



MARCO PREVEDELLI  
DIPARTIMENTO DI FISICA E ASTRONOMIA  
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA  
MARCO.PREVEDELLI@UNIBO.IT

# ATOMI COME “STRUMENTI” DI MISURA

*Da qualche decennio ormai abbiamo imparato a manipolare singoli atomi tramite radiazione elettromagnetica e ad utilizzarli come sensori per campi esterni, elettromagnetici o gravitazionali, per misure di frequenza a livelli di precisione e accuratezza impensabili per qualunque altra quantità fisica e infine, in un possibile futuro prossimo, come unità fondamentali di immagazzinamento ed elaborazione dell'informazione nella prossima generazione di calcolatori, i computer quantistici.*

La spettroscopia, in passato, è stata uno dei metodi di indagine più proficui per determinare la struttura degli atomi e delle molecole [1] ed è tuttora una delle tecniche di analisi più sensibili, confrontabile in alcuni casi persino con la spettrometria di massa [2]. Da qualche decina d'anni, inoltre, l'interazione tra radiazione e materia è stata utilizzata anche per manipolare il momento angolare e la velocità degli atomi. Questo ha permesso, per alcune specie atomiche (Li, Na, Rb, Cs, Sr e Ca tra i più comunemente utilizzati), di variare la loro distribuzione di velocità. In un paio di secondi, ad esempio, a partire da un vapore di Rb a temperatura ambiente e ad una pressione di circa  $10^{-8}$  torr è facile ottenere, applicando campi magnetici e fasci laser opportuni, una nuvola contenente circa  $10^9$  atomi di  $^{87}\text{Rb}$  con una densità dell'ordine di  $10^{11}$  atomi/cm<sup>3</sup> e una temperatura di pochi milionesimi di grado K. Solo vent'anni fa un simile esperimento valeva un premio Nobel [3]. Attualmente può costituire un'esperienza di laboratorio, di un corso universitario di fisica della materia. A partire da una nuvola di questo tipo, in un'altra decina di secondi, è possibile ridurre ulteriormente la temperatura ed aumentare la

densità sino a raggiungere la degenerazione quantistica, realizzando un condensato di Bose-Einstein, che, tipicamente, contiene da  $10^4$  a  $10^6$  atomi e temperature difficili persino da definire ma che comunque sono espresse in nK. La realizzazione dei primi condensati Bose-Einstein è stata premiata con il Nobel nel 2001 [4] ma in 15 anni è diventata una procedura abbastanza ordinaria. In alternativa, se invece di atomi neutri si utilizzano ioni, intrappolati utilizzando campi elettrici variabili nel tempo e raffreddati da fasci laser, è possibile lavorare con poche particelle, al limite una sola. Un campione di atomi o ioni “freddi” rappresenta il punto di partenza ideale per realizzare strumenti di misura incredibilmente sensibili.

Qui lo spazio non permette di discutere della possibile implementazione di computer quantistici utilizzando ioni freddi, in cui ogni ione immagazzina un “qubit”, la versione quantistica di un bit, in cui l'unità elementare di informazione non assume solo i valori 1 e 0 ma anche una loro “sovrapposizione”. Per recenti lavori sulla implementazione in sistemi atomici si rimanda a [5] e [6]. Qui basta dire che i computer quantistici sono nella loro infanzia, non è anco-

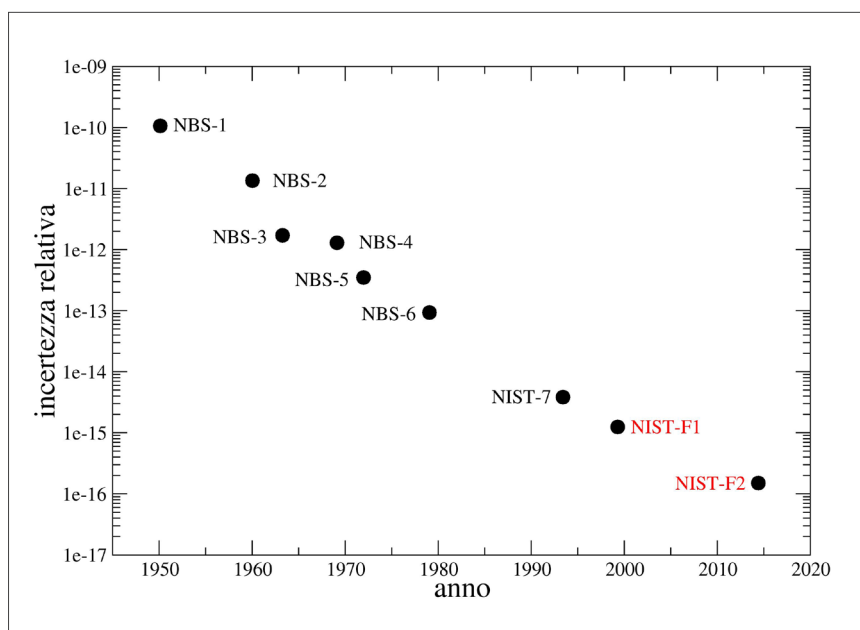


Fig. 1 - Andamento dell'incertezza relativa in funzione del tempo per gli orologi atomici al Cs realizzati per funzionare come standard primari dall'Istituto Metrologico degli Stati Uniti. In nero e rosso modelli basati su atomi termici e "freddi" rispettivamente

ra nemmeno chiaro quale sia il miglior sistema fisico con cui implementarli. È già noto, tuttavia, un algoritmo per computer quantistici [7] con cui gli attuali metodi crittografici diventerebbero attaccabili. La ricerca pubblica e, molto probabilmente, segreta in questo settore è quindi evidentemente molto attiva.

Si rimanda alla letteratura anche per quanto riguarda le misure di campo magnetico [8] ed elettrico [9].

Vorrei invece dedicare un po' di spazio alla discussione degli orologi atomici sia perché sono un ottimo esempio di come sia insensato cercare di separare ricerca di base e applicata, sia perché la frequenza è di gran lunga la quantità fisica che riusciamo a misurare meglio e, come fisico sperimentale, ne sono in qualche modo affascinato.

### Orologi atomici

Attualmente è l'atomo di  $^{133}\text{Cs}$  a determinare la durata del secondo. L'era atomica nel campo degli orologi è iniziata negli anni Cinquanta con la costruzione dei primi prototipi basati su atomi termici. La definizione del secondo basata sul  $^{133}\text{Cs}$  e non più sulla rotazione terrestre risale al 1967. La Fig. 1, mostra l'errore in funzione del tempo degli orologi atomici al Cs costruiti come standard primari dall'Istituto Metrologico

degli Stati Uniti (NBS in passato, ora NIST). Si può notare come ci sia stata una riduzione media dell'errore relativo di un fattore 10 ogni 10 anni. Gli ultimi due punti si riferiscono alle cosiddette "fontane atomiche", in cui vengono utilizzati atomi "freddi". L'errore si è ridotto da circa 10  $\mu\text{s}$  al giorno a 10 ps al giorno.

Naturalmente è lecito chiedersi quale sia l'utilità pratica di tanta precisione. Per rispondere a questa domanda basta considerare i navigatori GPS, che utilizzano una costellazione di una trentina di satelliti, ognuno dei quali monta orologi atomici al Cs o al Rb di prestazioni ridotte dato che, per

evidenti motivi di spazio, ingombro e consumo, non è possibile installare su satellite i migliori strumenti da laboratorio. Questo si traduce in un errore di posizionamento dell'ordine di circa 10 m in pochi secondi: buono abbastanza per trovare un numero civico se ci si muove a bassa velocità in auto, ma non sufficiente per guidare in tempo reale un aereo in atterraggio. Con orologi migliori a bordo dei satelliti GPS un aereo potrebbe effettuare un atterraggio in assenza di visibilità e di comunicazioni da terra, basandosi solo sul navigatore di bordo. Nella vita di tutti i giorni quindi non solo siamo inconsapevoli utilizzatori di orologi ultraprecisi ma non ci dispiacerebbe disporre di qualcosa di meglio.

Vale poi la pena di notare che, secondo la teoria della relatività ristretta, la frequenza di due orologi in moto relativo non è la stessa, mentre la teoria della relatività generale prevede che la frequenza di un orologio dipenda dal valore del campo gravitazionale in cui è immerso. Le orbite dei satelliti GPS sono ellittiche quindi, durante l'orbita, variano sia la velocità che il campo gravitazionale locale e, a causa di effetti relativistici, gli orologi hanno una frequenza irregolare, accumulando errore. È necessario, quindi, calcolare, per ogni satellite, a partire dai suoi dati orbitali, le

correzioni e periodicamente regolare il suo orologio. Se questo non venisse fatto il GPS diventerebbe inutilizzabile in pochi mesi [10]. La teoria della relatività generale, considerata tra le più astratte, ci serve per raggiungere un indirizzo che non conosciamo.

Dopo circa cinquant'anni di onorato servizio sta giungendo anche per il Cs il tempo della pensione. Disponiamo già di orologi migliori basati su Al<sup>+</sup> [11], Sr [12] e Yb [13] che raggiungono, nel caso migliore, errori relativi dell'ordine di 10<sup>-18</sup>, vale a dire 100 volte meglio dei migliori orologi al Cs (Fig. 2). Le misure di frequenza di questi orologi sono di gran lunga le misure più precise mai effettuate. Per avere un'idea di che cosa voglia dire misurare qualcosa con 18 cifre significative supponete di determinare il volume dell'acqua contenuta in tutti gli oceani, stimata in 1,3 miliardi di km<sup>3</sup>, con un errore dell'ordine del m<sup>3</sup>.

Il motivo principale del miglioramento nelle prestazioni è dato dalla frequenza a cui operano gli orologi. Nel Cs si utilizza una transizione iperfine del livello elettronico fondamentale a circa 9,1 GHz mentre la nuova generazione di orologi atomici sfrutta transizioni nella regione del visibile. Nel caso dello Sr, ad esempio, la frequenza è attorno a 3,3x10<sup>5</sup> GHz, pari a una lunghezza d'onda di 698 nm. Per questo motivo si parla, per la nuova generazione, di orologi "ottici". Il loro sviluppo ha richiesto il superamento di problemi tecnici formidabili, primo tra tutti quello della misura diretta di frequenze ottiche, non di ordinarie misure di lunghezza d'onda. La soluzione di questo problema è stata premiata con il Nobel per la Fisica nel 2005 [14]. Diventa anche non banale confrontare orologi distanti utilizzando fibre ottiche. Per avere un'idea della complessità di tali esperimenti si veda [15].

Si veda [16] per una rassegna sugli orologi atomici all'alba del nuovo millennio e [17] per una rassegna recente sugli orologi ottici. In [18] si mostra come gli effetti relativistici sia-

no ormai chiaramente osservabili utilizzando orologi ottici in laboratorio. Lo sviluppo degli orologi ottici non è ancora terminato per cui non è ancora chiaro su quale atomo sarà basata la prossima definizione del secondo e quando tale definizione entrerà in vigore, tuttavia disponiamo già ora di orologi molto migliori dello standard attuale che ci permettono misure di fisica fondamentale e applicata impensabili sino a pochi anni fa.

## Sensori inerziali

Vorrei infine accennare al campo dei sensori inerziali. È possibile preparare un campione di atomi freddi in modo che ciascuno sia in una sovrapposizione di due stati con energie interne e velocità diverse. Ne consegue che la funzione d'onda, inizialmente localizzata in un punto dello spazio, si separa in due picchi distinti e l'atomo, in un certo senso, si trova contemporaneamente in due posti diversi. Di recente si è riusciti a rendere questa separazione dell'ordine di 50 cm e quindi a creare atomi di dimensioni macroscopiche [19]. È possibile non solo separare in due parti la funzione d'onda ma anche scambiare le loro velocità relative e quindi ricombinarle facendole infine interferire. Ognuna delle due parti acquista una fase che dipende dal potenziale in cui si è mossa. La "figura di interferenza" risultante può essere utilizzata per misurare

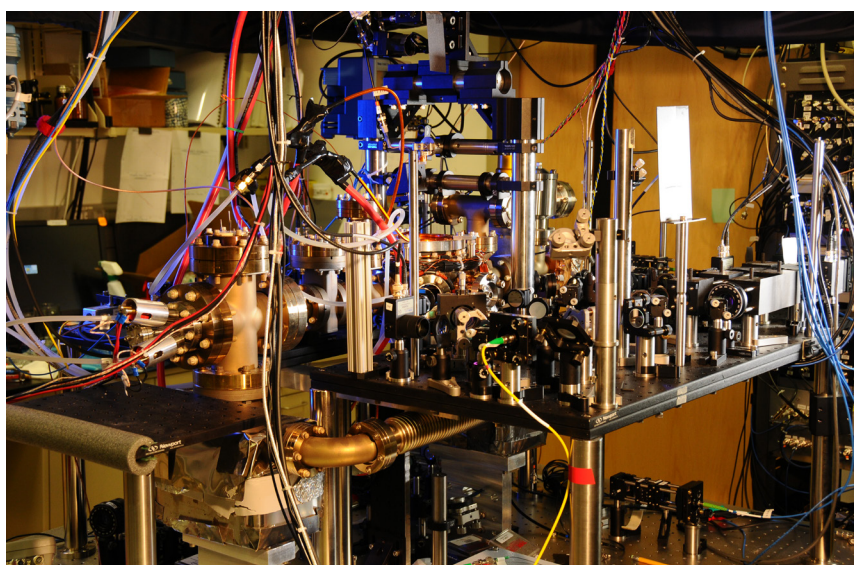


Fig. 2 - Parte dell'apparato sperimentale che costituisce un orologio ottico a Yb realizzato dall'Istituto Metrologico degli Stati Uniti



l'accelerazione degli atomi e le sue derivate spaziali. A titolo di esempio in [20] sono riportati i risultati per un gravimetro trasportabile basato su atomi di Rb freddi (Fig. 3). La sensibilità relativa nella misura dell'accelerazione di gravità locale  $g$  può raggiungere  $10^{-10}$ , il che equivale a rivelare il campo gravitazionale prodotto da una persona a 1 m dallo strumento sul fondo dato dal campo gravitazionale terrestre.

La conoscenza di  $g$  e delle sue derivate permette di effettuare prospezioni geologiche e ha evidenti applicazioni pratiche. Esistono già almeno tre ditte, che dichiarano di produrre e vendere gravimetri atomici [21]. A partire dai primi esperimenti [22] negli anni Novanta siamo arrivati ai primi dispositivi commerciali senza che lo sviluppo di questa tecnologia sia ancora giunto al termine. La sensibilità negli strumenti di laboratorio è destinata a migliorare mentre gli strumenti da campo diventeranno meno costosi ed ingombranti.

L'interesse per i sensori basati su atomi è piuttosto forte e ha portato la Comunità Europea a discutere l'opportunità di finanziare, a partire dal 2018, un progetto bandiera del valore di 1 miliardo di euro. Una versione del manifesto del progetto è reperibile in [23]. Nel manifesto vengono citate sei tecnologie chiave da acquisire e sviluppare entro il 2035. Tre di queste sono appunto gli orologi, sensori e computer quantistici.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] G. Herzberg, *Atomic Spectra and Atomic Structure*, Dover, Londra, 1944.
- [2] J. Galli *et al.*, *Optica*, 2016, **3**, 385.
- [3] S. Chu, *Rev. Mod. Phys.*, 1998, **70**, 685; C. Cohen-Tannoudji, *ibid.*, 707; W. Phillips, *ibid.*, 721.
- [4] E.A. Cornell, C.E. Wieman, *Rev. Mod. Phys.*, 2002, **74**, 875; W. Ketterle, *ibid.*, 1131.
- [5] S. Debnath *et al.*, *Nature*, 2016, **536**, 63.
- [6] C.R. Monroe, R.J. Schoelkopf, M.D. Lukin, *Scientific American*, maggio 2016, 50.
- [7] P.W. Shor, *SIAM J. Comput.*, 1997, **26**, 5.
- [8] I.K. Kominis *et al.*, *Nature*, 2003, **422**, 596.
- [9] A. Facon *et al.*, *Nature*, 2016, **535**, 262.
- [10] N. Ashby, *Phys. Today*, maggio 2002, 41.
- [11] P.O. Schmidt *et al.*, *Science*, 2005, **309**, 749; T. Rosenband *et al.*, *Science*, 2008, **319**, 1808.
- [12] B.J. Bloom *et al.*, *Nature*, 2014, **506**, 71; I. Ushijima *et al.* *Nature Photon.*, 2015, **9**, 185.
- [13] N. Hinkley *et al.*, *Science*, 2013, **341**, 1215.
- [14] J.L. Hall, *Rev. Mod. Phys.*, 2006, **78**, 1279; T.W. Hänsch, *ibid.*, 1297.
- [15] C. Lisdat *et al.*, *Nature Commun.*, 2016, **7**, 12443.
- [16] S.A. Diddams *et al.*, *Science*, 2004, **306**, 1318.
- [17] C.W. Chou *et al.*, *Science*, 2010, **329**, 1630.
- [18] F. Hong, *Meas. Sci. Technol.*, 2017, **28**, 012002.
- [19] T. Kovachy *et al.*, *Nature*, 2015, **528**, 530.
- [20] M. Hauth *et al.*, *Appl. Phys. B*, 2013, **113**, 49.
- [21] <http://aosense.com/>; <http://www.atomsensors.com/>; <https://www.muquans.com/>
- [22] A. Peters, K. Yeow, S. Chu, *Nature*, 1999, **400**, 849.
- [23] [http://quope.eu/system/files/u7/93056\\_Quantum%20Manifesto\\_WEB.pdf](http://quope.eu/system/files/u7/93056_Quantum%20Manifesto_WEB.pdf)



Fig. 3 - Parte del gravimetro atomico trasportabile descritto in [20]. A questo va aggiunto un armadio telefonico da 19 pollici contenente l'elettronica. L'intero sistema può essere trasportato in un furgone