

Per una fisica del tempo

Luigi Foschini

Istituto Nazionale di AstroFisica (INAF)

Osservatorio Astronomico di Brera

20 Novembre 2019

Negli ultimi anni, il mondo della fisica ha assistito al rapido emergere del problema del tempo. Che cos'è il tempo, il mistero del tempo, l'enigma del tempo: sono solo alcune frasi a effetto che risuonano da una conferenza divulgativa all'altra, dalle pagine dei quotidiani a quelle delle riviste. Tuttavia, sono indice di un approccio decisamente sbagliato e fuorviante. Che il chiedersi cosa sia il tempo fosse un errore, lo aveva già notato Ludwig Wittgenstein: nel suo *Big Typescript*, il filosofo austriaco aveva scritto che tale domanda equivaleva a pensare che il tempo avesse una sostanza. Anche parlare di mistero del tempo ha risvolti simili, dato che richiama scenari magici e superstiziosi. La fisica non può ovviamente accettare questi approcci, ma non ha ancora sviluppato una vera e propria fisica del tempo, così come invece ci sono la fisica dello stato solido, la fisica dei quanti, la fisica dei fluidi, ecc... Non si pensi che la fisica relativistica possa essere un valido sostituto, dato che, anche in relatività, il tempo è ancora un po' trascurato, spesso considerato come una dimensione spaziale. Come si vedrà più avanti, uno dei maggiori contributi sul tempo nella relatività è arrivato involontariamente.

Esempi lampanti della mancata considerazione del tempo si possono leggere o ascoltare un po' dovunque. Uno degli ultimi casi che mi sono capitati sotto gli occhi è un'intervista a Sean Carroll dello scorso luglio 2019 sul sito *FQXi*, in cui il fisico statunitense affermava candidamente che le leggi della fisica a livello fondamentale sono simmetriche rispetto al tempo, mentre nella vita quotidiana si nota chiaramente un passato, un presente e un futuro. Il punto è che quando si fanno affermazioni del genere, ci si riferisce alle leggi ideali della fisica. Nel caso della meccanica, queste leggi sono state elaborate eliminando l'attrito, ovvero i fenomeni dissipativi in genere. Dato che la dissipazione di energia è l'effetto principale del tempo, è scontato che se si elimina questa, la fisica risultante sarà invariante rispetto al tempo! Si pensi a un esempio classico, una particella che oscilla avanti e indietro tra due posizioni spaziali, altrimenti detto pendolo o oscillatore armonico semplice. In condizioni ideali (senza attrito), il moto del pendolo è un'oscillazione di ampiezza costante nel tempo, tanto che si è pensato di usarlo come cronometro, in cui ciascuna oscillazione costituisce un'unità di tempo o una sua frazione. Tuttavia, sottolineo ancora una volta, questo vale in condizioni ideali, non realistiche. Infatti, se si considerano i pendoli reali occorre aggiungere la dissipazione di energia dovuta all'attrito con l'aria e quella del perno del pendolo. Questa dissipazione di energia modifica l'ampiezza dell'oscillazione, che andrà riducendosi nel corso del tempo, fino ad azzerarsi. Tanto è che i pendoli reali necessitano di una fonte di energia meccanica per poter continuare a oscillare, altrimenti si fermano. Gli orologi moderni hanno oscillatori elettronici, per cui la fonte di energia è una batteria incorporata, ma non di meno deve essere ricaricata di tanto in tanto o cambiata. Pertanto, le leggi ideali della meccanica classica sono

simmetriche rispetto al tempo, ma non è così per le leggi realistiche, dato che la dissipazione di energia introduce una naturale freccia del tempo.

Lo stesso concetto vale anche per sistemi con molte particelle (per esempio, un gas), ovvero quando si passa alla termodinamica. Si pensa che l'entropia definisca la freccia del tempo, ma a ben vedere questa grandezza esprime la probabilità di evoluzione verso certe configurazioni. Ciò che rende difficile l'inversione temporale — per esempio — di un uovo che cade per terra e si rompe, è che ci sono infinite possibilità di realizzare la caduta e rottura, ma una volta che l'evento si è verificato, esiste una e una sola sequenza per ritornare allo stato iniziale. La probabilità di azzeccare quell'unica soluzione per tornare spontaneamente alla configurazione iniziale è straordinariamente piccola, ma non nulla. Pertanto, anche l'entropia di per sé non definisce una freccia del tempo, se non in senso probabilistico. Tuttavia, anche in questo caso, è necessario sottolineare che queste considerazioni valgono per condizioni ideali: ovvero le particelle che compongono il gas devono essere delle sfere rigide, le pareti del contenitore devono essere completamente riflettenti, ecc. Nel momento in cui si aggiungono effetti dissipativi (particelle e pareti che possono assorbire parte dell'energia durante l'urto), ecco che la direzione del tempo appare naturalmente, senza bisogno di invocare la probabilità.

La fisica classica ha consentito di trascurare il tempo, come molte altre cose, perché è una fisica a misura d'uomo. Nel momento in cui si vuole studiare la natura al di là delle percezioni umane dirette, l'importanza del tempo emerge chiaramente. Si consideri lo stato di una particella: in fisica classica è definito dalla sua posizione e dal suo impulso in un certo istante di tempo. Non è possibile misurare simultaneamente queste due grandezze, ma si assume che nel piccolo intervallo di tempo che intercorre tra le due misure, le due grandezze non cambino significativamente. Nella meccanica quantistica, questo non è più possibile, poiché la misura perturba lo stato della particella al punto che se misuro la posizione, l'impulso risulterà poi indeterminato (e viceversa). Diventa evidente che il tempo opera un *taglio* tra il prima e il dopo, cosa che viene chiamata, in modo alquanto pittoresco, collasso della funzione d'onda. Prima della misura, non si sa dove sia la particella, ma si può stimarne la probabilità; dopo la misura, si conosce la posizione della particella al momento della misura, ma non si sa più dove sia al momento successivo, perché l'operazione di misura ha cambiato l'impulso.

Un altro esempio interessante è la cosiddetta correlazione quantistica (*entanglement*): una particella A con spin zero decade in due particelle B e C , con spin seminteri e opposti. Un'interpretazione molto in voga afferma che le due particelle B e C sono unite in A prima del decadimento e poi, si separano, ma rimangono correlate, al punto che se misuro lo spin di una, istantaneamente conosco anche quello dell'altra senza doverlo misurare. Questa non-località è avvolta da mistero, dato che non si conoscono segnali capaci di propagarsi a velocità maggiori di quella della luce nel vuoto. Se, invece, si pensa in termini di taglio del tempo, prima c'è solo la particella A che, decadendo, svanisce e genera B e C , i cui momenti angolari sono collegati dall'omonimo principio di conservazione e non da una qualche misteriosa correlazione istantanea. Se non si conosce l'informazione sulla conservazione del momento angolare, le due particelle appariranno completamente indipendenti. Questo almeno fino a una qualche interazione successiva che modifica

la conservazione del momento iniziale. Quello che succede a B e C non ha effetto su A , grazie al taglio del tempo, altrimenti sarebbe come mangiare una fetta di torta oggi e ingrassare ieri!

Un altro aspetto importante che sottolinea l'intrinseca differenza del tempo dallo spazio, è la misura del tempo. Si è scritto poco fa che gli orologi sono basati sull'idea che un'oscillazione costante possa essere misura del tempo. Tuttavia, è bene notare che questa ipotesi di costanza e uniformità del tempo non è mai stata verificata e mai potrà esserlo. Si pensi alla misura di una dimensione spaziale, per esempio la lunghezza o la larghezza di un libro: si prende un righello o un metro a nastro, si pone di fianco a un lato del libro e si legge la scala graduata. Questo semplice atto non può essere fatto per il tempo, perché non possiamo affiancare due intervalli di tempo. Possiamo solo supporre che l'ora misurata il giorno 18 novembre dalle 9 alle 10, sia esattamente uguale all'ora misurata il giorno 3 gennaio dalle 14 alle 15. Anzi, la teoria della relatività ci ha insegnato che questo non è valido in generale e che solo la grande differenza tra la velocità della luce e le velocità umane rende possibile questa approssimazione. La relatività speciale ha mostrato che il ritmo del tempo di un osservatore in moto a velocità prossime a quella della luce è differente rispetto al ritmo di un osservatore a riposo. Inoltre, secondo la relatività generale, cambiamenti di ritmo si verificano anche a seconda della distanza da una massa/energia. Questi due effetti sono misurabili nei vari sistemi satellitari di posizionamento (per esempio, il Global Positioning System, GPS). I satelliti sono in orbita a circa ventimila chilometri dalla Terra e hanno velocità rispetto al pianeta pari a circa 4 km/s. Se non si tenesse conto della relatività, gli orologi sui satelliti avrebbero una differenza per orbita di circa 19 microsecondi rispetto agli orologi al suolo, che corrispondono a un errore sulla distanza al suolo pari a circa sei chilometri.

È bene notare che anche nella relatività c'è una parte ideale e una più realistica. La relatività speciale tratta dei sistemi di riferimento inerziali (non accelerati), per cui è simmetrica rispetto al tempo, tanto è che quest'ultimo è considerato come quarta dimensione di uno spaziotempo quadridimensionale, del tutto equivalente alle tre dimensioni spaziali. Così come il panorama si riferisce alla visione spaziale, si potrebbe parlare di un temporama, per la visione temporale. Tuttavia, se il tempo è spazializzato, allora non c'è più tempo. Passato, presente e futuro semplicemente esistono, il fluire del tempo è un'illusione e si parla di un universo come un unico blocco di spaziotempo (*block universe*). Tuttavia, sottolineo ancora una volta, anche questo è un caso ideale. Nell'universo c'è massa/energia che curva lo spaziotempo, generando così delle asimmetrie locali: i sistemi di riferimento accelerati non sono tutti equivalenti, come invece accade per quelli inerziali. Un sasso cade sempre verso il suolo, mai verso il cielo, e quindi la gravità stabilisce una direzione temporale. Non solo: come si è visto, la massa/energia cambia il ritmo del tempo. Un'ora sulla Terra non è la stessa di un osservatore sull'orlo dell'orizzonte degli eventi di una singolarità spaziotemporale.

Inoltre, c'è un altro punto di grande importanza, scoperto involontariamente da Kurt Gödel: studiando le equazioni di campo gravitazionale di Einstein, il matematico austriaco trovò una nuova soluzione per un universo statico, in cui comparivano delle linee temporali chiuse (termine tecnico per macchina del tempo). Alcuni colleghi di Princeton fecero notare a Gödel che l'universo era in espansione e, inserendo questa nuova condizione, la nuova soluzione risultò essere priva di linee

temporali chiuse. L'espansione cosmologica costituisce una direzione temporale preferenziale, che automaticamente rimuove la possibilità di spazializzazione del tempo e quindi di spostamento arbitrario in questa dimensione (niente viaggi nel tempo). Ne risulta che il tempo è intrinsecamente differente dalle dimensioni spaziali, tanto che un particolare gruppo di teorie di gravità quantistica adotta uno spaziotempo 3+1 (tre dimensioni spaziali e una temporale). Il tempo è quindi un taglio che divide ipersuperfici tridimensionali in uno spazio quadridimensionale.

L'intrinseca differenza del tempo rispetto allo spazio richiede anche una revisione semantica. La parola futuro deriva dal latino *futurus*, participio futuro di una forma arcaica del verbo essere (*fu*). Pertanto, futuro si riferisce a qualcosa che esiste e semplicemente deve essere raggiunto (andrebbe bene per il block universe). Avvenire è una parola più adatta, perché esprime qualcosa che non esiste ancora e che ha da venire. Il tempo come taglio, l'adesso, separa il passato, che è stato e non è più, dall'avvenire, che deve essere ancora generato. Peraltro, visto che siamo in tema etimologico, è bene rammentare che la parola tempo deriva dal latino *tempus*, che a sua volta deriva dal greco *temnô*, che vuol dire proprio dividere. La parola inglese *time* ha invece un'etimologia differente, ma è collegata alla radice proto-indo-europea *da-*, che pure vuol dire dividere. Pertanto, parlare di tempo come taglio vuol dire ripristinare il significato originario del termine.

L'ordine del tempo non è spaziale o relazionale: non c'è un qui o un là come nello spazio, poiché il passato e l'avvenire non esistono. Come ho scritto poco fa, non si possono accostare due ore di due differenti giorni per vedere se sono uguali, come si fa per misurare una dimensione spaziale con un righello. L'avvenire deve essere generato e questo può accadere secondo le leggi della fisica, che non sono deterministiche. Si possono fare inferenze, calcolare probabilità e valori attesi, ma non c'è alcuna possibilità di fare predizioni, dato che l'avvenire non esiste e deve essere generato. Le predizioni sono solo superstizione e dispiace che questo termine sia percolato anche nell'ambiente scientifico (si pensi al termine previsioni del tempo usato in meteorologia).

Per generare l'avvenire occorre energia: si è sottolineato più volte che sono i fenomeni dissipativi che impongono una freccia del tempo, tanto che le leggi della fisica nei casi ideali sono invarianti rispetto al tempo. Anche il vuoto ha energia, altrimenti non esisterebbe. Senza energia non c'è tempo, non c'è esistenza.

In queste note sono stati affrontati solo alcuni aspetti del tempo, giusto per cercare di stimolare la riflessione. C'è una forte necessità di riconsiderare il tempo in tutti i settori della fisica, di sviluppare una fisica del tempo. Le ripercussioni potrebbero essere altamente significative e fruttuose. La fisica non può più permettersi di trascurare il tempo in avvenire, sempre che voglia progredire verso una teoria di gravità quantistica.

Per chi fosse interessato al tema a un livello più tecnico, c'è il libro L. Foschini, *Fisica del tempo* (Bonomo, Bologna, 2018).