

# Per quanto tempo è per sempre?

Una breve storia della misura  
del tempo

di Guido Tonelli



Le clessidre sono alcuni dei più antichi fra gli strumenti di misura del tempo. Assieme a meridiane e calendari hanno definito il rapporto con il tempo per intere comunità di umani, quelle che prosperavano grazie a piogge periodiche, o alle alluvioni benefiche di un grande fiume. Per un tempo interminabile il più terribile degli incubi per ogni popolazione di allevatori o coltivatori era che il Sole non riapparisse o che si interrompesse di colpo la magica sequenza delle stagioni. Il nostro senso del tempo ha radici in questa storia millenaria. Qualunque cosa minacciasse questo meccanismo perfetto costituiva un pericolo per la sopravvivenza dell'intera specie umana. Non a caso il potere veniva affidato a sacerdoti e astronomi, i più sapienti nell'organizzare un calendario, nel carpire i segreti nascosti in questo fluire regolare. Chi comprendeva le leggi segrete del tempo dominava il mondo, chi era capace di correggere quelle sottili derive nel fluire dei giorni e delle stagioni, che lo rendevano impercettibilmente irregolare, esercitava un potere immenso sugli uomini. Ma la necessità di controllare lo scorrere del tempo è uno dei bisogni ancestrali più profondi. Come accade in molti animali, e persino in alcune specie di insetti, il forte senso del tempo che caratterizza la nostra specie ha radici profonde nella biologia. Ritmi circadiani regolano da sempre le nostre funzioni vitali,

mentre valutare gli intervalli di tempo, memorizzare le attese, ipotizzare il momento più opportuno per una determinata azione si sono rivelati strumenti fondamentali per la sopravvivenza della specie. Non deve stupire che riechegi ancora in noi lo stupore dell'umanità bambina di fronte al carattere periodico dei grandi processi naturali: il Sole che percorre il suo arco a segnare l'alternarsi di luce e buio, l'accendersi delle stelle nel cielo notturno, la Luna che lo illumina con perfetta cadenza e il susseguirsi interminabile delle stagioni.

Con il passaggio dalla civiltà contadina all'epoca della manifattura, padroneggiare lo scorrere del tempo e misurarlo con precisione diventa un'attività fondamentale. Orologi meccanici sempre più precisi vengono messi a punto per organizzare la produzione e il commercio dei beni, per scandire il ritmo della vita nelle città o determinare la posizione dei vascelli che solcavano i grandi oceani alla ricerca di nuove terre. L'avvento della moderna rivoluzione industriale, ai primi del '900, segna il trionfo della misura del tempo, che diventa onnipresente e invade tutti gli aspetti della vita: organizza la giornata lavorativa nelle fabbriche e nei luoghi di lavoro, definisce le pause concesse agli operai e misura il loro salario, regola e stabilisce con precisione anche i periodi dedicati al recupero delle energie o allo svago.



a.  
Un orologio da  
taschino.

Migliaia di orologi fanno la loro apparizione nelle fabbriche e nei luoghi pubblici delle città, invadono le case e diventano accessori personali indispensabili. Iniziano con fare capolino dai taschini dei signori e finiscono per dilagare al polso di tutti. Una moltitudine di cronometri viene inglobata in ogni strumento di lavoro, trasporto o comunicazione. Il “clock” definisce i cicli dei processori nei cellulari, nei computer, nei sistemi satellitari, in ogni tipo di macchina utensile. Con la seconda rivoluzione industriale, gli orologi diventano strumenti onnipresenti che cadenzano la vita e le attività di miliardi di individui. Per ironia della sorte, proprio nel momento in cui la società celebrava il massimo trionfo del tempo, di colpo cambia tutto e il concetto stesso di tempo viene stravolto irrimediabilmente. Non appena la scienza moderna riesce a esplorare gli angoli più reconditi dell’universo, scopre che lo scorrere del tempo è qualcosa di molto più complicato e bizzarro di quanto si poteva immaginare. Quando si analizzano i fenomeni che avvengono nelle dimensioni subnucleari, il tempo diventa qualcosa di intimamente connesso allo spazio, che si deforma con la velocità. Qualcosa di ancora più strabiliante succede quando si osservano gli oggetti giganteschi che popolano il cosmo sulle grandi distanze, le galassie o gli ammassi di galassie. In questi due mondi, così lontani fra loro, quello scorrere del tempo armonico e costante, che ci ha incantato per millenni, si liquefa, si contorce, si frantuma. Spazio e tempo ci appaiono come una coppia indissolubile; non un concetto astratto, ma una sostanza materiale che occupa

l’universo intero, che vibra, oscilla e viene deformata dalla grande distribuzione di massa o di energia. La concezione ordinaria del tempo, quella che per millenni è stata utilizzata per ogni incombenza quotidiana, non funziona più. Con Albert Einstein il tempo assoluto di Isaac Newton riceve un colpo durissimo. Non solo non è più rigido e immutabile, ma perde anche la sua indipendenza dallo spazio. Il tempo universale di Newton si frantuma definitivamente in una specie di pulviscolo, un caleidoscopio di minuscoli orologi locali, il cui ticchettio non è soltanto fuori sincronia con tutto il resto, ma varia continuamente, incessantemente. A ogni punto corrisponde una specifica curvatura che dipende dalla distribuzione di energia e massa dell’intero universo rispetto a quella particolare posizione, in ogni singolo momento. Il tempo scorre con ritmi differenti in ciascun punto dell’universo e il suo fluire varia nel tempo anche localmente, in funzione dei cambiamenti dinamici della distribuzione di massa ed energia dell’universo intero. A partire da quel momento misurare il tempo con precisione sempre crescente diventa uno strumento fondamentale per comprendere le leggi fondamentali della natura, per carpirne i segreti più nascosti. La misura di intervalli di tempo sempre più minuti diventa essa stessa uno strumento scientifico privilegiato per cercare le profonde simmetrie che possono nascondere nuove leggi della fisica. Per misurare il tempo si sono sempre utilizzati fenomeni periodici: il battito del polso, il moto apparente del Sole attorno alla Terra o un pendolo che



**b.**  
L'Astron della Seiko è stato il primo orologio al quarzo commercializzato. Le uniche 100 unità prodotte furono vendute tutte a Tokyo nel Natale del 1969.

compie piccole oscillazioni. La precisione è cresciuta sempre di più, via via che si sono utilizzati fenomeni fisici caratterizzati da oscillazioni di frequenza sempre maggiore. Per questo si è passati dagli orologi a pendolo a quelli al quarzo, fino a giungere agli orologi atomici. La rivoluzione scientifica dei primi del '900 ci ha dato gli strumenti per capire e indagare i fenomeni caratteristici dei sistemi atomici, e lì si sono trovate transizioni periodiche ad altissima frequenza, che seguono un ritmo più regolare e preciso di qualunque altro fenomeno naturale utilizzato fino a quel momento.

Per avere un'idea del salto di qualità, basta ricordare che un buon orologio al quarzo può scartare di qualche secondo all'anno, mentre non è difficile costruire orologi atomici che sbagliano di un secondo ogni qualche milione di anni. Recentemente, utilizzando alcune particolari transizioni in atomi raffreddati a temperature vicinissime allo zero assoluto, è stato possibile costruire prototipi sperimentali che sbaglierebbero di un secondo ogni trenta miliardi di anni, un intervallo di tempo più che doppio rispetto all'età attuale del nostro universo. Ma a cosa servono orologi così precisi? Il loro scopo non è certamente quello di fornirci l'ora esatta. Sono strumenti di una sensibilità estrema, capaci di misurare le infinitesime differenze di potenziale gravitazionale che fanno accelerare o rallentare lo scorrere del tempo. Con strumenti così raffinati diventa possibile investigare fenomeni che nessuno è riuscito finora a misurare. Per esempio, può diventare realistico misurare la deformazione dello spaziotempo su scala microscopica, cioè testare la relatività generale nel mondo delle particelle subatomiche.

Nella storia della fisica, ogni volta che si è trovato un modo più preciso di misurare il tempo si sono fatte spesso scoperte fondamentali. Qualcuno pensa, per esempio, di provare a verificare se le costanti fondamentali della fisica sono veramente costanti nel tempo. Altri immaginano di sottoporre a stress i principi fondamentali dell'elettromagnetismo, della gravità e della meccanica quantistica. La sfida per riuscire a misurare intervalli di tempo sempre più minuscoli domina il mondo delle particelle elementari, stati della materia talmente effimeri da esibire vite medie che si consumano in infinitesime frazioni di secondo. Per molte di queste particelle si usa la dilatazione relativistica del tempo. Accelerate a velocità vicine a  $c$ , prima di decadere percorrono distanze misurabili, dalle quali si ricavano informazioni preziose sulla loro vita media. È quello che succede quotidianamente nel cuore dei moderni tracciatori di particelle cariche, che equipaggiano tutti gli esperimenti nei collisori di particelle e misurano agevolmente vite medie fino a  $10^{-13}$ s (ovvero un decimo di picosecondo), cioè più breve di un millesimo di miliardesimo di secondo.

Ma quando si parla di particelle con vite medie di una decina di ordini di grandezza ancora più brevi, vale a dire comprese fra  $10^{-22}$  e  $10^{-25}$ s, nessun rivelatore riuscirebbe a distinguere il cammino che percorrono prima di decadere. Anche viaggiando alla velocità della luce percorrerebbero distanze comprese fra le dimensioni di un protone e quelle di un quark. Per studiare intervalli di tempo così infinitesimi si deve ricorrere a un metodo completamente diverso. È quello che ci ha permesso di misurare la vita media delle particelle più importanti del modello standard, i bosoni W e Z, il bosone di Higgs e il più



**C.**  
Il Collider Detector del Fermilab (CDF, 1985-2011), dove nel 1995 è stato scoperto il quark top.

massiccio dei quark, il top. In questo caso ci viene in soccorso il principio di indeterminazione che, da limite invalicabile alla precisione, diventa uno strumento potente che ci permette di effettuare misure che parevano impossibili. Una forma di relazione di indeterminazione vale anche per tempo ed energia. Se vogliamo conoscere con alta precisione una delle due grandezze, dobbiamo accettare una grossa indeterminazione sull'altra. In questo caso  $\Delta E$ , che possiamo vedere come incertezza sulla massa della

particella che decade, è inversamente proporzionale a  $\Delta t$ , che interpretiamo come la sua vita media. Misurando molte volte la massa della particella e determinando l'incertezza  $\Delta E$  con cui la misuriamo, possiamo determinare la sua vita media. Anche se la vita media è molto piccola, praticamente non misurabile in altro modo, lo stesso principio che sembrava limitare le nostre capacità di conoscenza può essere invece usato per espanderle. La sfida a misurare intervalli di tempo sempre più minuscoli continua.

#### Biografia

**Guido Tonelli**, fisico del CERN, professore emerito dell'Università di Pisa e ricercatore associato dell'INFN, è uno dei principali protagonisti della scoperta del bosone di Higgs. Per il suo contributo alla scoperta ha ricevuto il Breakthrough Prize in Fundamental Physics, il Premio Enrico Fermi e la Medaglia d'onore del Presidente della Repubblica.