



Time out

Il tempo, da Newton alla gravità quantistica

di Carlo Rovelli

a.
Immagine artistica di un satellite del
Gps (Global Positioning System).



Quando negli anni settanta il primo sistema di navigazione satellitare (il Gps che ora si trova in tante automobili) fu sperimentato dall'esercito americano, i fisici avvertirono i costruttori che gli orologi sui satelliti sarebbero andati più veloci di quelli a terra. I generali dell'esercito responsabili del progetto non vollero crederci e i primi test furono fatti ignorando quest'accelerazione del tempo con l'altezza. Nulla funzionò. Così i generali dovettero accettare l'idea che il tempo da qualche parte scorre più veloce.

Esperienze come questa ci mostrano che la nostra intuizione elementare su come funziona il tempo non è corretta. O meglio, che questa intuizione non è adatta a descrivere il mondo, non appena si esce dal regime di dimensioni, velocità e precisione a cui siamo abituati. Se si pongono due orologi precisi uno più in alto e uno più in basso, questi misurano due intervalli di tempo diversi, fra il momento in cui sono stati separati e il momento in cui vengono ravvicinati. L'orologio tenuto più in basso indica che è passato meno tempo e l'orologio tenuto più in alto indica che è passato più tempo: il tempo non passa eguale per tutti (vd. p. 42, ndr). Oggi abbiamo orologi molto precisi, e questa differenza di velocità dello scorrere del tempo si misura anche a dislivelli di pochi decimetri. Il tempo è qualcosa di più complesso di quanto immaginiamo comunemente.

Quello che sappiamo oggi sul tempo grazie alla fisica si può distinguere in quattro livelli, via via più completi, ma via via più incerti, associati a quattro teorie: la *fisica newtoniana*, che ha tre secoli, la *relatività speciale* (o *ristretta*) e la *relatività generale*, che hanno un secolo, e la *gravità quantistica*, che è

in corso di elaborazione. Quanto è grande l'affidabilità del nostro sapere sul tempo, raccolto in queste teorie?

La prima di queste teorie, la teoria di Newton, è quella che si avvicina di più alla nostra intuizione elementare del tempo. Ci offre una concettualizzazione del tempo precisa e solidissima, di assoluta affidabilità nell'ambito dei fenomeni più familiari ma, allo stesso tempo, limitata. Sappiamo per certo che fallisce, per esempio, nel caso degli orologi precisi che misurano tempi differenti ad altezze differenti. La seconda e la terza teoria, cioè le due teorie di Einstein sul tempo, sono state largamente suffragate da una vastissima classe di esperienze e sono oggi estremamente affidabili, anche se il mondo scientifico è pronto a rimetterle in dubbio (come ha fatto, ad esempio, per gli strani risultati sui neutrini più veloci della luce di qualche anno fa, che si sono poi rivelati un falso allarme – vd. p. 38, ndr). Ma anche per queste due teorie sappiamo che esistono precisi limiti di validità, al di là dei quali le nostre idee sul tempo richiedono ulteriori cambiamenti. Infine, la ricerca attuale in gravità quantistica sta formulando una concettualizzazione del tempo ancora nuova, che appare necessaria per comprendere anche gli aspetti più generali della natura del tempo. Ma la ricerca in gravità quantistica è ancora lontana dall'aver un supporto sperimentale e, dunque, è ancora immersa in una nuvola di incertezza, priva di consenso. Quindi, detto in altre parole, oggi i fisici hanno idee molto confuse su cosa sia il tempo. L'unica cosa veramente certa è che il tempo non corrisponde a quello che ci indica la nostra intuizione elementare.



b.
Ritratto di Isaac Newton del 1702 di
Sir Godfrey Kneller (olio su tela).

Vediamo le quattro teorie sul tempo più nel dettaglio. La fisica newtoniana descrive il tempo come qualcosa che scorre in maniera uniforme ovunque, in un universo immerso in uno spazio infinito. Spazio e tempo sono indipendenti dalla materia o dagli osservatori. Lo spazio esiste anche se non c'è nulla, il tempo scorre anche se nulla succede. Questa idea di tempo ci è oggi familiare, ma non bisogna pensare che sia innata. L'idea del tempo di Newton si è imposta per la sua efficacia, non perché fosse naturale, e infatti si è imposta a fatica. L'idea dominante precedente, codificata per esempio da Aristotele, era che il tempo fosse solo una descrizione del modo (della misura) in cui le cose si muovono. Quindi se nulla esiste e nulla si muove non c'è tempo che passa. Le idee astratte di tempo e di spazio, indipendenti dalle cose del mondo e dall'accadere concreto nel mondo, ci sembrano oggi naturali, ma sono storicamente recenti. La fisica newtoniana, costruita su questa nozione di tempo, funziona benissimo nella nostra vita quotidiana, ed è per questo che si è imposta come modello di pensiero, ma è sbagliata quando si misurano le cose in modo più preciso. Per esempio, il pianeta Mercurio segue un'orbita chiaramente diversa da quella prevista dalle equazioni di Newton. E due orologi uguali possono misurare tempi diversi, in barba al tempo unico di Newton.

Si è chiaramente capito che l'idea newtoniana dell'universo non descriveva bene la natura con il celebre lavoro di Einstein del 1905 sulla relatività speciale. La scoperta di Einstein si può formulare nel modo seguente. Secondo l'idea newtoniana di tempo, il tempo è unico nell'universo, quindi esiste un

“adesso” che è ora lo stesso ovunque nell'universo. Tutti gli accadimenti dell'universo si possono catalogare fra quelli “futuri”, che sono dopo l'adesso, quelli “passati” che sono prima, o in un istantaneo “adesso”, fra il passato e il futuro, in cui si trova ora l'intero universo. Ma la realtà, come ha giustamente compreso Einstein, non è fatta così.

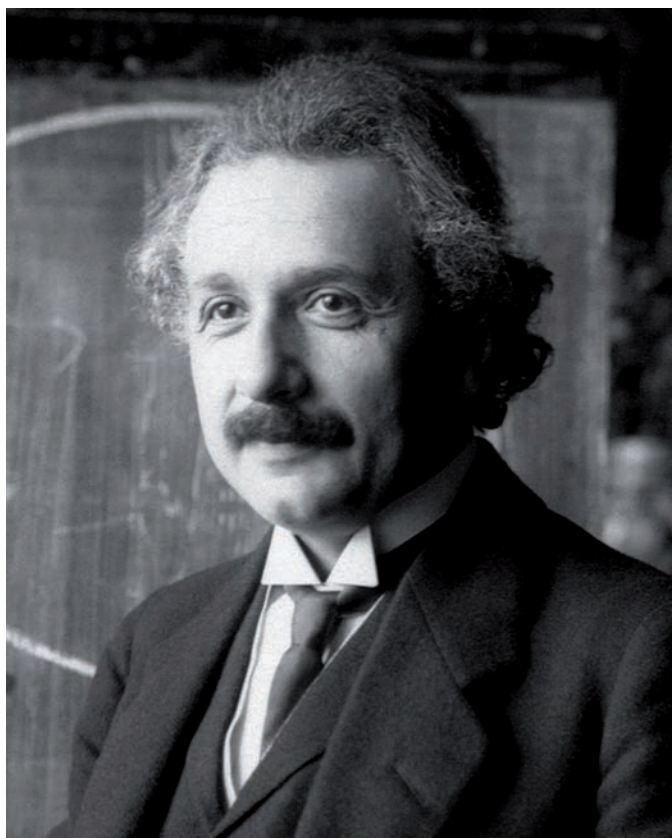
Posso parlare del mio “passato”, che comprende tutto ciò che ho potenzialmente visto e vissuto, posso parlare del mio “futuro”, ovvero dell'insieme degli eventi rispetto ai quali io mi trovo nel passato, ma fra il passato e il futuro esiste uno spazio intermedio, di cui Newton non si era accorto, che non è né passato né futuro. La durata di questa regione che non è né passato né futuro rispetto al *me-ora*, dipende dalla distanza da me. A pochi metri da me, la durata di questo spazio intermedio è dell'ordine dei nanosecondi, cioè molto breve, per questo non ci accorgiamo della sua esistenza. Dall'altra parte dell'oceano è dei millisecondi, ancora sotto la soglia della nostra percezione. Ma su Marte è di 15 minuti e su una galassia più lontana è dell'ordine di milioni di anni (vd. fig. 2 in approfondimento a p. 8). Quello che accade su quella galassia durante questi anni non è per noi né passato né futuro. In nessun modo, quello che accade là durante questo tempo può avere un effetto su di noi, né quello che accade qui può influire su ciò che accade sulla galassia durante questi milioni di anni. È come se, durante questo intervallo, le due storie temporali non fossero collegate. La teoria della relatività speciale di Einstein ci ha mostrato che la struttura del tempo è più complessa di quanto pensassimo. Non c'è un “adesso”

dell'universo e non c'è un tempo unico per tutti. Ogni luogo, ogni oggetto, ogni storia ha il suo proprio tempo e questi tempi non sempre combaciano. Anzi, in generale non combaciano. Orologi eguali possono indicare durate diverse, se si muovono in modo diverso. Einstein scopre questa curiosa struttura profonda della realtà, oggi largamente verificata, analizzando l'apparente inconsistenza fra la teoria elettromagnetica e la meccanica.

Dieci anni dopo, nel 1915, analizzando l'apparente inconsistenza fra la sua teoria e la teoria della gravità, Einstein realizza un altro spettacolare tuffo nella comprensione della realtà. E così scopre che lo spazio "dentro cui tutto esiste" e "il tempo lungo il quale tutto scorre", cioè questa specie di tela immobile introdotta da Newton su cui sembravano dipinti la realtà e il suo divenire, costituiscono un oggetto fisico ben definito, anch'esso governato da equazioni. Questo oggetto è il *campo gravitazionale*, un gemello del campo elettromagnetico introdotto pochi decenni prima da Faraday e Maxwell per comprendere l'elettromagnetismo. Spazio e tempo smettono di essere le misteriose quantità quasi "extra fisiche" introdotte da Newton e immerlettate da Kant, e la realtà torna a essere un insieme di oggetti che interagiscono, di cui chiamiamo "tempo" la misura del moto, come lo era per Aristotele. Einstein usa la metafora del "grande mollusco" per descrivere lo *spaziotempo* in cui siamo immersi: spazio e tempo diventano oggetti quasi materiali, con una loro dinamica.

Negli ultimi dieci o quindici anni, le più selvagge e incredibili conseguenze di questa audace teoria di Einstein (riguardanti buchi neri, espansione dell'universo, onde gravitazionali, lenti gravitazionali, differenza di velocità del passaggio del tempo con l'altezza ecc.) sono state tutte direttamente o indirettamente verificate. Oggi, questa teoria rappresenta la più estesa forma di sapere fortemente credibile che abbiamo sul tempo. Il tempo è il nome che diamo a una certa caratteristica quantitativa del campo gravitazionale, che a sua volta è una cosa simile al campo elettromagnetico.

Anche per la relatività generale di Einstein, tuttavia, sappiamo con relativa certezza che esistono precisi limiti di validità. Questi vengono dal fatto che la teoria non comprende gli effetti quantistici, i quali devono svolgere un ruolo anche per lo spazio e per il tempo. La ricerca volta a costruire una teoria quantistica della gravità, e quindi una teoria quantistica dello spazio e del tempo, porta a riconsiderare ancora una volta la nozione di tempo. Ci si è improvvisamente accorti di ciò negli anni sessanta, quando i fisici americani John Wheeler e Bryce DeWitt hanno scritto l'equazione fondamentale della teoria e questa equazione è scritta senza che il tempo vi compaia in alcun modo. Anche in versioni più moderne di questa teoria, come nella cosiddetta *teoria della gravità quantistica a loop*, le equazioni fondamentali non includono la variabile "tempo". La spiegazione di questo fatto, che all'inizio ha generato molta confusione, è semplice: il tempo in sé, come osserva Newton stesso nel suo libro, non è osservabile. Noi osserviamo solo cose in movimento, la variabile tempo è un'utile aggiunta per mettere ordine. Ma in uno "spaziotempo", cioè in un campo gravitazionale, soggetto a fluttuazioni



c.
Albert Einstein in una foto del 1921.

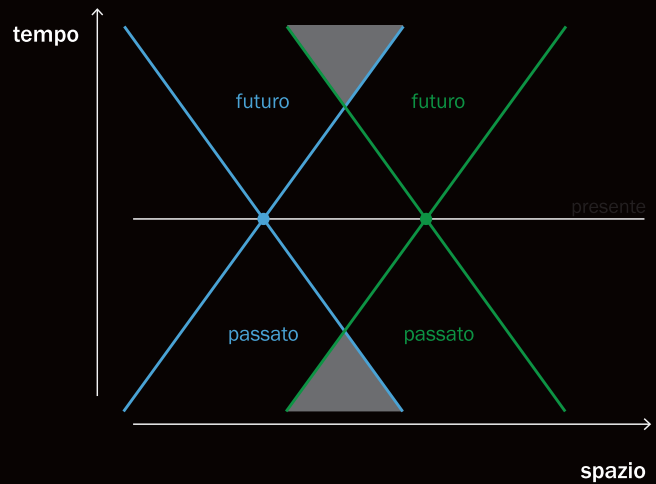
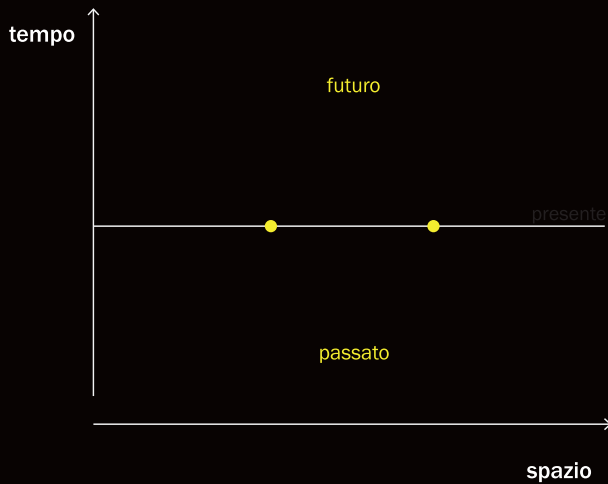
Spaziotempo relativo

Ogni punto di un diagramma spaziotemporale rappresenta un evento, cioè qualcosa che accade in una certa posizione dello spazio e in un certo istante di tempo. Nella fig. 1 (a sinistra) sono visibili due eventi (in giallo) che per la fisica newtoniana si verificano nello stesso istante e hanno lo stesso passato (semipiano inferiore) e lo stesso futuro (semipiano superiore). La linea orizzontale su cui giacciono rappresenta il loro presente. A destra nella fig. 1, per la relatività speciale, i due eventi, i punti in blu e in verde sono simultanei solo in un

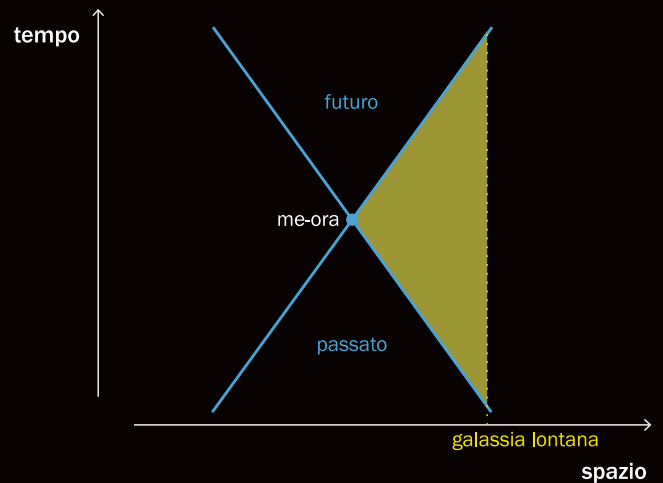
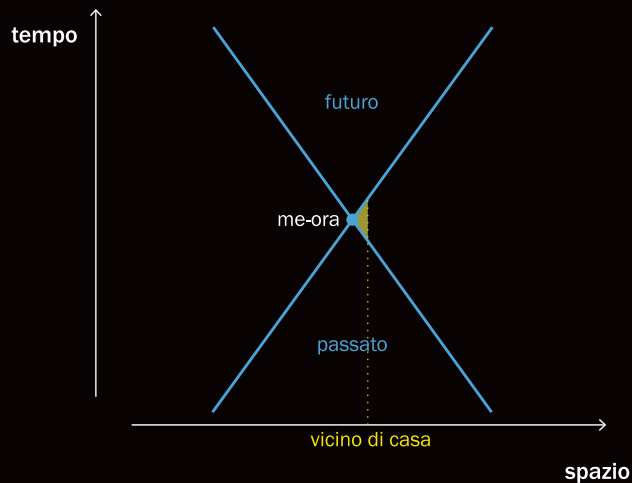
particolare sistema di riferimento e hanno un futuro e un passato distinti. Il futuro e il passato sono rappresentati, rispettivamente, dai triangoli superiori e inferiori (i cosiddetti "coni" del futuro e del passato). Le intersezioni di questi triangoli costituiscono il futuro e il passato comune dei due eventi (in grigio). Il diagramma con i due coni raffiguranti il futuro e il passato si chiama *spaziotempo di Minkowski*.

Nella fig. 2, l'intervallo di tempo degli eventi che non sono connessi a me-ora aumenta all'aumentare della distanza da me del punto dello spazio in cui questi eventi si verificano (la distanza è misurata sull'asse orizzontale). Questo intervallo di tempo è di una frazione piccolissima di secondo per gli eventi che si verificano vicino a me, è di qualche decina di minuti per eventi che si verificano, ad esempio, su Marte (non visualizzato nella figura) e può essere di milioni o di miliardi di anni per eventi che si verificano su una lontana galassia.

1.



2.



d.
Una rappresentazione artistica della gravità quantistica.



quantistiche e alla granularità minuta che caratterizza tutti gli effetti quantistici, questa inosservabile nozione del tempo perde ogni utilità. È un po' come dire che la distanza in chilometri lungo un'autostrada è un concetto utile se ci serve per viaggiare in automobile, ma se stiamo studiando i singoli grani dell'asfalto diventa una nozione che fa solo confusione. Per studiare i quanti di gravità, il tempo non è più una buona variabile. Invece di avere equazioni che descrivono come cambiano le cose "nel tempo", possiamo direttamente avere equazioni che descrivono come cambiano le cose l'una rispetto all'altra. Questo è ragionevole, ma allora il fluire del tempo come lo sperimentiamo sulla nostra pelle, che cos'è? Una possibilità è che il tempo come lo conosciamo noi riemerge solo in un limite statistico o termodinamico. Quello che caratterizza il fluire del tempo è la *termodinamica*, la crescita dell'*entropia* (cioè la grandezza che misura il disordine microscopico dei sistemi fisici). Forse, il tempo nasce solo quando si considerano molte variabili e valori medi. Il tempo, insomma, è

una conseguenza della nostra ignoranza dei dettagli microfisici del mondo. La terna gravità/quanti/termodinamica rappresenta oggi un nodo chiave per comprendere il mondo, su cui si sta concentrando molta della ricerca fondamentale più affascinante. Al centro di questo nodo, c'è la misteriosa nozione di tempo. Di certezze, alla fine, ce ne sono pochissime. Come dice Amleto alla fine del primo atto, confuso, dopo che lo spettro di suo padre gli ha rivelato che le cose non sono come lui pensava, *The time is out of joint* ("Il tempo è uscito dai suoi cardini").

Biografia

Carlo Rovelli è professore di fisica teorica all'Università di Aix e Marsiglia, dove dirige il gruppo di ricerca in gravità quantistica. È conosciuto per i suoi lavori sulla teoria della gravità quantistica "a loop".

Link sul web

http://it.wikipedia.org/wiki/Gravità_quantistica_a_loop