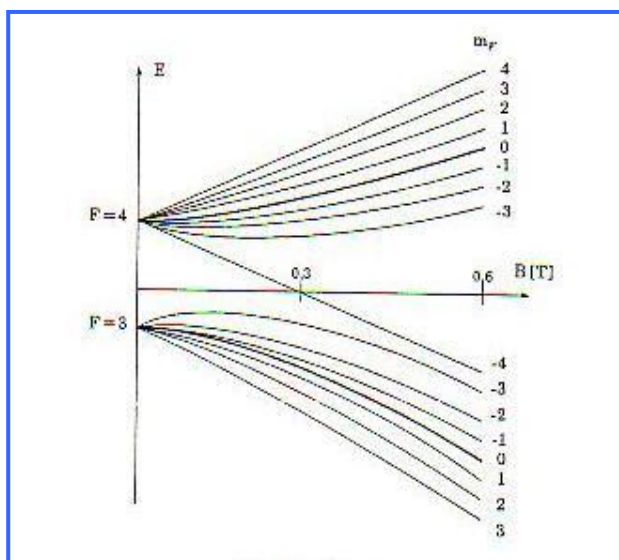


## Campioni atomici al cesio

### Introduzione

Gli orologi con oscillatore a cristallo di quarzo, che si sono via via rivelati più affidabili e precisi degli orologi a pendolo, hanno iniziato a sostituire questi ultimi negli anni intorno al 1940, anche se l'orologio primario di riferimento rimaneva pur sempre il moto di rotazione della Terra. Infatti il tempo veniva determinato attraverso osservazioni astronomiche e gli orologi utilizzati solo per conservare, tra una osservazione e la successiva l'unità di intervallo di tempo, il "*secondo di giorno solare medio*", che era stato adottato come riferimento internazionale nel 1875.



Livelli energetici dell'atomo di cesio

Parallelamente agli studi indirizzati al perfezionamento degli oscillatori a cristallo di quarzo, venivano avviate in diversi laboratori ricerche per la realizzazione di oscillatori ancora più stabili basati su fenomeni atomici della meccanica quantistica. E' ben noto che l'atomo di una qualsiasi sostanza può assumere un certo numero di stati eccitati ben determinati, caratteristici dell'elemento al quale esso appartiene. Passando da un livello di energia ad un altro, corrispondenti a ciascuno di questi stati, l'atomo cede energia quando passa ad un livello inferiore e, al contrario, ne assorbe quando passa al livello superiore. Questo cambiamento di livello o transizione dà luogo all'emissione o all'assorbimento di una radiazione elettromagnetica, la cui frequenza è direttamente proporzionale alla quantità di

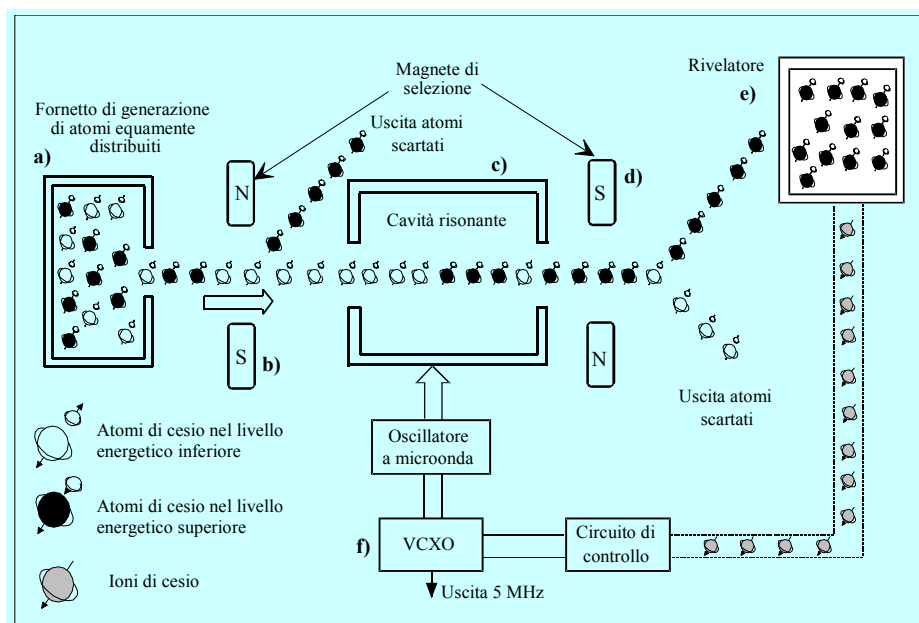
energia ed è determinabile con grande precisione. Tecnicamente si sono rivelati molto adatti a essere utilizzati come "oscillatori" gli atomi di idrogeno, rubidio e cesio.

Il segnale di riferimento del secondo derivato da questi oscillatori, è caratterizzato da una accuratezza che, nei migliori campioni al cesio da laboratorio, è almeno diecimila volte migliore di quella raggiungibile con le osservazioni astronomiche. Proprio su una transizione naturale del cesio è basata l'attuale definizione dell'unità di intervallo di tempo, il *secondo*. Tale definizione, adottata in tutto il mondo fin dal 1967 a sèguito delle decisioni prese dalla 13<sup>a</sup> Conferenza Generale dei Pesi e delle Misure, è così formulata: "Il secondo è l'intervallo di tempo che contiene 9 192 631 770 periodi della radiazione corrispondente alla transizione tra i due livelli iperfini dello stato fondamentale dell'atomo di cesio 133".

Il primo esemplare di oscillatore atomico a fascio di cesio fu realizzato in Gran Bretagna presso il National Physical Laboratory da L. Essen e J.V.L. Parry e messo in funzione nel 1955. Intorno al 1960 comparvero in commercio le prime realizzazioni di orologi atomici a fascio di cesio che si diffusero rapidamente nei laboratori che operavano nel settore della metrologia del tempo.

## Principio di funzionamento

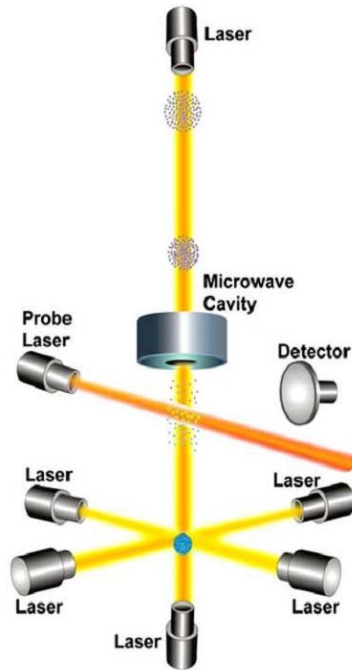
Nella figure seguenti vengono mostrati, tra l'altro, lo schema semplificato di un oscillatore a fascio di cesio ed una sua realizzazione commerciale. Nello schema, il fornello a) riscaldato a circa  $90^{\circ}\text{C}$ , emette il fascio di atomi di cesio uniformemente distribuiti nei sedici livelli energetici. Il selettore magnetico b) attua la prima selezione garantendo l'immissione nella cavità risonante del livello energetico inferiore ( $F = 3$ ,  $m_F = 0$ ). Nell'interno della cavità risonante c), grazie all'interazione con il segnale a microonda, avviene la transizione al livello superiore ( $F = 4$ ,  $m_F = 0$ ), che in uscita viene indirizzata sul rivelatore dal selettore magnetico d). La rivelazione del livello energetico superiore è affidata ad un filo incandescente e), in grado di produrre un segnale elettrico proporzionale alla quantità di atomi incidenti. Un circuito di controllo provvederà, in funzione del segnale rivelato, a generare un segnale di errore necessario per controllare l'oscillatore al quarzo f) (VCXO), che a sua volta costituisce la sorgente dell'oscillatore a microonda.



Vi è una distinzione tra i campioni a fascio di cesio commerciali e quelli sperimentali di laboratorio. Questi ultimi infatti sono in genere apparecchiature di notevoli dimensioni, in cui si sfrutta al massimo la risoluzione consentita dalla tecnica di "Ramsey" operando con cavità la cui lunghezza può raggiungere anche un metro.

I campioni commerciali invece sono strumenti ben più piccoli, come dimensioni, di quelli sperimentali. La lunghezza della cavità Ramsey è dell'ordine di 20 cm e l'orologio, nel suo insieme, si presenta estremamente compatto.

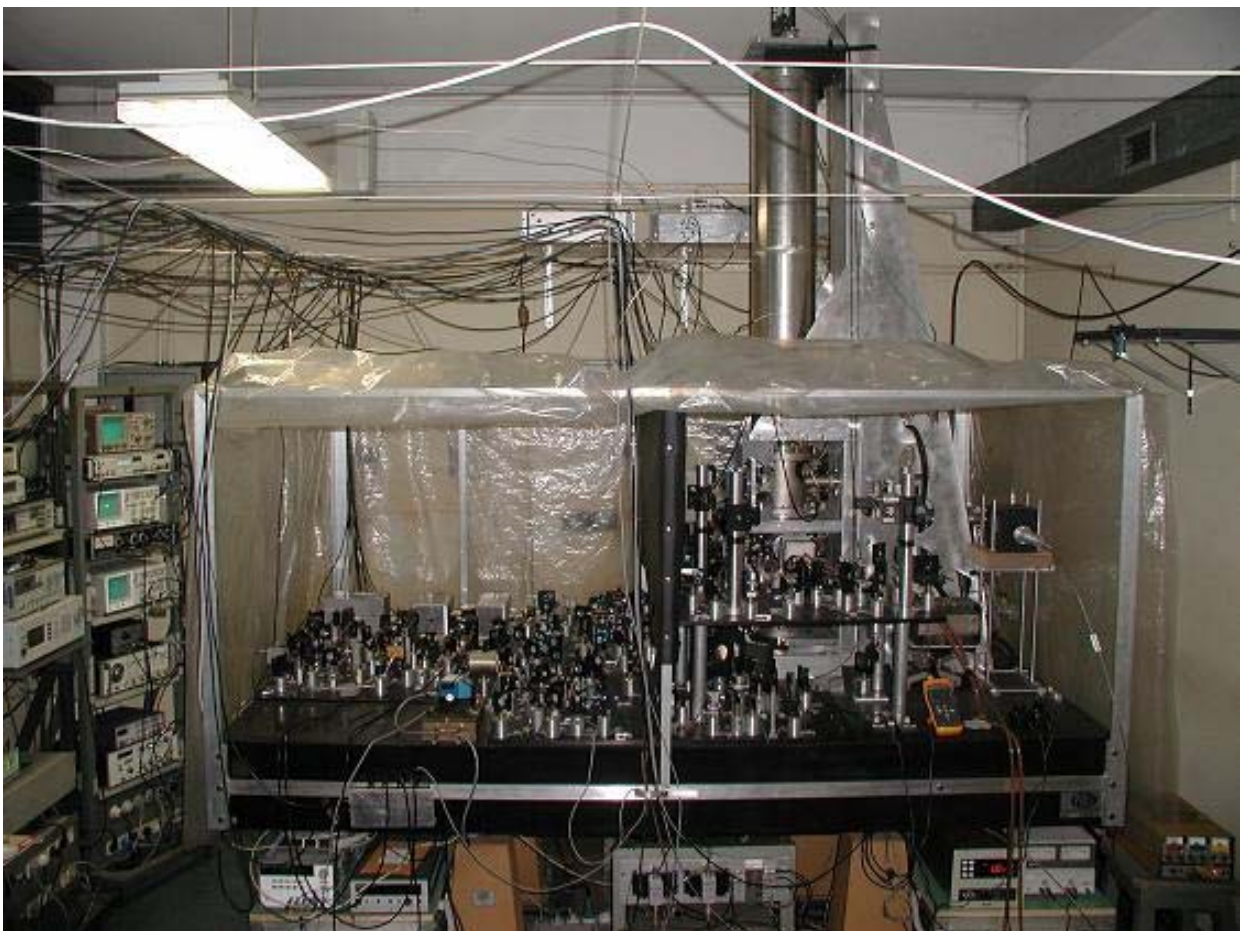
Dopo la storica realizzazione sperimentale di Essen e Parry negli anni cinquanta al National Physical Laboratory (Inghilterra), che permise l'adozione della nuova definizione del secondo, campioni a fascio di cesio primari sono stati sviluppati in istituti metrologici di vari paesi (Canada, Stati Uniti, Giappone, Russia, Germania e Francia), anche al fine di studiare tutti i parametri che limitano l'accuratezza raggiunta nella realizzazione dell'unità di tempo del Sistema Internazionale. In particolare, i campioni atomici CS1 e CS2 realizzati in Germania al termine degli anni sessanta, seguiti da un terzo esemplare negli anni ottanta, e funzionanti come orologi cioè senza interruzioni a partire dal 1978, sono stati fino al 1995 le realizzazioni più accurate del secondo (incertezza dell'ordine di qualche unità di  $10^{-14}$ ) su cui è stata allineata la scala di tempo atomico internazionale TAI.



L'ultima generazione di campioni al cesio da laboratorio, del tipo a fontana atomica, che anziché fasci di atomi impiegano atomi di cesio raffreddati con tecniche di "laser cooling", permettono di raggiungere incertezze dell'ordine di unità di  $10^{-15}$ .

Per avere un'idea concreta dell'accuratezza di un orologio associato ad un campione con queste caratteristiche, si può dire che un tale dispositivo, ammesso che potesse funzionare così a lungo, impiegherebbe circa 30 milioni di anni per accumulare uno scarto di un secondo.

Uno dei cinque esemplari attualmente operanti al mondo di campione atomico a fontana di cesio, è regolarmente funzionante da alcuni anni anche presso l'INRIM.



Campione atomico a fontana di cesio dell'INRIM

## Campioni di tipo commerciale

I primi campioni al cesio industriali furono costruiti a metà degli anni sessanta in Svizzera (Ebauches) e negli Stati Uniti (Hewlett-Packard).

La disponibilità di questi apparati portò una vera e propria rivoluzione nei laboratori di tempo e frequenza di tutto il mondo, perché consentirono di avere in tempo reale l'unità di riferimento del secondo, ed anche di trasferirla presso un altro laboratorio, mantenendo un notevole livello di accuratezza.

Pur con le limitazioni legate al valore del fattore di qualità della transizione di orologio, intrinsecamente legate al fatto di avere una cavità risonante di dimensioni contenute, il campione a fascio di cesio commerciale ha fatto negli anni notevoli progressi sia dal punto di vista dell'accuratezza che della stabilità.



Campione a fascio di cesio Hewlett Packard mod. 5071A

Un dato interessante rilevato dal BIPM sull'insieme di circa 200 di questi orologi (H.P. mod. 5071A), utilizzati per la realizzazione della scala di tempo atomico internazionale, è il dato di stabilità di frequenza, per periodi di osservazione da 20 a 40, giorni che è pari a  $6 \cdot 10^{-15}$ .

Volendo riassumere brevemente le caratteristiche salienti di questi oscillatori atomici, possiamo dire che hanno i seguenti vantaggi: sono campioni primari per definizione, quindi hanno una elevata accuratezza, una notevole stabilità a lungo termine ed una scarsa sensibilità ai fattori ambientali.

Tra gli svantaggi dobbiamo invece ricordare soprattutto il costo elevato, la limitata vita media del risonatore (5 anni), le dimensioni notevoli ed una stabilità a breve termine inferiore a quella dei maser all'idrogeno e dei rubidi.