

Qualche idea dalla rivoluzione scientifica del
Rinascimento alla meccanica quantistica

Davide Bucci

13 novembre 2003

Indice

1	Il contesto scientifico prima delle rivoluzioni del XX secolo	1
1.1	Il problema del moto nella scienza pregalileiana	1
1.2	I nuovi fervori del Rinascimento	2
1.3	Galileo Galilei	4
1.4	Isaac Newton	6
1.5	L'avvento dell'elettricit�	8
2	Qualche concetto di meccanica quantistica	10
2.1	Un esperimento con pallottole	11
2.2	Un esperimento con le onde	12
2.3	Un esperimento con gli elettroni	13
2.4	Il principio di indeterminazione	15
2.5	Conclusione	16

Capitolo 1

Il contesto scientifico prima delle rivoluzioni del XX secolo

Iniziamo la nostra analisi con una breve presentazione della storia della fisica cosiddetta “classica”. Fin dagli albori della storia della scienza, uno dei problemi che ha maggiormente tormentato i sonni dei cosiddetti “filosofi naturali” è stato certamente quello del moto; esso fa parte della nostra realtà quotidiana e costituisce un buon esempio degli scogli che è stato necessario superare per pervenire finalmente ad una visione più moderna della situazione.

1.1 Il problema del moto nella scienza pregalileiana

Le nostre esperienze comuni riguardo al moto dei mezzi sono parecchie: la nostra idea intuitiva di moto è strettamente collegata ad azioni pratiche come lo spingere il sollevare od il trasportare dei pesi. Una conclusione erronea in cui è molto semplice cadere (e che, come vedremo, ha intralciato lo studio del moto fino all’epoca di Galileo) è che quanto maggiore è l’azione esercitata su di un corpo, tanto maggiore è la sua velocità. Un’automobile mossa da un motore più potente normalmente può raggiungere delle velocità più elevate rispetto ad un automobile che monta un motore più modesto.

Nella *Meccanica* di Aristotele, si legge: *un corpo in moto si arresta allorchè la forza che lo spinge non può più agire in modo da spingerlo.*

Idee di questo tipo hanno intralciato lo studio del moto non perchè siano intrinsecamente sbagliate (è verissimo che se un oggetto comune come una sedia viene spinto prima o poi finirà per fermarsi), ma piuttosto perchè sono intrinsecamente sterili.

Cerchiamo di capire la situazione ed introduciamo una delle domande

che stanno alla base della filosofia della scienza moderna: *quali sono i tratti fondamentali di una buona teoria scientifica?* La domanda non è per niente banale, ne affrontiamo ora un primo aspetto intuitivo; una delle cose che possiamo richiedere ad una teoria è quello di essere versatile e poter essere utilizzata in molti campi differenti. In altri termini, una teoria scientifica deve poter essere utilizzata per descrivere situazioni differenti richiedendo il minor numero possibile di ipotesi “ad hoc” che debbano essere introdotte per rendere il discorso consistente.

La fisica aristotelica costituisce un tentativo ammirevole di spiegare il mondo e si poggia su numerosi principi che derivano in maniera piuttosto diretta da esperienze comuni. Il problema è che quando la situazione incomincia a complicarsi, le ipotesi aggiuntive richieste incominciano a diventare parecchie e la descrizione diventa sempre più ingarbugliata. Per quasi duemila anni, le migliori menti del pensiero occidentale si sono sforzate di descrivere il mondo che vedevano attraverso i postulati aristotelici pervenendo alla fine in un nulla di fatto.

1.2 I nuovi fervori del Rinascimento

Un periodo estremamente fecondo nella storia dell’arte e della filosofia della scienza è stato senza dubbio il Rinascimento, in cui gli sviluppi della matematica giocano un ruolo estremamente importante. Basti pensare agli sviluppi degli algebristi italiani di tale periodo come Raffaele Bombelli (1526-ca 1572), Nicolò Tartaglia (ca 1500-1557), Scipion dal Ferro, Luca Pacioli (1445-1514) od agli studi sulla prospettiva di un elemento come Leon Battista Alberti (1406-1472) il quale godeva di una certa fama anche come matematico. Ecco come si esprime R. Feynman (1918-1988), uno dei massimi fisici del XX secolo sull’argomento: *Sono rimasti sconvolti quando ho affermato che lo sviluppo di maggior importanza per la matematica in Europa è avvenuto quando Tartaglia ha scoperto che si poteva risolvere un’equazione cubica. Anche se di per sé è una scoperta di poca utilità, deve esser stata psicologicamente meravigliosa, perché ha dimostrato che l’uomo moderno poteva far qualcosa di cui nessun greco antico era capace* [FYN89].

I tempi stanno diventando a poco a poco maturi per la più grande rivoluzione che il pensiero occidentale abbia conosciuto. L’autorità di Aristotele inizia ad incrinarsi e compaiono dei personaggi che, non privi di una certa spregiudicatezza, propongono idee radicalmente nuove sulla descrizione del mondo. Innanzitutto, incomincia ad affermarsi una classe di artigiani estremamente attivi in diverse attività e desiderosi di svecchiare l’immagine degradante del “meccanico”, fino ad allora non molto ben considerata nella

cultura dell'epoca. Un esempio assai noto dell'artigiano-ingegnere-artista è rappresentato dalla figura di Leonardo da Vinci (1452-1519).

Un altro argomento che aveva tenuto occupate le menti dei filosofi fin dall'antichità e che risulta strettamente collegato al moto è lo studio dell'astronomia e delle posizioni dei pianeti nel cielo. Un eccellente "sistema del mondo" basato sulla fisica aristotelica che è stato in uso per quasi duemila anni è stato quello proposto da Tolomeo (ca 100-170) e descritto nell'*Almagesto*. Si trattava di un sistema geocentrico e che poneva i differenti pianeti incastonati su sfere cristalline concentriche e che, grazie anche al meccanismo degli epicicli, consentiva di effettuare delle previsioni abbastanza precise sulle eclissi e sulle posizioni dei pianeti nel cielo. Un aspetto fondamentale di questo sistema era proprio il fatto che consentisse di effettuare delle *previsioni*.

Uno dei fondamenti della cosmologia tolemaica era l'assunto aristotelico della perfezione del moto circolare nei confronti degli altri moti. La prima picconata moderna alla concezione geocentrica venne da Nicolaus Kopperlingk, che divenne diversamente noto con il nome latinizzato di Copernico (1473-1543). La proposta copernicana era un sistema radicalmente diverso, in cui la terra era scalzata dal suo ruolo di centro dell'universo in cui veniva posto il sole. Questa proposta era stata avanzata per eliminare la necessità degli epicicli e per rendere effettivamente circolare l'orbita di ciascun pianeta, nella migliore delle tradizioni aristoteliche.

Il sistema copernicano, esposto nel *De revolutionibus orbitum coelestium* (Norinberga, 1543), a ben vedere, non rappresentò un miglioramento di quello tolemaico per quanto riguardasse la precisione dei calcoli, ma possedeva un'intrinseca semplicità che lo rendeva più fecondo e dunque più valido dal nostro punto di vista. Fu quando Keplero (1571-1630) introdusse la prima delle sue famose leggi dando diritto di cittadinanza al moto ellittico nei cieli che la precisione dei calcoli venne notevolmente incrementata. Tralascieremo per mancanza di spazio le critiche degli studiosi aristotelici alle ipotesi copernicane, basti dire che l'idea di una terra che non sia al centro dell'universo mina alla base l'intera costruzione della fisica aristotelica, strettamente collegata alla classificazione dei corpi in "leggeri" e "gravi", secondo la loro naturale tendenza ad andare in alto od in basso.

La tradizione cristiana inoltre aveva inglobato la cosmologia tolemaica, la quale costituiva il punto di vista ufficiale della Chiesa cattolica. In un periodo di fervori protestanti (Lutero affisse le 95 tesi protestanti sulla porta della chiesa del castello di Wittenberg nel 1517), le posizioni eliocentriche erano considerate dunque nient'altro che un gingillo matematico ed è in questo senso che va letta la prefazione del teologo Osiander all'opera di Copernico del 1543.

Alla fine del rinascimento comparve tuttavia una schiera di pensatori in

cui il copernicanesimo veniva adottato senza indugi, insieme a concezioni del mondo nuove con concessioni alle dottrine cabalistiche che ebbero un certo successo all'epoca. Esponenti di questo tipo sono per esempio Giordano Bruno (1548-1600), Tommaso Campanella (1568-1639), Bernardino Telesio (1509-1588) e William Gilbert (1544-1603).

La polemica contro la cabala e gli elementi magici fu estremamente interessante perché venne portata avanti anche da pensatori che tuttora sono considerati alla base della filosofia della scienza moderna: citiamo per esempio Francesco Bacone (1561-1626), che fu uno dei primi a rendersi conto dell'importanza degli aspetti organizzativi ed istituzionali della scienza, in altre parole, della necessità di un *metodo* coerente.

1.3 Galileo Galilei

L'esponente di maggiore importanza della storia della scienza della fine del rinascimento è senza dubbio Galileo Galilei (1564-1642). Egli affrontò con grande acume buona parte degli argomenti della filosofia naturale aristotelica fino a convincersi della necessità di operare in modo diverso e di utilizzare un linguaggio diverso per la descrizione della natura. Il processo di matematizzazione della scienza nasce con Galileo. Finalmente svecchiato dai preconcetti aristotelici, il grande scienziato poté affrontare finalmente in modo coerente il discorso del moto, risolvendo molti problemi che avevano tolto il sonno a molti filosofi a lui precedenti.

Una trattazione della figura di Galileo, nonché la sua drammatica controversia nei confronti dell'Inquisizione ci porterebbe via troppo spazio per poter essere affrontate in maniera soddisfacente (si veda per esempio [BCC01]), ci limitiamo soltanto a ricordare come con Galileo inizia ad affermarsi uno dei punti chiave della scienza moderna, ovverosia la necessità di fornire delle *previsioni*.

Non ha senso interrogarsi sul perché il mondo funzioni in una certa maniera, quanto di meglio possiamo fare è osservare con umiltà le meravigliose pagine del libro della Natura le quali sono scritte in una lingua matematica. Per citare testualmente il grande scienziato: *“La filosofia è scritta in questo grandissimo libro che continuamente ci sta aperto innanzi a gli occhi (io dico l'universo), ma non si può intendere se prima non si impara a intender la lingua, e conoscer i caratteri, ne' quali è scritto. Egli è scritto in lingua matematica, e i caratteri son triangoli, cerchi, ed altre figure geometriche, senza i quali mezzi è impossibile a intendere umanamente parola; senza questi è un aggirarsi vanamente per un oscuro labirinto”*; si confrontino le parole di Galileo con quelle scritte nel XX secolo da Feynman: *“Per quelli che*

non conoscono la matematica è difficile arrivare al vero apprezzamento della bellezza, la grandissima bellezza della natura. [...] Se volete conoscere e apprezzare la natura, è necessario capire la lingua che parla” [FYN65].

A questo punto, è necessaria una breve disquisizione su cosa vuol dire *descrivere*: perveniamo ad un punto fondamentale della filosofia della scienza moderna, una buona teoria scientifica deve essere in grado di fornire, nel senso matematico del termine, delle predizioni su dati che possono essere misurati con esperimenti ripetibili.

Un aspetto altrettanto fondamentale dell’opera di Galileo è inoltre quello di riuscire a staccarsi dal senso comune rappresentato dalle affermazioni di Aristotele. In altre parole, Galileo riesce a compiere uno sforzo di astrazione formidabile nel momento in cui riesce a descrivere il moto di una sfera perfetta su di un piano inclinato anche lui perfetto, in quanto noi non viviamo in un mondo perfetto e vi sono differenti fenomeni parassiti che sono estremamente difficili da affrontare. Sono in questo senso da ammirare gli sforzi sperimentali di Galileo, volti ad eliminare il più possibile le cause di attrito, per quanto permettevano le tecnologie a sua disposizione.

Rileggiamo in una formulazione moderna il principio d’inerzia formulato in maniera esatta e chiara dal grande scienziato: *“ogni corpo permane nel suo stato di quiete o di moto rettilineo uniforme rispetto ad un sistema di riferimento euclideo predeterminato fintantoche non interviene una forza a mutare tale stato”*. In tale formulazione è completamente assente ogni riferimento al mondo reale, il principio tratta il moto di un oggetto in uno spazio libero da qualunque impedimento, situazione certo non comune nella nostra esperienza quotidiana.

Il vantaggio di questa formulazione non è tanto quella dell’essere direttamente applicabile alle nostre affermazioni, quanto più di essere applicabile ad una varietà elevatissima di fenomeni che avrebbero richiesto numerose ipotesi aggiuntive per essere trattati con la fisica aristotelica. In altri termini, il processo di astrazione compiuto dalla fisica galileiana consente di creare un quadro completamente nuovo in cui inserire le teorie. È per questi motivi che Galileo viene considerato giustamente il padre della scienza moderna.

Gli anni a cavallo fra Galileo e Newton vedono l’attività di René Descartes (1596-1650) che pervenne ad un nuovo modo di intendere la matematica e rese possibile la realizzazione di un ponte fra due discipline come l’algebra e la geometria. I nuovi metodi, denominati “analitici” portavano aria nuova e contribuirono all’utilizzazione di un linguaggio radicalmente nuovo, al posto del vetusto e pesante linguaggio geometrico in voga all’epoca.

1.4 Isaac Newton

Newton (1642-1723) è stato certamente una delle menti più versatili della storia della scienza, tuttavia penalizzata da un carattere sospettoso ed intransigente che lo portò ad affrontare numerose controversie, fra le quali è ben nota quella con Leibnitz per quanto riguarda il calcolo infinitesimale. I contributi di Newton alla scienza possono essere raggruppati in tre grandi campi differenti:

- la dinamica e la gravitazione, ovvero lo studio del moto di corpi aventi una massa e sottoposti a forze
- l'ottica, ossia lo studio della luce e delle sue proprietà
- il calcolo infinitesimale, ossia lo studio dei metodi matematici che fanno intervenire in maniera coerente quantità infinitesime ed infinite.

A questo punto è doverosa una precisazione: i termini usati dai fisici e dai matematici per descrivere le loro leggi possono avere un significato lievemente differente rispetto a quello attribuitogli nell'uso comune. In particolare, il concetto di forza può essere visto come qualunque causa che permette di distogliere un corpo libero da qualunque altra interazione dal suo stato di quiete o di moto rettilineo uniforme prescritto dal principio d'inerzia galileiano. Tale definizione è collegata ovviamente al concetto intuitivo della forza come qualcosa legato al moto, ma è nondimeno ben distinta da quanto suggerisce l'uso comune ed è diversa dalla forza in senso della fisica aristotelica.

A questo punto incominciamo ad avere di fronte dei concetti ben più precisi e definiti di quanto non fossero mai stati prima, grazie anche ad un nuovo linguaggio matematico ed alla consapevolezza della distinzione della fisica rispetto alla teologia. La scienza si propone di *descrivere*, non di *spiegare*. È curioso osservare come tale divisione (che fu un problema così drammatico per Galileo) non fosse molto chiara in un personaggio grandissimo come Keplero.

L'eredità di Newton fu raccolta da molti studiosi e matematici i quali pervennero ad una sistematizzazione del mondo inteso come un insieme di fenomeni sostanzialmente meccanici comportanti l'interazione di un gran numero di particelle sottoposte alle leggi di Newton.

Il contesto di base è estremamente semplice: per descrivere il moto di tutti i pianeti del sistema solare è sufficiente scrivere due formule:

$$F = ma \quad (1.1)$$

Una forza (vettoriale) F è equivalente ad un'accelerazione a a parte un coefficiente scalare m chiamato massa e che rappresenta una proprietà fisica intrinseca della materia.

$$F = G \frac{m_1 m_2}{d^2} \quad (1.2)$$

Due corpi aventi rispettivamente massa m_1 e m_2 sono attratti da una forza F diretta lungo la congiungente dei centri di massa dei due corpi ed inversamente proporzionale al quadrato della distanza d .

Se il problema è risolvibile analiticamente nel caso di due corpi come la Terra ed il Sole (si ottiene l'ellisse di Keplero), presenta delle difficoltà nel caso di più corpi: le equazioni rimangono sempre le stesse (in forma vettoriale), ma la soluzione non può essere scritta come composizione di funzioni più o meno comuni. Per problemi di questo tipo, oggi sono preziosi i metodi moderni di calcolo numerico e l'uso del calcolatore.

Diventò insomma chiaro come descrivere il mondo in termini di equazioni piuttosto semplici le quali coinvolgevano delle quantità infinitamente piccole (in particolare, i loro rapporti) e che vennero chiamate equazioni differenziali.

Una delle caratteristiche di tale sistema era quella che *un'intelligenza dotata di una capacità di calcolo infinita e possedente in un istante dato la posizione, la velocità e l'accelerazione di ogni particella presente nel mondo con precisione infinita può conoscere la storia passata e futura di tutto l'universo*. Tale tipo di visione è chiamata *meccanicismo* e conobbe un'indubbia fortuna per tutto il Settecento. In tale quadro, nonostante sia riconosciuta l'indipendenza tra il pensiero scientifico e la religione, si pone l'affermazione di Pierre Simon de Laplace (1749-1827) che riconosceva Dio come un'ipotesi non necessaria.

La meccanica Newtoniana sviluppata in seguito da personaggi come Lagrange e Laplace costituiva un sistema coerente che consentiva di descrivere in maniera unificata sia gli avvenimenti del mondo, sia gli avvenimenti celesti come il moto dei pianeti.

1.5 L'avvento dell'elettricità

Sebbene alcuni fenomeni elettrostatici fossero conosciuti da tempo, come la possibilità di attirare piccoli pezzi di carta con una bacchetta isolante strofinata con un panno di lana, lo studio serio dell'elettricità non poté cominciare prima dell'invenzione della celeberrima pila di Alessandro Volta (1745-1827).

Se il Seicento ed il Settecento sono stati i secoli della meccanica, l'Ottocento è stato il secolo dello studio dei fenomeni elettrici, la cui importanza attuale è evidente. La pila di Volta consentiva per la prima volta lo studio dell'elettricità sotto forma di un flusso più o meno controllabile e non più sotto forma di scintille. Di notevole importanza furono agli inizi del secolo gli studi di André Marie Ampère (1775-1836) e Georg Simon Ohm (1789-1854) i quali si interrogarono sulle relazioni fra le grandezze osservabili del flusso elettrico.

Il nome del primo scienziato è adesso legato all'unità di misura della corrente nel SI^a, mentre il secondo è legato alla scoperta della celeberrima legge:

$$V = RI \quad (1.3)$$

ove V è la tensione applicata ad un corpo, R è la resistenza del corpo e I è la corrente che viene fatta transitare all'interno del corpo in esame.

^aSistema Internazionale di misura, specifica in maniera univoca e coerente le unità di misura da utilizzare per la scrittura di articoli scientifici e di ingegneria

La situazione divenne sempre più interessante quando Michael Faraday (1791-1867) scoprì un legame fondamentale fra l'elettricità ed il magnetismo, un altro aspetto conosciuto da tempo ma sostanzialmente assai mal compreso.

La summa di tutte le conoscenze sull'elettricità e magnetismo venne effettuata nel 1865 da una delle grandi menti del pensiero scientifico di tutti i tempi, l'inglese James Clerk Maxwell (1831-1879), il quale pubblicò nel 1873 il suo *Treatise on Electricity and Magnetism*, un testo che conteneva quattro equazioni che riassumono in maniera mirabile l'insieme dei fenomeni elettrici e magnetici conosciuti al tempo.

Le equazioni di Maxwell nella loro forma moderna (differenziale) possono essere scritte come segue:

$$\nabla \wedge E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (1.4)$$

$$\nabla \wedge H = \frac{\partial D}{\partial t} + J_e \quad (1.5)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (1.6)$$

$$\nabla \cdot D = \rho \quad (1.7)$$

Tali equazioni, definite da E. Segré (1905-1989) il “fiat lux della fisica classica” ([SGR85]) sono uno dei livelli più elevati a cui giunse la scienza dell’ottocento.

Capitolo 2

Qualche concetto di meccanica quantistica

La meccanica quantistica è formata da un insieme di teorie le quali descrivono il funzionamento del mondo su scala atomica. Proprio il fatto che la scala in cui avvengono gli effetti descritti sia così distante dal mondo con cui siamo abituati ad avere a che fare ogni giorno riveste i fenomeni quantistici di un'aura un po' misteriosa. Il motivo fondamentale è che *gli oggetti su scala molto piccola non si comportano come nulla di cui abbiamo esperienza diretta*. Essi non possono essere considerati come palline, nuvolette, molle od altro semplicemente perché il quadro all'interno del quale essi sono inseriti è fondamentalmente diverso da quello a noi familiare.

Questo fatto generò una grande confusione agli inizi del ventesimo secolo e molti grattacapi agli studiosi (fra cui il grande Einstein, che pure ricevette il premio Nobel per la descrizione dell'effetto fotoelettrico, uno dei primi fenomeni dichiaratamente quantistici scoperti).

Questa situazione si risolse in parte con la definizione formale della meccanica quantistica che ebbe luogo a partire dalla metà degli anni venti con esponenti del calibro di Schrödinger, Heisenberg e Bohr. Essi furono in grado di sviluppare una descrizione accurata e soprattutto *coerente* dell'insieme dei fenomeni su scala atomica. Il punto è che la teoria quantistica non è una teoria intuitiva e non si propone di fornire delle spiegazioni; in maniera ancora più evidente che negli altri campi della fisica, le basi della meccanica quantistica sono state accettate non perché ragionevoli, ma piuttosto perché fornivano delle *previsioni* in accordo con i risultati sperimentali.

In questo lavoro vorremmo dare un'idea del cosiddetto *dualismo onda-particella*, aspetto della meccanica quantistica che tolse il sonno per un bel po' di tempo a molti studiosi. In particolare, presenteremo un semplice esperimento ideale in cui osserveremo il comportamento dapprima di due oggetti del nostro

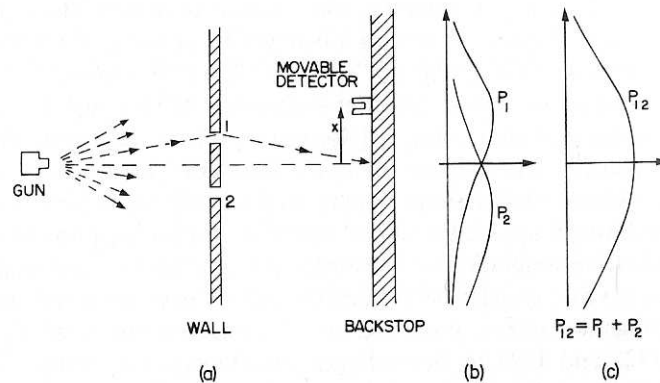


Figura 2.1: Un esperimento con pallottole

mondo non quantistico (delle pallottole sparate da un fucile e delle onde su di uno stagno) e poi un oggetto come un elettrone. L'impostazione didattica è quella del [FYN66], uno dei testi universitari più affascinanti di introduzione alla meccanica quantistica.

2.1 Un esperimento con pallottole

La configurazione sperimentale è la seguente ed è visibile in figura 2.1 a:

- vediamo sulla sinistra una pistola od un fucile a canne corte (“*gun*”) il quale, grazie o ad una cattiva qualità della canna, oppure ad una notevole imperizia di colui che utilizza l’arma, spara una serie di proiettili su un ampio ventaglio in verticale
- in centro, troviamo un muro che presenta due fessure, le quali consentono ai proiettili di passare solamente se sono emessi lungo una direzione determinata da parte della pistola. Supponiamo inoltre che l’energia di ogni proiettile non sia sufficiente a far sì che in una collisione vi sia distruzione della pallottola
- sulla destra, abbiamo un rilevatore mobile, come una cassetta di sabbia, all’interno della quale possiamo contare il numero di proiettili che arrivano in una certa posizione.

Se noi su un foglio di carta rappresentiamo il numero di pallottole raccolte in base alla posizione del “sensore” (la cassetta di sabbia), otteniamo dei punti

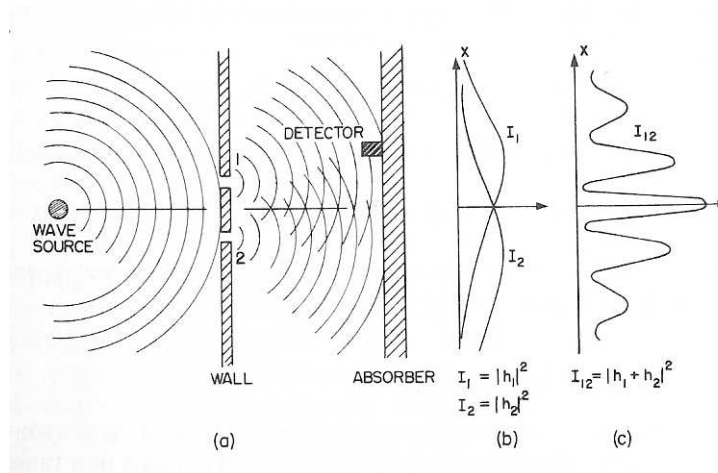


Figura 2.2: Un esperimento con le onde

che uniti ci danno una curva continua. In figura 2.1 *b*, vediamo l'insieme di queste curve; sulla sinistra, P_1 è la curva che si rileva con la sola fessura 1 aperta e P_2 quella con la sola fessura 2 aperta. Mettendo in opera il congegno rappresentato, possiamo effettuare delle osservazioni piuttosto interessanti, le quali possono essere riassunte nei punti seguenti, che riflettono il carattere squisitamente “corpuscolare” della nostra esperienza.

- i proiettili arrivano per unità *discrete*, e non si trovano delle pallottole divise a metà
- la curva che indica il numero di proiettili raccolti dalla cassetta di sabbia in base alla posizione varia quando vi sono una o due fessure aperte. La curva P_{12} , che si ottiene con le due fessure aperte è pari alla somma delle curve che si ottengono chiudendo alternativamente l'una o l'altra fessura.

In termini tecnici, il secondo risultato viene riassunto con la frase che *le due feritoie non danno luogo ad interferenza*.

2.2 Un esperimento con le onde

Immaginiamo di trovarci a lavorare su di uno stagno sufficientemente calmo e di adottare un dispositivo molto simile a quello già visto nel paragrafo 2.1. Come è visibile in figura 2.2 *a*, abbiamo:

- sulla sinistra, un dispositivo che ci consente di creare delle onde nello stagno, per esempio un pistone mosso da un motore ad un ritmo regolare
- in centro, uno schermo con due feritoie le quali sole lasciano passare le perturbazioni dell'acqua
- sulla destra, un rilevatore, per esempio un sughero che muove un pennino intinto nell'inchiostro, oppure più semplicemente una spiaggetta in cui le onde lasciano un segno proporzionale alla loro intensità (e non si riflettono).

Ripetiamo come nel caso precedente la nostra esperienza e prendiamo nota dell'ampiezza delle oscillazioni dell'acqua dapprima con una sola fenditura aperta, e poi con entrambe le fessure. Se le figure che otteniamo con una sola fenditura non differiscono in maniera significativa rispetto al caso dei proiettili (vedi figura 2.2 *b*), le sorprese arrivano con le due fenditure: l'ampiezza delle onde in certi punti è doppia di quanto ci aspetteremmo semplicemente sommando le due curve P_1 e P_2 , mentre in certi altri l'ampiezza delle oscillazioni è nulla.

Tale fenomeno va sotto il nome di *interferenza* ed è un comportamento intrinseco dell'aspetto ondulatorio dell'esperienza che abbiamo svolto: in certi punti, l'ampiezza delle onde provenienti dalle due fenditure si somma costruttivamente ed abbiamo un'intensità risultante notevole, in altri le due onde arrivano in "opposizione di fase" e si annullano reciprocamente.

2.3 Un esperimento con gli elettroni

Forti della nostra esperienza maturata con oggetti macroscopici, avendo una idea chiara di che cos'è un'onda ed una particella, cercheremo di dirimere la questione sul comportamento dell'elettrone ed effettueremo un esperimento mentale in tutto e per tutto analogo ai precedenti, salvo per la scala che deve essere molto più piccola.

Il nostro dispositivo è visibile in figura 2.3 *a*; come al solito, ci troviamo davanti:

- sulla sinistra, una sorgente, come un semplice filamento riscaldato che emette elettroni attorno a sé ed un elettrodo che li accelera nella direzione voluta (tale oggetto è chiamato cannone elettronico, *electron gun* ed è presente in ogni tubo catodico di televisione o monitor che non sia LCD)

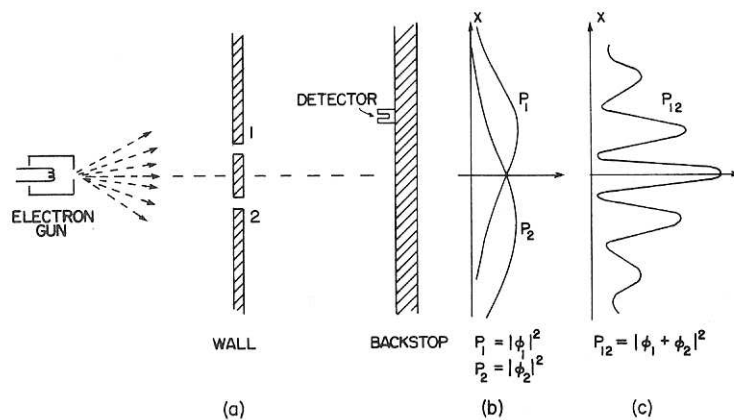


Figura 2.3: Un esperimento con gli elettroni

- in centro, abbiamo una parete con due fenditure molto vicine che (come nei casi precedenti) possono essere chiuse alternativamente
- sulla destra un rivelatore, in questi casi si usa un fotomoltiplicatore, aggancio estremamente sensibile che dà un segnale elettrico ogni volta che arriva un elettrone in ingresso

Sia con una che con due fessure aperte osserviamo un primo fatto che ci porterebbe a propendere per una descrizione di tipo particellare dell'elettrone: il segnale elettrico che osserviamo (si potrebbe anche ascoltare collegandolo ad un altoparlante: click!) è sempre della stessa intensità; non rileviamo “mezzi elettroni”, ma solo impulsi della medesima ampiezza spaziati in modo variabile nel tempo: click, click, ... click!

Se tuttavia effettuiamo una misura con le due fenditure aperte e teniamo traccia del numero di elettroni che arrivano in un dato luogo in una certa durata di tempo, notiamo dei fenomeni di interferenza estremamente evidenti (figura 2.3 c), che ci porterebbero a considerare l'elettrone come un'onda.

La risposta al quesito se un elettrone sia un'onda, oppure una particella è semplice: entrambi gli aspetti sono dei modelli, delle *teorie* di tipo macroscopico che da sole non sono sufficienti per formare una teoria soddisfacente dell'elettrone. *Non è possibile creare delle equivalenze macroscopiche che tengano conto del carattere quantistico dell'elettrone.*

Quello che importa comunque è che attualmente esiste una teoria completa e coerente che descrive l'elettrone in moltissime circostanze. Un'interpretazione che si può dare è quella di associare ad un elettrone un'ampiezza di probabilità, ovvero a un numero complesso, variabile nel tempo, che è

legato alla probabilità di rilevarlo in un dato istante (attraverso un'operazione molto semplice). Tali ampiezze di probabilità introducono un aspetto ondulatorio all'interno della descrizione dell'elettrone e consentono di descrivere molto bene gli aspetti di interferenza che abbiamo "osservato" nel nostro esperimento mentale.

Per il lettore interessato, una presentazione ampia, ma accessibile, di un tale tipo di teoria è disponibile in [FYN85].

2.4 Il principio di indeterminazione

Una delle prime cose che si impara in fisica (soprattutto per quanto riguarda i corsi di fisica "classica") è che ogni misura è affetta da errore. Nel paradigma classico, l'errore e lo studio statistico degli errori è uno degli argomenti più importanti della teoria e nasce dal fatto che non è possibile materialmente controllare tutti gli aspetti che influiscono sullo strumento con il quale effettuiamo tale misura. In altre parole, l'approccio probabilistico di analisi degli errori riflette in qualche modo una condizione di ignoranza che non siamo in grado di risolvere in nessun altro modo se non facendo ricorso alla statistica ed alla probabilità.

In meccanica quantistica, la situazione è ben differente in quanto divenne via via sempre più chiaro come nel mondo su scala atomica una descrizione deterministica non fosse adeguata a cogliere l'essenza delle cose, ovvero non poteva fornire delle previsioni accettabili. Se in fisica classica la probabilità e non la certezza era indice di un'ignoranza su determinate variabili che non potevano esser controllate nell'ambito dell'esperimento analizzato, in meccanica quantistica la situazione è rovesciata: *una certa dose di probabilità è intrinseca nella descrizione su piccola scala del mondo*. Pensiamo ad un atomo di idrogeno: la posizione dell'elettrone non è definita all'interno del suo orbitale; possiamo solo calcolare (con l'equazione di Schrödinger) per ogni punto intorno al nucleo la probabilità in un dato istante di rilevare con qualche mezzo un elettrone: click!

Questa descrizione in termini di probabilità rappresenta una conseguenza matematica ineccepibile delle formulazioni attuali della meccanica quantistica. Ogni descrizione quantistica del mondo deve tener in conto di questo aspetto.

Una conseguenza fondamentale è che non è possibile effettuare delle misure senza perturbare un sistema: se nel mondo macroscopico possiamo pensare di escogitare degli strumenti di misura piccoli a piacere, in modo da perturbare in maniera infinitesima il sistema in esame, nel mondo degli atomi questo "piccolo a piacere" deve arrestarsi a un certo punto.

Una delle formulazioni più conosciute del principio di indeterminazione di Heisenberg è quella che sancisce che il prodotto delle indeterminazioni dello spazio e della velocità non può essere inferiore ad una certa soglia che, guarda caso, è proprio dell'ordine della costante di Plank, così importante a quelle scale:

$$\Delta x \cdot \Delta v \geq \frac{h}{m} \quad (2.1)$$

ove m è la massa dell'oggetto in questione. Un'altra conseguenza del principio di indeterminazione scritto sotto questa forma è che non è più possibile parlare di *traiettoria* di una particella, intesa come luogo dei punti che vengono attraversati nel tempo.

Bisogna comunque far presente che in una descrizione quantistica non sono solo lo spazio e la posizione ad esser soggette ad un principio di indeterminazione, ma vi sono altre coppie di osservabili (ossia quantità che possono essere fatte oggetto di una misura) le quali sono interessate da una relazione di questo tipo.

2.5 Conclusione

In questo breve capitolo, abbiamo presentato alcuni aspetti della meccanica quantistica e ci siamo concentrati soprattutto sul dualismo onda-particella e sul principio di indeterminazione. Resta inteso che la nostra breve trattazione è ben lungi dal trattare in maniera adeguata la faccenda, ed invitiamo il lettore interessato a far riferimento ai testi di carattere introduttivo citati in bibliografia.

Bibliografia

- [FYN89] R. Feynman *Che t'importa di ciò che dice la gente*, 1989 Zanichelli, Collana le Ellissi
- [FYN65] R. Feynman *La legge fisica*, 1971 Bollati Boringhieri, Torino ed. it *The Character of the Physical Law*, 1965 British Broadcasting Corporation, London
- [BCC01] D. Bucci *Galileo Galilei, la nascita del pensiero scientifico moderno*, 2001 disponibile nel sito Internet: www.geocities.com/leibowitz.geo/galilei_pag1_it.htm
- [FYN85] R. Feynman *QED, la strana teoria della luce e della materia*, 1989 Adelphi, ed. it. *QED, The Strange Theory of Light and Matter*, 1985
- [GMW61] G. Gamow, *Biografia della fisica*, Oscar saggi Mondadori, ed. it *Biography of Physics*, 1961, Harper Moderns Science Series
- [SGR85] E. Segre, *Personaggi e scoperte della fisica*, Oscar saggi Mondadori
- [FYN66] R. Feynman *The Feynman Lectures on Physics*, 1966, Addison Wesley
- [BLT00] E. Beltrametti (a cura di) *Quaderno di Le Scienze: Fenomeni quantistici*, 2000, La Nuova Italia Editrice S.p.A
- [ENS38] A. Einstein, L. Infeld *L'evoluzione della fisica*, 1965, Boringhieri, Torino, ed. it. *The Evolution of Physics*, 1938
- [RSS88] P. Rossi (a cura di) *Storia della Scienza Moderna e Contemporanea: Dalla rivoluzione scientifica all'età dei lumi*, 1988, UTET, Torino