

IL DATO NELLA CONOSCENZA SCIENTIFICA

Misure, informazioni, significati

di Maria Bondani*

La scienza non consiste nel raccogliere dati, consiste soprattutto nel porre domande alla Natura e nel capire a quali risposte i dati portano. Questa è una caratteristica fondamentale della ricerca fisica qualunque sia l'ambito fenomenico indagato. L'autrice, ricercatrice nel campo dell'ottica quantistica, spiega come questa affermazione sia assolutamente coerente anche in contesti complessi in cui la ricerca non può essere intesa «come una successione di misure», ma piuttosto «come una vera e propria catena della conoscenza».

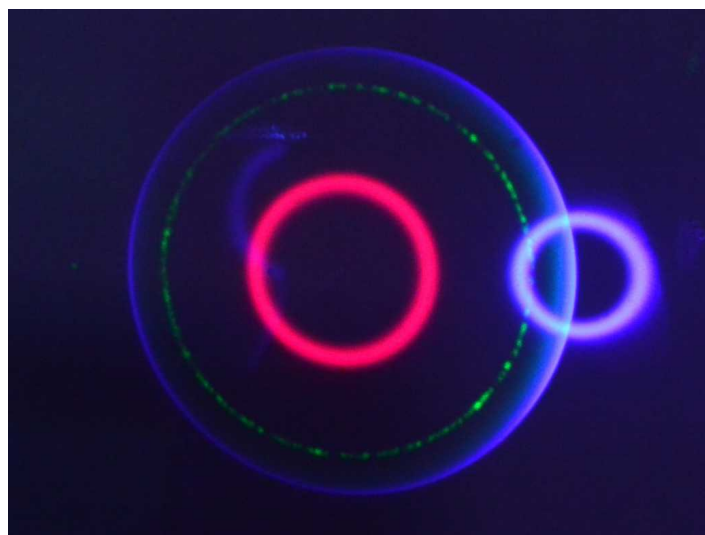
** Istituto di Fotonica e Nanotecnologie, CNR and CNISM UdR Como*

Che cosa significa davvero misurare? Dietro ogni numero che compare sullo schermo di uno strumento c'è una lunga storia fatta di fenomeni fisici, strumenti, modelli, scelte sperimentali e interpretazioni. Nel caso della luce quantistica, questa storia diventa particolarmente evidente: ciò che alla fine chiamiamo «dato» è il risultato di una complessa trasformazione dell'informazione fisica.

Nella mia storia di ricercatrice nel campo dell'ottica quantistica ho avuto la possibilità, soprattutto nell'attività di laboratorio, di seguire alcuni esperimenti dall'inizio alla fine: partire da una domanda su un sistema fisico, immaginare una procedura sperimentale per cercare una risposta, realizzare l'esperimento, raccogliere i dati, analizzarli e infine verificare quanto quei risultati permettessero di rispondere alla domanda iniziale. È un'esperienza particolarmente interessante perché consente di vedere la ricerca sperimentale non come una successione di misure, ma come una vera e propria catena della conoscenza.

Quando pensiamo a un esperimento scientifico, immaginiamo spesso qualcosa di semplice: c'è un fenomeno naturale, lo osserviamo, facciamo una misura e otteniamo un numero. Quel numero viene poi confrontato con una teoria e, se tutto torna, abbiamo imparato qualcosa sulla Natura.

Nella ricerca sperimentale, tuttavia, il percorso è molto più articolato. Un ricercatore deve decidere che cosa misurare, come misurarlo, con quali strumenti, quali condizioni controllare e come interpretare ciò che gli strumenti restituiscono. La misura non è quindi l'ultimo passaggio di un processo di conoscenza già definito: è parte integrante della costruzione della domanda e della risposta.



Stati quantistici della luce

La luce nel contesto dell'ottica quantistica

Chi studia ottica quantistica si occupa della luce sotto due aspetti: come fenomeno fisico fondamentale e come strumento per ottenere informazioni su altri sistemi. La luce è infatti uno dei principali vettori di informazione attraverso cui possiamo esplorare il mondo che ci circonda. Nella descrizione dell'ottica quantistica, la luce è un campo elettromagnetico quantizzato, le cui proprietà sono descritte dallo stato del campo e dalla sua evoluzione. Questo linguaggio è diverso dalle immagini intuitive che abbiamo ereditato dalla storia della fisica. Siamo abituati, per esempio, a parlare della luce come composta da un flusso di fotoni. Ma non tutti gli stati della luce possono essere descritti semplicemente in questo modo. Esistono stati a numero definito di fotoni, come quelli associati alla emissione di singoli atomi o molecole, ma anche stati, come quello della luce laser, nei quali il numero di fotoni non è definito. Esistono inoltre stati *squeezed*, caratterizzati da proprietà particolari delle fluttuazioni e utilizzati, per esempio, nella rivelazione delle onde gravitazionali, e stati *entangled*, caratterizzati da correlazioni non classiche.

La varietà degli stati della luce mostra quanto sia importante utilizzare un linguaggio adeguato per descrivere il fenomeno. Non si tratta soltanto di una questione terminologica: il modo in cui definiamo e descriviamo un sistema determina anche quali proprietà possiamo cercare di misurare.

Lo stato quantistico della luce, infatti, non è qualcosa che possiamo semplicemente *guardare*. Possiamo prepararlo, farlo evolvere e modificarlo, ma non possiamo leggerne direttamente il valore su uno strumento. La teoria quantistica ci dice quali informazioni possiamo ottenere dalle misure e con quali probabilità possiamo aspettarci i diversi risultati. Una delle ragioni sperimentali di questa limitazione è che la misura della luce comporta necessariamente una interazione con la materia in cui viene scambiata energia. I rivelatori trasformano l'interazione con il campo luminoso in un segnale osservabile e, nella misura diretta, l'informazione che si ottiene è legata all'intensità. Ma l'intensità, da sola, non caratterizza completamente lo stato della luce: altre proprietà, come la fase o le correlazioni, devono essere ricavate attraverso opportune configurazioni sperimentali. Dobbiamo quindi progettare le misure in modo da rendere accessibili informazioni che non sono direttamente osservabili.

Se vogliamo studiare una proprietà della luce che non possiamo misurare direttamente, possiamo modificare il sistema o il percorso della luce prima della rivelazione. Interferometri, polarizzatori e altri elementi ottici permettono, per esempio, di trasformare l'informazione di fase contenuta nel campo in variazioni di intensità che possono essere registrate.

Misurare significa scegliere come rendere accessibile una determinata informazione fisica. L'apparato sperimentale non è quindi semplicemente un mezzo attraverso il quale osserviamo la Natura. È ciò che ci permette di porle una domanda in una forma alla quale essa possa rispondere attraverso un risultato misurabile.

Alla fine della catena sperimentale non troviamo lo stato quantistico scritto sullo schermo. Troviamo un segnale prodotto da un rivelatore. Nel caso della luce, questo segnale è tipicamente un segnale elettrico. Viene amplificato,



Stati quantistici della luce

elaborato e digitalizzato fino a diventare una serie di numeri memorizzati da un computer.

A questo punto siamo tentati di identificare il numero con il dato scientifico. Ma che cosa rappresenta realmente quel numero? Potrebbe essere un'intensità luminosa, il numero di eventi registrati, un tempo di arrivo, una correlazione, una probabilità o una quantità ottenuta attraverso una combinazione di diverse misure. Per stabilirlo dobbiamo conoscere tutto ciò che è avvenuto tra il fenomeno iniziale e il numero che abbiamo davanti. In altre parole, dobbiamo costruire un modello della catena di misura.

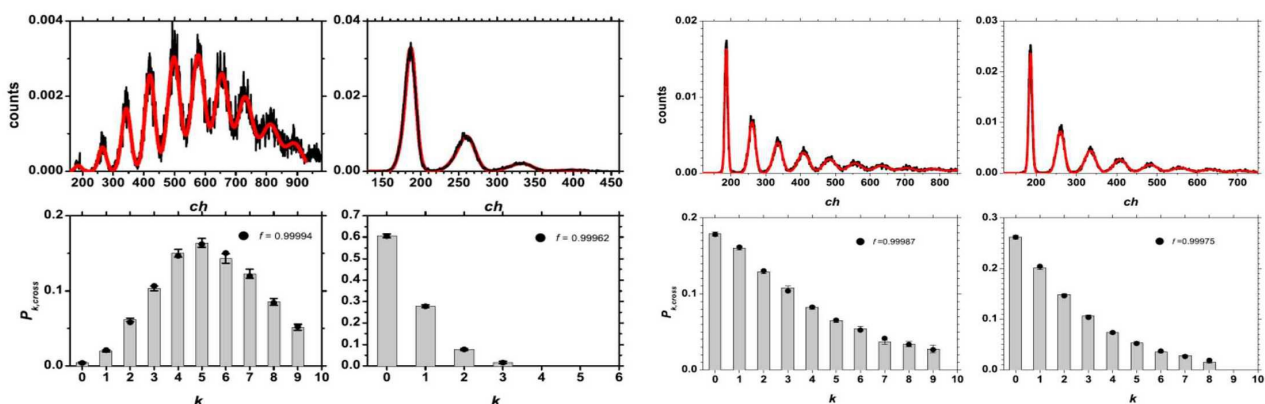
Lo strumento, il dato, l'informazione

Consideriamo, per esempio, un rivelatore di luce. Tipicamente, il segnale che viene prodotto è una traccia elettrica che varia nel tempo. Possiamo descriverla attraverso diverse caratteristiche (il valore di picco, l'area complessiva, la durata, il tempo di salita o quello di discesa) che contengono informazioni diverse: scegliere di utilizzare il picco invece dell'integrale, oppure un intervallo temporale invece dell'intera traccia, significa scegliere quale caratteristica del segnale utilizzare per rappresentare il fenomeno. Per questo la caratterizzazione del rivelatore è una parte importante della ricerca sperimentale. Non basta acquistare uno strumento, collegarlo a un computer e utilizzare il numero che compare sullo schermo. Bisogna conoscere il suo comportamento e stabilire in che modo il segnale prodotto sia collegato alla grandezza fisica che vogliamo studiare.

Nell'ottica quantistica questa esigenza è particolarmente forte. Piccole sorgenti di rumore possono nascondere proprio l'informazione che stiamo cercando. In alcuni esperimenti può essere necessario modificare il modo abituale di analizzare il segnale, per esempio scegliendo la parte della traccia che contiene l'informazione più utile e riducendo, per quanto possibile, l'effetto del rumore. La scelta dello strumento e la scelta del metodo di analisi diventano così parte della misura stessa.

Questo ci permette di comprendere meglio una frase apparentemente banale: il numero che registriamo come uscita di una misura non parla da solo, non contiene in sé il proprio significato. Per comprenderlo dobbiamo sapere che cosa è stato misurato, con quale strumento, in quali condizioni e attraverso quale procedura. Lo stesso vale per i grafici che incontriamo continuamente negli articoli scientifici. Spesso il risultato di mesi o anni di lavoro viene

Analisi delle risposte di rivelatori



condensato in alcuni punti sperimentali e in una linea che li descrive. A prima vista sembra quasi che il risultato sia quella linea. Ma il significato della linea sta nel fatto che essa mette in relazione i dati con un fenomeno fisico

attraverso una lunga catena di misure, rivelatori, calibrazioni, acquisizioni, selezioni dei dati, procedure di analisi e modelli matematici.

Se il dato non esaurisce l'informazione, come possiamo passare dall'uno all'altra? Nel caso della luce quantistica, una risposta è rappresentata dalla possibilità di combinare molte misure differenti. Uno stato quantistico non può essere caratterizzato completamente attraverso una singola misura. Possiamo però preparare ripetutamente lo stesso stato, effettuare misure diverse e utilizzare l'insieme dei risultati per ricostruire le sue proprietà. Una delle tecniche utilizzate a questo scopo è la tomografia quantistica in cui nessuna singola misura contiene tutta l'informazione necessaria ma l'insieme di misure opportunamente progettate e analizzate permette di ricostruire lo stato.

In questo caso emerge anche un aspetto caratteristico della meccanica quantistica: le singole misure hanno generalmente esiti probabilistici. Ripetendo la preparazione dello stesso stato e la stessa misura otteniamo una distribuzione di risultati. È proprio da questa distribuzione che possiamo ricavare informazioni sul sistema.

La situazione può quindi essere descritta in questo modo: l'evoluzione dello stato può essere controllata e descritta dalle leggi fisiche, mentre l'esito della singola misura è probabilistico. Il comportamento statistico di molte misure costituisce però una fonte di informazione estremamente precisa.

È anche su questa combinazione tra controllo dello stato e risultato statistico che si basano le tecnologie quantistiche. Nei computer quantistici, per esempio, gli stati vengono preparati e manipolati secondo procedure controllate e alla fine vengono effettuate misure i cui risultati, considerati statisticamente, permettono di estrarre l'informazione elaborata dal sistema. Un esempio ancora più suggestivo è il *ghost imaging* o *immagine fantasma*. In questo tipo di esperimento è possibile ricostruire l'immagine di un oggetto sfruttando le correlazioni tra diverse parti della luce. In particolare, l'informazione utilizzata per ricostruire l'immagine può provenire da una parte della luce che non ha interagito direttamente con l'oggetto.

L'esempio è interessante perché mostra qualcosa di fondamentale: l'informazione non deve necessariamente essere contenuta in un singolo dato ma può essere distribuita nelle relazioni tra dati diversi. Un singolo valore può quindi avere poco significato se considerato isolatamente, mentre l'insieme dei valori e le loro correlazioni possono rivelare una struttura che non era visibile nei singoli risultati.

Di fronte al dato inatteso

C'è un'altra caratteristica importante della ricerca sperimentale. Di fronte a un risultato sperimentale inatteso si tende talvolta a dire: «I dati sono sbagliati». Tuttavia il dato, in sé, non è necessariamente né giusto né sbagliato: un dato è sempre prodotto da un fenomeno e da un determinato processo di misura. Può accadere che quel processo non abbia funzionato come previsto: potremmo aver sbagliato una procedura, utilizzato un apparato non adeguato, incontrato una sorgente di rumore oppure interpretato in modo errato il segnale. In questo caso il dato potrebbe non essere utile per rispondere alla domanda che avevamo posto, ma questo non significa che sia privo di valore. Un risultato inatteso può indicarci che l'esperimento non funzionava nel modo previsto, che una nostra ipotesi era sbagliata o che esisteva un effetto che non avevamo considerato. Può persino aiutarci a capire meglio il funzionamento dell'apparato.

Per questo, prima di eliminare un risultato perché «non torna», è importante chiedersi perché non torna. Il dato va, in questo senso, rispettato: non perché

ogni misura sia necessariamente significativa per la domanda che ci siamo posti, ma perché ogni misura ci informa almeno su ciò che è accaduto nel processo che l'ha prodotta.

Questo atteggiamento è parte integrante della pratica sperimentale. Il ricercatore non deve soltanto cercare i risultati che confermano ciò che si aspettava; deve anche essere capace di interrogare quelli che contraddicono le aspettative.

Il dato scientifico, quindi, non è una risposta definitiva. È piuttosto un punto di partenza che ci fornisce informazioni su ciò che è accaduto durante una determinata procedura sperimentale. In qualunque ambito della scienza, un dato acquista significato soltanto all'interno del processo che lo ha prodotto e del modello attraverso cui viene interpretato. La conoscenza scientifica non nasce quando compare un numero sullo schermo di uno strumento, nasce quando comprendiamo che cosa quel numero significa.

La scienza non consiste quindi soltanto nel raccogliere dati, consiste soprattutto nel porre domande alla Natura e nel capire quali risposte i dati ci permettono davvero di dare.

Maria Bondani

(Istituto di Fotonica e Nanotecnologie, CNR and CNISM UdR Como, Italy)