



Marco Genovese

Responsabile
programma di ricerca
Ottica Quantistica
INRiM
Istituto Nazionale
di Ricerca Metrologica,
Torino

Metrologia e Correlazioni Quantistiche

ABSTRACT

Noise is unavoidable in measurements and limits the final precision of these. In particular, when one has a quantization of carriers, as photons in electromagnetic field or electron in electric current, a minimal noise is present: the *Shot noise*. Recently INRiM researchers have experimentally demonstrated as *Shot noise* can be beaten, when quantum correlations are exploited.

L'atto di misurare pervade la nostra vita, non solo quando compriamo delle merci e misuriamo il loro peso o la loro dimensione, ma anche, ad esempio, quando, attraversando la strada, misuriamo la distanza e la velocità di un'automobile che si avvicina, per sapere se avremo il tempo di attraversare. A partire da Galileo il compiere misure quantitative sempre più precise è diventato un aspetto fondamentale della Scienza contemporanea e, infatti, anche ai nostri giorni è di basilare importanza per lo sviluppo delle nostre conoscenze, tanto da essersi sviluppato come un campo autonomo nell'ambito delle scienze naturali: la metrologia. Ad esempio la precisione elevata degli orologi atomici (ora inferiore ad un milionesimo di miliardesimo di secondo) è necessaria per realizzare gli interferometri di radiotelescopi; tuttavia essa trova anche applicazione nella nostra vita quotidiana: il posizionamento via GPS non sarebbe possibile senza gli orologi atomici.

Numerosi altri esempi dell'importanza di misure sempre migliori potrebbero essere riportati sia per la ricerca che per le tecnologie che pervadono la nostra vita quotidiana.

Ma la precisione con cui si misura una lunghezza, un tempo, l'intensità della luce può essere migliorata arbitrariamente? In realtà quando si cerca di migliorare la precisione di una misura ci s'imbatta inevitabilmente in limiti dovuti al fatto che ogni misura è "rumorosa", ovvero presenta delle fluttuazioni casuali del valore che si ottiene da una misura all'altra.

Per quanto si possa diminuire tale rumore esistono dei limiti invalicabili alla sua riduzione. In particolare, per tutti i sistemi tradizionali elettrici od ottici esiste un livello minimo a cui può essere ridotto il rumore, indicato col termine di rumore *Shot*.

Questo limite deriva dal fatto che le misure relative a sistemi elettrici oppure ottici (ma anche atomici) hanno a che fare con singole unità quantizzate di portatori di carica (gli elettroni) o della luce (i fotoni). Quando si richiedono precisioni elevate di misura le fluttuazioni inevitabili del numero di trasportatori conducono inesorabilmente alla presenza di fluttuazioni sull'osservabile (ad esempio una corrente elettrica o l'intensità luminosa), il rumore *Shot* per l'appunto.

Tale rumore diminuisce con la radice quadrata del numero di fotoni (i quanti di luce), elettroni o atomi coinvolti, ovvero, più intensa è la corrente o la luce che si intende misurare, più precisa è la misura. Tuttavia, sovente, sia nei laboratori sia per applicazioni tecnologiche, vi è la necessità di misurare correnti o intensità luminose molto deboli, per le quali il rumore *Shot* diventa rilevante.

È quindi questo il limite invalicabile per le misure che possiamo compiere? Negli ultimi anni gli scienziati si sono resi conto che alcune proprietà di taluni sistemi quantistici (ovvero descritti dalla Meccanica Quantistica, la teoria che permette di spiegare il comportamento di molecole, atomi, particelle elementa-

ri, ...) permettono di superare tale limite. L'applicazione delle correlazioni quantistiche alla metrologia sta dunque originando un nuovo campo di ricerca, noto come "metrologia quantistica".

Prendiamo come esempio un interferometro. Questo è un sistema in cui della luce coerente (con una precisa relazione di fase tra fasci che hanno percorso cammini ottici diversi, come si può ad esempio ottenere utilizzando luce emessa da un laser) è suddivisa su più cammini e quindi ricomposta. A causa della natura ondulatoria della luce si originano delle frange d'interferenza, ovvero un alternarsi di regioni più chiare o più scure a seconda se le onde luminose ricomposte vi si siano trovate in maniera di sommare le loro ampiezze (interferenza costruttiva) o di sottrarle (interferenza distruttiva). Incidentalmente, poiché anche particelle come elettroni, atomi o molecole presentano, secondo la descrizione della Meccanica Quantistica, aspetti ondulatori, degli interferometri possono essere costruiti anche per queste particelle.

Supponiamo ora di avere un interferometro operante a livelli di luce molto bassi, cioè con pochi fotoni. Il risultato della misura può essere migliorato ripetendo più volte la stessa misura ed effettuando una media dei valori ottenuti. Il miglioramento della precisione scala con la radice quadrata del numero N di ripetizioni (ovvero l'incertezza della misura è proporzionale a $1/\sqrt{N}$): questo è il limite del rumore *Shot*.

Tuttavia usando le proprietà di taluni sistemi quantistici il miglioramento della misura scala con il numero N di ripetizioni (ossia l'incertezza della misura è proporzionale a $1/N$): una proprietà significativa quando N diviene grande. In particolare questo capita per alcuni sistemi a più particelle (elettroni, atomi, fotoni, ...) che presentano forti correlazioni tra loro (una proprietà nota come "entanglement", che in inglese significa "aggrovigliamento"¹⁾, correlazioni che non possono essere descritte quando queste sono trattate come particelle classiche.

Per comprendere questo fenomeno si consideri l'interferometro Mach Zehnder di Figura 1. Se l'input è della luce classica (ad esempio un laser) l'intensità su una porta di uscita varia come $(1 + \cos \phi)$, ove ϕ è la differenza di fase tra i due cammini.

Se invece considero uno stato entangled in cui si hanno N fotoni su un cammino e nessuno sull'altro, lo stato evolve in $|0\rangle + e^{iN\phi} |N\rangle$ (ove $|0\rangle$ e $|N\rangle$ sono rispettivamente lo stato a zero e N fotoni), il quale conduce ad una dipendenza dalla fase proporzionale a $(1 + \cos(N\phi))$, cioè la fase è "amplificata" N volte.

Incidentalmente, si può notare che anche gli orologi atomici sono degli interferometri (tra stati di atomi), quindi anche per loro valgono queste considerazioni.

La possibilità di superare il limite *Shot*, proposta teoricamente negli scorsi anni, viene ora concretamente realizzata sperimentalmente in alcuni laboratori e verosimilmente, potrebbe uscire dai laboratori

per trovare applicazioni tecnologiche. Ricerche in questo senso sono in corso presso l'Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica di Torino, che ha contribuito significativamente al loro sviluppo. Infatti, la prima dimostrazione della possibilità di scendere sotto il rumore *Shot* grazie all'entanglement nel numero di fotoni è stata realizzata proprio all'INRiM (vedi Fig. 2). Questo risultato si basa sul fatto che anche la luce presenta fluttuazioni di intensità, ovvero del rumore. Supponiamo ora di avere un oggetto che assorba la

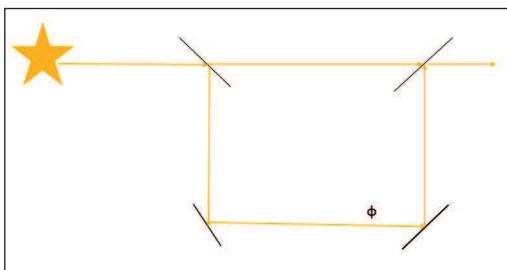


Figura 1. Interferometro Mach Zehnder.

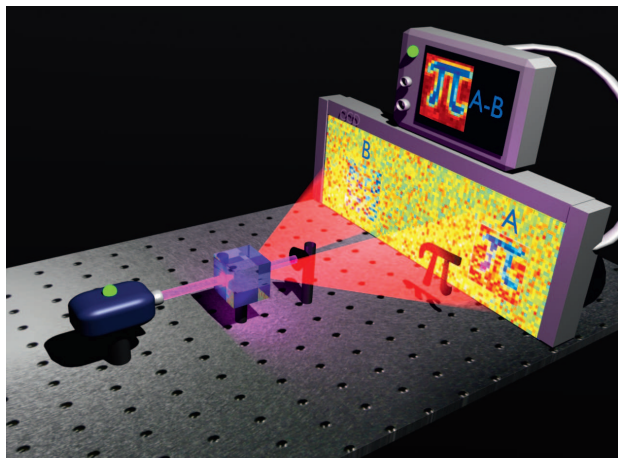


Figura 2. Set up per la misura dell'*imaging* quantistico sotto *shot noise*. Un fascio di luce emesso da una sorgente laser crea una coppia di fasci gemelli in un cristallo non-lineare. Uno dei due fasci attraversa un oggetto debolmente assorbente e quindi entrambi i fasci sono misurati da una telecamera CCD sottraendo il rumore misurato sul fascio senza oggetto dall'altro.

ove s'intende ottenere l'immagine (il cosiddetto *imaging* differenziale).

Il miglioramento che si può raggiungere per questa via è quantificato dal parametro $\sigma = \langle \delta^2 (N_1 - N_2) \rangle / \langle N_1 + N_2 \rangle$ ove N_1 ed N_2 sono rispettivamente il numero di fotoni misurati sul ramo 1 e 2, $\delta^2 (N_1 - N_2)$ è la varianza della differenza (cioè il valore della fluttuazione) e il simbolo $\langle \rangle$ denota la media rispetto a più misure. Più piccolo è σ , migliore è l'immagine che si ottiene. Per la luce di un'usuale lampadina σ è sempre maggiore di 1, per la luce di un laser raggiunge il suo limite inferiore, 1, valido per le sorgenti di luce tradizionali.

Tuttavia questo risultato può ancora essere migliorato, come calcolato dal gruppo di fisici teorici dell'Università di Como guidato da Luigi Lugiato ed Alessandra Gatti [1]. Tale tecnica richiede l'uso di fasci di luce particolari con delle correlazioni molto elevate (dovute alla loro natura quantistica), che possono, ad esempio, essere generati in particolari cristalli, detti non-lineari, irradiati con potenti sorgenti laser. Si producono così due fasci di luce detti "gemelli" (vedi Fig. 3), in quanto hanno fluttuazioni d'intensità esattamente correlate (un caso di "entanglement"). Usando i fasci gemelli il rumore può essere, idealmente,

annullato, ovvero il parametro σ ridotto a zero. Questo è ciò che han realizzato sperimentalmente i fisici dell'INRiM [2]: prodotti due fasci gemelli molto "puri", hanno inserito un vetrino su cui era depositato un sottilissimo strato (mono-atomico) di Niobio che disegnava un π .

Usando della luce "classica", ovvero laser o termica (quella di una lampadina), l'immagine della π non poteva essere osservata da una telecamera CCD a valle del vetrino, in quanto "persa" nelle fluttuazioni della luce. Invece quando i fasci "gemelli" venivano usati ecco che "miracolosamente" l'immagine appariva (si veda Fig. 4).

Questi risultati sono poi stati estesi dimostrando la possibilità di ottenere un "quantum radar" (cioè d'identificare un

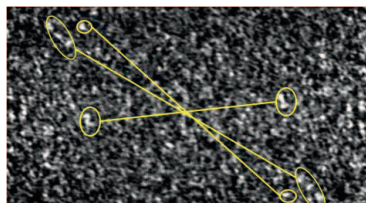


Figura 3. Ripresa CCD di fasci gemelli. Si osservi come le fluttuazioni d'intensità, aree luminose oppure oscure, siano correlate nelle tre coppie di aree evidenziate.

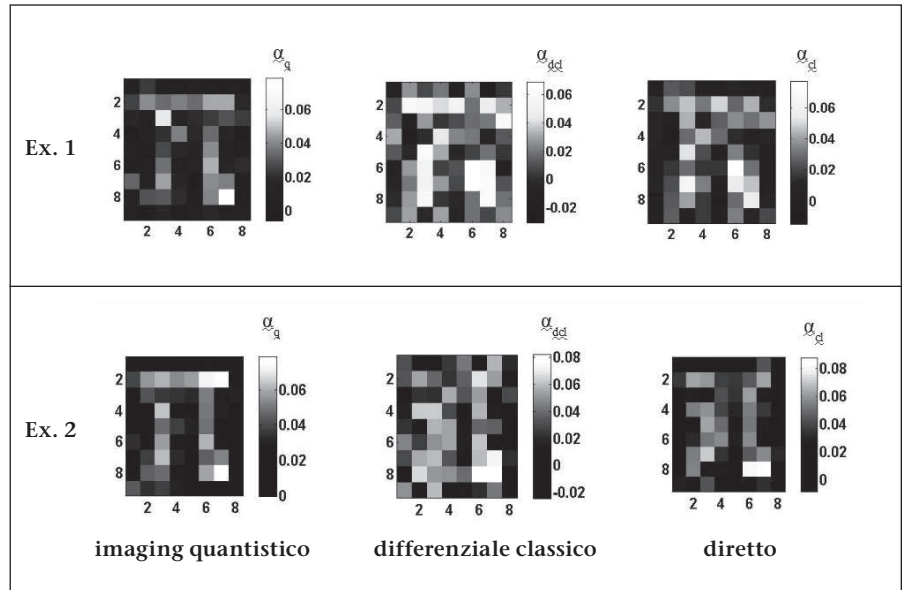


Figura 4. Due esempi rappresentativi di *imaging* ottenuto rispettivamente con *sub Shot noise quantum imaging*, *imaging* classico differenziale e *imaging* classico diretto. Si noti il vantaggio del protocollo quantistico.

oggetto in un fondo preponderante grazie alle correlazioni quantistiche) [3] e suggerendo alcune applicazioni all'interferometria [4].

Tali ricerche, oltre ad avere un grande interesse come fisica di base, aprono anche la strada a future applicazioni tecnologiche, ad esempio nel campo della biologia e della tecnologia dei film sottili. Più in generale la metrologia quantistica è attesa diventare sempre più significativa e diffusa, sia permettendo misure più precise ed accurate, sia come metrologia per le emergenti tecnologie quantistiche [5] (quali la crittografia quantistica, l'informazione quantistica ed il computer quantistico,...).

Bibliografia

- [1] BRAMBILLA, E.; CASPANI, L.; JEDRKIEWICZ, O.; LUGIATO, A. L.; GATTI A., "High-sensitivity imaging with multi-mode twin beams", *Phys. Rev. A* **77**, 053807 (2008).
- [2] BRIDA, G.; GENOVESE, M.; RUO BERCHERA, I., "Experimental realization of sub-shot-noise quantum imaging", *Nature Photonics* **4**, 227 – 230 (2010).
- [3] LOPAEVA, E.; RUO BERCHERA, I.; DEGIOVANNI, I.; OLIVARES, S.; BRIDA, G.; GENOVESE, M., "Experimental Realization of Quantum Illumination", *Phys. Rev. Lett.* **110**, 153603 (2013).
- [4] RUO BERCHERA, I.; DEGIOVANNI, I. P.; OLIVARES, S.; GENOVESE, M., "Quantum light in coupled interferometers for quantum gravity tests", *Phys. Rev. Lett.* **110**, 213601 (2013).
- [5] KWIAT, P. et al., "Vedere nel buio con la meccanica quantistica", *Le Scienze*, febbraio 1997; L. Castellani, G. Fornero, *Teletrasporto*, Ed. Springer, 2011.

Note ¹ In linguaggio tecnico un sistema fisico si dice *entangled* se la funzione d'onda globale non è fattorizzabile in funzioni d'onda di particella singola.

² In tal caso lo stato quantistico del fascio gemello è della forma $\sum_n C(n) |n_1\rangle \otimes |n_2\rangle$, ove $|n\rangle$ rappresenta lo stato a n fotoni. I pedici 1,2 indicano il fascio 1 o 2 rispettivamente.