



Riflessioni critiche su *L'ordine del tempo*

Claudio Borghi
Liceo Scientifico Belfiore, Mantova
claudioborghi60@gmail.com

Abstract

In the light of Rovelli's essay *The order of time* we propose some critical remarks on the operational definition of time in the theoretical frameworks of relativity, quantum mechanics, quantum gravity and thermodynamics. We have identified two different theoretical approaches which are probably incompatible. If we could experimentally prove that relativistic time can only be measured by particular devices, equivalent to atomic clocks, while thermal time can only be measured by thermal clocks, nonequivalent to atomic clocks, we could radically recast the problem of time.

1. Introduzione

Il saggio di Rovelli *L'ordine del tempo*¹ propone una sintesi articolata e aggiornata su ciò che la fisica ha espresso in materia di conoscenza del tempo. Parafrasando il titolo di un celebre saggio di Einstein, *Il significato della relatività*², in cui l'autore esponeva in forma divulgativa una sintesi delle idee fondanti della relatività ristretta e generale, possiamo concepire il testo di Rovelli come un tentativo di far luce sul significato del concetto di tempo, traendo materia di indagine speculativa dalla ricerca teorica e sperimentale in fisica, ma anche servendosi di interessanti paralleli con la riflessione filosofica che i maestri del pensiero (da Agostino a Leibniz, da Hegel a Heidegger a Bergson) hanno seminato attraverso i secoli.

¹ Rovelli (2017).

² Einstein (1923).

Claudio Borghi

“Riflessioni critiche su *L'ordine del tempo*”

© 2018 Isonomia, Rivista online di Filosofia – Epistemologica – ISSN 2037-4348

Università degli Studi di Urbino Carlo Bo

<http://isonomia.uniurb.it/epistemologica>

In questa sede ci soffermeremo sull'aspetto fisico della questione, consapevoli del fatto che quando si parla di tempo non ci si riferisce ad un concetto unitario, e che occorre manifestarne limpida, per quanto complessa, la natura, trattandosi di una realtà teoricamente e sperimentalmente multiforme, che presenta aspetti problematici a seconda dell'ambito entro il quale la si indaga. In sintesi riassumiamo, nei paragrafi seguenti, le idee di Rovelli circa il tempo relativistico, quantistico e termodinamico. Alla luce delle riflessioni dell'autore, cercheremo di enucleare alcuni aspetti critici di natura logico-operativa; infine mostreremo come, con buona probabilità, si abbia a che fare con concetti di tempo fisicamente diversi, circa i quali, in particolare nel caso del tempo termico rispetto al tempo relativistico, non è possibile operare alcuna sintesi riduzionistica alla luce delle conoscenze attuali.

2. Tempo relativistico

Nella formulazione della teoria della relatività occorre distinguere alcune fasi fondamentali.

Nell'articolo del 1905 Einstein costruisce l'edificio della relatività ristretta per sistemi di riferimento inerziali, in cui il tempo è una coordinata che, insieme alle tre spaziali, consente di individuare un evento: tale coordinata identifica, rispetto a un fissato osservatore, l'istante in cui l'evento si produce, mentre la differenza tra due istanti esprime la durata del fenomeno fisico osservato tra i due eventi a cui tali istanti corrispondono. Dai principi di invarianza di c e di relatività si deduce che la simultaneità tra due eventi dipende dall'osservatore e la durata di un fenomeno misurata da un osservatore per il quale gli eventi iniziale e finale non coincidono spazialmente risulta dilatata, alla luce delle trasformazioni di Lorentz, del fattore $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$ rispetto alla durata dello stesso fenomeno misurata da un

osservatore per il quale gli eventi estremi sono spazialmente coincidenti. Nel citato articolo Einstein formula un'ipotesi embrionale circa la perdita di sincronizzazione di due orologi di identica costruzione che, inizialmente in quiete relativa, si incontrano di nuovo dopo essersi separati e mossi a diverse velocità, ma li concepisce come dispositivi ideali, quindi insensibili alle variazioni di potenziale.

Nel 1908 Minkowski propone una riformulazione matematica della teoria einsteiniana inquadrandola in un iperspazio a quattro dimensioni, lo spaziotempo, in cui la misura della durata di un fenomeno corrisponde alla

lunghezza della linea di universo seguita da un corpo (in particolare, un orologio). Oltre all'effetto di dilatazione del tempo acquista un preciso significato operativo anche l'effetto orologi, in accordo col quale due corpi o orologi inizialmente in quiete relativa si separano in quanto uno dei due accelera, si allontana, quindi decelera e torna infine a congiungersi col primo³. Al momento del ricongiungimento gli orologi avranno descritto linee di universo non equipollenti, quindi avranno misurato diverse durate. L'effetto implica una separazione a partire dalla condivisione dello stesso stato di moto, per cui l'orologio che ha accelerato accumula, durante il moto a velocità costante, un ritardo sperimentalmente rilevabile rispetto a quello che non ha variato la velocità. Questo aspetto è in realtà tutt'altro che marginale, in quanto la dilatazione del tempo non sarebbe sperimentabile in forma di effetto orologi se non si creasse una dissimmetria necessaria alla misura: più significativamente, occorre una interazione iniziale e finale⁴ tra gli orologi per consentire il confronto, quindi rendere operativo l'effetto. L'implicita natura relazionale dell'effetto orologi nell'ambito della teoria einsteiniana non è stata indagata a sufficienza, ma non riteniamo sia questa la sede per approfondire il problema. Apriamo comunque la seguente, importante questione metodologica: come sarebbe possibile verificare gli effetti relativistici sul tempo in assenza di interazioni tra gli orologi?

Il fenomeno della dilatazione relativistica del tempo, e più in generale l'effetto orologi, è legato al concetto di relatività della simultaneità, che Einstein deduce direttamente dai principi su cui ha costruito la teoria, in particolare l'invarianza di c . L'impossibilità da parte di osservatori inerziali diversi di condividere l'istante in cui due fenomeni accadono nello spazio implica, come ribadisce Rovelli, l'impossibilità di condividere l'istante presente da parte di osservatori posti a una certa distanza spaziale l'uno dall'altro o in moto relativo. Ogni osservatore può stabilire una connessione causale tra eventi che si producono entro il proprio cono di luce, mentre tra eventi fuori dal cono tale connessione è impossibile: ne deriva una molteplicità di istanti-presente e di coni di luce, da cui è impossibile dedurre

³ E' bene notare che l'accelerazione e la decelerazione possono essere rese trascurabili, quindi non influenzano il calcolo della durata misurata dall'orologio che le subisce, ma sono necessarie a produrre la dissimmetria tra gli stati di moto dei due strumenti, quindi, a ben vedere, a far sì che il fenomeno possa essere osservato e misurato.

⁴ La verifica sperimentale dell'effetto non è possibile se gli orologi mantengono invariata la velocità, quindi se rimangono solidali, durante l'intero processo, con sistemi di riferimento inerziali.

una rappresentazione condivisa dell'evoluzione dei fenomeni fisici⁵. Da ultimo, alla luce della teoria della relatività generale, in corrispondenza di diversi potenziali gravitazionali (o pseudo gravitazionali, ad esempio di natura centrifuga) il tempo scorre con diverso ritmo, più lentamente in prossimità di una massa (pianeta, stella), più rapidamente allontanandosi da essa.

In sintesi:

a) non esiste un presente condiviso da tutti gli osservatori, in quanto l'istante t che corrisponde all'adesso di un osservatore può essere approssimativamente condiviso solo da osservatori vicini e in quiete rispetto ad esso, non da osservatori lontani o che si siano allontanati da esso accelerando, ecc.;

b) la simultaneità, che risulta sussistere tra due eventi rispetto a un osservatore, non sussiste per un secondo osservatore in moto rispetto al primo;

c) le durate misurate da due orologi, inizialmente in quiete relativa, sono diverse qualora uno dei due acceleri, si muova a velocità costante, quindi torni indietro e si ricongiunga col primo, in quanto la maggior velocità acquisita rispetto a quello rimasto in quiete implica che debba misurare una durata contratta;

d) due orologi portati in diversi potenziali gravitazionali o pseudo gravitazionali perdono la sincronizzazione e misurano durate diverse come conseguenza del diverso ritmo di scorrimento del tempo al variare del potenziale.

Venendo meno la condivisione del presente, al tempo proprio relativistico non è possibile assegnare una realtà fisica in sé, ma solo in termini di relazione e confronto tra durate misurate lungo diverse linee di universo a parità di eventi estremi. Poiché non c'è un unico tempo che scorre all'interno dei diversi orologi in quanto ogni orologio misura un tempo proprio, esiste una molteplicità di tempi che dipendono dallo stato di moto e dal potenziale, ciascuno dei quali non esiste in sé ma solo in relazione agli altri, qualora sia possibile un confronto. In sede di verifica sperimentale, il cuore del problema è la particolare metodologia empirica e teorica tramite cui si misurano le durate. Analizzando in dettaglio il funzionamento degli orologi reali, si deduce che la variazione del periodo proprio avviene per ragioni

⁵ A un evento sulla Terra non corrisponde alcun evento simultaneo su Proxima Centauri; tra due eventi che si producono sulla Terra un osservatore terrestre può stabilire un ordine di successione e una connessione causale, mentre non può stabilire un ordine e una connessione tra due eventi che avvengono su Proxima Centauri.

diverse caso per caso⁶. Nell'articolo del 1905 Einstein non entra nello specifico della questione, in quanto la perdita di sincronizzazione di due orologi in diversi stati di moto è una conseguenza del concetto di simultaneità relativa: essa deve necessariamente verificarsi, pena la falsificabilità immediata dell'intero edificio teorico. Vale la pena ricordare che Einstein, ogni volta che ha parlato di orologi, si è riferito a strumenti ideali (aventi cioè tutti lo stesso periodo proprio) a riposo rispetto all'osservatore e sincronizzati tramite lo scambio di segnali di luce. Coerentemente, egli osserva che la procedura di sincronizzazione di orologi in luoghi separati consente di ottenere sia una definizione di simultaneità che di tempo.

E' utile quanto suggestivo inquadrare il modello teorico einsteiniano (nella forma originale in cui è stato elaborato nel 1905, quindi prima della successiva riformulazione matematica di Minkowski) immaginando lo spaziotempo come uno spazio riempito di orologi puntiformi (ideali), in quiete e sincronizzati rispetto a un certo osservatore: è immediato riconoscere che un secondo osservatore in moto rispetto al primo dovrà servirsi di un diverso insieme di orologi, sincronizzati tra loro ma non con quelli del primo. Il fatto che uno di tali orologi possa muoversi rispetto ad un osservatore, cambiare velocità e tornare in quiete nel punto di partenza, mostrando un ritardo nella misura della durata rispetto agli orologi vicini, implica un salto logico ingiustificato all'interno della teoria, in quanto la rete di orologi è un dispositivo concettuale ideale che consente di trasformare il continuo spaziale tridimensionale in un continuo quadridimensionale. Gli orologi ideali, in sostanza, non dovrebbero muoversi rispetto a un osservatore, in quanto possono servire solo come indicatori dell'istante in cui un certo fenomeno accade nel punto in cui sono posti. L'effetto di una variazione di velocità sradica la teoria dalle fondamenta su cui è stata costruita e, a ben vedere, richiede un nuovo postulato *ad hoc*, la *clock hypothesis*, secondo la quale la misura di una durata corrisponde alla lunghezza della linea di universo, nell'ottica della riformulazione concettuale di Minkowski.

Il problema aperto è: tutti gli orologi reali soddisfano la *clock hypothesis*?

Non riteniamo sia questa la sede per approfondire la discussione, ma ricordiamo che l'effetto orologi è stato verificato solo su orologi atomici, ottici, al quarzo, basati sull'uso dei maser e a cavità risonante. In tali strumenti la variazione della durata quantificata lungo diverse linee di universo è una conseguenza della variazione del periodo proprio dello strumento in quanto

⁶ Cfr. Borghi (2013), Borghi (2014), Borghi (2015).

dipendente dall'energia della transizione quantica⁷, che a sua volta dipende dal potenziale gravitazionale e pseudo gravitazionale⁸. Negli orologi portati su un aereo a circumnavigare il globo terrestre il periodo proprio è variato in modo significativo, rispetto a quelli rimasti a terra, in quanto il potenziale gravitazionale e pseudo gravitazionale è significativamente cambiato come conseguenza del moto circolare descritto ad alta velocità e ad alta quota⁹.

3. Tempo quantistico

Il salto concettuale operato dalla meccanica quantistica rispetto alla teoria relativistica è legato alla natura granulare e indeterministica delle grandezze fisiche, quindi alla necessità di quantizzare anche lo spazio e il tempo in quanto grandezze costitutive del campo gravitazionale, che in sede di relatività generale viene interpretato come curvatura, determinata dalla densità di materia-energia, di un'entità quadridimensionale elastica, lo spaziotempo¹⁰.

Alla luce della sintesi teorica prodotta, nell'ambito della gravità quantistica, tra relatività generale e meccanica quantistica, il modello tramite il quale si descrive la realtà fisica diventa concettualmente più complesso, in quanto:

a) nella relatività generale si attribuisce una realtà autonoma allo spaziotempo, la cui geometrodinamica fornisce una accurata descrizione e consente una misura raffinata e precisa dei fenomeni gravitazionali, consentendo anche di prevedere fenomeni inaccessibili alla teoria newtoniana

⁷ Poiché l'atomo di una qualsiasi sostanza può assumere solo determinati stati eccitati propri dell'elemento a cui appartiene, passando da un livello energetico ad un altro, corrispondenti a una fissata coppia di tali stati eccitati, l'atomo cede una determinata quantità di energia quando passa al livello inferiore, oppure ne assorbe la stessa quantità quando passa al livello superiore. Tale transizione di stato dà luogo all'emissione o all'assorbimento di una radiazione elettromagnetica di energia ΔE , la cui frequenza è direttamente proporzionale alla quantità di energia ceduta o assorbita secondo la nota relazione $\Delta E = h\nu$. Gli orologi atomici forniscono misure in accordo con la teoria in quanto l'energia ΔE tra due fissati livelli energetici in un atomo dipende dal potenziale gravitazionale e pseudo gravitazionale φ

secondo la relazione $\Delta E = \Delta E_0 \sqrt{1 + \frac{2\varphi}{c^2}}$, dove ΔE_0 è la differenza di energia in un potenziale nullo. Poiché il periodo proprio di un orologio atomico è legato alla differenza di energia secondo la relazione $T = \frac{h}{\Delta E}$, si ottiene che $T \sim T_0 (1 - \frac{\varphi}{c^2})$, in accordo con la legge che esprime il periodo proprio di un orologio relativistico, cfr. Borghi (2016a).

⁸ Borghi (2013).

⁹ Hafele (1972).

¹⁰ Einstein (1916).

(esistenza dei buchi neri, curvatura dei raggi di luce in presenza di campi gravitazionali di forte intensità, evoluzione dello spaziotempo all'insegna di un'espansione dello spazio e radicale rifondazione della cosmologia, ecc.);

b) la quantizzazione del campo gravitazionale, quindi dello spaziotempo, implica l'esistenza di una lunghezza minima indivisibile, la lunghezza di Planck $L_p \sim 10^{-35}$ m, quindi di un volume minimo $V_p \sim (L_p)^3$, e di un quanto fondamentale di tempo, il tempo di Planck ($\sim 10^{-44}$ sec).

L'ipotetica esistenza di reti di grani di spazio implica che entro tali strutture si manifestino temporalmente le relazioni molteplici tra i campi quantistici interagenti. Poiché misurare estensioni, spaziali o temporali, richiede uno strumento, perlomeno nella forma realistica in cui lo concepisce Einstein, capace di distendersi sul continuo, in linea di principio non è possibile misurare lunghezze e tempi granulari.

Il problema è legato alla discrepanza tra la rappresentazione teorica dei fenomeni e la misurabilità degli stessi.

Un orologio dovrebbe, paradossalmente, registrare una molteplicità finita di grani di tempo infinitesimi, ciascuno dei quali, essendo indivisibile, è senza durata. Il periodo proprio di un dispositivo di misura dovrebbe quindi necessariamente contenere un numero intero di grani di tempo, a cui non corrisponde una evoluzione interna (un moto, una trasformazione) dello strumento. In particolare, negli orologi radioattivi, in cui il decadimento è un fenomeno di natura statistica, diventa arduo concepire temporalmente il verificarsi di una trasformazione in quanto, come scrive Rovelli, «*quasi tutti i valori di t non esistono*»¹¹. L'elaborazione teorica delle proprietà della realtà fisica fondamentale implica di conseguenza la sparizione di qualsiasi background, in senso newtoniano (spazio e tempo assoluti: contenitore vuoto lo spazio; flusso astratto, matematico il tempo¹²) o einsteiniano («*la residua*

¹¹ Rovelli (2017: 75).

¹² Nel famoso *Scolio ai Principia*, Newton scrive: «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; quello relativo, apparente e volgare, è una misura (accurata oppure approssimativa) sensibile ed esterna della durata per mezzo del moto, che comunemente viene impiegata al posto del vero tempo: tali sono l'ora, il giorno, il mese, l'anno». Se ne deduce che l'orologio è uno strumento con cui cerchiamo di effettuare «una misura (accurata oppure approssimativa) sensibile ed esterna della durata per mezzo del moto, che comunemente viene impiegata al posto del vero tempo». Il vero tempo, per Newton, «in sé e per sua natura senza relazione ad alcunché di esterno», è quindi un tempo matematico che la mente usa come strumento concettuale per conoscere il mondo che osserva, una variabile utile e necessaria per scrivere relazioni funzionali che, si direbbe, non ha legami se non approssimativi e rozzi col tempo volgare, sensibile ed esterno che misuriamo con gli strumenti.

impalcatura temporale della relatività generale ... si perde, se teniamo conto dei quanti»¹³), al quale riferire la descrizione di ciò che accade o, come dice altrove Rovelli, appare. E' da questo fondale di irrealtà temporale che occorre risalire alla dimensione macroscopica, in cui constatiamo usualmente che il tempo scorre e le cose internamente si trasformano.

Ancora una volta è importante ribadire l'ambiguità circa l'esistenza o meno di una quantità di cui si indagano le proprietà, come si trattasse di un concetto su cui è possibile speculare indipendentemente dall'operazione di misura, cioè dall'interazione tra grandezza e strumento.

In sintesi, alla luce della teoria quantistica, in particolare della gravità quantistica a *loop*, la teoria a cui lo stesso Rovelli ha fornito importanti contributi teorici, il tempo ha natura: a) granulare; b) indeterministica, per cui gli stessi coni di luce, su cui si fonda la conoscenza dello spaziotempo, nell'ottica della teoria relativistica, da parte di osservatori reali, subiscono fluttuazioni che rendono indeterminata la distinzione, per ogni osservatore, tra passato, presente e futuro. I principi su cui si fonda la teoria quantistica, quindi, minano la possibilità di attribuire un significato fisico alla dinamica intrinseca dell'evoluzione del tempo anche all'interno di ogni sistema di riferimento, in quanto i coni di luce non consentono di ottenere una conoscenza deterministica dei nessi causali tra i fenomeni osservati. La realtà fondamentale, nell'ottica delle più recenti risultanze della gravità quantistica, è un insieme di campi quantistici covarianti, sovrapposti gli uni agli altri e in molteplice relazione reciproca. E' alla luce di questa prospettiva teorica, che Rovelli considera peculiare della realtà fisica fondamentale, che occorre riconoscere la necessità di dimenticare il tempo¹⁴.

4. Tempo termico ed entropia

La non commutatività delle grandezze fisiche nell'ambito delle interazioni quantistiche implica che la misura della posizione prima della velocità di una particella, o viceversa, generi un diverso ordine di successione dei fenomeni in un sistema fisico. Questo ha portato a concepire l'ipotesi di un germe di temporalità su scala quantistica affine all'ipotesi del tempo termico¹⁵, alla luce della quale un sistema termodinamico sceglie, in funzione della sua energia, una variabile privilegiata che individua una precisa direzione del suo flusso evolutivo.

¹³ Rovelli (2017:74).

¹⁴ Rovelli (2011).

¹⁵ Cfr. Connes e Rovelli (1994) e Rovelli (2011).

In accordo con la *thermal time hypothesis* il tempo termico non è una variabile esistente in sé, indipendente dai sistemi fisici, riguardante la struttura fondamentale della realtà, bensì una proprietà connessa alla distribuzione statistica che utilizziamo per descrivere macroscopicamente un sistema, quindi, in un certo senso, emergente dalla nostra interazione con esso. Legato all'evoluzione irreversibile dei sistemi, in particolare degli orologi, il tempo termico esprime e implica la centralità e irriducibilità del concetto di divenire intrinseco, indissolubilmente connesso alla produzione di energia disordinata, riconducibile concettualmente e operativamente alla grandezza entropia.

Nell'ottica di una distinzione operativa tra orologi relativistici e orologi termici è bene considerare la differenza tra processi reversibili e irreversibili. Come sopra osservato, 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 termici sono invece legati a processi evolutivi di natura chiaramente irreversibile, in quanto rilevano e misurano una quantità crescente di energia disordinata che si produce al loro interno¹⁶: a seguito di una trasformazione irreversibile è impossibile che spontaneamente il sistema possa ripristinare lo stato iniziale, una volta riportato lo strumento, dopo un certo cammino, nel punto di partenza.

Secondo la teoria statistica di Boltzmann l'evoluzione spontanea dei sistemi (isolati) verso stati di equilibrio implica la realizzazione del macrostato avente massima probabilità termodinamica, a cui corrisponde il massimo disordine molecolare. Estrapolando su scala cosmica questo fenomeno, visto che l'unico sistema autenticamente isolato può essere solo l'Universo, viene da chiedersi perché l'evoluzione spontanea debba implicare necessariamente un ordine maggiore nel passato rispetto al futuro. Rovelli sostiene che la percezione di una freccia del tempo che viaggia verso il futuro, in cui l'entropia cosmica è maggiore rispetto al passato, è frutto di una sfocatura osservativa, in quanto l'entropia è una grandezza di natura statistica che quantifica le diverse configurazioni che una visione sfocata dei fenomeni non distingue, essendo legata alla nostra particolare collocazione nell'Universo. In sostanza, il fatto che l'entropia sia stata più bassa in passato potrebbe essere un effetto prospettico¹⁷, frutto dell'ignoranza circa la

¹⁶ Si veda l'esempio sperimentale proposto nel paragrafo 6.

¹⁷ Rovelli (2015).

molteplicità di stati microscopici che il nostro sguardo approssimativo, grossolano e macroscopico non individua. L'esempio citato a supporto dell'argomentazione pare inoppugnabile: come possiamo interpretare più ordinata una certa successione delle carte di un mazzo in ragione di un determinato criterio (ad esempio il colore), allo stesso modo quell'ordine cessa se cambia il criterio in base al quale l'ordinamento è stato individuato. In sostanza, l'entropia universale ci appare più bassa nel passato in quanto stiamo usando un criterio particolare, oggettivamente relativo, per quantificarla, cambiando il quale salta l'oggettività della quantificazione, quindi la conseguente unidirezionalità del flusso del tempo, che all'entropia in termodinamica è implicitamente connesso.

Siamo ancora, seppur in ambito teorico diverso, di fronte a uno snodo concettuale decisivo: il tempo che si esperisce nella realtà fisica, di cui su scala microscopica si deve concepire l'inesistenza nel contesto della gravità quantistica, emerge alla scala del fenomeno macroscopico come conseguenza della mancata conoscenza della pluralità dei microstati che concorrono a realizzarlo.

Il problema di fondo è lo stesso rilevato nei paragrafi precedenti: Rovelli vuole provare, affondando lo sguardo analitico dell'intelletto, che la realtà del tempo è apparente, frutto di sfocatura o di ignoranza.

5. Il tempo come singolarità ineliminabile

In una diversa prospettiva di ricerca teorico-empirica, il tempo può essere concepito come singolarità ineliminabile della realtà su scala macroscopica, di cui possiamo indagare le proprietà sondando la complessità dei fenomeni in forma e con strumenti diversi nei vari ambiti in cui tentiamo di concettualizzarlo. In quest'ottica occorre rifondare la ricerca prendendo coscienza del fatto che col termine tempo si sono indicate o una grandezza matematica assoluta o una grandezza matematica relativa, in quanto sia la meccanica newtoniana che la relatività einsteiniana si fondano su una modellizzazione teorica che prescinde dall'unica proprietà che rende reali i fenomeni fisici: l'irreversibilità. A questo riguardo è rimarchevole che lo spaziotempo relativistico abbia proprietà metriche determinate dalla densità di materia-energia ma sia con buona probabilità insensibile ai processi dissipativi che caratterizzano la materia e l'energia, la cui incessante trasformazione è connessa all'incremento di entropia. In sostanza occorre tornare a riflettere criticamente, dopo aver contemplato la mirabile armonia della teoria

einsteiniana del campo gravitazionale, sulle perplessità dello stesso Einstein¹⁸ circa il fatto che l'equazione di campo è assimilabile a un monumento composto da marmo pregiato (la parte inerente al campo gravitazionale) e legno scadente (la parte inerente alla materia-energia), da cui il suo stesso ideatore avrebbe voluto prendere rapidamente le distanze, nella prospettiva di una più generale teoria del tutto. Il problema, di cui Einstein era senz'altro consapevole, è che la ricerca di un'armonia tra campi e materia-energia più generale di quella che era riuscito a concepire nel 1916 o, più radicalmente, di una geometrizzazione integrale sia dei campi che della materia-energia, è destinata a fallire, in quanto la realtà fisica è una sovrapposizione, entro il quadro concettuale del tempo termico-entropico, tra campi e materia-energia o, alla luce delle più recenti sintesi teoriche, tra campi quantistici covarianti. Laddove si descrivano i fenomeni fisici tenendo conto dei processi irreversibili, quindi, emerge l'impossibilità di inglobare il tempo termico nella fenomenologia delle teorie di campo, se non a prezzo di snaturarlo. L'alternativa è o dimenticarlo, scelta che Einstein con ogni probabilità non avrebbe mai fatto, o accettarne la realtà singolare, irriducibile a un quadro teorico unitario. Tale realtà singolare implica che i due materiali di cui è fatto il monumento possano essere più realisticamente reinterpretati come i campi e il tempo termico-entropico, tra cui non è possibile una sintesi, in quanto esprimono la fenomenologia irriducibile dei due elementi costitutivi della realtà: il reversibile e l'irreversibile.

In quest'ottica occorre riflettere su un aspetto molto delicato dell'analisi di Rovelli che, trascurando le fluttuazioni quantistiche, propone di immaginare lo spaziotempo relativistico alla nostra scala come «una tavola rigida» avente «*direzioni, che chiamiamo spazio, e quella lungo la quale l'entropia aumenta, che chiamiamo tempo*»¹⁹. Correttamente Rovelli considera l'entropia una grandezza relativa, in quanto dipende dalle variabili con cui l'osservatore che intende misurarla interagisce in conseguenza della sua particolare collocazione nel mondo, ma arbitrariamente postula che il ritmo di scorrimento del tempo termico debba essere soggetto alle leggi relativistiche. Questa affermazione non ha in effetti fondamento, né in relatività né in termodinamica, e fa riferimento a due accezioni profondamente diverse del concetto di grandezza relativa. Rovelli, inoltre, fonda la teoria del tempo termico sull'assunto circa l'ignoranza della complessità dei microstati, che ci porta a concepire un effetto prospettico di squilibrio entropico in direzione del passato dell'universo, il che proverebbe che non ci sia un'oggettiva

¹⁸ Einstein (1936).

¹⁹ Rovelli (2017: 166).

unidirezionalità nell'evoluzione dei fenomeni su scala cosmica. Se tale effetto può essere una conseguenza delle variabili macroscopiche con cui gli osservatori terrestri interagiscono, non si spiega perché ogni organismo vivente o ogni corpo inorganico evolvano solo in una direzione, quella in cui la loro complessità si dissolve, a meno di pensare che tale dissoluzione sia frutto di una sfocatura o di un'ignoranza, in quanto il nostro modo di relazionarci con essi è particolare. Ciò che Rovelli non affronta è la singolarità della natura del tempo termico-entropico, circa la quale è necessario un nuovo approccio speculativo nell'ottica di un'analisi accurata di ciò che accade all'interno dei corpi e, più in particolare, degli orologi.

6. Molteplice realtà del tempo

Gli sforzi teorici più consistenti di questi ultimi decenni sono stati prodotti in direzione di una possibile sintesi tra relatività generale e meccanica quantistica. La gravità quantistica, a cui si è fatto cenno, è stata ideata nell'ottica di risolvere le incoerenze radicali tra i fondamenti su cui erano stati costruiti i due più imponenti edifici teorici del Novecento. Il nuovo assetto concettuale ha consentito di superare le incongruenze al prezzo, traumatico, di far sparire il background spaziotemporale. A ben vedere, l'ottica speculativa entro la quale è avanzata la recente fisica teorica è quella della continua amplificazione del potere risolutivo degli strumenti matematici, tramite i quali lo sguardo analitico dell'intelletto ha sondato in profondità il mondo. Dall'interno niente è come appare fuori, ma questo non significa, come scrive Rovelli nel titolo di un suo precedente saggio, che la realtà non è come ci appare²⁰. Esistono in effetti due possibili direzioni di ricerca nella realtà fisica dei fenomeni, di pari importanza speculativa: l'indagine del mondo microscopico, che in ultima analisi pare ridursi a una molteplicità di campi quantistici sovrapposti e in relazione fra loro, e l'indagine del mondo macroscopico, in cui giocano un ruolo decisivo l'entropia e il tempo termico.

Il problema teorico-empirico su cui si fonda la distinzione tra tempo relativistico e tempo termico è la natura del processo, reversibile o irreversibile, tramite il quale il dispositivo di misura funziona. Nel caso degli orologi atomici²¹, il periodo proprio dello strumento è legato al dislivello energetico tra due fissati stati quantici all'interno degli atomi, in corrispondenza dei quali un elettrone passa da uno stato eccitato a uno a minor energia: tale processo è reversibile, nel senso che non causa un incremento di

²⁰ Rovelli (2014).

²¹ Borghi (2015).

entropia, mentre un tale incremento, che tuttavia non viene quantificato nel processo di misura, si produce in concomitanza con l'eccitazione degli atomi. Laddove, quindi, in generale, ogni orologio misura la durata di un fenomeno in funzione del suo periodo proprio, nel caso di un orologio atomico tale periodo proprio è legato alla quantità di energia elettromagnetica emessa durante la diseccitazione, in corrispondenza della quale non c'è produzione di energia termica, quindi incremento di entropia. Questo chiaramente non implica una violazione del secondo principio della termodinamica in quanto l'entropia, nel processo complessivo (eccitazione + diseccitazione) di funzionamento dell'orologio, che con buona approssimazione può essere considerato un sistema isolato, cresce.

Come ricordato in precedenza, secondo la teoria relativistica l'orologio (utile perché consente di contare fenomeni ciclici in relazione al suo periodo proprio) deve misurare la lunghezza della linea di universo che descrive nello spaziotempo. Se ne deduce che durate diverse, misurate in corrispondenza di linee di universo di diversa lunghezza tra due fissati eventi estremi (ad esempio la partenza e l'arrivo di un orologio portato in viaggio su un aereo e confrontato con un orologio rimasto a terra con cui era inizialmente sincronizzato), non possono dipendere dal tipo di orologio utilizzato, in quanto sono una proprietà dello spaziotempo, non degli orologi che lo sondano.

Einstein, nelle *Autobiographical Notes*²², riflettendo sull'evoluzione del suo percorso teorico, aveva evidenziato un'autocritica piuttosto marcata circa l'evidente dualismo tra lo spaziotempo (frutto della sua teoria del 1905 riformulata matematicamente da Minkowski nel 1908) e la materia-energia che ne determina le proprietà strutturali. In sostanza Einstein ha sviluppato, a partire dal 1905, una riflessione sullo spazio e il tempo, connotata da una forte originalità ideativa, e in parallelo una indagine sulla materia e l'energia (ipotesi dei quanti di luce, equivalenza tra massa ed energia), nell'ottica di un dualismo la cui sintesi è compendiata nelle equazioni del campo gravitazionale, in cui si ipotizza un'interazione reciproca tra spaziotempo e materia-energia. E' questa interazione, in cui campo gravitazionale e materia-energia esistono in sé ma si influenzano a vicenda (il primo essendo curvato dalla seconda, la seconda risentendo dinamicamente della curvatura del primo), il cuore profondo della teoria. Non entriamo nella delicata questione epistemologica su quale sia il fondamento empirico-teorico di una simile ipotesi, in quanto si tratta a ben vedere di un postulato, ben più radicale del

²² Einstein (1949).

principio di equivalenza, su cui Einstein ha costruito il complesso edificio fisico-matematico della relatività generale.

Il problema della probabile non equivalenza tra tempo relativistico e tempo termico può essere riassunto nella seguente riflessione e nel successivo esperimento mentale.

Se entro il quadro concettuale della relatività ristretta e generale si possono prevedere, sugli orologi, effetti di velocità o di potenziale, e tali effetti implicano solo fenomeni reversibili, in cui cioè le operazioni di misura non siano legate ad un incremento di entropia, un orologio reale non dovrebbe produrre misure in accordo con le previsioni relativistiche qualora al suo interno entrino in gioco fenomeni dissipativi.

Un semplice esempio sperimentale consente di inquadrare il senso della questione.

Consideriamo due batterie, ad esempio quelle di due telefoni cellulari identici, ugualmente cariche. I cellulari sono comodi perché hanno l'indicatore del livello di carica, chiaramente tarato in unità arbitrarie, che possono benissimo essere unità di tempo. Si tratta a tutti gli effetti di dispositivi che misurano il tempo interno, in quanto quantificano il tempo di dissipazione della carica. Ci proponiamo di confrontare le durate delle batterie in diverse situazioni di moto o di diversa intensità del potenziale gravitazionale. Immaginiamo di lasciare uno di tali cellulari in laboratorio e di portare l'altro su un aereo: dopo aver effettuato un viaggio, ad esempio la circumnavigazione del globo terrestre, lo riportiamo a terra. Alternativamente, potremmo portare il viaggiatore in alta montagna, in cui il potenziale gravitazionale è più intenso di quello nel laboratorio, tenercelo per un po' e quindi riportarlo a livello del mare, e confrontare di nuovo i livelli di carica.

Tali esperimenti invitano a riflettere sul concetto di tempo, in particolare a distinguere i concetti di tempo interno e tempo proprio²³.

Trascuriamo, per semplicità, gli effetti del potenziale gravitazionale, che ci costringono ad allargare il campo alla relatività generale, e limitiamoci al caso del cellulare che viaggia sull'aereo. Inevitabilmente ci chiediamo per quale causa fisica il cellulare viaggiatore dovrebbe scaricarsi di meno, determinando un rallentamento in relazione alla dissipazione di energia elettromagnetica in termica, causa che non sembra, in effetti, possibile individuare. Il fatto interessante è che, potendo considerare l'indicatore della batteria come un orologio che misura il tempo interno del cellulare, tale tempo risulta necessariamente legato ad una trasformazione dell'energia interna.

²³ Borghi (2013).

Come già osservato, la relatività ristretta riferisce la misura del tempo proprio a orologi ideali che registrano la lunghezza della linea di universo e ci dice che tale misura è minore per il cellulare viaggiatore, che ha descritto una linea di universo più breve di quella descritta dal cellulare rimasto a terra: la durata dei processi interni agli orologi dipende dalla linea di spaziotempo che descrivono, non da cosa fisicamente accade dentro l'orologio. Circa il consumo della batteria, secondo la relatività ristretta il processo dissipativo non rallenta: dura meno perché il tempo proprio della batteria sull'aereo è minore. La questione controversa è quindi legata alla possibile non equivalenza tra il tempo proprio relativistico, legato alla geometria dello spaziotempo, e il tempo termico, legato a un processo di trasformazione interna. Tale questione può essere risolta solo in sede sperimentale, in quanto il punto critico, intorno al quale si gioca la discussione circa l'esistenza di diverse realtà del tempo fisico, è la tipologia della misura che distingue un orologio atomico da un orologio termico, quale potrebbe essere in questo caso una batteria, in cui un processo di natura elettromagnetica o elettrochimica (non è importante il tipo di batteria utilizzata) produce una dissipazione irreversibile di energia sotto forma di calore. Come in precedenza osservato, in un orologio atomico il complessivo aumento dell'entropia (legato all'eccitazione degli atomi, ecc.) non viene quantificato nel processo di misura, mentre una batteria produce e quantifica, nel contesto sperimentale sopra descritto, una dissipazione irreversibile in forma di energia termica: nel primo caso (orologio atomico) lo strumento misura il tempo proprio relativistico, nel secondo (batteria) misura il tempo interno termico-entropico.

Circa l'esistenza di tempi fisici diversi, cioè non riducibili l'uno all'altro, qualora si riuscisse a provare, teoricamente e sperimentalmente, che esiste almeno un orologio che non misura il tempo relativistico in quanto, sottoposto ad un esperimento in cui un orologio atomico ha fornito misure in accordo con la teoria einsteiniana, si mostra palesemente in disaccordo con le previsioni, si aprirebbe un terreno di indagine nuovo. Rovelli, nella sua complessa disamina, non ammette che il tempo termico e il tempo relativistico siano irriducibili l'uno all'altro, ignorando la possibilità che un orologio che misura il tempo termico possa non risentire degli effetti relativistici. Il punto critico è invece proprio questo: verificare operativamente se un orologio termico consente di ottenere misure in accordo con quelle ottenute dagli orologi atomici²⁴.

²⁴ Borghi (2016b).

7. Conclusioni. Necessità di una nuova prospettiva di indagine sulla natura del tempo

«*Il mondo è fatto di eventi, non di cose*»²⁵, scrive Rovelli, nel senso che non abbiamo a che fare con corpi esistenti nella loro fissità di oggetti che interagiscono a distanza. Parafrasando il titolo del saggio pubblicato nel 2014, una possibile conclusione potrebbe essere: la realtà è tutto ciò che accade, nel senso che la realtà degli eventi osservati è costituita da una rete di relazioni e interazioni. Quale conclusione trae Rovelli, nell'ottica di giustificare la forma emersa del tempo quale viene sperimentata su scala macroscopica? Si direbbe che occorra accettare le diverse prospettive entro le quali il tempo mostra la sua fenomenologia alla nostra visione intellettuale, il che implicitamente significa che il tempo è uno, ma molteplici sono le forme teoriche tramite le quali ne sondiamo le proprietà, in accordo con le quali gli si attribuisce:

a) una dinamica evolutiva assoluta che dal passato procede verso il futuro passando per il presente, indipendentemente dall'osservatore (tempo assoluto di Newton);

b) una dinamica evolutiva in cui non c'è condivisione del presente da parte dei diversi osservatori, ognuno dei quali può costruirsi una propria secondo la quale ordina i fenomeni, non condivisa dagli altri (tempo relativo di Einstein);

c) una realtà legata all'incremento dell'entropia all'interno del corpo (che può essere, ma non necessariamente, un orologio) utilizzato per misurare la durata di un fenomeno in cui tale corpo è coinvolto, quindi legata alla sua dinamica evolutiva interna (tempo termico).

Se queste possono essere considerate le forme emerse in cui il tempo è stato interpretato nell'ambito delle teorie fisiche degli ultimi trecento anni, negli ultimi decenni la ricerca delle strutture fondamentali su cui si regge l'impalcatura dei fenomeni macroscopici porta a dover ridurre gli enti teorico-empirici, ai quali si è fatto riferimento finora, a una molteplicità di campi, gravitazionali, elettrici, magnetici, nucleari, ecc., reciprocamente interagenti senza necessità di alcun background spaziotemporale, in quanto le equazioni della fisica fondamentale (gravità quantistica) esprimono relazioni tra campi e loro proprietà senza dover riferire la variazione delle grandezze al tempo. E' tuttavia evidente che tale prospettiva riduzionistica non consente di spiegare i fenomeni naturali su scala macroscopica: è come pretendere di far emergere la spiegazione del funzionamento di un organismo vivente esibendone individualmente gli organi che contiene o, ancora peggio, i singoli

²⁵ Rovelli (2017: 85).

atomi di cui tali organi sono fatti. A ben vedere, la domanda sulla natura del tempo è analoga alla domanda sul perché le cose sono come appaiono, nella loro nuda singolarità di forma e divenire.

La domanda più radicale è un'altra, che abbiamo formulato in momenti diversi nello sviluppo di queste riflessioni critiche: tralasciando la teoria di Newton, che si limita ad assegnare al tempo una astratta realtà matematica, è possibile, entro gli ambiti in cui sono state formulate, trovare una sintesi tra la teoria relativistica del tempo proprio e la teoria termodinamica del tempo interno? L'autore del presente lavoro ha sviluppato accurate analisi critiche²⁶, che in questa sede sono state solo sinteticamente riportate, circa la non equivalenza tra tempo relativistico e tempo termico, alla luce delle quali occorre concludere che si tratta di grandezze irriducibili l'una all'altra, in quanto si riferiscono alla misura di durate in cui entrano in gioco rispettivamente fenomeni reversibili (tempo relativistico) o irreversibili (tempo termico). Nella prospettiva di una incompatibilità tra il concetto teorico-operativo di tempo nei principali ambiti in cui è stata indagata la sua natura empirica, occorre necessariamente aprire una nuova prospettiva di ricerca sulla natura del tempo fisico, dovendo riconoscere che le teorie di cui disponiamo, tralasciando la meccanica newtoniana per le ragioni citate, ci consentono di sondare: su scala macroscopica fenomeni idealmente reversibili o irreversibili; su scala microscopica una rete di relazioni tra campi in cui il tempo può essere dimenticato, senza perdere coerenza e completezza nella descrizione teorica dei fenomeni.

La soluzione dei problemi qui discussi non è semplice, in quanto finora si è esplicitamente ignorata la probabile incommensurabilità tra concetti che emergono in ambiti teorici diversi, su cui occorre riflettere a fondo e, soprattutto, effettuare misure sperimentali per verificare se orologi termici e orologi relativistici sono equivalenti. La risposta, che l'autore del presente lavoro ritiene con molta probabilità negativa, costringerebbe Rovelli a dover modificare radicalmente la prospettiva teorica entro la quale ha costruito il suo saggio. Il diverso ordine del tempo irreversibile rispetto a quello reversibile non può essere derivato da una radice senza tempo, in quanto l'unico tempo reale su cui occorre concentrare l'attenzione è il tempo termico, tutti gli altri essendo o utili variabili matematiche o rappresentazioni idealizzate della realtà fisica in cui si ignora ciò che accade all'interno degli orologi reali e, più in generale, dei corpi soggetti al divenire.

²⁶ Cfr. Borghi (2016a) e Borghi (2016b).

Ringraziamento

Ringrazio Carlo Rovelli per un intenso scambio di idee risalente agli anni 2011-2014, che mi ha stimolato a sviluppare, pur in forma dialettica rispetto alle sue, queste riflessioni sul tempo. I suoi articoli e libri hanno fatto il resto.

Bibliografia

- Boltzmann, L. (2005), *Fisica e probabilità* (a cura di Massimiliano Badino), Milano, Edizioni Melquìades.
- Borghi, C. (2013), «Tempo relativistico, tempo evolutivo e ritmo di marcia degli orologi reali», *Isonomia epistemologica*.
- Borghi, C. (2014), «Are Mechanical Clocks Relativistic Clocks?», *Annales de la Fondation Louis de Broglie*, **39**.
- Borghi, C. (2015), «Il tempo generato dagli orologi», *Isonomia epistemologica*.
- Borghi, C. (2016a), «A Critical Analysis of the Concept of Time in Physics», *Annales de la Fondation Louis de Broglie*, **41**.
- Borghi, C. (2016b), «Physical Time and Thermal Clocks», *Foundations of physics*, **46**, 10.
- Connes, A., Rovelli, C. (1994), «Von Neumann Algebra Automorphisms and Time-thermodynamics Relation in Generally Covariant Quantum Theories», *Class. Quantum Grav.*, **11**.
- Einstein, A. (1905), «Zur Elektrodynamik bewegter Körper», *Annalen der Physik*, **17**.
- Einstein, A. (1916), «Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie», *Annalen der Physik*, **49**.
- Einstein, A. (1923), *The meaning of relativity*, Princeton University Press.

- Einstein, A. (1936), «Physics and reality», *Journal of the Franklin Institute*, **221**.
- Einstein, A. (1949), *Autobiographical Notes*, Chicago, Open Court Publishing Company.
- Hafele, J. C. (1972), «Relativistic Time for Terrestrial Circumnavigations», *American Journal of Physics*, **40**.
- Minkowski, H. (1908), «Die Grundgleichungen für die elektromagnetischen Vorgänge in bewegten Körpern», *Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Mathematisch-Physikalische Klasse*, pp. 53-111.
- Rovelli, C. (2011), «Forget time», *Foundations of Physics*, **41**, 9.
- Rovelli, C. (2014), *La realtà non è come ci appare*, Raffaello Cortina Editore.
- Rovelli, C. (2015), «Is Time's Arrow Perspectival?». On-line: <https://arxiv.org/abs/1505.01125v2>
- Rovelli, C. (2017), *L'ordine del tempo*, Adelphi.