

Spaccare il secondo

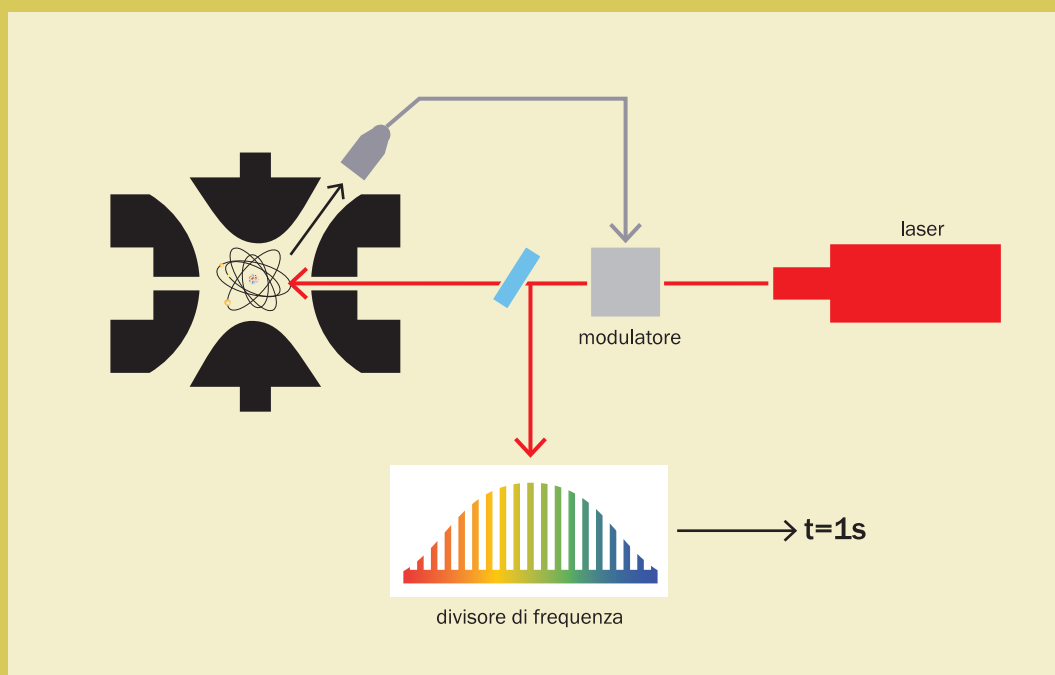
Dagli orologi atomici agli orologi nucleari

di Aldo Godone e Massimo Inguscio

La scienza che si occupa di definire le unità di misura, la *metrologia* moderna, discende da un'intuizione di James Maxwell del 1870, secondo cui: "Se si vogliono ottenere campioni di lunghezza, tempo e massa, che siano assolutamente permanenti, essi devono essere cercati non nelle dimensioni o nel movimento o nella massa del nostro pianeta, ma nella lunghezza d'onda, nella frequenza e nella massa assoluta degli atomi. Essi infatti sono eterni, inalterabili e tutti perfettamente uguali". Il suggerimento di Maxwell è stato messo in pratica per la prima volta per l'unità di misura del tempo, costruendo degli *orologi atomici*: si tratta di dispositivi, costituiti da un oscillatore (in genere un laser), che analizza una transizione atomica utilizzata come

discriminatore della frequenza, e da un divisore di frequenza, in grado di riportare il periodo dell'oscillazione atomica di riferimento a un intervallo di tempo convenzionalmente definito come un secondo (vd. fig. a).

Il primo orologio atomico è stato realizzato nel 1955 al National Physical Laboratory in Inghilterra da Louis Essen e Jack Parry utilizzando una transizione dello stato fondamentale del cesio 133, la cui frequenza è stata poi convenzionalmente definita pari a 9.192.631.770 Hz ed è alla base dell'attuale definizione del secondo. Lo sviluppo di questo orologio è stato impressionante, in quanto ha migliorato la sua accuratezza di circa un ordine di grandezza ogni decennio, sino a raggiungere il livello di una parte su 10^{14} nel 1990. Questo



a. Schema di un orologio atomico. La radiazione di un oscillatore laser è agganciata in frequenza alla transizione atomica di riferimento attraverso un modulatore e inviata a un divisore di frequenza, che genera l'unità di tempo in secondi.



b.
L'apparato di controllo della fontana criogenica al cesio utilizzata quale campione primario della scala di tempo nazionale italiana.

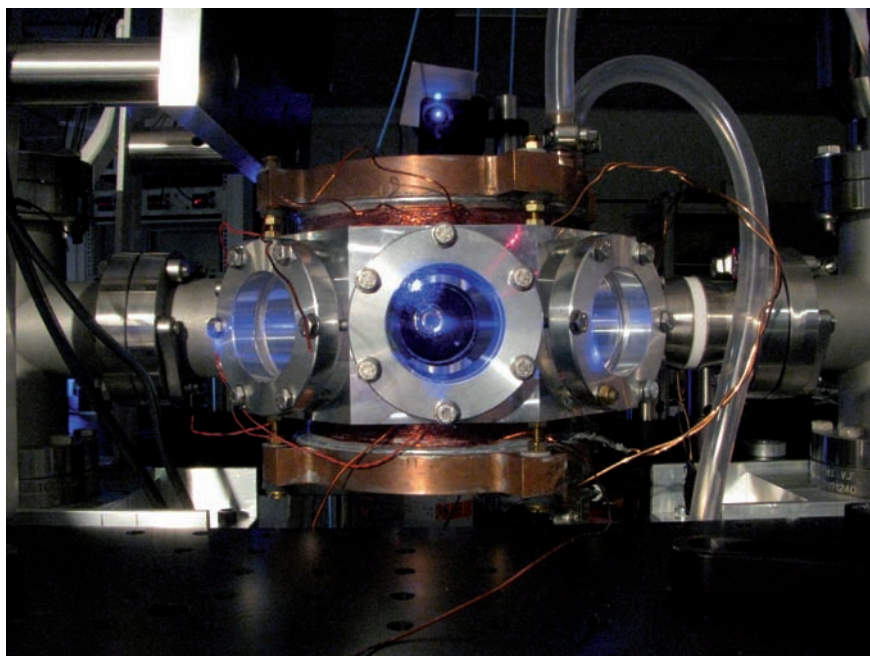
significa che orologi di questo tipo possono sbagliare al massimo di un milionesimo di secondo al giorno.

La "performance" di un orologio atomico dipende principalmente dal tipo di transizione dell'atomo di riferimento e dall'isolamento dalle perturbazioni esterne (come campi elettrici, magnetici, temperatura, urti, ...). L'intuizione di Maxwell, infatti, è tanto più valida quanto più la realizzazione sperimentale riproduce la situazione ideale di un atomo imperturbato. Proprio per venire incontro a questa necessità è stato determinante lo sviluppo della tecnica di raffreddamento laser (*laser cooling*) degli atomi, che ha consentito, negli ultimi 20 anni, di spingere ulteriormente l'accuratezza dell'orologio al cesio "termico", grazie alla realizzazione di *orologi atomici a fontana*, dove atomi di cesio o rubidio raffreddati a una temperatura prossima allo zero assoluto (pari a 1 micro-Kelvin) vengono sondati durante il loro volo nel campo gravitazionale terrestre (vd. fig. b). Questo risultato costituisce un primo limite di accuratezza per gli orologi basati in questo caso su una transizione nella regione delle microonde.

Nell'ultimo decennio si è proposto l'utilizzo, al posto del cesio, di reticoli di stronzio e itterbio (vd. fig. c) o di singoli ioni di alluminio, che presentano transizioni ottiche fortemente proibite (ovvero con una frequenza estremamente precisa).

Ciò ha consentito di portare l'accuratezza di questi *orologi atomici ottici* fino a qualche parte su 10^{18} (un milionesimo di secondo l'anno), aprendo la strada a una possibile futura ridefinizione dell'unità di misura del secondo. Allo stesso tempo, però, ha indicato un nuovo limite di accuratezza per gli orologi atomici, essenzialmente legato alla difficoltà tecnica di assicurare la condizione di "atomo imperturbato" a livelli migliori di quelli ottenuti. Nella figura a pagina 32 è raffigurata l'evoluzione degli orologi, dagli orologi con bilanciere a verga del 1300 agli orologi atomici moderni. Nel riquadro è riportato il notevole miglioramento di accuratezza nella realizzazione dell'unità di tempo degli ultimi 30 anni, dovuto all'introduzione degli orologi atomici a fontana e ottici.

Agli inizi del 2000 la Physikalisch-Technische Bundesanstalt tedesca ha proposto una transizione nucleare dell'isotopo 229 del torio come possibile transizione di riferimento per un orologio in grado di superare l'accuratezza di quelli ottici di uno/due ordini di grandezza. Il forte interesse per questa transizione del torio 229 è dovuto alla sua frequenza incredibilmente bassa, che ne consente, in linea di principio, l'osservazione con tecniche di spettroscopia laser ordinaria nella regione dell'ultravioletto. Da un punto di vista metrologico, una transizione nucleare garantisce una minore sensibilità ai fenomeni



c.
Luce emessa da un
campione ottico all'itterbio.

che tipicamente limitano i campioni di frequenza ottici, in quanto il nucleo è fortemente schermato dagli strati elettronici esterni. Al momento quattro gruppi di ricerca nel mondo sono impegnati nel tentativo di ridurre l'incertezza con cui oggi si conosce la frequenza di questa transizione (circa 10%), allo scopo di osservarla direttamente con le tradizionali tecniche di spettroscopia atomica, passo fondamentale per la realizzazione di un primo *orologio nucleare*.

L'importanza di osservare questa transizione del torio non risiede solo nel suo impiego metrologico, ma, più in generale, nella sua dipendenza dalla costante di struttura fine, circa 10.000 volte superiore a quella delle transizioni normalmente

utilizzate nei campioni atomici, che permetterebbe anche una verifica della stabilità nel tempo delle costanti fondamentali (vd. p. 19, ndr).

Orologi atomici o nucleari molto più accurati di quelli attuali darebbero un grande impulso agli esperimenti legati alla relatività generale, sia a terra che sui satelliti. Infatti, da un lato si avrebbe un miglioramento dei test "classici", come quelli del redshift gravitazionale (vd. p. 44, ndr) o del *principio di equivalenza* (vd. Asimmetrie n. 14 p. 13, ndr), dall'altro si aprirebbe la strada a interessanti nuove possibilità di osservazione di effetti gravito-elettromagnetici e di verifiche dei modelli di gravità quantistica (vd. p. 9, ndr).

Biografia

Aldo Godone ha svolto la sua attività scientifica nel campo della spettroscopia atomica ad alta risoluzione e in particolare dei campioni atomici di frequenza. Attualmente è coordinatore scientifico dell'Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica (Inrim) di Torino.

Massimo Inguscio, professore di fisica della materia all'Università di Firenze, è esperto a livello internazionale di materia condensata ultrafredda. È co-fondatore del Laboratorio Europeo di Spettroscopia Non-Lineare ed è attualmente presidente dell'Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica (Inrim) di Torino.

Link sul web

http://www.inrim.it/ldm/index_i.shtml

<http://www.hoepli.it/libro/il-tempo-e-atomico-9788820358945.html>

<http://physics.aps.org/articles/v5/126>

EVOLUZIONE DEGLI OROLOGI

scarto
(secondi/giorno)

1300 1400 1500 1600 1700 1800 1900 2000 anno

10^3

10^2

10^1

10^0

10^{-1}

10^{-2}

10^{-3}

10^{-4}

10^{-5}

10^{-6}

10^{-7}

10^{-8}

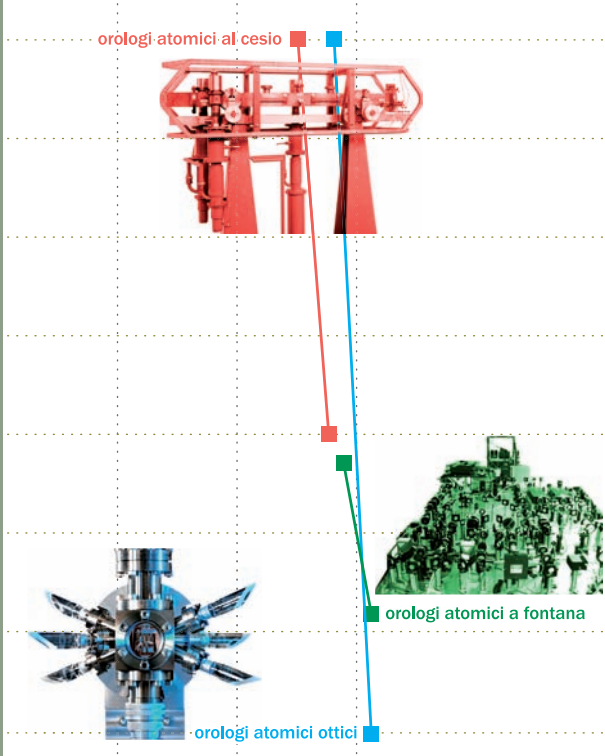
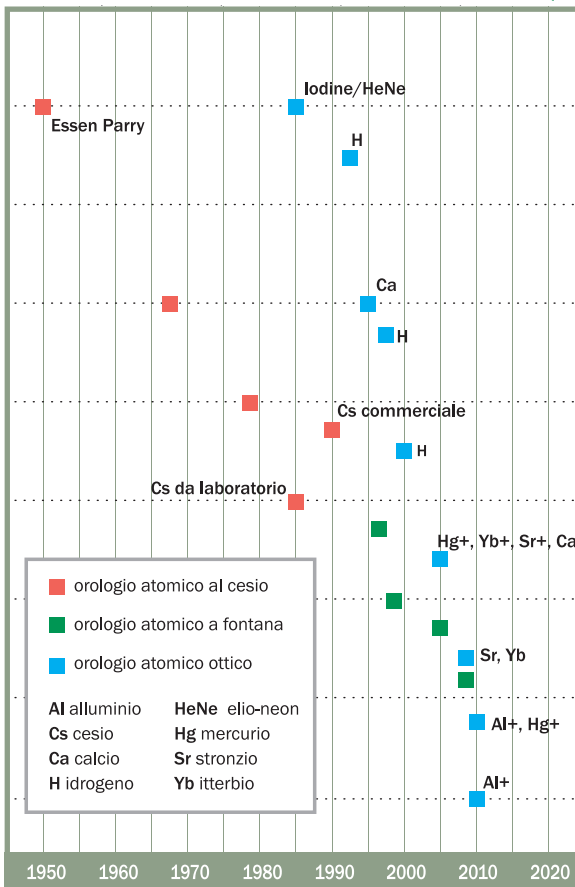
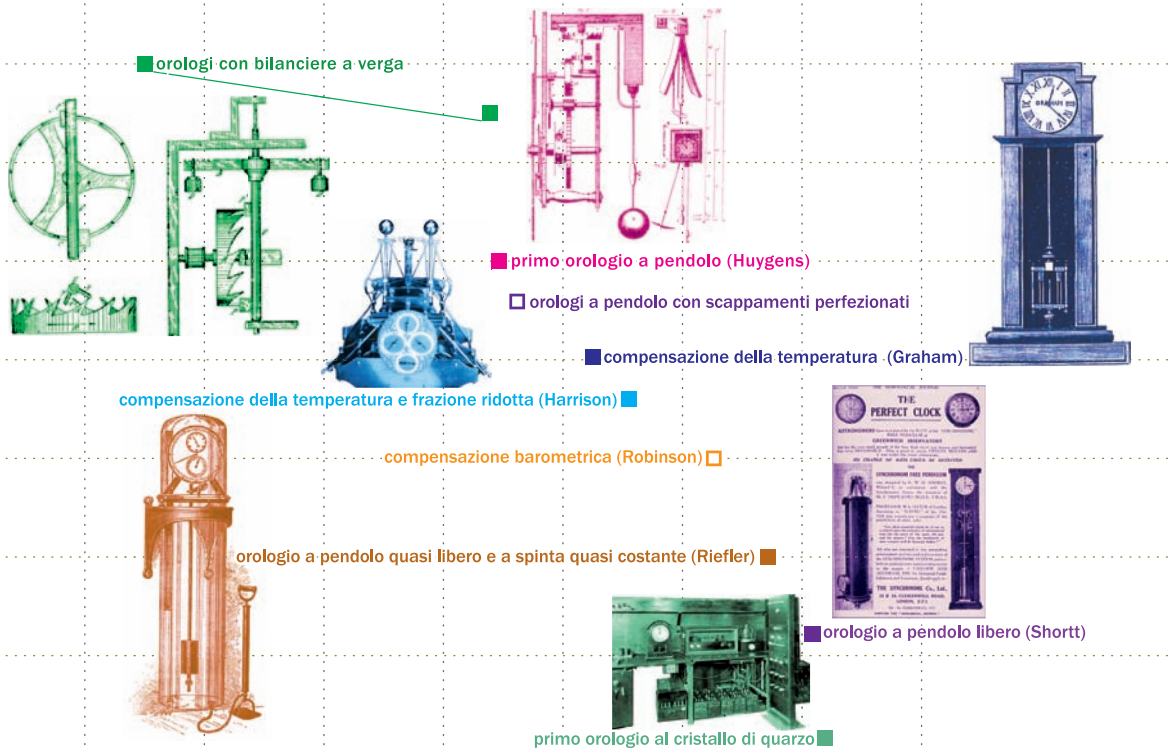
10^{-9}

10^{-10}

10^{-11}

10^{-12}

10^{-13}



scarto
(secondi/giorno)

1300 1400 1500 1600 1700 1800 1900 2000 anno