

Dammi solo un minuto

La misura moderna del tempo

di Salvatore Micalizio

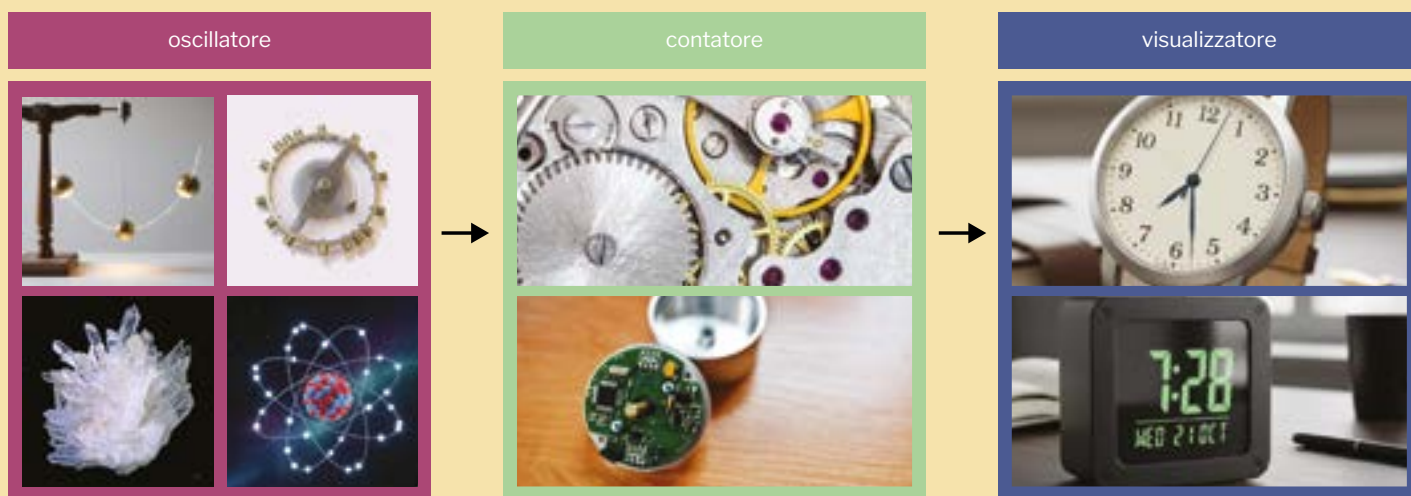
L'avanzare della conoscenza dei fenomeni fisici e della tecnologia ha portato alla nascita di meccanismi sempre più complessi per misurare una grandezza tanto elusiva quanto fondamentale come il tempo, basti pensare agli orologi meccanici. Più di recente, gli orologi al quarzo prima e quelli atomici poi hanno permesso di raggiungere livelli di accuratezza inimmaginabili. Ma quali caratteristiche deve possedere un orologio per essere considerato realmente preciso?

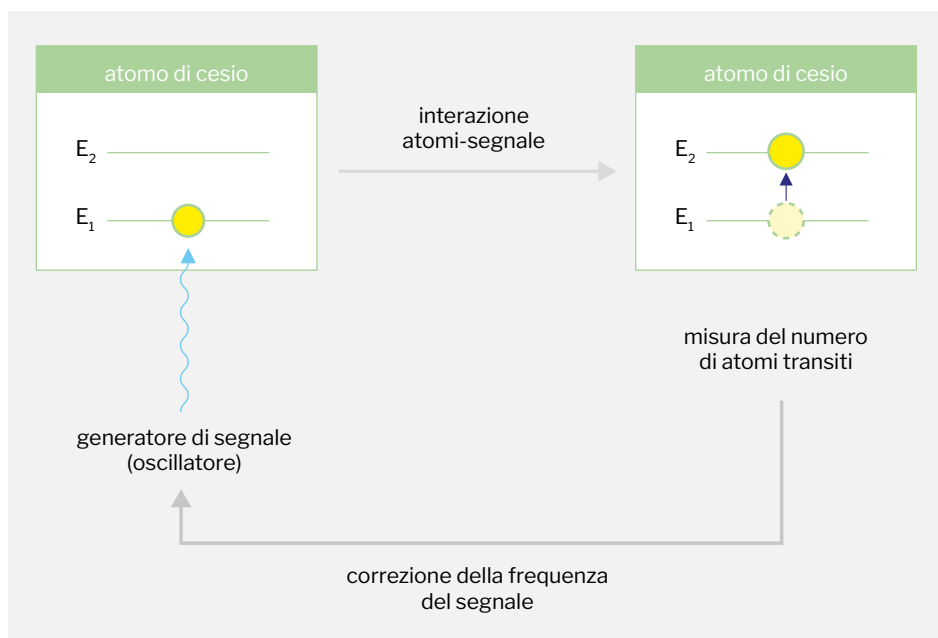
Innanzitutto, per costruire un orologio ad alte prestazioni, abbiamo bisogno di un fenomeno fisico periodico, che si ripete cioè con regolarità, e che fornisce il battito dell'orologio stesso; la durata di tale fenomeno, o un suo multiplo, può essere utilizzata come riferimento per definire l'unità di tempo. È necessario poi un dispositivo che conti queste oscillazioni e un sistema che mostri l'ora. Infine, tutte le parti dell'orologio devono essere alimentate da una sorgente di energia (vd. fig. a). Il moto di un pendolo o di un bilanciere, le vibrazioni di un cristallo di quarzo o le oscillazioni associate a transizioni atomiche possono essere assunti come

fenomeni periodici di riferimento. Una caratteristica importante è che tali oscillazioni siano stabili e poco influenzate dalle condizioni ambientali.

Per realizzare orologi precisi è fondamentale anche un'altra proprietà: la frequenza dell'oscillazione deve essere la più elevata possibile. Un'analogia con le misure di lunghezza ci può aiutare a capire perché. Supponiamo di voler misurare la lunghezza di un oggetto, come ad esempio un tavolo. La precisione della misura dipende dalla finezza della scala graduata del righello utilizzato. Un righello con tacche molto ravvicinate, ad esempio con risoluzione del millimetro, permette di determinare con maggiore accuratezza la lunghezza del tavolo rispetto a un righello che presenta una risoluzione limitata al centimetro. La stessa cosa vale per gli intervalli temporali: più è alta la frequenza del fenomeno che definisce l'intervallo di tempo di riferimento, maggiore sarà la precisione con cui determineremo la durata dell'intervallo stesso. Nel 1880 i fratelli Pierre e Jacques Curie dimostrarono l'"effetto piezoelettrico": una lamella di quarzo posta all'interno di un opportuno circuito elettrico risonante

a. Schema di principio di ogni orologio moderno. Il cuore dell'orologio è l'oscillatore che può essere un pendolo, ma anche un quarzo o un atomo. Il segnale generato dal risonatore è inviato a un sistema (meccanico o elettronico) che rivela e conta le oscillazioni del risonatore. Un visualizzatore (lancette o display) mostra poi l'ora.





b. Principio di funzionamento di un orologio atomico. Nello stato iniziale, l'elettrone dell'atomo (in giallo) si trova nel livello energetico a energia più bassa. L'elettrone interagisce con un segnale elettromagnetico di frequenza opportuna generato da un oscillatore locale (il quarzo, la cui frequenza è stata moltiplicata). L'elettrone effettua quindi la transizione al livello più energetico con una certa probabilità. Si sintonizza la frequenza del quarzo a quella dell'atomo massimizzando il numero di atomi transiti.

comincia a oscillare e tali oscillazioni sono estremamente regolari. La frequenza di oscillazione dipende da come è tagliata la lamella e varia da decine di kilohertz (decine di migliaia di oscillazioni al secondo) a decine di megahertz (decine di milioni di oscillazioni al secondo).

Negli orologi al quarzo commerciali che portiamo al polso, un circuito elettromeccanico converte a più bassa frequenza le rapide oscillazioni del quarzo, un po' come il cambio nell'automobile regola la velocità delle ruote rispetto al motore. In questo modo, la frequenza di oscillazione (circa 30 kHz) viene divisa fino a ottenere un valore utile per misurare il tempo: un'oscillazione al secondo. Il segnale di frequenza così generato aziona un motorino elettrico che muove le lancette o agisce sul display. La precisione dell'ora mostrata resta comunque legata al risonatore, cioè al quarzo.

I quarzi non sono solo impiegati negli orologi di tutti i giorni. Sono infatti un componente fondamentale per costruire orologi ancora più precisi: gli orologi atomici, che hanno frequenze di oscillazione ancora maggiori e il cui schema concettuale è mostrato in fig. b.

Gli atomi possiedono una struttura discreta dei livelli energetici. Per passare da un livello a un altro di energia maggiore, l'elettrone dell'atomo deve assorbire una radiazione elettromagnetica con una frequenza ben precisa. Questa frequenza è una proprietà della natura, dipendendo esclusivamente dall'atomo considerato: tutti gli atomi di uno stesso elemento condividono la stessa frequenza di risonanza che può quindi essere utilizzata come riferimento stabile e accurato.

Il segnale elettromagnetico di frequenza opportuna viene generato proprio a partire da un quarzo. Rispetto ai quarzi degli orologi da polso, il quarzo di un orologio atomico vibra a una frequenza molto più alta, 10 o 100 MHz, è isolato dall'ambiente

esterno ed è controllato in temperatura. In questo modo il quarzo fornisce agli atomi un segnale poco rumoroso, contribuendo alla precisione dell'orologio.

Le frequenze atomiche di interesse per gli orologi giacciono principalmente nella regione delle microonde, sono cioè dell'ordine dei GHz (gigahertz, miliardi di oscillazioni al secondo): la frequenza del cesio è per esempio circa 9 GHz. Per eccitare una transizione atomica con un segnale elettromagnetico, è necessario quindi un circuito elettronico che a partire dalla frequenza del quarzo arrivi ai GHz delle frequenze atomiche.

Il segnale sintetizzato in questo modo è inviato sugli atomi che hanno una certa probabilità di saltare al livello più energetico (il livello più in alto in fig. b). Si misura quindi il numero di atomi che ha cambiato stato energetico: in questo modo si ha un'indicazione di quanto la frequenza del segnale applicato sia vicina a quella della transizione atomica. Il segnale generato dal quarzo si sintonizza automaticamente in base alla risposta degli atomi: se la frequenza non coincide, un sistema di correzione la aggiusta finché non è perfettamente sincronizzata con la frequenza atomica. In questo modo, l'orologio mantiene un'elevatissima precisione.

Su questo principio funzionano diversi orologi atomici, tra cui la fontana atomica al cesio che è lo standard di frequenza che attualmente realizza la definizione del secondo con la miglior accuratezza (vd. fig. c): per accumulare un errore di un secondo la fontana deve funzionare per più di un milione di anni! La fontana atomica al cesio prende questo nome, perché il suo funzionamento ricorda quello di una fontana. Dopo una prima fase in cui gli atomi di cesio sono raffreddati mediante laser fino a temperature prossime allo zero assoluto, gli atomi vengono lanciati verso l'alto, dove rallentano, si fermano e ricadono sotto l'effetto della gravità. Da qui il nome



“fontana atomica”: gli atomi zampillano come in una fontana. Durante questo moto balistico, gli atomi attraversano due volte una cavità a microonde: una mentre salgono e una mentre scendono. In questo modo, la microonda induce la transizione tra due livelli energetici dello stato fondamentale. La misura della frequenza di questa transizione è estremamente precisa ed è alla base dell’attuale definizione del secondo nel Sistema Internazionale. Più di recente, la ricerca nel campo della metrologia del tempo si è indirizzata verso transizioni atomiche appartenenti al dominio

ottico, in altre parole il segnale di interrogazione è un laser. Elementi come lo stronzio (Sr) e l’itterbio (Yb) hanno frequenze di oscillazione milioni di volte più elevate delle microonde. Questi nuovi orologi atomici sbaglierebbero di appena un secondo nell’arco di miliardi di anni e sono quindi ottimi candidati per una possibile ridefinizione del secondo. Inoltre, orologi così precisi possono trovare applicazione in campi affascinanti come la geodesia relativistica, la fisica fondamentale e la navigazione satellitare del futuro.

c. La fontana atomica al cesio costruita presso i laboratori dell’INRIM. La fontana è lo standard di frequenza che realizza con la miglior accuratezza la definizione del secondo del Sistema Internazionale di misura (SI).

Biografia

Salvatore Micalizio è ricercatore presso la Divisione di Metrologia Quantistica e Nanotecnologie dell’INRIM (Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica). Si occupa di campioni atomici di frequenza a microonda ed è responsabile di diversi progetti finanziati dall’ESA dedicati allo sviluppo di orologi atomici compatti per applicazioni spaziali.