

2010 Dipartimento di Filosofia
Università di Urbino
Isonomia



Vedere e rivedere l'*inosservabile* doppia natura della realtà quantistica

Clelia Sedda

Università degli Studi di Bologna

clelia.sedda@unibo.it

Gino Tarozzi

Università degli Studi di Urbino "Carlo Bo"

gino.tarozzi@uniurb.it

Abstract: The very historical origin of movie appears strongly connected to the requests of scientific research, owing to the aptitude of the language of motion picture both to record physical reality in its dynamic aspect, allowing one to analyze those types of motion, either too slow or too fast to be immediately perceived, and to have access to those phenomena which are not directly observable, but able to impress the photographic emulsions.

With the transition from the individual vision of the scientist to collective achievement in movie theatres, cinematographic language seems to have gradually lost its function of objective representation of reality, and in particular of those forms and aspects of reality which cannot directly observed.

Two short films, made between the '70s and '80s of the last century, the former by the physicists Merli, Missiroli and Pozzi of the Bologna University, the latter by a group of Japanese physicists directed by Tonomura seem, however, to confirm the possibility that movie recuperates its historic role of scientific language. These pictures, showing the phenomenon of interference or rather, as we shall see, autointerference of electrons, allows, in fact, one to view the dual nature, ondulatory and corpuscular, of physical reality at the elementary level, a duality considered unobservable on the grounds on the standard interpretations of quantum mechanics..

Il rapporto tra cinema e scienza è una questione di considerevole rilevanza concettuale che finora non è stata sufficientemente indagata, con l'eccezione di alcune ben documentate analisi sul contributo delle applicazioni delle teorie scientifiche alla nascita e all'evoluzione della cinematografia. Da tali indagini è parzialmente emerso come l'origine stessa della cinematografia appaia intrinsecamente connessa alle esigenze della ricerca scientifica, dal momento che il linguaggio cinematografico consente di registrare la realtà fisica nel suo aspetto dinamico a fini di analisi, studio, scoperta, conoscenza, e si configuri al tempo stesso come il risultato dalla simultanea applicazione di teorie differenti delle scienze naturali: dalle leggi fisiche dell'ottica e della meccanica nella costruzione della camera oscura, prima, e dei dispositivi di proiezione delle immagini, poi; dalla chimica dei materiali fotosensibili nella realizzazione delle pellicole; e infine dagli studi di psicofisica e neurofisiologia per la percezione del movimento a partire dalla visione di una sequenza di fotogrammi.

Ciò che condusse alla creazione di un mezzo di visualizzazione e rappresentazione del reale che non aveva precedenti per potenza, completezza ed efficacia fu, infatti, proprio la combinazione di un dispositivo ottico in grado di rilevare ed eventualmente anche ingrandire (come era accaduto per il cannocchiale di Galileo e il microscopio di Leeuwenhoek) tutto ciò che è nel suo campo visivo, e di un sistema di registrazione sensibile alla radiazione visibile (ma anche invisibile, come dimostrò eloquentemente la scoperta da parte di Becquerel della radioattività) e di un terzo dispositivo meccanico in grado di proiettare le immagini così ottenute (o più frequentemente una loro selezione realizzata attraverso il montaggio) a una velocità tale da produrre nello spettatore l'impressione del movimento e infine la possibilità di associare, in una seconda fase, al sistema di ripresa ottica un dispositivo magnetico in grado di registrare e poi riprodurre anche i suoni.

Già gli *antenati* del cinema, come il revolver fotografico e il cronofotografo, erano stati ideati per la riproduzione del movimento e per la sua stessa analisi, in particolare di quei casi in cui risultava impossibile percepire la successione ordinata dei diversi stati: la possibilità offerta da queste invenzioni di aumentare o ritardare la velocità di proiezione era quindi finalizzata all'esigenza di *vedere* quei tipi di moto che la nostra percezione immediata non riesce a cogliere perché troppo lenti, come quello di un pianeta durante un'eclisse¹, o troppo veloci, come quello di un proiettile sparato da

un fucile e soprattutto di quei moti veloci di cui non è stato possibile osservare gli stati intermedi, come nel caso del cavallo di Muybridge o del gatto di Maray².

Ancora più significativa appare, da questo punto di vista, la funzione della cinematografia nel suo ruolo di documentazione scientifica nel caso della scoperta dei raggi X: un fenomeno non osservabile in modo diretto, ma in grado di impressionare le emulsioni fotografiche, come venne dimostrato dalla scoperta accidentale della radiazione nucleare. Attraverso il cinema, che viene in questo caso a proporsi come strumento per visualizzare l'invisibile, generando stupore e meraviglia, tale scoperta esce rapidamente dai laboratori per diventare oggetto di comunicazione immediata e straordinariamente popolare³.

Terminata questa iniziale fase pionieristica il cinema si trasformerà ben presto, con il passaggio dalla visione individuale dello scienziato alla fruizione collettiva (che ha luogo a partire dalle prime proiezioni pubbliche a pagamento e che convenzionalmente ne sancisce la nascita), nella più importante forma di comunicazione di massa, con una conseguente modificazione progressiva del suo linguaggio, che finirà con l'abbandonare la sua originaria funzione di rappresentazione mimetica del reale e in particolare di quelle forme e di quegli aspetti del reale che non sono accessibili a un'osservazione diretta.

Scopo di questo contributo è analizzare e riflettere su due filmati che mostrano il fenomeno dell'*interferenza* o meglio, come vedremo, dell'*autointerferenza* degli elettroni, in cui il mezzo cinematografico sembra recuperare il suo fondamentale ruolo storico di linguaggio scientifico, evidenziando inoltre come questo recupero avvenga all'interno di questioni teoriche di particolare rilevanza: quello della struttura duale della realtà fisica a livello elementare, un importante problema aperto per i fondamenti della fisica, che cercheremo di sintetizzare nel prosieguo.

Fu proprio il progressivo emergere del comportamento duale, ondulatorio e corpuscolare, prima della radiazione (Planck, 1900 e Einstein, 1905), poi della materia (de Broglie, 1924 e Schroedinger, 1926) l'evidenza sperimentale feconda su cui è nata e si è sviluppata la teoria quantistica. Tale questione fisica si è successivamente configurata come uno dei più controversi problemi epistemologici della fisica contemporanea, quello dell'interpretazione della funzione d'onda della meccanica quantistica, che ha dato origine a un acceso dibattito nel corso del quale sono state

assunte tutte le posizioni logicamente possibili. Anche l'interpretazione di Copenaghen, che rappresenta l'interpretazione "ufficiale" o ortodossa della teoria quantistica, non ha assunto una posizione unitaria ma si è articolata in tre differenti prospettive fondamentali nei confronti di questo strano comportamento duale degli oggetti atomici:

(a) *né onde né particelle*, dal momento che la loro dualità rappresenterebbe un pseudoproblema, legato all'obsoleta ontologia della fisica classica, come nel caso di Heisenberg e Jordan, che sostenevano una posizione radicalmente antirealistica, basata sull'idea della necessità di "una ritirata nel formalismo matematico";

(b) *solo particelle senza onde*, secondo la nota interpretazione di Born (1926) della funzione d'onda di Schrödinger nei termini di un mero strumento matematico che consente di calcolare, attraverso il suo modulo quadrato, la densità di probabilità di trovare una certa particella in una data regione spaziale;

(c) *o onde o particelle* (in senso reciprocamente esclusivo), secondo il principio di complementarità di Bohr, in cui viene assunta la necessità del ricorso sia a una rappresentazione ondulatoria sia a una rappresentazione corpuscolare, ma nello stesso tempo l'impossibilità di conciliarle pienamente in una immagine unitaria della realtà fisica.

Posizioni completamente diverse furono assunte da Erwin Schrödinger, che sostenne un'ontologia di natura puramente ondulatoria, interpretando la sua funzione d'onda come un'onda fisica reale, e negando contemporaneamente qualunque aspetto corpuscolare ai fenomeni atomici (vale a dire *solo onde senza particelle*) e da Louis de Broglie, che rifiutò il carattere limitativo del principio di complementarità, asserendo la possibilità di una coesistenza tra un fenomeno ondulatorio esteso con una particella localizzata (*sia onde sia particelle*). L'interpretazione realistica di de Broglie è stata riproposta, in una particolare forma più debole da Franco Selleri, assumendo che alle onde "vuote" di de Broglie non possono essere attribuiti né energia né impulso, ma soltanto proprietà di relazione con le particelle: la già ben nota proprietà delle onde di produrre interferenza, unitamente alla nuova proprietà di generare, secondo la congettura di Selleri, emissione stimolata di fotoni⁴. L'interpretazione di Selleri, ripresa da altri autori in diverse ulteriori proposte sperimentali⁵, fu accolta con notevole favore non solo dallo stesso de Broglie, ma anche da un altro grande avversario dell'interpretazione di Copenaghen, il filosofo Karl Popper, che aderì

incondizionatamente ad essa, abbandonando la sua originaria interpretazione statistica strettamente corpuscolare:

13. Franco Selleri ha suggerito (continuando l'opera di Louis de Broglie) che possono esistere *onde senza particelle*. Io ho proposto una teoria in qualche modo simile, la teoria dell'esistenza di campi o onde di propensità. In questo contesto ci sono esperimenti molto interessanti da parte di H. Bonse e H. Rauch sulla realtà (probabilistica e anche di tipo causale) di campi di neutroni senza neutroni.

14. Le conseguenze di 13. sembrerebbero rivoluzionarie. Esse stabilirebbero in luogo del carattere "complementare" di particelle e onde (ondicelle) l'interazione di due tipi di oggetti reali: onde e particelle.⁶

Nuove proposte sperimentali sembrano indicare che lo scarto tra l'interpretazione complementare di Bohr e questa particolare interpretazione realistica può essere probabilmente colmato, mentre risulterebbe possibile discriminare tra le interpretazioni dualistiche che attribuiscono una qualche forma di realtà fisica alle onde di de Broglie e le interpretazioni "riduttive" della complementarità alla Jordan-Heisenberg, che considerano la questione del dualismo priva di significato⁷.

Nel dibattito storico l'interpretazione complementare di Bohr, poiché sembrava la sola delle tre varianti dell'interpretazione ortodossa in grado di render conto della natura ondulatoria dei micro oggetti atomici attestata dai fenomeni di diffrazione e (auto)interferenza, finì tuttavia per prevalere, sia pure in una particolare versione emendata e restrittiva in cui la complementarità veniva concepita semplicemente come sinonimo delle relazioni di indeterminazione, come appare chiaramente da questa formulazione data da Jordan:

Un qualsiasi singolo esperimento che portasse contemporaneamente alla luce sia le proprietà corpuscolari sia le proprietà ondulatorie della luce non contraddirebbe soltanto le teorie classiche, ma sarebbe inoltre assurda sia dal punto di vista logico che matematico.⁸

Esiste tuttavia un esperimento che mette in discussione questa formulazione restrittiva del principio di complementarità, evidenziando il comportamento duale di materia e radiazione a livello elementare, al punto che Richard Feynman, una delle

massime autorità della fisica teorica nella seconda metà del Novecento, ha sottolineato come esso sembri racchiudere tutti i problemi della meccanica quantistica:

un fenomeno che è impossibile, *assolutamente* impossibile spiegare in nessun modo in forma classica e che contiene in se il cuore della meccanica quantistica. In effetti questo fenomeno contiene l'unico mistero. Non possiamo eliminare il mistero *spiegando* come avviene. Ci limiteremo a *descrivere* come avviene; e nel far questo avremo descritto le principali caratteristiche della meccanica quantistica.⁹

Si tratta del celebre esperimento della doppia fenditura realizzato con singoli elettroni, che Feynman considera un esperimento mentale (thought-experiment) destinato a rimanere tale a causa di difficoltà tecniche che egli riteneva insormontabili:

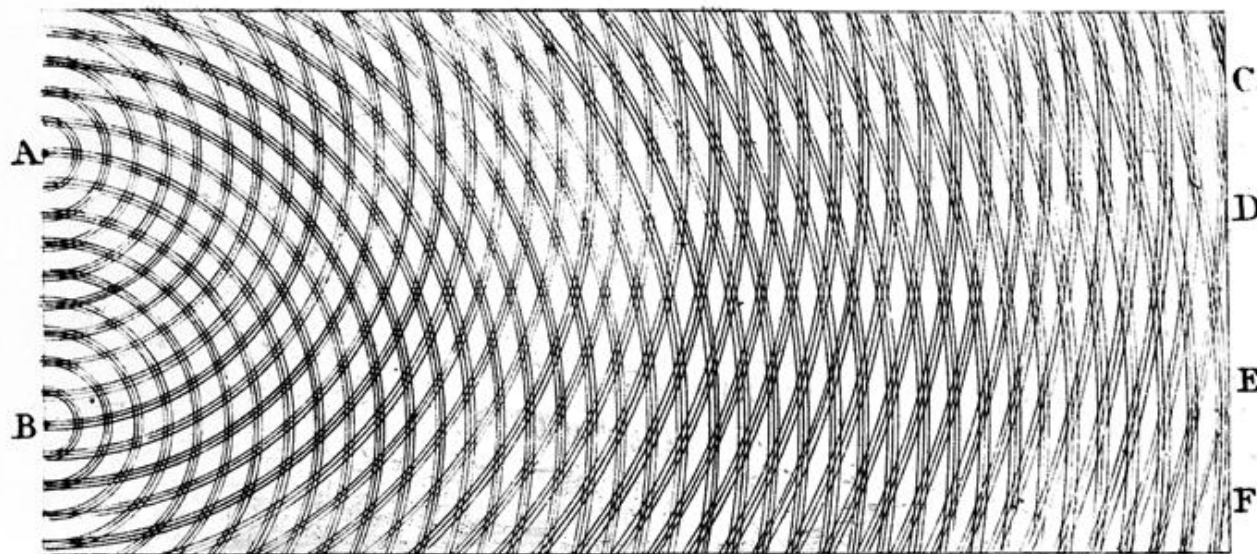
Vi avvertiamo subito che non dovrete tentare di realizzare questo esperimento [...] che non è mai stato fatto in questo modo. Il guaio sta nel fatto che per rivelare gli effetti che ci interessano, l'apparato dovrebbe essere costruito su una scala talmente piccola da rendere impossibile la sua realizzazione. Quello che stiamo quindi compiendo è in realtà un esperimento "mentale" che abbiamo scelto perché è facile ragionarci sopra. Sappiamo quali sono i risultati che si otterrebbero perché sono stati fatti molti esperimenti nei quali le scale e le proporzioni erano state scelte per mostrare gli effetti che descriveremo.¹⁰

Poco più di dieci anni dopo questa dichiarazione, verrà smentita da un esperimento il cui filmato è conservato nell'archivio del C.N.R. di Bologna accanto a documentari scientifici a carattere divulgativo.

Si tratta del cortometraggio *Interferenza di elettroni*¹¹, della durata di meno di un quarto d'ora, realizzato dai fisici Pier Giorgio Merli, Gianfranco Missiroli e Giulio Pozzi in collaborazione con Lucio Morettini e Dario Nobile¹², che documenta il loro esperimento¹³, il quale si proponeva di mostrare il comportamento ondulatorio degli elettroni interpretando la loro (auto)interferenza come una conseguenza dell'aspetto statistico di tale fenomeno. Come tuttavia vedremo nel seguito, il film consente, in realtà, di visualizzare il comportamento duale, ondulatorio e corpuscolare, degli elettroni in un'unica immagine dinamica.

Il primo esperimento che aveva evidenziato i fenomeni d'interferenza è la versione classica dell'esperimento della doppia fenditura, solitamente considerato come

l'*experimentum crucis* della storia della fisica con cui Young e Fresnel sembravano aver dimostrato in modo conclusivo la natura ondulatoria della luce. I due scienziati evidenziarono come, ponendo una sorgente luminosa dinanzi a uno schermo in cui erano state praticate due fenditure equidistanti dalla sorgente, su un secondo schermo rivelatore, collocato dietro il primo, apparisse la caratteristica figura di interferenza, propria dei fenomeni ondulatori ¹⁴.



Una tale figura d'interferenza non si sarebbe, invece, potuta osservare in base alla teoria corpuscolare della luce attribuita a Newton. Quest'ultimo, per la verità, pur rigettando le teorie ondulatorie dei suoi contemporanei, non aveva tuttavia né elaborato né aderito a una concezione di tipo corpuscolare, applicando nei confronti del problema della natura della luce il suo noto precetto metodologico *hypotheses non fingo*.

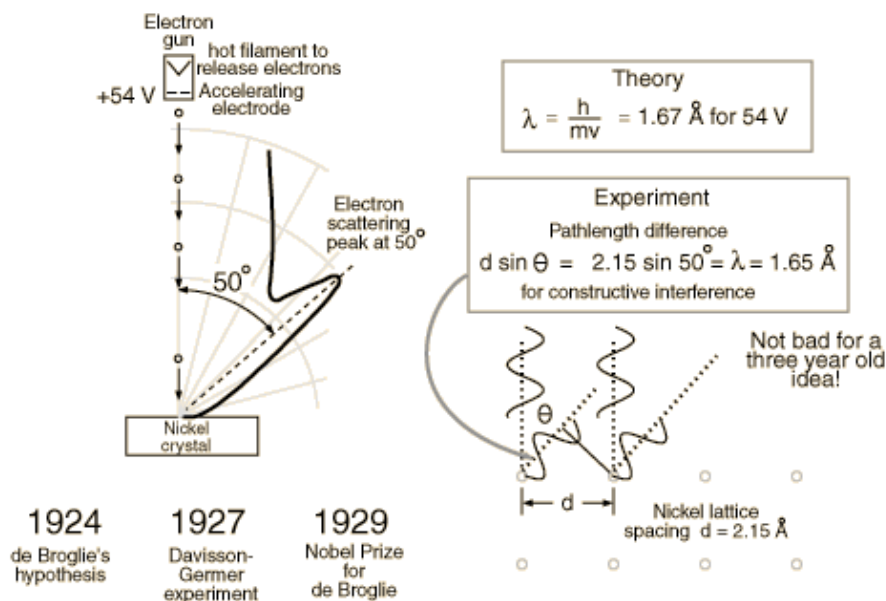
L'esperimento di Young è stato ripetuto nel 1909 da Geoffrey Ingram Taylor, quattro anni dopo la proposta della teoria einsteiniana dei quanti di luce che riprendeva in una nuova forma, l'ipotesi corpuscolare, mostrando che anche la più flebile sorgente di luce, come una candela che brucia a una distanza di circa 2 km, è in grado di produrre le medesime frange di interferenza. Veniva così adombrata una forma anticipata di riconoscimento del carattere duale (a un tempo ondulatorio e corpuscolare) dei

fenomeni luminosi che sarebbe di lì a poco efficacemente sintetizzata dalla famosa affermazione di Dirac che *ogni fotone interferisce solo con se stesso*.

Mentre nel caso della natura della luce si erano scontrate alternandosi nella storia della fisica due diverse concezioni e sembrava delinearsi la necessità di una qualche forma di coesistenza tra le due, nel caso della materia nessuno era disposto a pensare a qualcosa di diverso da, e a mettere quindi minimamente in discussione, la sua natura corpuscolare, tanto più in una fase in cui l'ipotesi corpuscolare, con l'opera di Einstein, si era prepotentemente riproposta come interpretazione dei fenomeni della radiazione luminosa.

Fu soltanto Louis de Broglie che, nel 1924, estendendo dalla radiazione alla materia le idee di Einstein sul dualismo onda corpuscolo con la sua teoria ondulatoria della materia, avanzò l'ipotesi rivoluzionaria, che anche gli oggetti atomici dotati di massa (gli elettroni in primo luogo, che sono gli oggetti più leggeri e facili da studiare, ma anche i neutroni e ogni altro sistema atomico e subatomico) potessero manifestare un comportamento di tipo ondulatorio accanto a quello corpuscolare. La teoria ondulatoria della materia di de Broglie fu sviluppata matematicamente nella meccanica ondulatoria di Schrödinger nel 1926 e venne ben presto confermata dall'evidenza sperimentale.

Si tratta del celebre esperimento di Davisson e Germer¹⁵ che nel 1927



osservarono la diffrazione di fasci di elettroni attraverso un cristallo di nichel, confermando l'esistenza delle proprietà ondulatorie delle particelle teorizzata da de Broglie, ribadita successivamente da altri esperimenti tra i quali quello di George Paget Thomson, realizzato con sottili pellicole di cellulose e altri materiali.

Il filmato di Merli, Missiroli e Pozzi si propone quindi innanzitutto di mostrare come il fenomeno dell'interferenza non sia caratteristico soltanto dei processi ondulatori, e quindi della radiazione, come era già apparso negli esperimenti di Young, ma anche della materia a livello elementare, e in particolare degli elettroni. La prima parte si sofferma proprio sui fenomeni di interferenza nella fisica classica, evidenziando come essi costituiscano una caratteristica peculiare di processi ondulatori differenti, come le onde che si propagano nell'acqua o la radiazione luminosa che passa attraverso dei prismi. A tale scopo vengono mostrate prima due sorgenti che, vibrando in fase, producono, in un fluido, onde progressive, e successivamente una sorgente puntiforme di luce monocromatica che attraversa un biprisma ottico e viene rivelata su uno schermo: in entrambi i casi si ottiene il medesimo fenomeno di interferenza, che sia nel caso della radiazione luminosa sia in quello delle onde dell'acqua è dovuto alla sovrapposizione, in un punto dello spazio, di due o più onde.

L'intensità dell'onda risultante in un dato punto dello spazio può essere maggiore o minore dell'intensità di ogni singola onda nello stato iniziale. Nella regione della sovrapposizione appare il classico fenomeno di interferenza: nel caso delle onde luminose, sullo schermo, si evidenzia la presenza di frange e l'intensità dell'illuminazione, che nell'esperimento viene rilevato con un fotometro, risulta pressoché periodica. Le considerazioni fatte sono rigorosamente valide solo nel caso di una sorgente puntiforme. Impiegando una sorgente monocromatica e coerente come quella di un laser e allineando sul banco ottico un biprisma, i tre fisici bolognesi hanno quindi realizzato una versione moderna dell'esperienza della doppia fenditura di Young e Fresnel, considerato come *experimentum crucis* a favore della natura ondulatoria della luce, fino alla teoria einsteiniana dei quanti di luce, che riproponeva l'ipotesi sulla natura (anche) corpuscolare della stessa.

Dopo questa prima parte introduttiva, incentrata sulla descrizione e visualizzazione dei fenomeni di interferenza della radiazione luminosa macroscopica, con intenti e valenza meramente didattici, si passa alla parte originale del filmato, che

costituisce la documentazione dell'esperimento in cui viene mostrato come questi fenomeni di interferenza si verificano anche nel caso della materia, quando analizziamo i suoi costituenti stabili più elementari, cioè gli elettroni, in accordo con la teoria ondulatoria della materia di de Broglie, a cui non si fa tuttavia alcun riferimento nel corso dell'intero filmato. La ragione di questa sorprendente omissione è forse legata al fatto che questi due grandi padri fondatori della meccanica quantistica si dissociarono energicamente dall'interpretazione ortodossa della teoria (fino a proporre interpretazioni alternative filosoficamente orientate in senso realistico), che sembra essere invece abbracciata, senza particolari riserve, dagli autori del filmato, come cercheremo di mostrare nel seguito.

Il mancato riferimento alla teoria ondulatoria di de Broglie e Schrödinger, di cui l'esperimento realizzato costituisce, a nostro parere, una chiara visualizzazione, potrebbe essere stato dettato dalle stesse motivazioni che avevano portato Bruno Ferretti (in quegli anni il più autorevole fisico teorico dell'ateneo bolognese) a sostenere, nell'introduzione a *I principi fisici della teoria dei quanti* di Heisenberg¹⁶, la pressoché totale assenza di interesse scientifico delle interpretazioni alternative realistiche della meccanica quantistica, e a ritenere un grave errore pedagogico consentire che i giovani si impegnassero nel loro studio, disperdendo preziose energie che avrebbero dovuto essere meglio impegnate in studi più seri e proficui:

Questi tentativi di interpretazione deterministica della fisica quantistica, pur non avendo con ogni probabilità nessuna importanza scientifica, possono però far sorgere sterili dubbi nei giovani che si accingono al non facile studio della fisica teorica. È quindi oltremodo opportuno che tali giovani abbiano idee per quanto possibile chiare sui fondamenti fisici della meccanica quantistica, e a questo scopo la lettura dell'opera di Heisenberg è indubbiamente estremamente utile.¹⁷

L'esperimento ha un carattere pionieristico attestato dal fatto che, per la sua realizzazione, viene utilizzato un microscopio elettronico appartenente, come risulta dai ringraziamenti in coda al film, all'Istituto di Anatomia¹⁸ all'interno del quale i tre autori pongono uno speciale interferometro, da essi stessi progettato e costruito. Si tratta di un biprisma elettronico, costituito da un filamento molto sottile, posto simmetricamente tra

due piastre, a cui veniva applicato un potenziale positivo e uno negativo, in modo tale che il fascio elettronico fosse diviso in due componenti.

Rodolfo Rosa, in un articolo di rassegna in cui ricostruisce la storia dell'esperimento in relazione ad altri realizzati successivamente nell'ambito dell'interferometria, sottolinea come l'uso del biprisma elettronico sia stato

il primo importante aspetto tecnico e concettuale dell'esperimento, mentre il secondo aspetto fondamentale sarebbe costituito dalla opportunità [...] di osservare il continuo arrivo degli elettroni uno alla volta sullo schermo televisivo fenomeno, questo, che precedentemente non era mai stato direttamente "osservato".¹⁹

Nel filmato dei tre fisici bolognesi viene infatti visualizzato l'arrivo degli elettroni attraverso i lampi lasciati dal loro impatto sullo schermo televisivo, così come il progressivo rapido costituirsi di una figura di interferenza, caratteristica, come si è detto, dei fenomeni ondulatori, prodotta dalle loro distribuzioni; l'aspetto cruciale dell'esperimento è costituito dalla osservazione, o meglio dalla visione degli elettroni che interferiscono con se stessi. Ciò avviene in realtà in due fasi: nella prima la sorgente emette un fascio di elettroni e si osservano numerosi arrivi simultanei e l'apparire della figura di interferenza; essa appare tuttavia contestuale alla registrazione degli impatti, per cui non si può parlare in senso stretto di autointerferenza di elettroni, ovvero di un elettrone che interferisce con se stesso, dato che all'interno del dispositivo interferometrico sono presenti *contemporaneamente* molti elettroni. Nella seconda, che è la parte decisiva e fondamentale dell'esperimento, la sorgente viene sufficientemente indebolita in modo tale che un solo elettrone per volta entri nel dispositivo interferometrico. Soltanto in quest'ultimo caso ci troviamo pertanto di fronte all'autentico fenomeno di autointerferenza, che tuttavia appare in due momenti diversi e leggermente sfasati temporalmente: si osservano subito i lampi prodotti dagli elettroni e soltanto dopo un certo tempo si cominciano a vedere le frange d'interferenza, per cui l'aspetto corpuscolare non si manifesta in questo caso in modo contestuale rispetto a quello ondulatorio. Per questo motivo il filmato appare perfettamente interpretabile alla luce del principio di complementarità di Bohr, per la quale l'immagine ondulatoria e quella corpuscolare sono entrambe necessarie per comprendere la natura dei

microgetti, non possono essere pienamente conciliate all'interno di una stessa situazione sperimentale, per cui finiscono con il manifestarsi l'una a spese dell'altra.

Nonostante ad esso sembrano applicabili queste limitazioni imposte dal principio di complementarità, dal filmato emerge comunque il misterioso e inspiegabile comportamento duale corpuscolare e ondulatorio degli elettroni, di cui parlava Feynman, attraverso la visione (quasi simultanea) di due generi di eventi completamente diversi: da un lato la localizzazione degli arrivi delle particelle, dall'altro la loro distribuzione attraverso frange di interferenza.

Ciò ci consente di parlare di cinema scientifico a pieno titolo e in senso forte, dato che siamo di fronte a un vero e proprio esperimento che mostra il comportamento duale dei fenomeni microscopici, dualità che come abbiamo visto precedentemente era stata negata da alcune interpretazioni della meccanica quantistica: basti pensare a questo proposito alla posizione di Heisenberg, Jordan e Pauli, secondo i quali il dualismo era un pseudoproblema, oppure a quella di Born, che introdusse una interpretazione puramente corpuscolare e persino alla prospettiva di Schrödinger, che ne sosteneva una puramente ondulatoria. In presenza di questa chiara evidenza a favore del comportamento duale degli elettroni, resta aperta la possibilità di interpretazioni differenti tra le quali non esiste una contrapposizione così radicale come sembrava apparire storicamente²⁰: quella realistica di de Broglie e quella complementare di Bohr, che riconoscono entrambe l'esistenza del comportamento ondulatorio e corpuscolare della materia, in termini di dualità positiva (*onde e corpuscoli*) o di dualismo negativo (*o onde o corpuscoli*).

Nell'interpretazione che Merli, Missiroli e Pozzi danno del loro esperimento, l'interferenza viene fatta derivare dall'interazione del singolo elettrone con il dispositivo di misura (il filamento). In tal modo il comportamento duale non risulterebbe più essere una proprietà intrinseca dell'elettrone bensì una proprietà di relazione di quest'ultimo con lo strumento di misura. Sembrerebbe quindi che gli autori aderiscano piuttosto che alla tradizionale interpretazione complementare di Bohr, a una sua variante, molto vicina alla reinterpretazione data dal fisico sovietico Vladimir Fock e da alcuni filosofi della scienza sovietici, fatta propria e diffusa in Italia da Ludovico Geymonat e Silvano Tagliagambe²¹. Secondo tale prospettiva il principio di complementarità andrebbe reinterpretato nei termini del concetto di relatività rispetto ai nostri mezzi o strumenti di

osservazione e misurazione: infatti soltanto quando nel dispositivo è presente una determinata distanza tra le due sorgenti virtuali si osserva l'interferenza, che viene distrutta variando tale distanza. L'esistenza o meno delle frange di interferenza verrebbe quindi a dipendere dal tipo di strumento di osservazione e, in questo caso specifico, l'elettrone si comporterebbe alternativamente come un'onda o un corpuscolo a seconda del mezzo di misurazione che decidiamo di utilizzare.

Come sottolineavamo all'inizio, la misteriosa natura duale delle particelle atomiche è racchiusa nell'esperimento ideale della doppia fenditura discusso da Feynman, ma è solo con questa sua trasformazione in esperimento reale, concretamente realizzato da Merli, Missiroli e Pozzi che possiamo "vederla" per la prima volta direttamente con i nostri occhi: ciò che appare sul monitor non è l'immagine macroscopica virtuale televisiva che si forma normalmente sul tubo catodico attraverso l'opportuna distribuzione dell'arrivo degli elettroni, ma la stessa immagine reale di quei costituenti fondamentali della realtà, a partire dalla quale le stesse immagini virtuali che osserviamo sugli schermi televisivi si formano.

Una visualizzazione più recente ed efficace del fenomeno dell'interferenza degli elettroni, dal titolo *Single electron events build up to form an interference pattern in the double-slit experiments*²² è stata realizzata da Akira Tonomura e il suo gruppo (Matsuda, Kawasaki, e Ezawa) nel 1989, per l'Hitachi Advanced Research Laboratory di Tokyo. Secondo quanto sostenuto da Rosa tale nuovo esperimento non conterrebbe alcuna novità sostanziale, avendo semplicemente dimostrato ciò che MMP avevano già dimostrato a Bologna quindici anni prima: vale a dire la formazione di frange d'interferenza come risultato dell'autointerferenza del singolo elettrone²³.

In realtà il filmato che mostra, nell'arco cronologico di poco più di un minuto, l'apparire delle frange d'interferenza direttamente sulla pellicola fotografica e non sul monitor del microscopio elettronico, producendo immagini di una chiarezza e un nitore straordinari, ha invece introdotto, a nostro parere, una novità teoretica notevole rispetto al filmato di Pozzi, Missiroli e Merli. Se in quest'ultimo, infatti, era possibile *vedere* contemporaneamente gli aspetti corpuscolari e ondulatori della materia soltanto con la sorgente non indebolita di elettroni in cui molti elettroni erano presenti contemporaneamente nel dispositivo sperimentale, nel film di Tonomura tale coesistenza delle proprietà corpuscolari e ondulatorie dei microgetti, diventa

perfettamente visualizzabile anche nel caso di un solo elettrone alla volta presente nel dispositivo interferometrico. Ciò è possibile facendo ricorso a una peculiarità del linguaggio cinematografico: quella della variazione della velocità di proiezione, che in questo caso viene accelerata, proiettando in 30 secondi, come avverte la voce dello speaker, quello che ha richiesto 30 minuti di ripresa. Ed è proprio questa accelerazione che permette di vedere degli impatti di elettroni che arrivano uno dopo l'altro sullo schermo con la contestuale immagine dinamica del processo ondulatorio generato dalle loro distribuzioni²⁴.

Il filmato di Tonomura ci permette di osservare non solo eventi non direttamente osservabili come gli impatti degli elettroni sulla pellicola fotosensibile, ma nello stesso tempo anche le frange d'interferenza secondo cui si distribuiscono, attraverso la variazione della velocità della proiezione dei lampi registrati direttamente sulla pellicola, analogamente a quanto accadeva nel cinema delle origini nel primo caso per i raggi X e nel secondo per il cavallo in corsa e il gatto in caduta libera. In tal modo l'osservatore/spettatore ha una visione simultanea di quei due tipi di proprietà, ondulatorie e corpuscolari, che secondo l'interpretazione complementare della meccanica quantistica non potrebbero coesistere in una medesima situazione sperimentale.

Questo contributo del linguaggio cinematografico scientifico a una questione di particolare rilevanza concettuale nell'interpretazione di quella che potrebbe essere considerata la più importante teoria della storia della scienza, costituisce una conferma di quelle modalità e di quella funzione originaria della cinematografia che pare non sia cambiata in più di cento anni di storia, che ha portato alla nascita stessa del cinema.

Lo stesso Tonomura ha inoltre sottolineato come questa natura ondulatoria degli elettroni, sia emersa «grazie al recente sviluppo di tecnologie avanzate, esperimenti che una volta venivano considerati esperimenti mentali in meccanica quantistica»²⁵. Attraverso queste nuove tecnologie, e in particolare dell'olografia elettronica non solo è possibile vedere oggetti microscopici precedentemente inosservabili (come ad esempio la distribuzione microscopica dei campi magnetici di forze, e la dinamica nei vortici quantizzati nei superconduttori), ma anche rivedere oggetti sia microscopici che macroscopici nella loro tridimensionalità. Appare quindi piuttosto probabile che da queste promettenti nuove tecniche possano derivare conseguenze in grado di giocare nel

futuro un ruolo molto rilevante sia nell'indagine della struttura della realtà sia nella nostra rappresentazione del reale.

Bibliografia

- Feynman, R., Leighton, R.D., Sands, M., 1963, *The Feynman Lectures of physics*, Addison-Wesley, Menlo Park, Ca., I, 1963.
- Garuccio A., Popper K., Vigier J.P., 1981, «Possible Direct Physical Detection of de Broglie Waves», *Physics Letters*, 86A, 1981.
- Garuccio A., Rapisarda V., Vigier J.P., 1982, «New Experimental Set-Up for the Detection of de Broglie Waves», *Physics Letters*, 90 a, 1982.
- Heisenberg, W., 1953, *I principi i fisici della teoria dei quanti*, Einaudi, Torino.
- Merli, G. P., Missiroli G. F., Pozzi G., 1976, «On the statistical aspect of electron interference phenomena», *American Journal of Physics* 44, 306, 1976.
- Omelyanovskij, M. E., Fock, V. A., 1972, *L' interpretazione materialistica della meccanica quantistica: fisica e filosofia in URSS* (a cura di Silvano Tagliagambe, prefazione di Ludovico Geymonat) Milano, Feltrinelli.
- Popper, K.R., 1985, «Realism in Quantum Mechanics and a New Version of the E.P.R. Experiment» in *Quantum Physics*, a cura di G. Tarozzi e A. van der Merwe, Reidel, Dordrecht.
- Prolo, M. A., 1951, *Storia del cinema muto italiano*, I, Poligono editrice.
- Rosa, R., *The Merli-Missiroli-Pozzi Two-Slit Electron Interference Experiment*, http://l-esperimento-piu-bello-della-fisica.bo.imm.cnr.it/Resources/Rosa-PhilSci_Archive-Jan2008.pdf.
- Rosa, R., *The Merli-Missiroli-Pozzi Two-Slit Electron Interference Experiment* <http://philsci-archive.pitt.edu/archive/00003816/>.
- Selleri, F., 1969, «On the wave function of quantum mechanics», *Nuovo Cimento Lett.*, 1, 1969.
- Selleri, F., 1971, «Realism and the wave-function of quantum mechanics», in *Foundations of Quantum Mechanics*, a cura di B. d' Espagnat, *Proceedings of the International School of Physics "Enrico Fermi"*, Course IL, Academic Press, New York, 1971, pp. 398-406.
- Selleri, F., 1987, *Paradossi e realtà. Saggio sui fondamenti della microfisica*, Bari, BCM Laterza.
- Tarozzi, G., 1982, «Two Proposal for Testing Physical Properties of Quantum Waves», *Nuovo Cimento Lett.* 35, (2), 1982 , pp. 553-559.
- Tarozzi, G., 1985, «Experimental Tests of the Properties of the Quantum Mechanical Wave-Function», *Nuovo Cimento Lett.*, 42, 1985.

Tarozzi, G., 1985, «Experimental Tests of the Properties of the Quantum Mechanical Wave-Function», *Nuovo Cimento Lett.*, 42, 1985, pp. 439-442.

Tarozzi, G., Auletta, G., 2004, «On the Reality of Quantum Waves», *Foundations of Physics*, 34, 2004.

Tarozzi, G., Auletta G., 2004, «Wave-like Correlations Versus Path Detection: Another Form of Complementarity» in *Foundations of Physics Lett.*, 17, 2004, pp. 889-895.

Tonomura, A., *Direct observation of thitherto unobservable quantum phenomena by using electrons* <http://www.pnas.org/content/102/42/14952.full>.

Note

¹ In particolare, come è noto, l'eclisse di Sole del 29 maggio 1919, ripresa dall'astronomo Sir Arthur Stanley Eddington nell'isola Principe, al largo della Guinea Spagnola, che ha fornito una prova della teoria della Relatività Generale. <http://www.pd.astro.it/eclisse/1919.htm>.

² La cronofotografia di Maray consentirà di dare una risposta definitiva al contrasto tra leggi della meccanica razionale e osservazione empirica: la prima stabilisce che in assenza di un punto d'appoggio esterno un corpo non può rigirarsi durante la sua caduta, mentre l'osservazione empirica mostrava come un animale fosse invece in grado di farlo. Virgilio Tosi, ne *La vera nascita del cinema*, ripropone le immagini mostra la ripresa cinematografica, realizzata da Maray, di un gatto che ricade a terra sulle zampe dopo esser stato fatto cadere in una posizione rovesciata,. Mostrando l'inapplicabilità delle leggi meccaniche a sistemi viventi complessi, la cinematografia scientifica fa compiere passi avanti alle scienze fisiche. Il filmato di Marey è presente on line all'indirizzo:

http://www.youtube.com/watch?v=JyKZ6_q_SIQ&feature=related.

Muybridge studiò la posizione degli zoccoli nell'andatura dei cavalli domandandosi se ci fosse un momento in cui i quattro zoccoli erano sollevati dal suolo (come Géricault nel 1821 aveva già intuito e dipinto ne *Il Derby di Epsom*): <http://en.wikipedia.org/wiki/Muybridge>,

http://it.wikipedia.org/wiki/File:Jean_Louis_Théodore_Géricault_001.jpg), per confutare una scommessa http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/0/07/The_Horse_in_Motion-anim.gif/220px-The_Horse_in_Motion-anim.gif, http://en.wikipedia.org/wiki/File:The_Horse_in_Motion.jpg.

³ Prolo (1951, 89-90, 107).

⁴ Selleri (1969, 908-910); Selleri (1971).

⁵ Garuccio-Popper-Vigier (1981, 397); Tarozzi (1982, 553-559); Garuccio-Rapisarda-Vigier, (1982, 17); Tarozzi (1985, 439-442).

⁶ Popper (1985).

⁷ Tarozzi-Auletta (2004, 889-895).

⁸ Popper (1985, 20). Questo travisamento portò successivamente alcuni fisici e filosofi a reinterpretare la complementarità nei termini di relatività ai nostri mezzi di osservazione (una sorta di estensione della relatività rispetto ai sistemi di riferimento), nel senso che la realtà microscopica si sarebbe rivelata in forma puramente ondulatoria (diffrazione e interferenza) rispetto ad alcune classi di strumenti e in forma puramente corpuscolare (registrazione localizzata e scelta del percorso) rispetto ad altre. Tale punto di vista, che si sarebbe ben presto rivelato in piena contraddizione con i risultati sperimentali, sembra essere la prospettiva adottata nell'interpretazione di Merli, Missiroli e Pozzi.

⁹ Feynman-Leighton-Sands (1963, 2).

¹⁰ *Ibidem*, 6.

¹¹ <http://www.youtube.com/watch?v=EFPFh6MY5VE>,

<http://www.youtube.com/watch?v=uqyUrXFkzpq&feature=related>.

¹² Il filmato ha ottenuto il Premio per la Fisica al Il film ha ottenuto nel 1976 il Premio per la Fisica al VII Festival International du *Film Scientifique dell'Université Libre* di Bruxelles. Nel maggio del 2002 sulla rivista *Physics World* appare un sondaggio per scegliere l'esperimento più bello della fisica. Quello citato il maggior numero di volte dai lettori risulta il film dei fisici bolognesi. L'università di Bologna gli ha dedicato una giornata di studi i cui materiali, unitamente ad altra documentazione sono stati inseriti nell'apposito sito: <http://l-esperimento-piu-bello-della-fisica.bo.imm.cnr.it/index.html>.

¹³ "On the statistical aspect of electron interference phenomena" pubblicato sull'*American Journal of Physics*.

¹⁴ http://en.wikipedia.org/wiki/File:Young_Diffraction.png.

¹⁵ http://hep.physics.indiana.edu/~hgevans/classes/graphics/qm/e_scattering/e_scattering.html.

¹⁶ Werner Heisenberg (1953).

¹⁷ Citato nel fondamentale testo di Franco Selleri, *Paradossi e realtà. Saggio sui fondamenti della microfisica* (1987, 63).

¹⁸ L'istituto di Anatomia è situato nelle immediate vicinanze dell'Istituto di Fisica e veniva quindi solitamente impiegato per studiare le microstrutture cellulari a livelli molto meno elementari.

¹⁹ Rosa, *The Merli-Missiroli-Pozzi Two-Slit Electron Interference Experiment*.

²⁰ Tarozzi-Auletta (2004, 1675-1694).

²¹ Omelyanovskij-Fock (1972).

²² <http://www.hqrd.hitachi.co.jp/rd/moviee/doubleslite.mpeg>.

²³ Rosa, *op. cit.*

²⁴ Su internet sono presenti diversi filmati di animazione che spiegano l'esperimento della doppia fenditura: <http://www.youtube.com/watch?v=Bgnuib0z0vI&feature=related> (prima di otto parti); Dr. Quantum: <http://www.youtube.com/watch?v=DfPeprQ7oGc>; The Strangeness Of Quantum Mechanics: http://www.youtube.com/watch?v=UMqtiFX_IQQ&NR=1; Double slit experiment with marbles: <http://www.youtube.com/watch?v=oBgs6pBn7AM&feature=related>; _Double-slit video: <http://www.youtube.com/watch?v=DwCiDkz1KVA&feature=related>; Young's Double slit Experiment: http://www.youtube.com/watch?v=_Vbt6XuNvy4&feature=related; Parallel Worlds, Parallel Lives Was on BBC4 November 26, 2007: http://www.youtube.com/watch?v=B9xM2_MrC2k&feature=related; Il fisico Dr. Robert Plunkett, descrive la natura ondulatoria degli elettroni: <http://www.youtube.com/watch?v=UXvAla2y9wc&feature=related>; Perché dio non esiste? Lo dimostra il double slit experiment: <http://www.youtube.com/watch?v=yOwTV-HgDUo>.

²⁵ Tonomura *Direct observation of thitherto unobservable quantum phenomena by using electrons* <http://www.pnas.org/content/102/42/14952.full>.