Rendiconti
Accademia Nazionale delle Scienze detta dei XL
Memorie e Rendiconti di Chimica, Fisica, Matematica e Scienze Naturali
139° (2021), Vol. II, fasc. 2, pp. 73-76
ISSN 0392-4130 • ISBN 978-88-98075-46-1

Luce e atomi quasi allo zero assoluto*

MASSIMO INGUSCIO

Presidente del Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR) - Università Campus Bio-Medico (UCBM), Roma - Laboratorio Europeo di Spettroscopia Nonlineare (LENS), Firenze
E.mail: inguscio@lens.unifi.it

Abstract – On the occasion of the award of the Matteucci Medal 2020, we discuss past, present and future of the interaction between atoms and light. Key moments in this long history of discoveries are discussed, in connection with the work of prominent scientists that were awarded with the Matteucci Medal. It is a long story, which starts more than one century ago with the pioneers of spectroscopy and quantum mechanics, and continues with the application of ultracold matter to the design of a new quantum technology, with exciting scenarios for the metrology of time and for the development of quantum computers and simulators.

La luce e gli atomi hanno una lunga storia di progresso "intersecato"

Consideriamo la luce che ci proviene dal Sole e osserviamola con un prisma o un reticolo di diffrazione: c'è uno spettro continuo di colori, ma anche delle righe nere, ossia dei colori mancanti, come fu osservato per la prima volta da Fraunhofer. Le linee mancanti sono legate all'assorbimento di luce nelle regioni più esterne dell'atmosfera solare, da parte di atomi che vengono eccitati soltanto da luce di determinati colori. Gli atomi, una volta eccitati, emettono a loro volta luce, però anche in questo caso con colori, ossia frequenze, ben specifiche. Lo spettro di emissione dell'atomo più semplice che c'è è quello dell'idrogeno, a cui molto deve la scienza, la fisica in particolare, ma non solo. La spiegazione di questo spettro è dovuta all'assunzione che l'energia dell'atomo sia *quantizzata*, cioè che esistano livelli di energia ben precisi tra i quali si possono avere delle transizioni in assorbimento, quelle appunto delle righe mancanti, o in emissione. Il progresso nella comprensione sempre più approfondita di questi processi verrà illustrato facendo riferimento alle scoperte di cui sono stati autori molti scienziati premiati con la medaglia Matteucci, che questa Accademia delle Scienze, detta dei XL, che ringrazio onorato e commosso, ha voluto conferirmi.

Questa storia di atomi, che ho cominciato a raccontare, inizia da lontano. La spiegazione dello spettro a righe si deve a uno dei più antichi premiati con la

* Prolusione tenuta in occasione dell'Inaugurazione del 238° Anno Accademico dell'Accademia Nazionale delle Scienze detta dei XL, tenutasi il 29 settembre 2020 presso la Biblioteca dell'Accademia.

medaglia, **Niels Bohr (Medaglia Matteucci, 1923)**. L'atomo di idrogeno fu poi compreso meglio da **Erwin Schrödinger (Medaglia Matteucci, 1927)**, che fu capace di elaborare un'equazione attraverso la quale riuscì a formalizzare in termini matematici il concetto di dualismo onda-corpuscolo alla base della meccanica quantistica, ossia il fatto che nel mondo microscopico le particelle hanno anche un comportamento ondulatorio. Quando mi è stato annunciato il premio molti mesi fa – a causa della pandemia c'è stato poi un lungo lasso di tempo fra l'annuncio privato e il comunicato ufficiale – sono rimasto impressionato perché ho visto i nomi di questi personaggi e ripercorso la storia che vi sto raccontando (una curiosità: la medaglia Matteucci di Erwin Schrödinger, all'epoca d'oro, è stata battuta all'asta a Monaco proprio un anno fa).

Ma torniamo alla nostra storia: luce e atomi. È una storia che è all'origine della meccanica quantistica e che nel tempo si è arricchita di osservazioni con precisione sempre maggiore. Ad esempio, se osserviamo da vicino lo spettro emesso dall'atomo di sodio, ci accorgiamo del fatto che la riga gialla è "sdoppiata". I progressi nella risoluzione degli spettri atomici, legati a configurazioni sperimentali sempre più sofisticate come quella dovuta a **Henry Augustus Rowland (Medaglia Matteucci, 1895)**, hanno portato allo sviluppo di nuove teorie. Lo sdoppiamento della riga del sodio si spiega con il fatto che l'elettrone nell'atomo si muove con velocità poi non tanto lontane da quelle della luce. Il primo a spiegare lo sdoppiamento, aggiungendo correzioni relativistiche alla meccanica quantistica, fu **Arnold Sommerfeld** (**Medaglia Matteucci, 1924)**, molti anni prima che Dirac formulasse la teoria esatta dell'atomo di idrogeno relativistico. L'atomo di idrogeno, un protone e un elettrone, è l'unica cosa che i fisici sappiano davvero risolvere esattamente, un problema a due corpi che cela molti segreti. Abbiamo visto la meccanica quantistica, la meccanica quantistica relativistica, lo sdoppiamento delle righe e via discorrendo: gran parte della storia della fisica del secolo scorso è legata alla spettroscopia, in particolare ai sistemi semplici come l'atomo di idrogeno, e alla precisione con cui si osserva l'interazione fra la luce e quest'atomo. Aumentando la precisione si osserva il *Lamb shift*, uno spostamento dei livelli, molto sottile e raffinato, spiegato con l'elettrodinamica quantistica (QED), che forse ad oggi è la teoria fisica più verificata. La QED è dovuta anche a **Freeman Dyson (Medaglia Matteucci, 1989)**. anche se furono tre scienziati diversi a vincere il premio Nobel per la QED, Dyson ebbe un ruolo importante e viene da molti considerato un "Nobel mancato".

Nello sviluppo della spettroscopia una rivoluzione è venuta dalla scoperta del *laser*, che ci ha consentito di analizzare gli spettri in maniera sempre più precisa. Qualche decina di anni fa il limite alla precisione delle misure veniva dal fatto che gli atomi si muovono per agitazione termica. In un gas a temperatura ambiente le velocità sono di centinaia di metri al secondo: gli atomi possono essere osservati e misurati solo per intervalli di tempo brevissimi e questo limita intrinsecamente la precisione. Ma negli ultimi decenni del secolo scorso, i fisici atomici sono riusciti a rallentare il moto degli atomi riducendone l'agitazione, e quindi la temperatura che, come sappiamo, dell'agitazione è una misura. Il laser è stato ancora una volta protagonista. L'interazione può essere vista come un "urto" tra il fotone (ossia il "quanto" di luce) e l'atomo, a seguito del quale l'atomo cambia la sua velocità. Usando molta fantasia, configurazioni speciali e fenomeni anche controintuitivi – siamo abituati a pensare che la luce del laser scaldi – si è raffreddato il moto degli atomi dalle centinaia di metri al secondo fino a pochi millimetri al secondo. Uno dei principali artefici del raffreddamento laser è stato **Claude Cohen-Tannoudji (Medaglia Matteucci, 1994)**: tre anni dopo la medaglia Matteucci avrebbe vinto anche il premio Nobel insieme a Steven Chu e a William D. Phillips. Grazie alle loro scoperte la scienza ha oggi a disposizione un "mondo" di atomi molto freddi, a temperature di pochi miliardesimi di grado Kelvin, molto più basse di quelle del fondo isotropo a microonde che pervade l'universo. Mentre i nostri colleghi fisici particellari esplorano fenomeni a energie elevatissime, noi fisici atomici scendiamo a temperature sempre più basse, all'estremo opposto della scala di energie. Nel "grande freddo" dei nostri laboratori si indagano le grandi leggi della natura ed Eric Cornell (premio Nobel per la condensazione di Bose-Einstein di cui parleremo tra poco) ama osservare che, invece di fare tanto rumore, nel grande freddo il ricercatore "ascolta" quasi in assenza di rumore, per capire quello che succede. Gli atomi possono essere rallentati sempre più con la luce, ma non si fermano, come già anticipavano i poeti e i filosofi, tra questi Lucrezio. Non si fermano, si muovono sempre con maggior lentezza, e sempre più si comportano come un'onda; più rallentano e più l'onda associata ad ognuna di queste particelle si estende sino a coprire la distanza tra un atomo e l'altro. Questo problema fu studiato nel 1925 da **Albert Einstein (Medaglia Matteucci, 1921)**, che applicò la statistica elaborata nel 1924 da Bose al comportamento di un gas di atomi a temperature prossime allo zero assoluto: premesso che lo zero assoluto non può essere raggiunto –

perché ce lo impedisce la termodinamica – Einstein prevede che, al diminuire della temperatura, a un certo punto le onde associate agli atomi potessero sovrapporsi in un'unica onda, un "oggetto" quantistico macroscopico: un *condensato di Bose-Einstein*. In laboratorio riusciamo a produrre questo "oggetto" composto da alcuni miliardi di atomi e della grandezza di decine di micron, quindi un sistema macroscopico, che ha però un comportamento quantistico: alle temperature bassissime di pochi miliardesimi di gradi Kelvin, gli atomi collassano tutti in un unico stato quantistico che è quello a energia più bassa. In laboratorio il condensato di Bose-Einstein sarebbe stato osservato da E. Cornell, C. Wieman e W. Ketterle nel 1995, settanta anni dopo la previsione teorica. Una delle prove sperimentali che si trattava di un nuovo stato quantistico della materia veniva dal fatto che il condensato espandeva anisotropamente, anche come conseguenza del principio di indeterminazione di **Werner Heisenberg** (**Medaglia Matteucci, 1929**). I condensati di Bose-Einstein sono oggetti macroscopici quantistici che, tra l'altro, hanno aperto la strada alla realizzazione dei calcolatori quantistici basati su atomi.

La statistica di Bose-Einstein riguarda appunto i *bosoni*, cioè particelle a spin intero. A seconda dell'isotopo, però, un atomo può mostrare alternativamente il comportamento delle particelle a spin semi-intero, cioè i *fermioni*. Nel 1926 Enrico Fermi, nella quiete di Arcetri a Firenze, scrisse il fondamentale lavoro che prevedeva il comportamento di atomi "fermionici" a bassissima temperatura. All'Accademia dei Lincei nel 2016 abbiamo celebrato l'anniversario di questo articolo che, con la nuova statistica quantistica, ha prodotto risultati nei campi più disparati della scienza, anche quelli più applicativi come la fisica dei semiconduttori. Sempre ad Arcetri, settantacinque anni dopo, al Lens (Laboratorio Europeo di Spettroscopia Nonlineare), abbiamo avuto la fortuna di riuscire a produrre, con l'isotopo 40 dell'atomo di potassio, quel mare degenere che Fermi aveva previsto. Nel **1926 Enrico Fermi** ricevette la **Medaglia Matteucci** proprio nell'anno del suo articolo sulla statistica. Una foto storica ritrae Enrico Fermi ad Arcetri con il suo collega **Franco Rasetti**: di lì a poco si sarebbero spostati a Roma e nel **1931** anche Rasetti avrebbe ricevuto la **Medaglia Matteucci**.

È una lunga storia in cui la luce è protagonista: prima ci fa vedere gli atomi, poi li rallenta e quasi ne frena il moto, fino al punto da intrappolarli là dove l'intensità luminosa è massima oppure minima. Riusciamo a maneggiare gli atomi con la luce e a localizzarli nelle posizioni che desideriamo. Con l'interferenza della luce laser si costruiscono reticoli dove gli atomi vengono intrappolati in strutture periodiche come cristalli ideali. Eravamo partiti dai tempi di Bohr, quando l'atomo era quasi una speculazione, e ora vediamo realmente gli atomi intrappolati nei siti del reticolo e li osserviamo "saltare" da un sito all'altro per effetto tunnel, come prevede la meccanica quantistica. Con questi reticoli di luce possiamo simulare il mondo dello stato solido in modo ideale perché tutti i parametri sono controllabili. Tra le tante simulazioni di stato solido, lasciatemene citare una, che è molto cara al vostro Presidente Annibale Mottana. Si tratta del *quasi-cristallo*, dove non c'è una vera e propria simmetria traslazionale, che è invece la caratteristica propria dei cristalli, ma permane comunque un ordine a lungo raggio. In laboratorio siamo riusciti ad alterare un reticolo di luce in maniera quasi-periodica, simulando appunto un quasi-cristallo, e questo ci ha permesso di osservare direttamente il fenomeno della localizzazione di Anderson: gli atomi intrappolati in questo reticolo non si muovono, restano sempre confinati; invece, quando il reticolo è periodico, gli atomi possono propagarsi e danno luogo a una conduzione. Questi quasi-cristalli, oltre ad essere simulati con gli atomi e la luce, esistono anche in natura: il primo a scoprirli in natura, poco più di dieci anni fa, è stato un giovane cristallografo, Luca Bindi, analizzando i campioni conservati nel Museo di Mineralogia in Piazza San Marco a Firenze.

La simulazione quantistica parte in effetti da molto lontano. I veri grandi sanno vedere molto in avanti, come Enrico Fermi che, oltre ad essere stato inventore di una nuova statistica e poi celebre fisico nucleare, è stato anche il padre del calcolo elettronico in Italia. L'informatica nacque a Pisa a metà degli anni '50 del secolo scorso sotto la sua spinta: "costruite un calcolatore elettronico". Nel 1982 un altro grande visionario, Richard Feynman, lanciò l'idea di un simulatore quantistico, ritenendo difficile che ci potesse essere un calcolatore tanto potente da poter calcolare tutti i diagrammi e tutte le interazioni previste dalle teorie fisiche alla frontiera. Il simulatore quantistico può essere pensato come un calcolatore quantistico dedicato, progettato per risolvere uno specifico problema fisico. Nei laboratori, con gli atomi ultrafreddi, si possono simulare extra dimensioni e campi di gauge, e procediamo verso la possibilità di fare simulazione quantistica persino di situazioni legate alla fisica delle alte energie, quali la quantum chromodynamics, le teorie di campo di gauge, e altre importanti ricerche per le quali hanno ricevuto la **Medaglia Matteucci** nel **1979 Luciano Maiani**, nel **2002 Nicola Cabibbo** e nel **2005 John Iliopoulos**.

Gli atomi ultrafreddi sono altresì fondamentali per esplorare la frontiera di una misura ultraprecisa del tempo. Dal pendolo di Galilei è stato un crescendo di frequenze di oscillazione, si pensi all'orologio al quarzo o alle microonde. Oggi le transizioni atomiche nel visibile offrono un miliardo di milioni di oscillazioni al secondo. Un elemento fondamentale per misurare il tempo è quello di avere uno strumento capace di contare questo numero altissimo di oscillazioni. Questo è avvenuto con l'invenzione del "pettine di frequenza", dovuta al vincitore **della Medaglia Matteucci 2001 Theodor W. Hänsch**, vincitore poi del Premio Nobel nel 2005 insieme a John Lewis Hall. Gli orologi atomici nel visibile sono tanto precisi che, se uno di essi fosse stato messo in funzione al momento del Big Bang, adesso starebbe sgarrando di meno di un secondo. Come conseguenza della teoria della relatività generale, il tempo è sensibile alla gravità, che ne rallenta lo scorrere come se questa esercitasse un "attrito". Se con i primi orologi atomici, per accorgersi del cambio di frequenza delle oscillazioni, era necessario andare in alta montagna – un esperimento esemplare fu quello condotto al Plateau Rosa da Sigfrido Leschiutta dell'Istituto Elettrotecnico Nazionale Galileo Ferraris di Torino – con le precisioni attuali si osservano spostamenti di frequenza alzando l'orologio sul tavolo di laboratorio di soli 10 centimetri. Nasce così una geofisica relativistica. Il tempo viene influenzato dalla gravità locale, come sembra intuito da artisti come Giorgio De Chirico, che nel suo quadro "L'enigma dell'ora" sulla facciata di una stazione ferroviaria dipinge un orologio che indica le tre ma, misteriosamente, se la lancetta delle ore è sulle tre, quella dei minuti è in posizione più incerta.

Ai nostri giorni la luce viaggia in fibra. Il tempo preciso attraversa l'Italia e l'Europa, per comunicare, trasmettere informazione, porre le basi per sofisticati esperimenti che collegano radiotelescopi lontani. Questo mi spinge a considerare quanto imprevedibile sia la scienza. Tutte le medaglie Matteucci sono importantissime, ma chi avrebbe potuto prevedere tutto questo sviluppo di scoperte e teorie! Come abbiamo visto, una delle medaglie è stata conferita a **Luciano Maiani**, mio illustre predecessore alla Presidenza del Consiglio Nazionale delle Ricerche, ma prima di noi ci ha preceduti come Presidente del CNR il Premio Nobel **Guglielmo Marconi** che vinse la **Medaglia Matteucci nel 1901**. Nemmeno Marconi, inventore delle comunicazioni con onde radio, avrebbe potuto immaginare che trasmissioni con frequenze molto più elevate, quelle della luce laser, avrebbero viaggiato in fibra. La frontiera è ora quella delle comunicazioni quantistiche, rese intrinsecamente sicure, dalla manipolazione quantistica della luce. Viene da pensare e da riflettere a quanto rivoluzionario sia stato il progresso nel mondo della luce da quando **nel 1887** la medaglia Matteucci veniva conferita a **Thomas A. Edison**, inventore della lampadina elettrica.