [v + (R + h)\Omega]^2 \right] \right\} \quad (4)$$

² In esperimenti recenti anche orologi basati su maser e oscillatori a cavità e orologi ottici hanno fornito misure in accordo con le leggi relativistiche.

³ Nell'elaborazione seguente si trascurano le fasi di accelerazione (in fase di decollo e raggiungimento della quota) e decelerazione (in fase di ritorno a terra) dell'aereo.

⁴ Gli esperimenti effettuati a partire dagli anni 60 hanno verificato, grazie alla scoperta dell'effetto Mössbauer nel 1957, che l'energia E dei fotoni assorbiti o emessi dai nuclei o dagli atomi dipende dal potenziale gravitazionale secondo la relazione

$$E(R + h) \approx E(R) \left(1 + \frac{gh}{c^2} \right).$$

Effetti analoghi sono stati verificati anche con nuclei o atomi su un disco rotante, in presenza quindi di potenziale pseudo gravitazionale.

dove $T_0 = \frac{h}{\Delta E_0}$ è il periodo fondamentale di un orologio atomico, con ΔE_0 differenza di energia tra due fissati livelli energetici in un atomo, in un potenziale nullo. Confrontando la (4) con la (5), che esprime il periodo dell'orologio rimasto a terra:

$$T(R) = T_0 \left[1 + \frac{1}{c^2} \left(\frac{GM}{R} + \frac{1}{2} \Omega^2 R^2 \right) \right] \quad (5)$$

si osserva che la velocità v (positiva per il volo verso est, negativa per il volo verso ovest), insieme alla diversa quota a cui avviene il moto, implica la quantificazione di un diverso potenziale gravitazionale e pseudo gravitazionale, responsabile della variazione del periodo proprio di B rispetto a quello di A. Confrontando la (4) e la (5) con la legge che quantifica il periodo proprio di un orologio atomico a distanza $r \geq R$ dal centro della Terra:

$$T(r) = T_0 \left\{ 1 - \frac{1}{c^2} [\varphi_G(r) + \varphi_A(r)] \right\} \quad (6)$$

si constata che la (4) ingloba sia l'effetto del potenziale gravitazionale $\varphi_G(r)$ della Terra alla distanza r dal centro, sia il potenziale pseudo gravitazionale $\varphi_A(r)$ alla stessa distanza dovuto all'accelerazione centripeta del riferimento. L'analisi teorica di Hafele (1972) fa invece uso della metrica di un sistema non rotante centrato in una sfera gravitazionale omogenea (la Terra). Dopo successive integrazioni, Hafele ottiene il rapporto tra gli intervalli di tempi propri misurati da un orologio sull'aereo e un orologio a terra:

$$\frac{\Delta\tau(R+h)}{\Delta\tau(R)} = \frac{1 - \frac{GM}{c^2(R+h)} - \frac{[\Omega(R+h)+v]^2}{2c^2}}{1 - \frac{GM}{c^2 R} - \frac{R^2 \Omega^2}{2c^2}} \quad (7)$$

Tale relazione, scrive l'autore, può essere molto semplificata nell'ipotesi che sia $h \ll R$:

$$\frac{\Delta\tau(R+h)}{\Delta\tau(R)} = 1 + \frac{gh}{c^2} - \frac{2R\Omega v + v^2}{2c^2} \quad (8)$$

dove $g = \frac{GM}{R^2} - R\Omega^2$ è il valore superficiale dell'accelerazione di gravità misurato all'equatore. Si constata facilmente che il rapporto tra i tempi propri calcolato da Hafele è in accordo con le formule sopra riportate. Mentre i calcoli precedenti vengono svolti senza prestare attenzione agli orologi utilizzati nell'esperimento, è importante osservare che la particolare struttura degli orologi atomici⁵ (il cui periodo proprio, a partire dalla (3), si dimostra variare in funzione del potenziale secondo la (4)) consente di ottenere misure in accordo con l'analisi teorica di Hafele. Possiamo concludere che, se B avesse descritto un'orbita di maggior raggio, quindi a diversa altezza da terra, il suo orologio atomico avrebbe risposto, secondo le previsioni relativistiche, con una diversa quantificazione della durata, in quanto sarebbe variato il suo periodo proprio, in linea con la formula (4) sopra riportata, a causa di una variazione sia del potenziale gravitazionale che pseudo gravitazionale. Queste considerazioni sono decisive nello sviluppo dell'analisi critica, in quanto permettono di predisporre verifiche sperimentali che consentano di far luce sulla definizione operativa di tempo in fisica.

7. Orologi atomici in un esperimento di tipo Dingle-Selleri

Nell'esperimento ideale di Dingle-Selleri, in cui gli orologi gemelli si separano dopo una fase di trascurabile accelerazione di B, rimangono in moto rettilineo uniforme a diverse velocità, quindi si ricongiungono dopo una trascurabile fase di decelerazione, secondo il modello teorico einsteiniano l'orologio B misura una durata minore in quanto percorre una linea di universo più breve. Il problema della diversa misura, senza che ci sia alcuna variazione del potenziale, viene quindi risolto ricorrendo a una idealizzazione teorica, senza tener conto della risposta sul campo degli orologi reali: si assume che l'intervallo di tempo sia contenuto nella linea, indipendentemente dalla struttura dell'orologio che la descrive. Poiché, secondo la formula (4), il periodo proprio degli orologi atomici non varia in un potenziale costante, si propone di sottoporre due orologi atomici a un test sperimentale di tipo Dingle-Selleri, per studiarne il comportamento in tali condizioni. Il risultato delle misure costituirebbe un necessario completamento dell'esperimento di Hafele e Keating, con lo scopo di verificare se

⁵ Segnaliamo che l'effetto, previsto dalla relatività generale, di una specifica variazione delle frequenze emesse da un atomo al variare della quota in un campo gravitazionale, è stato più volte verificato in sede sperimentale.

tali orologi sono in accordo con le previsioni relativistiche anche in situazioni in cui la contrazione della durata, misurata dal gemello che si allontana, è da attribuire a una semplice variazione di velocità senza alterazioni del potenziale.

8. Particelle radioattive nei fasci lineari

Nel 1940 Bruno Rossi e David Hall (1941) hanno ricavato la vita media di muoni in volo nell'atmosfera, calcolando, dopo aver misurato la distanza media l percorsa dalle particelle prima della disintegrazione e la loro velocità v , il rapporto $\tau = \frac{l}{v}$. Nonostante l'atmosfera abbia influenzato le misure, soprattutto per le particelle di più alta energia, l'esperimento ha confermato la legge einsteiniana

$$\tau = \frac{\tau_0}{\sqrt{1-\beta^2}} \quad (9)$$

in accordo, secondo gli autori, con l'ipotesi relativistica circa il cambiamento del ritmo di marcia degli orologi in volo. A partire dagli anni 50, tramite gli acceleratori lineari, si è studiato il moto inerziale, a velocità relativistiche, di particelle radioattive nel vuoto. In assenza dei fattori perturbativi legati agli urti dei muoni con le molecole dell'aria nell'esperimento di Rossi e Hall, nell'esperimento di David Ayres (1971), con pioni positivi e negativi in volo, si è ottenuta (procedendo in modo analogo) una verifica ancora più accurata della (9). È bene notare che il moto, nell'atmosfera come nel vuoto, è rettilineo e uniforme, per cui un osservatore solidale con le particelle (in particolare nell'esperimento degli acceleratori lineari) deve ottenere una misura della vita media identica a quella rilevata su un campione in quiete in laboratorio, come semplice conseguenza del principio di relatività. Se ne deduce che la vita media propria non viene alterata dal diverso stato di moto rispetto al laboratorio terrestre, in palese contraddizione con l'ipotesi di Rossi e Hall circa il cambiamento del periodo proprio degli orologi-particelle in volo. Consideriamo, a questo proposito, un esperimento di tipo Dingle-Selleri, in cui l'osservatore solidale con i pioni, inizialmente in laboratorio, dopo il volo si ricongiunge con l'osservatore nel laboratorio e confronta la quantità di particelle decadute nel suo riferimento con quella decaduta, a parità di sostanza madre iniziale, nel campione rimasto in quiete. La teoria prevede che l'osservatore solidale con le particelle in volo debba rilevare una minore

quantità di sostanza figlia, come conseguenza della minore lunghezza della linea di universo descritta nello spaziotempo. In assenza di un'alterazione della vita media propria dei pion in volo, occorre ammettere che la quantità di sostanza figlia possa essere la stessa in entrambi i casi: tale eventualità, qualora dovesse essere confermata dall'esperienza, implicherebbe una falsificazione della teoria einsteiniana delle durate, che gli orologi reali dovrebbero misurare di entità diversa tra due punti estremi nello spaziotempo al variare del cammino.

9. Muoni nell'anello di accumulazione. Orologi radioattivi

Nell'esperimento dei muoni nell'anello di accumulazione (Bailey *et al* 1977) si è misurata, rispetto al laboratorio, una dilatazione della vita media delle particelle in moto circolare uniforme, ottenendo un risultato analogo a quello dei muoni in volo in fasci lineari. La vita media delle particelle in volo è stata calcolata, anche in tal caso, come rapporto tra la distanza media l percorsa dalle particelle prima della disintegrazione e la loro velocità v . È da notare che l'enorme accelerazione centripeta di 10^{18} g non ha avuto effetto alcuno sui muoni, rispetto agli osservatori nel laboratorio (gli stessi autori dell'esperimento hanno rilevato con notevole interesse il fatto che una accelerazione di tale intensità non abbia influenzato la struttura interna e la vita media delle particelle), che hanno interpretato l'esperimento come un semplice effetto di velocità, per cui la vita media τ delle particelle in volo è risultata dilatata del fattore γ rispetto alla misura τ_0 effettuata in laboratorio su un campione in quiete, in accordo con la (9). Secondo la teoria della relatività generale, un osservatore corotante posto nel centro dell'anello, per il quale le particelle sono in quiete, spiega la dilatazione della vita media, rispetto a quella misurata da un osservatore su un campione in quiete nel laboratorio, come un effetto del potenziale pseudo gravitazionale dovuto all'accelerazione centripeta del riferimento. L'elaborazione teorica effettuata nel quadro concettuale della relatività ristretta implica quindi un effetto di velocità, laddove un osservatore solidale con i muoni nell'anello, nel quadro della relatività generale, rileva un effetto di potenziale. I risultati sono identici, come è prevedibile, e portano alla relazione (9) tra la vita media propria e in volo. Il problema nasce in relazione all'evidente diverso significato fisico delle analisi teoriche. Nel caso in cui i muoni sono osservati in volo non si è misurata la loro vita media, in quanto la definizione operativa di tale grandezza implica che le particelle instabili debbano essere in quiete rispetto all'osservatore. L'unica misura

operativamente corretta della vita media dei muoni nell'anello è, quindi, quella effettuata dall'osservatore corotante: l'elaborazione ottenuta nel sistema del laboratorio, pur essendo coerente, porta a dedurre la misura di una grandezza di natura diversa (chiamata impropriamente vita media in volo), che non esprime alcuna proprietà caratteristica del campione radioattivo. La relatività generale prevede che l'osservatore corotante debba misurare una quantità di decadimento legata al potenziale pseudo gravitazionale in cui il campione è immerso, quindi minore dalla quantità osservata su un identico campione in quiete nel laboratorio. Se introduciamo il concetto di orologio radioattivo (Borghi 2012), un dispositivo costituito da un campione radioattivo che consente di ottenere misure di durate quantificando la massa di sostanza decaduta in relazione a un certo fenomeno (es. viaggio di un aereo), possiamo testare il suo comportamento confrontandolo con un analogo orologio rimasto in laboratorio in una variante dell'esperimento di Hafele e Keating, in cui sugli aerei, oltre agli atomici, siano portati anche orologi radioattivi. Tale test consentirebbe di verificare se le interazioni deboli, responsabili del decadimento delle particelle instabili, sono sensibili, nella misura prevista dalla teoria di Einstein, alle variazioni del potenziale gravitazionale o pseudo gravitazionale.

10. Realtà operativa e matematica del tempo relativistico

La teoria della relatività ristretta, nella formulazione quadridimensionale di Minkowski, implica la realtà dello spaziotempo, deducendola dal postulato dell'invarianza di c . Si può indifferentemente postulare la realtà dello spaziotempo e dedurre l'invarianza di c o viceversa: il contenuto teorico delle due affermazioni è lo stesso. Lo spaziotempo è un luogo abitato da punti di universo, che possono muoversi lungo linee di universo. In tale mondo matematico non è necessario il concetto di evoluzione interna: l'evoluzione è legata a variazioni nella posizione dei punti-corpi, causate dai moti. La diversa lunghezza delle linee di universo implica un diverso tempo proprio, per cui un orologio (purché rientri, come vedremo, nella definizione di orologio relativistico), che percorra una certa linea di universo, deve misurare una durata dipendente dalla linea stessa: gli orologi si deducono dal tempo, in relatività. La cattedrale della teoria è stata costruita su basi matematico-operative: sull'invarianza di c e il principio di relatività la ristretta, fondata sul gruppo delle trasformazioni di Lorentz delle coordinate, sul principio di equivalenza e la geometrizzazione dello spaziotempo la

generale, fondata sul gruppo delle trasformazioni continue, riemanniane, delle coordinate. Spazio e tempo sono coordinate di una varietà quadridimensionale, la cui forma emersa è però, almeno questo risulta all'esperienza, solo spaziale. I nostri sensi e i nostri strumenti sondano e misurano proprietà di materia-energia come attributi costitutivi dello spazio tridimensionale. Il tempo nasce, in questo contesto, come idea operativa trasformata in variabile matematica semplicemente utile, di cui gli orologi devono fornire una quantificazione coerente. La relatività ristretta e generale sono teorie fisiche, connesse a filosofie dello spazio e del tempo, che funzionano, in materia di misura degli intervalli di tempo, solo con particolari orologi, se cioè si accetta assiomaticamente l'idea di tempo che quegli orologi (o altri ad essi equivalenti, quindi di identica costruzione) implicano. Se si prova a idearne di non equivalenti e a usarli nello stesso contesto operativo in cui gli atomici funzionano correttamente, potrebbero fornire misure tra loro incommensurabili. Questo significa che la teoria della relatività (quella di Einstein come quella di Selleri), in materia di misura di durate, genera previsioni scorrette? A una domanda tanto delicata è necessario fornire una risposta accorta e prudente. Laddove estende a tutti gli orologi proprietà che valgono solo per orologi di particolare costruzione, può fornire previsioni scorrette in quanto sovrappone concetti di tempo potenzialmente incommensurabili. Se si accetta l'ottica secondo la quale una teoria fisica, coerentemente fondata e logicamente sviluppata, debba essere testata con strumenti che funzionano rispettando le regole del gioco, ignorando per definizione tutti gli altri, la teoria è corretta qualora la si verifichi con strumenti coerenti con le ipotesi teoriche. Un'attenta analisi mostra, come vedremo nel prossimo paragrafo, che gli orologi relativistici, per essere tali, devono funzionare in riferimenti *freely falling* e devono fornire misure in accordo con le previsioni teoriche, cioè devono quantificare correttamente le durate al variare della linea di universo percorsa dallo strumento.

11. Definizione di orologio relativistico. Riferimenti in caduta libera

Ludwik Kostro (2002) propone interessanti considerazioni su quali debbano essere le caratteristiche peculiari di uno strumento di misura delle durate secondo Einstein. Partendo da una rassegna delle definizioni di orologio fornite da Einstein tra il 1905 e il 1938 (da cui si evince la necessità del ripetersi di fasi identiche, quindi la presenza, nello strumento, di un fenomeno periodico), Kostro conclude che un orologio relativistico, per ottenere misure attendibili, debba essere puntiforme e ideale. La necessità (secondo il criterio di Max Von Laue (1966)) che lo strumento presenti, oltre a una parte vibrante, un dispositivo intrinseco di alimentazione energetica e un meccanismo di retroazione che consenta di ricaricarlo, non esclude dal novero degli orologi le clessidre e i pendoli, il cui meccanismo di funzionamento, però, secondo il principio di equivalenza forte, cessa di agire in riferimenti *freely falling*. Un orologio relativistico richiede un processo interno che non cessi di prodursi in caduta libera: nella definizione rientrano sia gli orologi atomici che i radioattivi, in quanto, anche in *free fall*, gli atomi emettono fotoni e i muoni decadono. Pendoli e clessidre non sono orologi (relativistici) in quanto in tali riferimenti cessano di funzionare: questo non impedisce tuttavia che, in un certo luogo, possano scandire il tempo insieme agli orologi atomici o radioattivi. In presenza di un campo gravitazionale, o più in generale in riferimenti non in caduta libera, tali orologi gravitazionali riducono la loro frequenza allontanandosi dalla sorgente del campo, laddove gli orologi atomici la incrementano: il fatto che non possano essere considerati orologi relativistici, per la ragione sopra ricordata, non impedisce di osservare con un certo interesse, senza ridurlo a semplice curiosità, questo comportamento anomalo. In relazione ai riferimenti in caduta libera emerge un'altra interessante osservazione, legata al seguente esperimento ideale. Consideriamo un orologio viaggiatore che, dopo una fase di trascurabile accelerazione, descriva un moto di *free fall* (ad esempio all'interno di un'astronave orbitante), quindi, dopo una fase trascurabile di decelerazione, si ricongiunga col gemello. La questione è analoga a quella proposta in precedenza, relativa alla diversa misura ottenuta da due orologi in un esperimento identificato col nome di Dingle-Selleri. Nelle situazioni analizzate da tali esperienze ideali, la teoria einsteiniana spiega le diverse quantificazioni delle durate come una registrazione delle diverse lunghezze delle linee di universo descritte dagli strumenti. Nell'eventualità che due orologi (atomici o radioattivi) dovessero, in situazioni sperimentali di tipo Dingle-Selleri, ottenere la stessa misura (quantificando, ad esempio nel caso di orologi radioattivi, la stessa

massa di sostanza figlia a partire da un'identica massa iniziale di sostanza madre), si otterrebbe, come osservato in precedenza, una falsificazione della teoria einsteiniana delle durate temporali come misure, effettuate dagli orologi, delle lunghezze delle linee di universo e si aprirebbe una feconda attività di indagine, speculativa e operativa, a partire dall'analisi del comportamento, nelle diverse situazioni sperimentali, degli orologi reali, al variare anche della loro struttura interna.

12. Tempo evolutivo interno. Evoluzioni reversibili e irreversibili

Per quanto le teorie relativistiche presentino una struttura concettuale rigorosa e coerente dal punto di vista logico-matematico, la debolezza epistemologica che emerge con evidenza dalla precedente analisi è legata alla possibile sovrapposizione tra due concetti di tempo di diversa natura: il tempo-movimento e il tempo-evoluzione. Gli orologi relativistici misurano durate dipendenti dallo stato di moto o dalla posizione all'interno di un campo: tali misure vengono riferite, senza altra giustificazione che non sia la necessità di far corrispondere la durata alla lunghezza della linea di universo, anche all'evoluzione interna dei corpi solidali con gli orologi, indipendentemente dalla loro struttura. Questo salto assiomatico, per cui si considera che il tempo debba scorrere in sé, quindi in modo identico per tutti gli orologi a parità di stato di moto (o di posizione all'interno di un campo), è senz'altro l'aspetto concettuale-operativo più critico di tali teorie. Se osserviamo un moto e troviamo il modo di misurarne la durata propria, riferendola a un orologio solidale col mobile, possiamo solo concludere che tale durata è legata al movimento, non all'evoluzione interna del corpo che l'ha descritto. Le teorie relativistiche sono costruite su un concetto operativo dinamico di tempo che postulano essere anche evolutivo. La tesi fondamentale del presente lavoro è che occorra distinguere tra evoluzione interna e movimento-posizione e ridefinire il campo di applicazione, in materia di misura delle durate, delle teorie relativistiche. La relatività generale è una teoria della gravitazione in cui viene introdotta una definizione convenzionale di tempo-movimento e di tempo-posizione che vale solo al suo interno. Gli esperimenti effettuati provano che gli orologi atomici si comportano come orologi relativistici in situazioni in cui lo strumento si trova in un potenziale gravitazionale o pseudo gravitazionale variabile, in quanto il periodo proprio di tali strumenti dipende dal potenziale secondo la (4). Le prove sperimentali di cui disponiamo non consentono di estendere tale comportamento ai casi in cui il potenziale è

costante o nullo, quindi a situazioni riconducibili all'esperimento ideale di Dingle-Selleri, come l'esperimento con particelle radioattive in moto rettilineo uniforme nei fasci lineari, o gli esperimenti con orologi in riferimenti in caduta libera. In linea con l'idea fondamentale che lo ispira, questo lavoro propone di studiare, all'interno di ogni orologio, i processi evolutivi in funzione della variazione del potenziale, nell'ipotesi che in alcuni casi possano non esserne influenzati. Nel caso delle particelle radioattive, il fatto che l'esperimento del CERN abbia provato in modo inequivocabile che l'accelerazione centripeta (rispetto al laboratorio) non ha effetto alcuno (per valori di 10^{18} g) sui muoni, porta a ritenere possibile che una variazione del potenziale pseudo gravitazionale (rispetto a un osservatore corotante) non abbia influenza sulla marcia di un orologio radioattivo. Nell'esperimento dei fasci lineari, due orologi radioattivi dovrebbero misurare, una volta riuniti, la stessa durata, in quanto la sostanza figlia prodotta nei due casi è con buona probabilità la stessa, in assenza di variazioni di potenziale. Attualmente non sappiamo, per mancanza di dati sperimentali, se il comportamento degli orologi radioattivi (a parità di condizioni) sia analogo a quello degli orologi atomici: non essendo accertato se i processi che causano il decadimento sono influenzati dal potenziale allo stesso modo della variazione dell'energia tra due livelli in un atomo, non possiamo essere certi che si comportino come gli atomici in situazioni sperimentali di tipo Hafele-Keating. È bene distinguere, in relazione al funzionamento dei diversi orologi, i processi reversibili da quelli irreversibili. Gli orologi atomici variano il periodo proprio al variare del potenziale gravitazionale e pseudo gravitazionale, adeguando il ritmo di marcia al potenziale senza che si producano all'interno dello strumento dei processi irreversibili, che cioè ne abbiano alterato in modo definitivo la struttura interna una volta riportati, dopo un certo cammino, al punto iniziale. Gli orologi radioattivi sono invece legati a processi evolutivi di natura chiaramente irreversibile, in quanto varia la quantità di sostanza madre disponibile al cambiamento interno: il decadimento implica una trasformazione che spontaneamente non può ripristinare lo stato iniziale, una volta riportato lo strumento, dopo un certo cammino, nel punto di partenza. Non ritenendo di poterla adeguatamente indagare, ci limitiamo in questa sede a suggerire che la causa della possibile discrepanza tra le misure di durate evolutive e relativistiche sia da rinvenire nella natura termodinamica, oltre che quantomeccanica, dei processi evolutivi, per cui l'aumento dell'entropia all'interno di un sistema, con buona approssimazione isolato, può comportare una totale indipendenza di un orologio, ad esempio radioattivo, da fattori esterni (o, al limite, la

trascurabilità di questi ultimi rispetto ai primi) che, nel caso degli orologi relativistici (atomici), risultano invece essere determinanti e prevalenti. Ci proponiamo in lavori futuri di esplorare questa idea, senz'altro feconda di sviluppi teorici anche di natura quantistica.

13. Una via alternativa verso il tempo

Nella sua autobiografia scientifica Albert Einstein osserva che la relatività ristretta introduce due tipi di oggetti fisici: 1) le aste metriche e gli orologi; 2) tutto il resto, quindi il campo elettromagnetico, il punto materiale, ecc. Questo dualismo (estendibile alla relatività generale, se in tutto il resto si include anche il campo gravitazionale, interpretato come curvatura dello spaziotempo) risulta essere, come riconosce lo stesso Einstein, piuttosto problematico, in quanto le aste metriche e gli orologi (oggetti costituiti da configurazioni atomiche in movimento) dovrebbero poter essere dedotti come soluzioni delle equazioni fondamentali su cui la teoria è stata costruita, e non essere concepiti come entità teoricamente autoconsistenti. Scrive Einstein:

Strictly speaking, measuring rods and clocks would have to be represented as solutions of the basic equations (objects consisting of moving atomic configurations), not, as it were, as theoretically self-sufficient entities. [...] But one must not legalize the mentioned sin so far as to imagine that intervals are physical entities of a special type, intrinsically different from other variables. (1949, 59-61)

È chiaro da principio che i fondamenti assiomatici della relatività non sono sufficientemente forti da consentire di dedurre equazioni complete al punto da fondare una teoria degli strumenti di misura. Il «peccato» consapevole a cui fa riferimento Einstein implica la dichiarazione esplicita di una potenziale incompatibilità, in particolare tra gli orologi reali e le durate che, in accordo con le equazioni che si deducono dai fondamenti su cui la teoria è stata edificata, gli strumenti dovrebbero quantificare. Einstein sceglie di procedere, ispirato da una necessaria fede empirica, dallo spaziotempo agli strumenti di misura, in particolare dalle durate temporali agli orologi reali. Il fatto che su tale peccato metodologico sia stata fondata anche la relatività generale è provato dalle situazioni sperimentali analizzate in questo lavoro, riassunte nel paragrafo precedente, in cui occorre ammettere che ogni orologio debba quantificare correttamente la durata prevista dalla teoria, come fosse in grado di misurare la lunghezza della linea di universo lungo la quale idealmente si muove. La strada alternativa

implica che si affronti il problema della misura delle durate a partire dagli orologi reali. Secondo tale impostazione, una variazione della misura deve essere legata a una variazione del periodo proprio dello strumento. Poiché il ritmo di marcia di un orologio può cambiare solo in conseguenza di una variazione del potenziale gravitazionale o pseudo gravitazionale, si deduce che una semplice variazione di velocità, tra due punti estremi, di un orologio rispetto all'altro, non possa causare una variazione della misura della durata, qualunque sia la natura dell'orologio. Nel caso degli orologi radioattivi rimane aperta la possibilità che non risentano neppure delle variazioni di potenziale, per cui potrebbero quantificare, indipendentemente dal percorso seguito tra due punti estremi, anche in presenza di diversi potenziali, lo stesso prodotto di decadimento, dunque misurare la stessa durata. Coerentemente con la necessità di misurare tempi evolutivi, occorre quindi sottoporre diversi orologi a test sperimentali, volti a controllare come varia il loro ritmo di marcia al variare del cammino tra due punti-eventi estremi. A partire da un'analisi accurata del comportamento, a parità di condizioni, di orologi aventi diversa struttura, il problema della natura del tempo può essere operativamente rifondato, come risulta dalle seguenti argomentazioni conclusive.

14. Conclusioni. Dagli orologi al tempo

La conclusione di questo lavoro consiste in una serie di riflessioni relative alla natura del tempo, il cui valore corrisponde a quello di nuove strategie operative o di domande aperte. L'analisi delle teorie relativistiche ha evidenziato la realtà conflittuale del tempo, in quella di Einstein come in quella di Selleri, in quanto in entrambe la misura delle durate è legata ad assunzioni assiomatiche, senza giustificare, nelle diverse situazioni sperimentali, la risposta degli orologi reali. La domanda implicita sulla natura del tempo, proposta all'interno di ogni teoria fisica, produce risposte legate a congetture, sviluppate secondo catene logiche che in ultima analisi si riducono a tautologie. L'unica teoria che pone esplicitamente a fondamento tale tautologia è quella di Newton, che riconosce la natura metafisica del tempo, disquisendo di durata matematica inaccessibile agli strumenti. Le teorie relativistiche, che paiono aver radicato il concetto in una sua fondazione operativa rigorosa e apparentemente inconfutabile, si risolvono a loro volta in congetture matematiche, in quanto le durate sono implicitamente contenute nelle linee di universo (Einstein) o devono dipendere dalla velocità rispetto al riferimento assoluto (Selleri), per cui

sono orologi solo gli strumenti che consentono di ottenere misure coerenti con le previsioni teoriche. La natura irreversibile dei processi che determinano il funzionamento di orologi che, con buona probabilità, non forniscono misure in accordo con le leggi relativistiche, implica che alcuni di essi possano misurare durate evolutive indipendenti dallo stato di quiete o di moto dello strumento. Se tale ipotesi venisse suffragata da opportune verifiche sperimentali (il caso più notevole, che in questa sede si suggerisce di indagare, è quello degli orologi radioattivi), della realtà operativa del tempo potrebbe essere impossibile dare una definizione unitaria. In particolare, la misura del tempo cosmico potrebbe avere un significato puramente convenzionale, in quanto derivante da una sintesi tra misure della radiazione di fondo, che fornisce indicazioni termodinamiche circa il tempo di raffreddamento, e misure relative all'espansione, che forniscono informazioni di natura geometrica e dinamica. Qualora tali orologi impliciti fornissero misure incommensurabili⁶, l'universo potrebbe essere interpretato come un contenitore di evoluzioni di diversa natura non riconducibili ad un unico flusso temporale. Il fondamento matematico-metafisico che anima il cuore speculativo delle teorie scientifiche dovrebbe in tal caso essere rimesso in discussione, a partire da una chiara analisi del concetto di orologio nei diversi ambiti teorici e operativi in cui viene utilizzato per ottenere misure di durate temporali. L'obiettivo primario è stabilire se esistono orologi che forniscono misure fisicamente diverse, quindi non riconducibili a un quadro teorico unitario, come pretende la teoria della relatività che, in termini di misura di durate, fornisce leggi matematiche che consentono di prevedere l'evoluzione di tutti i corpi-orologi al variare delle linee di universo, quindi dello stato di moto o della posizione all'interno di campi. Alla luce dell'analisi di cui sopra potrebbe emergere l'impossibilità di una visione teorica unitaria (che ha ispirato fortemente la riflessione einsteiniana, fondata sulla convinzione della radice ideale, matematica dei fenomeni fisici) a cui ricondurre l'oggetto dell'indagine proposta in questo lavoro. Occorrerebbe in tal caso erigere su basi nuove l'impalcatura matematica su cui si regge l'idealizzazione dei fatti sperimentali che anima la fisica: se, come dice Rovelli (1999, 14), «il tempo è ignoranza, un riflesso della nostra conoscenza incompleta dello stato del mondo», serve una opportuna revisione critica, fondata sulle osservazioni proposte in questa sede. Ripartire dagli orologi, per trovare risposte sul ritmo evolutivo di corpi

⁶ La nota questione della maggiore età di alcune stelle rispetto all'età del tutto potrebbe essere una ulteriore conseguenza della sovrapposizione tra scale temporali incommensurabili.

e fenomeni, potrebbe consentire alle teorie di rinnovare tale concetto operativo e costruire, senza pretese di universalità, nuove ipotesi esplicative della complessità del reale.

Ringraziamento. L'autore desidera esprimere un profondo debito di gratitudine per il prof. Silvio Bergia (Dipartimento di Fisica, Università di Bologna) che, pur non condividendone alcuni dettagli, ha consentito alle idee qui proposte di crescere ed evolvere e trovare la sistemazione conclusiva presentata in questa sede.

Bibliografia

- Ayres, D.S. *et al* (1971), “Measurements of the Lifetime of Positive and negative Pions”, *Physical Review D* 3, 1051-1063
- Bailey, J. *et al.* (1977), “Measurements of Relativistic Time Dilatation for Positive and Negative Muons in a Circular Orbit”, *Nature* 268, 301-305
- Bonizzoni, I., Giuliani, G. (2000), *The interpretations by experimenters of experiments on ‘time dilation’: 1940 - 1970 circa*, arxiv.org/abs/physics/0008012
- Borghi, C. (2012), “Effetto orologi e definizioni operative di tempo”, *Isonomia Epistemologica*. L’articolo è uscito anche in versione inglese: “Clock effect and operational definitions of time”, *Annales de la Fondation Louis de Broglie*, vol. 37, 227-237
- Builder, G. (1958), “Ether and Relativity”, *Austral. Jour. Phys.* 11, 279
- Dingle, H. (1957), Relativity and space travel, *Letters to Nature* 179, 1129
- Einstein, A. (1949), *Autobiographical Notes*, Chicago: Open Court Publishing Company, 59-61
- Hafele, J.C., Keating, R.E. (1972), “Around-the-World-Atomic Clocks: Predicted Relativistic Time Gains”, *Science* 177, 166-168
- Hafele, J.C. (1972), “Relativistic Time for Terrestrial Circumnavigations”, *American Journal of Physics* 40, 81-85
- Kostro, L. (2002), “Gli orologi nella teoria relativistica”, in *La natura del tempo*, a cura di F. Selleri, ed. Dedalo, Bari
- Langevin, P. (1911), “L’evolution de l’espace et du temps”, *Scientia* 10, 31-54
- Newton, I. (1687): *Philosophiae naturalis principia mathematica*, London (*Principi matematici della filosofia naturale*, cura e introduzione di A. Pala, Utet, Torino (1965)).

Rossi, B., Hall, D.B. (1941), "Variation of the Rate of Decay of Mesotron with Momentum", *Physical Review* 59, 223-228

Rovelli, C. (1999), *Quantum spacetime: what do we know*, arxiv.org/pdf/gr-qc/9903045v1

Selleri, F. (2009), *La relatività debole: la fisica dello spazio e del tempo senza paradossi*, Dedalo, Bari

Von Laue, M. (1966), *Geschichte der Physik*, Ullstein, Berlin.