

## I PREMI NOBEL PER LA SCIENZA 2005



## FISICA: UN NOBEL ALL'OTTICA «MODERNA»

L'avvento del maser e del laser intorno al 1960 aprì all'ottica orizzonti totalmente nuovi. Questo Nobel premia conquiste scientifiche legate all'avvento della radiazione laser e in questo senso può essere accomunato, per esempio, ai premi assegnati nel 1997 per gli atomi freddi (Steven Chu, Claude Cohen-Tannoudji, William Phillips) e nel 2001 per la condensazione di Bose-Einstein in sistemi atomici (Eric Cornell, Wolfgang Ketterle, Carl Wieman). Si tratta in realtà di un premio dal carattere un po' composito, in quanto assegnato a Roy Glauber (Università di Harvard) per il suo contributo alla teoria quantistica della coerenza ottica, e a John Hall (Università del Colorado a Boulder) e a Theodor Haensch (*Max-Planck Institut fuer Quantenoptik* di Garching) per i loro contributi allo sviluppo di una spettroscopia di precisione basata sul laser.

Nel 1963 Glauber pubblicò su *Physical Review* due lavori teorici che hanno costituito le fondamenta sulle quali si è sviluppata l'ottica quantistica e, in seguito, la cosiddetta *quantum information*.

Il primo dei due lavori era dedicato in gran parte a definire il concetto di coerenza. Sino ad allora, il grado di coerenza della radiazione ottica era stato visto sostanzialmente come inversamente proporzionale alla banda spettrale della radiazione, ma Glauber dimostrò che tale definizione era inadeguata. Per definire la coerenza, egli introdusse una successione di funzioni di correlazione spazio-temporali per le parti a frequenza positiva e negativa del campo elettrico. Tali funzioni possono essere ottenute sperimentalmente misurando coincidenze ritardate tra un numero arbitrario di fotoni. Un campo completamente coerente deve soddisfare un numero infinito di condizioni sulla successione delle funzioni di correlazione. In tal modo, si vengono a distinguere vari ordini di coerenza incompleta, a seconda del numero di condizioni di coerenza soddisfatte. La nozione di coerenza adottata sino ad allora corrisponde alla coerenza al prim'ordine (la prima condizione di coerenza è soddisfatta), ma rilevante è anche la coerenza a ordini superiori, soprattutto quella al secondo ordine.

Nel secondo dei due lavori Glauber discusse la statistica dei fotoni di un campo di radiazione arbitrario e introdusse l'uso essenziale dei cosiddetti «stati coerenti» del campo elettromagnetico.

Con questi lavori Glauber da una parte formulò su base solida e adamantina la teoria della foto-rivelazione che ha costituito il punto di partenza per tutta l'ottica quantistica. D'altra parte, gli stati coerenti costituiscono la linea di separazione tra gli stati «classici» e quelli «nonclassici» del



Roy J. Glauber (1925-...),  
Università di Harvard,  
Cambridge, MA (USA).



John L. Hall (1936-...),  
Università del Colorado,  
JILA, Boulder, CO (USA).



Theodor W. Haensch (1941-...),  
Istituto Max Planck di ottica  
quantistica, Garching e Uni-  
versità di Monaco, Germania.

campo di radiazione. Per esempio, misure di coincidenza al second'ordine hanno permesso di dimostrare in modo inequivocabile la natura quantistica della luce (esperimento di Dagenais, Kimble e Mandel).

Poco dopo la pubblicazione dei lavori teorici di Glauber, la coerenza (fino a ordine opportuno) della radiazione laser e la sua statistica dei fotoni vennero dimostrate sperimentalmente da vari gruppi di ricerca, tra cui quello di Tito Arecchi al CISE di Segrate. Inoltre, tecniche di coincidenza sono alla base di alcuni esperimenti chiave per la *quantum information*, per esempio nel caso della crittografia quantistica (distribuzione di una chiave crittografica immune da spionaggio) e del teletrasporto quantistico (riproduzione di uno stato quantistico in un sistema lontano).

Le attività di ricerca di Hall e di Haensch hanno permesso di raggiungere vette spettacolari nella precisione delle misurazioni ottiche. Queste conquiste giocano un ruolo chiave sia dal punto di vista fondamentale sia applicativo.

Hall ha introdotto tecniche di stabilizzazione che hanno permesso di diminuire di molti ordini di grandezza la larghezza di riga della radiazione emessa da laser. La teoria quantistica del laser conduce, per la larghezza di riga del laser, al risultato predetto dalla formula di Schawlow e Townes (due premi Nobel, incidentalmente), che corrisponde a una larghezza dell'ordine dell'hertz. I laser commerciali, però, hanno larghezze di riga dell'ordine del megahertz, cioè un milione di volte maggiore. Questo perché nel funzionamento del laser intervengono disturbi (chiamati in gergo «rumore») di origine classica e non quantistica. Introducendo opportuni servomeccanismi, Hall è riuscito a eliminare tali disturbi raggiungendo così i livelli predetti dalla teoria quantistica. Risultati di questo tipo hanno aperto le porte ad applicazioni in cui è necessaria una precisione spinta fino all'estremo, come le antenne per la rivelazioni di onde gravitazionali (in particolare, Hall collabora al progetto LIGO - *Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory*) o le misure della birifrangenza del vuoto magneticamente indotta.

A proposito di Haensch, è doveroso osservare che più di uno dei suoi successi risulta meritevole del riconoscimento del Nobel.

Fin dagli inizi della sua carriera scientifica si è dedicato alla spettroscopia di altissima precisione dell'atomo di idrogeno (misura della costante di Rydberg, eccetera). Negli anni più recenti ha introdotto e sviluppato la linea di ricerca dei *frequency combs* (pettini di frequenza) che è espressamente menzionata nella motivazione per il premio Nobel. Anche Hall ha contribuito a ricerche su questo argomento.

Il punto di partenza per comprendere i «pettini di frequenza» è il *mode-locked laser* (laser a modi agganciati), che emette una sequenza idealmente infinita di impulsi identici, intervallati tra di loro in modo perfettamente regolare e perfettamente agganciati in fase. Se chiamiamo  $t$  la durata (molto breve) del singolo impulso e  $T$  l'intervallo di tempo intercorrente tra due impulsi successivi, lo spettro corrispondente assume l'aspetto di un insieme di righe molto strette ed equispaziate, come i denti di

un pettine. L'intervallo tra due denti successivi è pari all'inverso di  $T$ , mentre la lunghezza del pettine è uguale all'inverso di  $t$ . Haensch ebbe l'idea di usare un tale pettine come un righello molto preciso per misurare intervalli di frequenza. Per esempio, si possono confrontare due righe laser con due diversi denti del pettine, e contare il numero di denti interposti per ottenere la differenza di frequenza tra le due righe, dato che si conosce con precisione la spaziatura tra i denti. Il problema principale è costituito, però, dalla lunghezza del pettine che limita la massima differenza di frequenza misurabile. Con le tipiche durate  $t$  degli impulsi emessi da laser *mode-locked*, la lunghezza del pettine risultante è dell'ordine di  $10^{13}$  Hertz. Tuttavia, esperimenti condotti da Haensch e Marco Bellini presso il Laboratorio Europeo di Spettroscopia Nonlineare (LENS) al tempo in cui Haensch era professore all'Università di Firenze dimostrarono che, facendo passare la sequenza di impulsi attraverso opportuni materiali dielettrici trasparenti, grazie a processi di ottica nonlineare è possibile aumentare la lunghezza del pettine fino a raggiungere la situazione spettacolare di un continuo di luce bianca che permette di attuare misure di frequenza dall'infrarosso all'ultravioletto. Il problema tecnico, legato alla limitata energia per impulso nei laser *mode-locked*, venne successivamente superato da Haensch e collaboratori in esperimenti condotti al *Max-Planck Institut fuer Quantenoptik*, utilizzando come materiale trasparente le cosiddette «fibre a cristalli fotonici» che erano state introdotte nel frattempo da altri gruppi di ricerca. Ciò ha permesso al gruppo di Haensch di creare uno strumento eccezionale, ormai entrato nel mercato, per misurazioni ultraprecise della frequenza ottica.

*Luigi Lugiato*