

LA SOTTILE DIFFERENZA FRA ORDINE E COERENZA

Si narra che nel lontano 1924 Albert Einstein ricevesse un plico, inviatogli da un giovane fisico indiano, S. N. Bose. Conteneva una memoria scientifica nella quale lo sconosciuto giovane tentava di applicare le idee, che all'inizio di questo secolo avevano portato Max Planck a sconvolgere il mondo della fisica classica e a dar inizio alla "rivoluzione dei quanti", ad un insieme di minuscole "palline", quali appunto sono gli atomi che compongono un qualsiasi pezzo di materia. Einstein, che una decina di anni prima aveva dato un'altra derivazione della celebre formula di Planck descrivendo il campo elettromagnetico come un insieme di "atomi di luce", i fotoni, capì immediatamente l'importante passo avanti compiuto dal giovane Bose, ne corresse alcuni errori e il risultato finale apparve in due lavori contemporanei (*): all'edificio della nascente fisica dei quanti era stata così aggiunta un'altra pietra angolare.

Il sistema fisico di cui Bose e Einstein avevano decifrato il "codice quantistico", è il più semplice fra i sistemi macroscopici: il gas perfetto. Fin dall'inizio della scienza moderna il gas, il cui nome deriva da caos, appare come il prototipo del disordine, il coacervo di una miriade di moti casuali e disordinati dei singoli atomi, la cui analisi puntuale oltre ad essere praticamente impossibile è inutile, giacché le vicende dei singoli atomi si dissolvono in quelle delle grandezze termodinamiche, come temperatura e pressione, che riassumono e descrivono statisticamente la corsa insensata delle minuscole palline. E le leggi dei gas perfetti, che portano i nomi antichi e venerandi di Boyle, Mariotte e Gay-Lussac, testimoniano della semplicità e del rigore delle leggi matematiche a cui deve obbedire il disordine, come dimostrarono verso la metà dell'800 i grandi fisici teorici J. C. Maxwell e L. Boltzmann, la cui analisi statistica del gas perfetto, mettendone in evidenza la natura atomica, pose le basi per quella che fu la reale e qualificante rivoluzione scientifica del XX secolo, la "rivoluzione atomistica".

Ma lo studio della storia ci pone spesso di fronte a ironie e paradossi. Nel momento in cui, nel primo decennio del '900, gli esperimenti di Rutherford danno la spallata definitiva al "paradigma termodinamico", i cui campioni Mach e Ostwald negano l'esistenza dei (fino ad allora) fantomatici atomi, è proprio un allievo di Ostwald, W. Nernst, a trovare una debolezza insanabile nella teoria del gas perfetto di Maxwell e Boltzmann, basata sulla meccanica classica. Sulla base di una grande quantità di dati sperimentali, Nernst dimostrò che al tendere della temperatura allo zero assoluto (-273°C) ogni sistema chimico-fisico tende con continuità ad uno stato ordinato o, come si dice in gergo, la sua

entropia tende a zero. Il “teorema del calore” di Nernst, oggi noto come terzo principio della termodinamica, metteva dunque in crisi la teoria di Maxwell-Boltzmann, ma quale aspetto di essa? Quello classico o quello atomistico? Ora Bose-Einstein avevano trovato la soluzione: applicando correttamente la teoria dei quanti al gas perfetto il teorema di Nernst veniva elegantemente soddisfatto, allontanando così ogni pericolo dalla trionfante rivoluzione atomista. E la soluzione rivelava per la prima volta l’esistenza di una strana, affascinante configurazione in cui si dispongono gli atomi del gas quando la temperatura scende al di sotto della “temperatura di Bose-Einstein”, il cui valore dipende unicamente dalle caratteristiche microscopiche degli atomi. Nel “condensato di Bose-Einstein”, così si chiama questa configurazione, milioni, miliardi, di atomi vengono a trovarsi in un unico stato, uguale per tutti. Il caos del gas, delle traiettorie casuali interrotte dagli occasionali urti fra gli atomi, tutto d’un tratto scompare per lasciare il posto a schiere di atomi, tutti nello stesso stato, in cui, secondo le leggi quantistiche, l’energia raggiunge il valore minimo.

L’ordine che si instaura nel condensato di Bose-Einstein, a ben guardare, non implica però un “patto”, un’armonia, una coerenza fra i diversi atomi: la fisica dei quanti dà sì risposte singolari, sorprendenti per le nostre aspettative ancorate alla fisica classica, ma non può introdurre surrettiziamente particolari relazioni fra gli atomi, quando, come nel caso del gas perfetto, le loro interazioni si assumono molto ragionevolmente trascurabili. L’ordine di Bose-Einstein è un “ordine in mancanza di meglio e di altro”, l’ordine in cui un insieme di palline si dispone quando queste cadono in un unico angusto buco.

Nei tre quarti di secolo che ci separano dalla scoperta teorica di Bose-Einstein è facile immaginare che i fisici non si siano risparmiati nel cercare in natura esempi di questo peculiare stato della materia, in cui la fisica dei quanti determina il comportamento di un sistema macroscopico di atomi, e non più e non solo quello così remoto dei singoli sistemi atomico-molecolari. I vari tentativi di ricondurre i fenomeni della superfluidità e della superconduttività alla condensazione di Bose-Einstein rientrano nelle vicende di questa ricerca, ma vengono facilmente smontati dalla semplice osservazione che in quei fenomeni l’interazione fra gli oggetti elementari, atomi o elettroni, gioca un ruolo fondamentale, oscurando così in modo irreversibile la semplicità della soluzione di Bose-Einstein. Per mettere alla prova questa teoria occorre quindi disporre di un sistema di atomi molto diluito, ma in tal caso la “temperatura di Bose-Einstein” è incredibilmente bassa, circa un milionesimo della temperatura ambiente.

Sistemi atomici di questo tipo, un miliardo di volte meno densi e meno caldi di quelli della vita di ogni giorno, incominciano a divenire realizzabili solo all'inizio degli anni Novanta, grazie allo sviluppo di sofisticate e raffinatissime tecniche basate sui laser. E puntualmente nel 1995, due gruppi americani, uno di Boulder capeggiato da E. Cornell e uno del MIT di Boston, guidato da W. Ketterle, annunciano l'osservazione di configurazioni ben particolari in insiemi di atomi alcalini a bassissima temperatura, Rubidio per Boulder e Sodio per il MIT. La lunga attesa, durata circa settanta anni, insieme ad alcuni aspetti qualitativamente conformi alle predizioni di Bose e Einstein consigliano i fisici coinvolti a comunicare al mondo che finalmente la natura aveva vendicato la chiaroveggenza dei due scienziati e l'accuratezza delle previsioni dell'"irragionevole" fisica quantistica. La notizia fa il giro del mondo e, per una volta, sulle prime pagine dei quotidiani compare la bizzarra storia di una lontana, eccentrica previsione teorica che il moderno mondo dei laser aveva dopo tanti anni pienamente confermato.

Ma si tratta veramente della scoperta sperimentale del "condensato" di Bose-Einstein? Nessuno sembra dubitarne, la temperatura a cui avviene la transizione ad uno stato che appare molto più ordinato di quello usuale, le caratteristiche di questo stato e, soprattutto, l'assenza di teorie alternative generalmente accettate, non lascia alla comunità scientifica altra conclusione. E' pur vero che il gruppo di Boulder osserva la transizione ad una densità circa dieci volte inferiore a quella predetta, ma Cornell e collaboratori non hanno difficoltà ad accettare che si tratti di un errore sperimentale, anche se tutto l'articolo pubblicato sulla rivista SCIENCE è volto a convincerci della raffinatezza e accuratezza delle misure. Ma le sorprese non finiscono, circa un anno più tardi il gruppo del MIT annuncia un'altra scoperta sensazionale (che anch'essa appare sulle prime pagine dei quotidiani di tutto il mondo): facendo diffondere due di tali "condensati", uno attraverso l'altro, si osservano dei tipici fenomeni di interferenza, ben definite frange di pieni e di vuoti, proprio come avviene quando un'onda luminosa attraversa ostacoli le cui dimensioni sono comparabili con la sua lunghezza d'onda. L'implicazione incontrovertibile di queste osservazioni è che i "condensati" altro non sono che vere e proprie "onde di materia", in cui gli atomi perdono completamente la loro individualità di particelle per assumere a tutti gli effetti un comportamento ondulatorio, e questo a livello macroscopico.

All'osservatore di buon senso tutto ciò sembra andare ben al di là del comportamento ordinato previsto da Bose ed Einstein, sembra infatti implicare l'emergere di una tipica coerenza nei comportamenti dei singoli, che solo un'interazione di lunga portata fra di essi, come quella elettromagnetica, è in grado di garantire. Ma quest'ultima, come si è già osservato, è del tutto assente nella teoria di Bose-Einstein. E allora? Ancora una volta il buon senso sembrerebbe consigliare di

andare oltre Bose-Einstein, di cercare nell'interazione elettromagnetica fra gli atomi la vera causa delle sorprendenti osservazioni che si sono accumulate negli ultimi tre anni. E invece no! Basta scorrere la letteratura scientifica recente per trovarvi ogni sorta di contorsione teorica per trasformare col senno del poi l'"ordine" di Bose-Einstein nella "coerenza" osservata sperimentalmente. Ma un'analisi logica e obbiettiva di questi tentativi mostra con chiarezza quello che si sarebbe dovuto sapere senza troppi calcoli; che senza un qualche tipo di interazione di portata comparabile a quello delle dimensioni dei "condensati" (tipicamente un decimo di millimetro), non esiste alcun modo di spiegare questi affascinanti fenomeni.

Si dà il caso (ed è qui che chi scrive ha qualcosa da contribuire a quella che forse con qualche fortuna potrà diventare la "controversia di Bose-Einstein") che già da alcuni anni, con la collaborazione di Emilio Del Giudice, ho sviluppato una teoria delle interazioni elettromagnetiche in sistemi atomico-molecolari simili a quelli di cui ci siamo fin qui occupati, fondata sulle leggi generali dell'Elettrodinamica Quantistica (QED), che sono oggi generalmente accettate. Orbene un'analisi, nell'ambito di questa teoria, delle particolari condizioni sperimentali in cui operano i gruppi di Boulder e del MIT, mostra molto chiaramente che quello che è stato osservato non è la "condensazione di Bose-Einstein", ma uno stato molto più strutturato, "coerente" appunto, simile a quello che si produce artificialmente in un laser, in cui gli atomi, oscillando all'unisono su particolari frequenze, perdono completamente la loro individualità per diventare genuine "onde di materia", dando così una spiegazione non solo delle sensazionali "frange di interferenza" ma anche degli aspetti quantitativi su cui il modello di Bose-Einstein lasciava molto a desiderare.

Sarebbe interessante chiedersi come mai una spiegazione così semplice e radicata nelle leggi generali della moderna Teoria Quantistica dei Campi venga con tanta cura rimossa dalla comunità scientifica. Ma questo richiederebbe un'analisi di ben altro spessore scientifico e filosofico, che è opportuno rinviare ad altra data e ad altra sede.

Giuliano Preparata

* S.N. Bose, Z. Phys. 26 178 (1924);

A. Einstein, Sitzungber. Kgl. Preuss. Akad. Wiss. 1924, 261 (1924).