



Effetto orologi e definizioni operative di tempo

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

Abstract

Starting from a critical analysis of the clock effect, this paper proposes to deduce different operational definitions of time from the different clocks that we can use to quantify durations. A new interpretation of thermodynamic time, as different from absolute and relativistic, is introduced. The analysis leads to infer the coexistence in physics of different incommensurable operational definitions of time and the need of discuss their coherence and reality.

1. Introduzione

Il presente lavoro nasce da un'analisi critica dell'effetto orologi. La possibile diversa interpretazione delle misure, in particolare alla luce del legame tra il periodo degli orologi atomici e il potenziale gravitazionale e pseudogravitazionale, rende necessaria una revisione della definizione operativa di tempo, derivandola dal cuore dinamico degli orologi che si possono utilizzare negli esperimenti. Oltre al tempo newtoniano e al tempo einsteiniano, in fisica viene implicitamente utilizzato anche il tempo termodinamico, di cui qui si propone una definizione operativa deducendola dagli orologi radioattivi, che potrebbero quantificare durate diverse, relativamente alla stessa linea di universo, rispetto a quelle quantificate dagli orologi atomici. Prove sperimentali effettuate su muoni accelerati hanno infatti rivelato la probabile indipendenza della vita media di queste

particelle dall'accelerazione e dal potenziale gravitazionale. Se ne deduce che orologi radioattivi a muoni dovrebbero fornire misure in disaccordo con le previsioni relativistiche, se venissero impiegati in un esperimento come quello di Hafele e Keating. Emerge la possibilità che in fisica si effettuino misure che coinvolgono una pluralità di tempi incommensurabili tra loro. L'analisi, distinguendo il concetto di tempo proprio di matrice relativistica da quello di tempo interno di matrice termodinamica, rende evidente la necessità di superare l'attuale ambiguità di interpretazione circa la sua realtà in relazione alle misure delle durate che gli strumenti forniscono.

2. Effetto orologi

Nel 1907 Albert Einstein si propose di generalizzare la sua teoria speciale della relatività ai riferimenti non inerziali. In prima battuta osservò che in un riferimento accelerato compaiono delle forze apparenti che presentano, in comune con la forza di gravità, la proprietà di essere proporzionali alla massa del corpo su cui agiscono. Da tale profonda quanto immediata osservazione Einstein dedusse il noto principio di equivalenza, secondo il quale una forza apparente in un riferimento accelerato è fisicamente indistinguibile da una forza di gravità. Ne ricavò che la generalizzazione della teoria della relatività ai riferimenti accelerati implicava una nuova teoria della gravitazione.

Come osserva Elio Fabri (2001, 1), gli si presentarono le seguenti possibilità:

scrivere tutte le leggi della fisica in una forma valida in un sistema di coordinate arbitrario (principio di covarianza generale), in quanto la trasformazione di coordinate tra riferimenti in moto qualunque è più generale di quella tra riferimenti inerziali (trasformazioni di Lorentz);

pensare che in presenza di campi gravitazionali lo spaziotempo non abbia più la metrica di Lorentz-Minkowski valida in relatività ristretta: poiché i campi gravitazionali sono generati da masse, Einstein formulò l'ipotesi che la presenza di masse incurvi lo spaziotempo e si propose di trovare le leggi di questo incurvamento (equazioni di Einstein del campo gravitazionale, interpretato come curvatura dello spaziotempo).

La relatività generale, sviluppata a partire da queste intenzioni del suo creatore, si è formata in una teoria che è stata diversamente interpretata: c'è chi vede come suo elemento caratteristico l'adozione di coordinate e di sistemi di riferimento qualsiasi; c'è invece chi ritiene che l'essere lo

spaziotempo lorentziano o meno segni il confine tra i territori delle due teorie relativistiche. Sposando la seconda interpretazione, non si utilizza la teoria generale se si studiano situazioni fisiche in cui lo spaziotempo è piatto (non incurvato), indipendentemente dalle coordinate che si sceglie di usare: la scelta del sistema di coordinate è semplicemente matematica, non ha alcun significato fisico. Se si accetta la prima interpretazione, anche se lo spaziotempo è piatto, il solo fatto di descrivere i fenomeni da un riferimento accelerato implica che si sta lavorando fuori dal territorio della teoria speciale, in quanto non si possono utilizzare le trasformazioni di Lorentz. Va osservato (aspetto non trascurabile) che gli esperimenti in un riferimento accelerato mostrano fenomeni che non si osservano in un riferimento inerziale, come l'impossibilità di sincronizzare orologi posti in luoghi diversi o la propagazione non rettilinea della luce. Se si condivide la seconda interpretazione, pur non negando gli effetti sopra citati, si deduce che le proprietà fisiche dello spaziotempo non sono influenzate dall'adozione di un riferimento accelerato, né lo sono dalla scelta di un sistema di coordinate piuttosto di un altro.

Descriviamo, idealmente, un esperimento in cui si confrontano le misure di due orologi che, inizialmente sincronizzati, vengono separati in modo da percorrere diverse linee di universo e quindi di nuovo riuniti¹. Mentre l'orologio A (inizialmente sincronizzato con B) si muove di moto rettilineo uniforme (fermo in un opportuno riferimento inerziale), B si allontana per poi ricongiungersi con A.

Scriva Fabri (2001, 2):

Immaginiamo A e B su due astronavi affiancate: mentre quella di A rimane a motori spenti per tutto l'esperimento, quella di B accende i razzi, compie un viaggio a piacere, torna vicino ad A, manovra in modo da affiancarsi di nuovo e si ferma rispetto ad A. Se ora si confrontano gli orologi, si trova che A è avanti rispetto a B.

Il cosiddetto paradosso degli orologi è fondato: a) sulla concezione newtoniana del tempo assoluto, per cui pare assurdo che i due orologi possano misurare tempi diversi; b) sull'apparente paradosso della simmetria, per cui, se è vero che B si è mosso rispetto ad A, e si accetta che misuri un tempo minore per il fatto che si è mosso, basta mettersi dal punto di vista di

¹ L'esperimento reale è stato effettuato nel 1971 dai fisici americani Hafele e Keating confrontando i tempi misurati da quattro orologi atomici collocati su aerei commerciali che hanno circumnavigato la Terra – una prima volta volando verso est, una seconda verso ovest – con il tempo misurato da orologi solidali con il riferimento terrestre.

B per giungere a conclusioni opposte. In tale seconda ipotesi, B appare fermo e A si allontana e ritorna rispetto a lui, quindi dovrebbe essere A a misurare un tempo minore: non potendo le due cose essere entrambe vere, se ne inferisce che siano entrambe false, quindi che i due tempi debbano essere uguali (tale argomentazione è stata sostenuta da Herbert Dingle (1972)). Mentre il paradosso nella sua prima formulazione si rimuove (facilmente) eliminando i retaggi dell'interpretazione psicologica del tempo assoluto newtoniano, la seconda argomentazione appare più sottile e a prima vista incontrovertibile: sembra aprire una falla nell'edificio logico della relatività, intaccando alle fondamenta proprio il concetto di relatività del moto e di equivalenza dei sistemi inerziali. Il punto è in effetti proprio questo: le due astronavi non sono entrambe riferimenti inerziali, per cui la supposta equivalenza non sussiste, in quanto (almeno) una delle due costituisce un riferimento accelerato. Se si accetta di interpretare i riferimenti accelerati all'interno della teoria ristretta, a partire dal concetto di tempo proprio, si deduce che ogni corpo ha un suo tempo proprio, legato alla metrica dello spaziotempo. Tale tempo proprio può essere interpretato come la *lunghezza* della curva che il punto descrive nello spaziotempo: «la curva esiste sempre, che il corpo si muova o no, per il solo fatto che *il tempo passa*» (Fabri 2001, 2). Se, nel caso dell'esperimento di Hafele e Keating (1972), consideriamo gli orologi sugli aerei e quelli a terra, li vediamo descrivere due linee di universo diverse (aventi gli stessi estremi), la cui lunghezza è calcolabile a partire dalla teoria di Minkowski (si dimostra che, fra tutte le curve che uniscono due punti nello spaziotempo, il segmento di retta ha la lunghezza massima). Si deduce che, secondo Einstein, tale lunghezza dovrebbe essere il tempo misurato dall'orologio, per cui l'orologio A, che si muove di moto rettilineo uniforme (la sua curva nello spaziotempo è una retta), dovrebbe segnare il tempo più lungo rispetto a qualunque altro: il condizionale è d'obbligo, visto che la teoria non spiega chiaramente né cosa sia un orologio né cosa significhi, fisicamente, il fatto sperimentale che *il tempo passa* e gli orologi ne registrano la misura al variare della linea di universo che descrivono.

3. Effetto orologi e potenziale gravitazionale

Ilaria Bonizzoni e Giuseppe Giuliani (2000, 37-38) osservano che negli orologi atomici gli atomi si comportano come microscopici dispositivi che bloccano la frequenza delle microonde assorbite dagli atomi stessi: il blocco della frequenza è garantito dalla coincidenza tra l'energia $h\nu$ delle

microonde e la differenza di energia ΔE tra i due stati quantici della transizione. Esperimenti sul red-shift gravitazionale hanno mostrato che la differenza di energia ΔE e, quindi, l'energia dei fotoni emessi o assorbiti dai nuclei o dagli atomi, dipende dal potenziale associato alla gravitazione o all'accelerazione. Se ne deduce che il periodo fondamentale degli orologi atomici dipende dal potenziale gravitazionale o pseudogravitazionale come l'energia dei fotoni assorbiti dagli atomi o dai nuclei.

L'elaborazione dei dati sperimentali ottenuti da Hafele e Keating può essere effettuata (Bonizzoni e Giuliani 2000, 43-44) a partire dalla legge:

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

che esprime la differenza di energia ΔE tra due stati quantici di un atomo, in quiete in un potenziale gravitazionale χ , in funzione della differenza di energia ΔE_0 in corrispondenza a un potenziale nullo. Poiché il periodo fondamentale di un orologio atomico in un potenziale gravitazionale nullo è espresso dalla relazione:

$$T_0 = \frac{h}{\Delta E_0} \quad (2)$$

otteniamo, dalla (1), il periodo fondamentale $T(R)$ di un orologio in quiete all'equatore:

$$T(R) = T_0 \left\{ 1 - \frac{1}{c^2} [\varphi_G(R) + \varphi_A(R)] \right\} \quad (3)$$

dove $\varphi_G(R)$ è il potenziale gravitazionale della Terra all'equatore e $\varphi_A(R)$ è il potenziale pseudogravitazionale all'equatore dovuto all'accelerazione centripeta. Ne segue che:

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

dove G è la costante di gravitazione universale, R , M e Ω sono rispettivamente il raggio, la massa e la velocità angolare della Terra.

Per gli orologi in volo su una circonferenza di raggio $R + h$ si ottiene invece:

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

dove v è la velocità dell'aereo rispetto al suolo, positiva per il volo verso est, negativa per quello verso ovest.

Dalle formule sopra riportate si deduce che l'esperimento di Hafele e Keating (interpretato come una delle prove più credibili della dilatazione temporale testata su orologi macroscopici) può essere considerato solo come una verifica dell'effetto del potenziale gravitazionale o pseudogravitazionale sull'energia dei fotoni emessi o assorbiti dagli atomi e, quindi, sul periodo degli orologi atomici.

4. Tempo proprio

Ad un'attenta analisi, emerge che in fisica il concetto di tempo viene usato in due modi antitetici: come attributo esterno del moto o come *variabile implicita* che misura dall'interno l'evoluzione di un sistema. La prima concezione è esplicitamente utilizzata in meccanica, la seconda, implicitamente, in termodinamica. Il fatto che, in termodinamica, la variabile t in pratica non compaia nella definizione delle grandezze porta ingenuamente a pensare che il concetto di tempo, definito in meccanica, si possa trasportare ovunque. Anche se può suonare semplificativo, risalta invece con immediatezza che, mentre l'evoluzione meccanica è legata alla variazione della posizione di un corpo rispetto agli altri, l'evoluzione termodinamica di un sistema è legata a processi che lo coinvolgono internamente e possono non avere legami con l'ambiente, quindi con lo spazio delle relazioni, esterno. Nel primo caso, il tempo è attaccato come

un'etichetta al sistema, nel secondo emerge come grandezza che ci informa del suo divenire intrinseco. Nella meccanica einsteiniana gli orologi sono oggetti idealmente legati ai corpi che misurano diversi flussi di tempo, connessi alla collocazione o al moto dei corpi stessi. La differenza tra la teoria di Newton e quella di Einstein sta nell'impalcatura matematica che deriva dalle diverse concezioni dello spazio e del tempo, che a loro volta emergono da ben noti diversi assunti empirici posti a fondamento. Nell'una lo spazio è un contenitore e il tempo scorre in una dimensione parallela come durata assoluta, nell'altra lo spazio non esiste come contenitore, sono reali solo i campi e le interazioni (la materia può essere pensata come diversa concentrazione del campo), mentre il tempo scorre in una dimensione che, pur essendo inaccessibile dallo spazio, forma con esso un continuum, la cui struttura matematica è descritta da equazioni da cui si desume che gli orologi, opportunamente costruiti, devono misurare tempi propri variabili al variare della linea di universo che percorrono. Mentre Newton non chiede agli orologi di misurare durate assolute, che non possono per definizione essere realmente quantificate, essendo semplici astrazioni matematiche, Einstein chiede agli orologi di misurare tempi propri reali, come fossero osservatori che sondano la forma matematica delle leggi su cui è costruito l'edificio della teoria. L'incongruenza che ne nasce è di natura operativa, in quanto l'orologio einsteiniano, risentendo dell'azione dei campi (gravitazionali, elettromagnetici, ecc.) in cui è immerso, deve fornire misure coerenti di tempi propri. Il tempo proprio, secondo la teoria di Einstein, dipende dalla curvatura dello spaziotempo determinata dalla distribuzione della materia-energia in cui si trova o si muove l'orologio-osservatore, quindi è un *tempo proprio esterno* all'orologio, la cui misura è influenzata dalla struttura relazionale dei campi in cui descrive la sua linea di universo. Se costruiamo orologi che sfruttano fenomeni microscopici (un esempio è il decadimento radioattivo) di diversa natura rispetto a quelli che determinano il funzionamento degli orologi atomici, possiamo analizzare le misure ottenute con tali strumenti e verificare se esiste un tempo proprio che fornisce indicazioni diverse da quelle previste dalla teoria di Einstein. Se le misure ottenute con orologi radioattivi non dipendono dai campi in cui sono immersi né dall'accelerazione, essi quantificano il *tempo proprio interno* dello strumento. Se le durate quantificate risultano incommensurabili rispetto a quelle fornite dagli orologi atomici, ne possiamo concludere che il tempo relativistico è un concetto che vale solo all'interno della teoria della relatività e non è esportabile altrove, se non a prezzo di creare scorrette sovrapposizioni concettuali. La necessaria attenzione alla ragione fisica per

cui orologi diversi producono misure incommensurabili di durate può guidarci a capire a fondo il problema del tempo, perlomeno a cercare nuove risposte a questioni empiriche come quelle sollevate dalle diverse possibili interpretazioni delle misure effettuate da Hafele e Keating.

5. Tempo termodinamico e orologi radioattivi

Diversamente dalle monadi leibniziane, senza porte né finestre, gli orologi atomici risentono della distribuzione di materia-energia in cui sono immersi. Tali strumenti riducono il tempo al conteggio di oscillazioni periodiche idealmente reversibili. In che relazione sta tale grandezza concettuale col tempo irreversibile, interpretabile come una variabile intrinseca che misura l'evoluzione termodinamica di un sistema, implicitamente legata al degrado reale della materia e dell'energia? Come strumenti di misura del tempo irreversibile possiamo utilizzare gli orologi radioattivi, che quantificano il prodotto crescente del decadimento e consentono di misurare l'incremento della *quantità di trasformazione* che si produce nel sistema di cui fanno parte (se isolato). Il decadimento radioattivo è un processo irreversibile, legato alla produzione di una sostanza figlia a partire da una sostanza madre. Consideriamo la legge

$$N = N_0(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (6)$$

dove N esprime la quantità di sostanza prodotta dal decadimento come funzione strettamente crescente del tempo t e N_0 la quantità presente inizialmente. Osserviamo che il valore di N può essere considerato una *misura diretta del tempo termodinamico*: espresso in unità N_0 , quantifica la *durata* del decadimento. Se risolviamo l'equazione (6) rispetto al tempo, possiamo calcolare il corrispondente valore di t : la quantificazione di t non è necessaria, è semplicemente utile. Dalla (6) si ottiene:

$$t = \tau \ln \frac{N_0}{N_0 - N} \quad (7)$$

Se misuriamo (in unità N_0) la durata N di un fenomeno localmente simultaneo al decadimento (ad esempio la durata del viaggio di un aereo),

possiamo quindi calcolare la durata stessa in unità τ a partire dalla (7). Possiamo anche convertire t in secondi utilizzando il valore noto della vita media della sostanza. Questo procedimento ha un significato fisico importante: ci fa capire che un simile orologio misura un tempo proprio reale, sfruttando un fenomeno non periodico e irreversibile che si produce al suo interno. Variando la sostanza radioattiva (il cuore dinamico dello strumento) otteniamo un altro orologio il cui τ (che determina la velocità del decadimento) è diverso dal precedente. L'incommensurabilità delle misure di durate ottenute con diversi orologi radioattivi rispetto a un orologio newtoniano ci impedisce di concludere che tali strumenti possano servire a misurare il tempo assoluto. Tantomeno possiamo equiparare gli orologi radioattivi a orologi relativistici, in quanto inadeguati a quantificare gli effetti previsti dalla teoria di Einstein. Il concetto di tempo di Newton ed Einstein è intrinsecamente reversibile, di natura fisicamente diversa rispetto a quello che misuriamo con un orologio radioattivo. Gli orologi radioattivi sono chiari esempi di dispositivi di natura termodinamica. In effetti nel decadimento sono coinvolti miliardi di atomi e non ha certo senso chiedersi se ognuno obbedisce alla legge (6): dal caos microscopico emerge l'ordine matematico come comportamento medio di una popolazione di particelle che si riassume in una formula semplice. Risulta evidente che in termodinamica il concetto di tempo viene a galla dal caos molecolare, dal disordine microscopico. La (6) implicitamente dice che una popolazione madre di N_0 atomi decade, producendo una quantità misurabile N di sostanza figlia. L'incremento progressivo di N è una conseguenza sperimentale dell'aumento dell'entropia. E' ben vero che si può obiettare che un orologio radioattivo non costituisce necessariamente un sistema isolato: il principio dell'aumento dell'entropia si applica ai sistemi isolati o più generalmente al sistema e l'ambiente. Tuttavia, se verificiamo sperimentalmente che non risente dell'azione dei campi in cui è immerso né dell'accelerazione, possiamo dedurre che tale orologio forma un sistema isolato, quindi misura un *tempo proprio interno*. Dopo aver costruito, coerentemente con le ipotesi di lavoro (le regole del gioco), le formalizzazioni teoriche e i quadri concettuali entro i quali la definizione operativa di tempo fisico viene formulata, è necessario distinguere chiaramente le aree di indagine. Il tempo termodinamico, misurabile da orologi all'interno dei quali non si producono fenomeni periodici, ma trasformazioni energetiche legate a processi irreversibili, serve per misurare il degrado reale dei corpi e dell'energia. Orologi di diversa costruzione servono a quantificare processi fisici diversi. L'irriducibilità del tempo termodinamico al tempo assoluto o al tempo einsteiniano implica che in

ogni ambito debbano essere progettati orologi specifici. Esperimenti diversi sul tempo non esprimono quindi proprietà del tempo in sé, ma degli oggetti o dei fenomeni che quegli strumenti sono stati chiamati ad indagare.

6. Tempo assoluto, relativistico e termodinamico

Nella teoria di Newton (1687, trad. it. 104-107) l'assoluto del tempo è postulato: «il tempo assoluto, vero, matematico, in sé e per sua natura senza relazione ad alcunché di esterno, scorre uniformemente, e con altro nome è chiamato durata». Gli orologi newtoniani sono dispositivi reali che forniscono «una misura (accurata oppure approssimativa) sensibile ed esterna della durata per mezzo del moto, che comunemente viene impiegata al posto del vero tempo». Nella teoria di Einstein il tempo forma un continuum con lo spazio e gli osservatori-orologi ne forniscono misure diverse a seconda del sistema di riferimento. L'analisi di tali misure sembra provare in modo inequivocabile che la chiave per aprire la porta della definizione operativa del tempo fisico debba essere la teoria di Einstein, in confronto alla quale quella di Newton fornisce strumenti concettuali inadeguati per interpretare i dati sperimentali: il tempo newtoniano pare essere una semplice variabile matematica, impossibile da misurare con orologi reali. Esperimenti sulla dilatazione del tempo testata su particelle in volo sono stati effettuati a partire dagli anni 40: ricordiamo in particolare quello di Bruno Rossi e David Hall (1941) su particelle in volo inerziale nell'atmosfera. Nei decenni seguenti furono effettuati diversi altri esperimenti, in particolare su particelle in moto inerziale ad alta energia prodotte negli acceleratori. Scrive D.S. Ayres (1971): «La dilatazione del tempo osservata sulla vita media delle particelle si accorda con una precisione dello 0.4 % con la previsione teorica e costituisce la verifica più precisa di questo aspetto della relatività speciale». L'analisi teorica delle misure prova in effetti in modo inequivocabile la correttezza della legge einsteiniana

$$\tau = \frac{\tau_0}{\sqrt{1-\beta^2}} \quad (8)$$

in cui τ_0 rappresenta il tempo proprio della particella (la vita media propria misurata da un osservatore che si trova nello stesso stato di moto della particella stessa) e τ il tempo non proprio (la vita media misurata da un osservatore rispetto al quale la particella è in volo). Occorre osservare che la

citata legge della dilatazione del tempo, verificata in esperimenti del tipo di quelli di Rossi e Ayres, implica che la vita media venga misurata da due osservatori rispetto ai quali la particella si trova in diversi stati di moto. L'esperimento ha quindi natura ben diversa da quello di Hafele e Keating, citato in precedenza, in cui si prova che orologi inizialmente sincronizzati, se vengono separati per percorrere diverse linee di universo e quindi vengono riuniti e confrontati, segneranno diverse misure della durata intercorsa tra l'evento separazione e l'evento riunione. In tal caso vengono confrontati, al variare delle linee di universo descritte tra due eventi fissati, i tempi propri che gli orologi misurano. Mentre negli esperimenti sopracitati di Rossi e Hall, ecc., non sono state confrontate direttamente misure fornite da orologi (si è verificata indirettamente la diversa durata della vita media di una particella rispetto a un osservatore solidale con la particella stessa e a un altro in moto rispetto al primo), l'effetto orologi implica la diversa durata di un fenomeno (viaggio dell'aereo) compreso tra due eventi (inizio e fine) secondo quanto dovrebbero rilevare le misure effettuate dagli orologi, sincronizzati nell'istante della separazione e confrontati quando si ricongiungono, che percorrono diverse linee di universo comprese tra gli stessi eventi estremi. L'esperimento di Hafele e Keating, quindi, testa direttamente sugli orologi la dipendenza delle misure dalla linea di universo descritta. I dati sperimentali di cui disponiamo attualmente ci consentono di concludere che gli orologi atomici rilevano misure di tempi propri relativistici coerenti con le previsioni teoriche in quanto gli atomi, comportandosi come microscopici dispositivi che bloccano la frequenza delle microonde assorbite dagli atomi stessi, consentono di misurare le variazioni del potenziale gravitazionale o pseudogravitazionale: la corrispondenza tra periodo proprio dello strumento e potenziale, come mostrato dall'equazione (5), sembra attualmente essere una proprietà valida solo per gli orologi atomici. Ci chiediamo: se orologi di diversa costruzione, all'interno dei quali non si producono le transizioni quantiche che consentono la misura del tempo relativistico, descrivono la stessa linea di universo ma forniscono misure incommensurabili rispetto a quelle fornite dagli orologi atomici, quali considerazioni possiamo trarne circa la realtà del tempo fisico?

Bonizzoni e Giuliani (2000, 26, 38) scrivono:

Esiste la possibilità che elevate accelerazioni possano in qualche modo modificare la costituzione interna delle particelle. Effetti simili, perlomeno per quanto riguarda la vita media delle particelle, non sono stati mai osservati, nemmeno in esperimenti in cui sono state sottoposte ad accelerazioni dell'ordine di 10^{18} g.

[...]

Poiché la vita media dei muoni non dipende dall'accelerazione e, quindi, dal potenziale gravitazionale, si può dedurre che due orologi a muoni dovrebbero fornire le stesse misure dopo un viaggio di uno di essi, in un esperimento del tipo di quello effettuato da Hafele e Keating.

Poiché nessun esperimento a tutt'oggi ha evidenziato che la vita media dei muoni possa dipendere dall'accelerazione o dal potenziale gravitazionale, se ne può dedurre che un orologio radioattivo, che quantifica un intervallo di tempo misurando il decadimento prodotto da una data quantità di muoni, probabilmente non fornirà misure in accordo con le previsioni relativistiche. Postulare che gli effetti relativistici debbano essere verificati da ogni orologio, anche se di diversa costruzione rispetto a quelli atomici, implica un evidente errore epistemologico. Questa generalizzazione impropria ha portato all'arbitraria previsione della diversa durata della vita degli organismi biologici al variare della linea di universo in situazioni sperimentali analoghe a quella studiata da Hafele e Keating. Nell'eventualità probabile che gli orologi biologici o gli orologi radioattivi non siano equivalenti agli orologi atomici, occorre concludere che non esiste una definizione operativa unitaria di tempo in fisica. L'osservazione del comportamento di orologi biologici risulta tuttavia di ardua attuazione. In questo lavoro viene proposto di osservare il comportamento di orologi radioattivi nelle stesse condizioni sperimentali in cui in passato si è osservato il comportamento degli orologi atomici, quindi di confrontare le misure di orologi di diversa costruzione. Ricordiamo che, se le uniche prove positive della legge relativistica della dilatazione del tempo si riferiscono alle misure della vita media delle particelle in volo inerziale (nell'atmosfera o nel vuoto negli acceleratori), un attendibile confronto dei tempi propri misurati da orologi di diversa costruzione che descrivano le stesse linee di universo non è ancora stato tentato. Se la quantità di muoni decaduti in un orologio su un aereo è uguale alla quantità di muoni decaduti in un orologio a terra, possiamo concludere che gli orologi radioattivi non misurano intervalli di tempo diversi in relazione a due diverse linee di universo comprese tra gli stessi punti di partenza e di arrivo. Si deduce la necessità di una nuova interpretazione della grandezza fisica tempo, non semplicemente fondata sull'ipotesi ingenua che il tempo esiste e scorre, ma sulla misura della quantità di trasformazione che gli strumenti consentono di rilevare in relazione alla durata di un certo fenomeno. L'idea che qui si propone è che la realtà fisica del tempo non sia riconducibile né a ipotesi metafisiche di matrice newtoniana né a ipotesi relativistiche di matrice einsteiniana, in

quanto, mentre le une lo ancorano a una sorta di durata assoluta e inaccessibile agli strumenti, le altre lo legano a strumenti particolari che possono solo simularne lo scorrere, quantificando in effetti variazioni di potenziale gravitazionale o pseudogravitazionale (orologi atomici). La definizione operativa del tempo fisico come misura della quantità di trasformazione fornita dagli orologi radioattivi, riducendolo a grandezza essenzialmente termodinamica, consente di evitare sovrapposizioni tra definizioni fornite in contesti teorici diversi (meccanica newtoniana, relatività einsteiniana), causa di fraintendimenti e conclusioni arbitrarie dovute all'uso inappropriato del concetto al di fuori dell'ambito specifico in cui può essere coerentemente applicato. La definizione operativa del tempo termodinamico proposta in questo lavoro apre nuove prospettive sperimentali e teoriche di ricerca, ma richiede di fare un passo oltre il quadro concettuale su cui sono state costruite le cattedrali speculative di Newton ed Einstein, per riconoscere la necessità di una rifondazione critica del problema del tempo a partire dagli strumenti di misura. E' questa l'unica strada percorribile per evitare gli errori metodologici impliciti nell'interpretazione dell'effetto orologi, di cui questo lavoro ha cercato di evidenziare la natura e la portata.

Ringraziamenti. L'autore desidera ringraziare il prof. Silvio Bergia, del Dipartimento di Fisica dell'Università di Bologna, per le preziose osservazioni critiche e l'incoraggiamento a sviluppare queste idee.

Riferimenti bibliografici

- Ayres, D.S., et al., 1971, *Measurements of the Lifetime of Positive and negative Pions*, Physical Review D 3, pp. 1051-1063.
- Bonizzoni, I., Giuliani, G., 2000, *The interpretations by experimenters of experiments on 'time dilation': 1940-1970 circa*. In rete alla pagina arxiv.org/abs/physics/0008012.
- Dingle, H., 1972, *Science at the crossroads*, Martin Brian & O'Keeffe, London, p.7, pp. 39-67.
- Fabri, E., 2001, *Relatività generale e paradosso dei gemelli*. In rete alla pagina www.df.unipi.it/~fabri/divulgazione/relgem/relgem1.htm.
- Hafele, J.C., Keating, R.E., 1972, *Around-the-World Atomic Clocks: Predicted Relativistic Time Gains*, Science, New Series, 177, pp. 168-170.
- 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, pp. 223-228.