

Possibile introduzione di modelli quantomeccanici a livello di scuola secondaria superiore.

Avvicinamento al concetto di orbitale - Parte I

Roberto Soldà
roberto.solda@libero.it

Riassunto

Nella prima parte del presente articolo vengono discusse le difficoltà che si incontrano nell'affrontare argomenti quali "struttura atomica" e "legame chimico" in termini di meccanica quantistica a livelli di scuola secondaria superiore senza le dovute cautele e senza predisporre le necessarie premesse.

L'argomento viene analizzato mettendo a confronto punti di vista qualificati e cercando di cautelare i docenti rispetto a una tradizione didattica eccessivamente semplificatoria che ha dominato in gran parte gli interventi di questo tipo.

In chiusura di questa discussione, si consiglia di affrontare l'argomento con l'aiuto di attività di laboratorio (vedi seconda parte dell'articolo) e intanto si invitano i docenti a fare in modo che gli alunni prendano familiarità con l'argomento attraverso letture e simulazioni al computer.

1. Premessa

Anche se i concetti della meccanica quantistica e soprattutto quello di orbitale sono ad alto contenuto formale e astratto, alcuni di essi fondamentali possono essere esposti in forma elementare, pur implicando una approfondita padronanza della meccanica quantistica e un notevole grado di consapevolezza del livello di sviluppo cognitivo raggiunto dagli allievi ai quali si intende proporre una introduzione alla meccanica quantistica (MQ). Ciò premesso, vengono espresse alcune osservazioni e considerazioni che si ritengono utili per gli insegnanti, al fine di presentarla in modo corretto.

Quindi per sopperire almeno parzialmente alle difficoltà di comprensione dei concetti astratti e altamente formali da parte dei ragazzi che nella maggioranza dei casi, in base alle ricerche pedagogiche di M. Shayer, hanno appena completato o stanno completando uno stadio di sviluppo cognitivo adeguato, si evidenzia come si possono sfruttare convenientemente le conoscenze pregresse acquisite.

In prima analisi è noto come nella scuola secondaria sia buona prassi presentare la struttura atomica basandosi sul modello atomico a gusci anziché su quello orbitalico; sarebbe infatti una operazione spericolata tentare di utilizzare, senza le dovute cautele, il modello ad orbitali per spiegare la struttura atomica e i legami chimici data la sua intrinseca difficoltà concettuale.

Tuttavia ho l'impressione che, adducendo come motivazione il fatto che la meccanica quantistica è poco intuitiva, venga tralasciato quanto in prospettiva potrebbe essere utile ai ragazzi delle scuole secondarie superiori.

In due articoli pubblicati abbastanza recentemente in questa rivista Villani [1,2] ha rilevato giustamente che *"l'immagine del mondo che la scienza contemporanea ha elaborato nel secolo XX e le problematiche filosofiche da essa aperte sono cose "spettacolari" ed "inedite" che col tempo dovrebbero permeare anche la cultura in generale e quella scientifica non specialistica in particolare"*. Ancora Villani afferma *"È ormai quasi un secolo che è nata la meccanica quantistica. Tuttavia, proprio a causa della sua "originale" visione del mondo a tutt'oggi essa è largamente utilizzata, ma poco padroneggiata. Se questo è un handicap a livello di ricerca specifica, diventa un grosso problema per la didattica sia universitaria sia secondaria. Si è, quindi, sviluppato un movimento tendente a risolvere il problema a monte eliminando l'utilizzo di concetti quantistici nelle scuole secondarie ed oltre. La mia posizione è, invece, che il docente deve padroneggiare tali concetti decidendo poi autonomamente scuola per scuola e classe per classe fino a che punto è possibile fare intuire, se non completamente capire, tali concetti moderni. L'approfondimento della nascita della meccanica quantistica e del suo successivo sviluppo consente, inoltre, concrete possibilità di studio interdisciplinare della Scienza con la Filosofia e la Storia"*[3]

Da parte sua Del Re ha fatto vedere[4] che *"...concetti come quello di orbitale sono potenti ausili nella spiegazione della struttura molecolare a livello di meccanica quantistica, e che escluderli dal discorso didattico solo perché non sono rigorosi può negare agli allievi l'occasione di conoscere uno dei modi in cui si arriva a una scoperta scientifica."*

E ciò vale per tutti i concetti della meccanica quantistica oltre che per quello di orbitale.

Da un'indagine personalmente svolta emerge che in generale gli insegnanti di fisica nella scuola media superiore, tranne che in alcuni licei scientifici ed in certi istituti tecnici, non trattano l'orbitale adducendo la mancanza di tempo disponibile e la conseguenza è che, per consolidata consuetudine, la trattazione dell'orbitale viene delegata agli insegnanti di chimica.

Comunque il "modello ad orbitali", oltre ad essere più complesso di quello a gusci, non è indispensabile per spiegare la struttura atomica, i legami chimici e la geometria delle molecole in un corso di chimica di base. Di conseguenza in alcuni testi di chimica generale per la scuola media superiore vengono tralasciate le esperienze, i concetti fondamentali e le teorie che hanno consentito di elaborare la teoria quanto-meccanica dell'atomo.

In definitiva, si può dire che attualmente l'insegnamento, non tanto del concetto di orbitale ma soprattutto dei concetti di base della meccanica quantistica che sarebbero accessibili ai ragazzi, rischia di venire disatteso negli insegnamenti d'ambito scientifico.

Tale inconveniente, a mio avviso, può essere evitato se si introducessero in modo efficace alcuni concetti fondamentali della meccanica quantistica, mediante una trattazione alla portata degli studenti secondari, compatibilmente con le loro conoscenze di matematica e di fisica.

In tale modo tutti gli allievi avrebbero la possibilità di apprendere a scuola tali concetti, tenendo anche presente che, come è stato sottolineato giustamente, l'informazione oltre a servire, come base sulla quale sviluppare l'apprendimento consapevole, serve come incentivo alla motivazione e quindi alla indispensabile "voglia di apprendere"[5].

D'altro canto lo stesso professore Mirone, che pure propende per il modello a gusci, in un articolo pubblicato parecchi anni fa[6] riconosce che anche a livello di scuola secondaria è possibile un'introduzione degli elementi di meccanica quantistica nell'insegnamento scientifico sempre preservando un certo rigore scientifico.

Questo è tanto più vero ora che, grazie all'ausilio del computer, gli esperimenti di una certa complessità, non realizzabili in un laboratorio scolastico, possono essere non solo visti ma addirittura simulati con la partecipazione attiva dei ragazzi.

Nella seconda parte di questo articolo verrà proposto appunto un percorso didattico che potrebbe servire come base sperimentale per affrontare la trattazione di alcuni concetti della meccanica quantistica, compreso un certo avvicinamento al concetto di orbitale.

In questa prima parte ci soffermeremo su alcune osservazioni relative agli esperimenti di interferenza con doppia fenditura ed alcune considerazioni circa la relazione fra funzione d'onda, probabilità e il principio d'indeterminazione.

2. Osservazioni relative agli esperimenti d'interferenza con doppia fenditura

Per quanto riguarda il comportamento ondulatorio degli elettroni, solitamente nei testi scolastici di chimica per la Scuola Secondaria Superiore, viene ricordato solamente l'esperimento di diffrazione degli elettroni con il quale i ricercatori americani J. Davisson e L. H. Germer e i ricercatori inglesi G. P. Thomson e A. Reid confermarono l'ipotesi di De Broglie (1927) circa la doppia natura, particellare e ondulatoria degli elettroni. Ma nel 1959 venne eseguito per la prima volta da G. Möllenstedt e C. Jönsson un esperimento di interferenza con un fascio di elettroni attraverso una doppia fenditura, analogo all'esperimento condotto da T. Young sui fotoni.

L'esperimento di Möllenstedt e Jönsson fu importante, soprattutto dal punto di vista didattico, perché un'analisi dell'esperimento di interferenza da doppia fenditura è il modo più diretto per introdurre il concetto di ampiezza di probabilità ed il principio di sovrapposizione che sono l'essenza del comportamento quantistico. Questo esperimento, presentato per molti anni come esperimento "pensato", diventò quindi più convincente di quello della diffrazione per dimostrare la natura ondulatoria degli elettroni.

Tuttavia, per rendere tale esperimento ancora più interessante, occorre mostrare che il fenomeno d'interferenza veniva prodotto anche dal passaggio di un solo elettrone per volta e che quindi il comportamento ondulatorio **non era da associarsi al fascio di elettroni ma al singolo elettrone**.

Nel 1974 tre ricercatori italiani: P. G. Merli, G. F. Missiroli e G. Pozzi, dell'Università di Bologna, riuscirono a portare a termine l'esperimento, usando un potente microscopio elettronico che per la prima volta poteva rilevare anche il passaggio di un singolo elettrone. Consapevoli dell'importanza concettuale che rivestiva la realizzazione dell'interferenza di singolo elettrone, realizzarono in laboratorio il famoso esperimento ideale della fisica quantistica e filmarono la formazione delle frange di interferenza.

Tale esperimento venne realizzato alcuni anni dopo nel 1989 anche dal giapponese Akira Tonomura e dal suo gruppo.

Le immagini del film mostrano che le frange si formano allo stesso modo se si aumenta costantemente il numero di elettroni che passano o se viene registrato in tempi successivi l'effetto di un singolo elettrone e confermano che **un elettrone, in tali condizioni sperimentali, si comporta come un'onda**.

L'esperimento di interferenza degli elettroni con la doppia fenditura ci insegna che gli elettroni, che attraversano la fenditura nello schermo, contribuiscono uno ad uno a produrre sulla lastra una figura di interferenza simile a quella ottenuta con la luce; tuttavia non è corretto pensare ad un elettrone (o ad un qualunque altro sistema quantistico) come ad un'onda di materia, perché il singolo elettrone, incidendo sul rivelatore, non produce una figura di interferenza, ma solo un puntino annerito ben definito; non è nemmeno corretto pensare alla funzione d'onda del sistema quantistico come ad una grandezza che esprime le proprietà ondulatorie collettive ad esempio di tutti gli elettroni che, col tempo, incidono sul rivelatore, perché sappiamo che l'esperimento produce gli stessi risultati anche quando gli elettroni sono inviati attraverso la doppia fenditura e contro il rivelatore uno per volta, senza che abbiano la possibilità di interagire (e

quindi di interferire) l'uno con l'altro; le proprietà ondulatorie della materia che emergono dall'esperimento sono pertanto da attribuire alla singola particella quantistica (un elettrone, in questo caso), e non a fenomeni di tipo statistico derivanti dall'averne un gran numero di particelle interagenti tra di loro. La funzione d'onda non è quindi un'onda di materia, ma deve essere un'onda di probabilità affinché sia salvaguardata la natura intrinsecamente probabilistica del fenomeno a causa del quale l'elettrone che attraversa la doppia fenditura dà interferenza.

A proposito di questo esperimento, credo interessante comunque riprendere, a uso e consumo degli insegnanti, alcuni commenti direttamente dalla letteratura.

“...Merli, Missiroli e Pozzi (indicati con MMP) furono i primi a realizzare un esperimento reale più ricco e suggestivo di quello ideale, direi più “pulito”. Inoltre, il loro esperimento dimostra - su base empirica, appunto - che una serie di tentativi di spiegazione precedentemente avanzati non sono praticabili. Il problema è: come si formano le frange? Qual è il meccanismo sottostante? Le risposte si radicano nel significato stesso della Meccanica Quantistica (MQ), ovvero come vadano interpretate le formule che vi compaiono, e quali siano le implicazioni filosofiche che ne conseguono. Esiste una vastissima letteratura sull'argomento. Ora però rimaniamo sull'esperimento, riprendendo, come esempi, alcune spiegazioni che sono state avanzate. Sarò necessariamente schematico. Prima spiegazione. La distribuzione che vediamo è quella che descrive l'intensità luminosa nei fenomeni di interferenza della luce in quanto riflette la natura stessa degli enti che generano la distribuzione. Oppure, all'opposto, l'esperimento ci mette in guardia dal non confondere le proprietà di una distribuzione statistica con le proprietà degli enti esaminati per costruire la distribuzione. Nella prima ipotesi, se si ammette l'esistenza di un'onda reale (o un pacchetto d'onde) di natura fisica nota, ossia elettromagnetica, associata in qualche modo all'elettrone, allora il meccanismo di formazione delle frange è spiegabile (come per altro è stato proposto) se si ritiene che l'elettrone riveli: a) nell'emissione la sua natura di corpuscolo, b) nel dispositivo interferenziale la sua natura di onda, c) nello schermo di ricezione nuovamente la natura di corpuscolo. Ma questa ipotesi è tagliata fuori dall'esperimento, in quanto (cito MMP) “in questo caso avremmo dovuto avere delle frange d'intensità decrescente al decrescere dell'intensità della corrente”. Ma ciò non avviene. Nella seconda ipotesi, le frange sono un epifenomeno. Gli elettroni sono corpuscoli e basta.

Alcuni anni prima dell'esperimento di MMP, l'esperimento ideale fu rivisitato da Karl Popper, uno dei massimi filosofi del 1900, sulla scorta di una sua invenzione filosofica, ossia una nuova interpretazione della probabilità su basi non epistemiche. In questa interpretazione, la probabilità è una proprietà oggettiva della situazione fisica. Qualcosa come una forza newtoniana, ma di carattere non deterministico, che agisce sulla singola particella. Senza entrare nell'argomento, basti dire che le idee di Popper furono riprese nel 1970 dal fisico Leslie Ballantine e ancora si ritrovano in un suo recente (ed eccellente) testo di MQ, la cui ultima ristampa è del 2003. Per Popper (e Ballantine) gli elettroni sono corpuscoli, non vi sono onde associate, né pacchetti d'onda.

La MQ sarebbe una teoria statistica, nel senso della meccanica statistica, una teoria che parla di insiemi di entità, non di elementi singoli. Sullo sfondo, detto per inciso, c'è uno dei più grandi dibattiti della storia della scienza, quello tra Einstein e Bohr sulla completezza o meno della MQ. Se gli elettroni sono soltanto corpuscoli, la formazione delle frange è spiegata su un'idea risalente al 1923, ossia come il risultato di trasferimento di impulso, impulso meccanico e quantizzato, tra il singolo elettrone e la struttura periodica (anche di periodo 2, come nell'esperimento ideale) dell'apparato interferometrico.

Ma anche questa spiegazione si rivela insostenibile, in quanto nell'esperimento reale le due fenditure sono puramente virtuali e non vi è alcun trasferimento di impulso meccanico, come per altro sottolineano MMP: “non vi è alcuna interazione dell'elettrone con il materiale”. Gli elettroni, infatti, sono deviati da un filo carico elettricamente. L'esperimento reale però non compare negli scritti successivi di Popper, anche se il filosofo ancora si dilunga sull'esperimento delle due fenditure, quello ideale. Va detto che su tutta la letteratura filosofica, l'esperimento di MMP non ebbe praticamente alcuna influenza.

Infine, è stata più volte avanzata l'idea, prima e anche una decina d'anni dopo l'esperimento di MMP, che le frange si potrebbero generare grazie al fatto che gli elettroni interagiscono in qualche modo tra loro. Ma nell'esperimento (cito MMP) “gli elettroni sono separati in media fra loro da una distanza dell'ordine della decina di metri per cui passano nel dispositivo interferometrico uno alla volta”. Nella loro vita, dunque, gli elettroni non si incontrano mai.

Quando uno nasce (è emesso), il precedente è già morto (assorbito). Questo è il punto essenziale ed il grande pregio dell'esperimento. Certo, gli elettroni non hanno tra loro alcuna forma di interazione nota, pure sembrerebbe che ciascuno di essi sappia che deve cooperare con chi l'ha preceduto e con quello che seguirà, al fine di riprodurre tutti insieme (quando sono alcune decine di migliaia) le figure dell'ottica ondulatoria.

Ciò che l'esperimento porta alla luce, quindi, è la tensione tra il singolo e l'insieme, tra l'uno e i molti. Nel singolo elettrone misuriamo proprietà quali la carica, la massa, lo spin. Ma man mano che l'individualità si perde, una nuova natura dell'elettrone si disvela nell'insieme. Solo nell'insieme emerge un comportamento dinamico che chiamiamo ondulatorio.

L'esperimento, nella sua limpidezza, ci porta - possiamo dire: naturalmente - a riflettere su concetti molto profondi. Forse, e questo è un altro pregio, ci insegna anche nuove strade da esplorare sia sul piano fisico che su quello filosofico.”

“...Resta comunque da stabilire il limite di demarcazione che separa il mondo classico da quello quantistico, la dimensione minima al di sopra della quale è possibile guardare tranquillamente con le nostre consuete convenzioni un qualsiasi oggetto. Una ricerca che vede Markus Arndt ed i suoi colleghi dell'Università di Vienna raggiungere risultati spesso sorprendenti. Ad esempio, nel 1999 sono riusciti a dimostrare che anche il fullerene, una molecola composta da 60 atomi di carbonio disposti secondo una geometria che la rende simile ad un pallone da calcio in miniatura, si muove nello spazio in accordo con quanto previsto dalla meccanica quantistica. Ora lo stesso gruppo si è spinto nell'esame di molecole ancora più complesse come quella di tetraphenilporfirina (TPP), una struttura a forma di disco che ha un diametro doppio rispetto a quella del fullerene. Per dimostrare che questi oggetti si muovono secondo le previsioni quantistiche, si ricorre ad una tecnica capace di rivelare se nel loro movimento manifestano caratteristiche di tipo ondulatorio. In pratica, l'esperimento si basa su una proprietà tipica delle onde, quello di produrre degli effetti d'interferenza, un fenomeno ben noto nel nostro mondo macroscopico. Consideriamo ad esempio un recipiente pieno d'acqua suddiviso da una barriera con una piccola apertura. Se produciamo delle onde da un lato possiamo osservare che al di là del foro si produce un fronte d'onda circolare. Se a questo punto nello schermo viene introdotta una seconda apertura avremo che i due fronti circolari che vengono così a formarsi, si sovrappongono producendo un'onda risultante con un profilo regolare di massimi e minimi che rappresenta il risultato del processo d'interferenza. Si ottiene lo stesso fenomeno anche nel caso di un fascio luminoso e secondo quanto previsto da Louis de Broglie, anche se si prendono in esame delle particelle microscopiche. Gli esperimenti sulla tetraphenilporfirina rivestono un grande interesse, oltre che per le grandi dimensioni della molecola, anche perché all'interno di questa molecola è presente un composto del gruppo chimico della porfirine. Queste sono molecole di grande importanza dal punto di vista biologico, perché permettono alle piante di assorbire la luce ed alla emoglobina del nostro sangue di fissare l'ossigeno. Alle porfirine spetterà adesso anche il merito di avere dimostrato che anche per le macromolecole organiche è valida la meccanica quantistica [7].”

3. Considerazioni didattiche sull'introduzione di alcuni concetti di meccanica quantistica.

L'obiettivo è di “guidare” i ragazzi verso una definizione sufficientemente corretta del concetto di funzione d'onda per un avvicinamento in prospettiva al concetto di orbitale.

Come è noto, la funzione d'onda è una grandezza che gode di due proprietà importanti:

- 1) pur non essendo un'onda fisica, comporta un'ampiezza nel senso che due funzioni d'onda interferiscono costruttivamente o distruttivamente analogamente a due onde fisiche;
- 2) il quadrato della funzione d'onda, calcolato in una data posizione (individuata dalle tre coordinate x, y e z dello spazio), permette di calcolare la probabilità di trovare la particella in quella posizione.

Ebbene il fatto che la funzione d'onda di una particella si comporti, pur non essendo un'onda fisica, come un'ampiezza il cui quadrato serve per calcolare la probabilità di posizione della particella, permette l'utilizzazione degli “elementi di probabilità” a conoscenza degli allievi e soprattutto un approccio sperimentale al concetto di funzione d'onda.

In questo approccio gioca un ruolo fondamentale il concetto di probabilità che è indispensabile anzitutto per comprendere la relazione di proporzionalità quadratica fra probabilità ed ampiezza, secondo la seguente relazione:

$$\text{Probabilità} = K \cdot A^2$$

dove con A si indica l'ampiezza.

Pertanto, prima di “iniziare” i ragazzi alla meccanica quantistica, è consigliabile approfondire gli elementi di statistica e il concetto di probabilità che vengono accennati nella scuola primaria e poi ripresi in quella secondaria di primo grado (come è noto argomenti di probabilità e statistica sono presenti nei programmi della scuola primaria fin dal 1985 e nella scuola secondaria di primo grado a partire dal 1979).

Inoltre è opportuno sottolineare che sperimentare con un fascio di elettroni è come eseguire un grande numero di misure e che, in tali condizioni, come con i sistemi costituiti da un numero molto elevato di elementi, assume importanza la statistica e, appunto, il concetto di probabilità.

Poi, per quanto riguarda le varie relazioni (la relazione di Einstein per l'effetto fotoelettrico, la relazione di De Broglie, ecc.), è necessario introdurle, partendo sempre da osservazioni o, comunque, da dati sperimentali senza farle imparare a memoria e con domande adeguate al fine di ottenere non un apprendimento mnemonico, bensì la comprensione di tali relazioni.

E ciò, a maggiore ragione, vale naturalmente anche per la relazione fra la funzione d'onda e la probabilità e la relazione d'indeterminazione di Heisenberg.

Entrambe le relazioni devono scaturire in base alle osservazioni che, come viene esposto più avanti, gli allievi con la guida dell'insegnante possono trarre dall'esperimento relativo all'effetto fotoelettrico, dalla simulazione al PC dell'esperimento alla Young e dall'analisi delle varie figure relative all'esperimento alla Young, che verranno loro fornite insieme alla scheda con le domande.

Tuttavia prima di iniziare l'attività didattica vera e propria, vista l'oggettiva difficoltà dei concetti che si vogliono intro-

Avvicinamento al concetto di orbitale – Parte I

durre, sarebbe opportuno utilizzare alcuni strumenti atti a familiarizzare lo studente con i concetti suddetti. In questo modo è possibile, da un punto di vista psicologico, predisporre un atteggiamento positivo da parte dello studente.

Possono essere usati strumenti diversi a seconda dell'esperienza del docente. In questa sede se ne suggeriscono due:

1) si anticipa la visione delle simulazioni al computer delle esperienze di interferenza, seguite da discussione con il docente; queste simulazioni verranno rivisitate dopo che i concetti saranno stati sperimentalmente introdotti. In Internet si trovano programmi di questo tipo[8].

2) si ricorre alla lettura di "favole metaforiche" quali "Alice nel paese dei quanti"[9], di cui si riporta un estratto in appendice.

Testi consultati

U. Amaldi, *Il mondo della fisica*, Zanichelli Editore, Bologna, 1991.

P. W. Atkins, *Chimica fisica*, Zanichelli Editore, Bologna, 1994.

F. Bueche, *La scienza della fisica*, Zanichelli Editore, Bologna, 1977.

C.A. Coulson, *La valenza*, Zanichelli, Bologna, 1961.

R. E. Dickerson, I. Geis, *Chimica, materia e universo*, Zanichelli Editore, Bologna, 1980.

M. Fazio, M. C. Montano, *Fisica*, vol. 3°, Arnoldo Mondadori Editore, Milano, 1991.

R. J. Gillespie, D. A. Humphreys, N. Colin Baird, E. A. Robinson, *Chimica*, Società Editrice Scientifica, Napoli, 1990.

M. Guardo, *Lezioni di chimica fisica*, vol. 1°, Zanichelli Editore, Bologna, 1989.

G. Herzberg, *Spettri atomici e struttura atomica*, Edizioni Universitarie Boringhieri, Torino, 1961.

G. Manuzio, G. Passatore, *Verso la fisica*, Casa Editrice Principato, Milano, 1990.

MPI, *Conferenze di fisica dai corsi di aggiornamento per gli insegnanti delle scuole secondarie*, vol. 2°, Feltrinelli Editore, Milano, 1967.

L. Pauling, *La natura del legame chimico*, Edizioni italiane, Roma, 1960.

L. Pauling, E. B. Wilson, *Introduzione alla Meccanica Quantistica*, Piccin Editore, Padova, 1968.

G. C. Pimentel, R. D. Spratley, *Chimica generale*, Zanichelli Editore, Bologna, 1975.

Bibliografia

[1] G. Villani, *CnS-La Chimica nella Scuola*, 2003, **25**, 123

[2] G. Villani, *CnS-La Chimica nella Scuola*, 2005, **27**, 138

[3] G. Villani, *SPAIS 2006 Scuola Permanente per l'Aggiornamento degli Insegnanti di Scienze*, Castello di Caccamo, Palermo.

[4] G. Del Re, *CnS-La Chimica nella Scuola*, 2007, **29**, 145

[5] P. Riani, M. V. Massidda, *CnS-La Chimica nella Scuola*, 2004, **26**, 4

[6] P. Mirone, *CnS-La Chimica nella Scuola*, 1980, **2**, 1S

[7] http://guide.supereva.it/fisica_applicata/interventi/2003/09/142826.shtml

[8] <http://video.google.com/vodeoplay?docid=2103619420771405578#>

<http://lxml.infin.mi.infin.it/~phys2000/>

[9] R. Gilmore, *Alice nel paese dei quanti*, Raffaello Cortina Editore, Milano, 1996

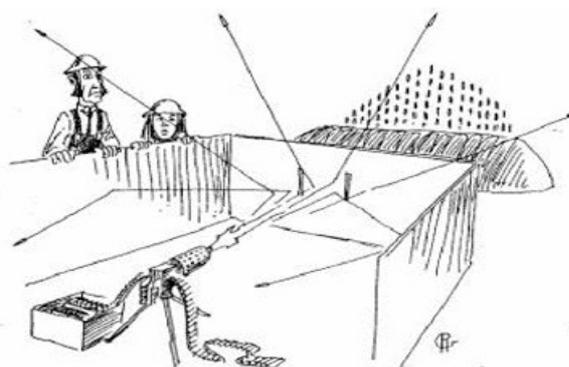
Appendice

"Alice nel paese dei quanti" (9). pag. 52-56.

...Guarda come sono fatte le onde sotto la freccia verde!", strillò il Meccanico, che era eccitatissimo - senza alcuna necessità, a parere di Alice. Lei fece però come le diceva e vide che nel punto indicato l'acqua era rialzata in entrambe le situazioni. "Ciascun foro del muretto ha prodotto un'onda che in un punto particolare si innalza: quando entrambi i fori sono aperti qui l'onda è due volte più alta, e complessivamente la salita e la discesa dell'acqua è molto maggiore che quando c'è un buco solo. Questa è ciò che si chiama interferenza costruttiva". "Ora guarda che succede alle onde sotto la freccia rossa". Alice si rese conto che mentre uno dei due fori in quel punto produceva un innalzamento, l'altro produceva un avvallamento della superficie. "Tu capisci che in questa posizione l'onda che viene da un buco va su, mentre l'altra si abbassa: quando sono presenti tutte e due insieme, si cancellano l'un l'altra, e l'effetto globale è nullo. Questa è ciò che si chiama interferenza distruttiva". "Questo è tutto ciò che c'è veramente da dire sull'interferenza delle onde. Quando due onde si sovrappongono e si combinano una con l'altra, le loro ampiezze (cioè, come ti ho già detto, quanto vanno in su o in giù) fanno altrettanto. In alcuni punti le onde che danno un contributo al fenomeno vanno tutte nella stessa direzione, così i disturbi si sommano e si ottiene un effetto maggiore. In altri vanno invece in direzioni diverse e si cancellano una con l'altra". "Sì, credo di star cominciando a seguirLa", disse Alice. "Sta dicendo che le porte della Banca Heisenberg funzionavano come le fessure del muretto e facevano una specie di effetto più grosso nel posto dove avevo bisogno di andare, mentre in altri luoghi si cancellavano a vicenda. Però non riesco a capire come l'interferenza possa funzionare nel mio caso. Con le onde dell'acqua Lei ha detto che c'è un'onda più grossa in un posto e più piccina in un altro perché c'è questa interferenza. Ma io non sono un'onda. Le onde si diffondevano su tutta la superficie, mentre io sono sempre in un solo posto alla volta". "Giustissimo!" tuonò trionfalmente il Meccanico Classico. "Questo è il problema. Hai detto bene: tu sei in uno e in un sol posto alla volta. Sei un qualcosa che assomiglia di più a una particella che a un'onda. E le particelle si comportano in modo molto diverso nel Mondo Classico (che è un posto sensato!) Un'onda viene diffusa in un'area vasta e in qualunque luogo di quest'area se ne può

osservare solo una piccola porzione. L'interferenza può far sì che in diversi luoghi se ne possa ottenere di più o di meno, ma è sempre solo una piccola parte dell'onda quello che vedi. Una particella, invece, è collocata in un qualche punto. Se guardi in posti diversi, o ci trovi la particella tutt'intera o, semplicemente, lì la particella non c'è per niente. Nella meccanica classica non è questione di particelle che mostrino effetti di interferenza. Adesso ti faccio vedere". Si rivolse al pavimento della Sala Gedanken, fissandolo attentamente. La superficie si trasformò da acqua che era in un'area liscia fatta di piastre d'acciaio, con barriere corazzate tutt'intorno, alte abbastanza da potercisi nascondere dietro. Verso il mezzo del pavimento, dove era emerso dall'acqua quel basso muricciolo, ora c'era un'alta barriera corazzata, con una stretta feritoia leggermente a sinistra del centro. "Ecco ; adesso abbiamo là stessa messinscena di prima, ma l'ho un po' cambiata in modo da poter osservare particelle veloci. Che poi sono qualcosa che va come un proiettile, perciò useremo proprio dei proiettili".

Fece un gesto verso un'estremità della sala e apparve spiacevole a vedersi - una mitragliatrice con molte scatole di munizioni accanto. "Questa mitragliatrice non è montata in modo fisso, e non spara sempre nella stessa direzione. Alcune pallottole colpiranno la feritoia nella barriera e ci passeranno attraverso, come faceva una parte dell'onda nel nostro recentissimo esperimento mentale. La maggior parte di esse, ovviamente, colpiranno l'acciaio e rimbalzeranno via. Accidenti! ora che mi viene in mente", aggiunse improvvisamente, "faremmo meglio a indossare questi, nel caso ci colpisse qualche pallottola vagante". Tirò fuori due elmetti di acciaio e ne passò uno ad Alice. "Ma ci servono davvero?", si informò Alice. "Pensavo che visto che è solo un esperimento mentale anche quelli fossero proiettili mentali e non ci potessero far del male." "Beh, sarà anche così. Ma ti potrebbe venire in mente che sei stata colpita da un proiettile, e non credo che sarebbe molto divertente, no?"



Alice si infilò l'elmetto. Le dava una gran noia tenerlo in testa e non poteva far a meno di pensare che non servisse proprio a un bel niente, ma continuare a discutere non pareva molto opportuno. Il Meccanico, dritto in piedi, fece un gesto imperioso con la mano e la mitragliatrice cominciò a sparare facendo un baccano infernale. Sputava proiettili a fiumi, in modo irregolare; per la maggior parte colpivano lo schermo corazzato e fischiavano via in tutte le direzioni; ma alcuni passavano attraverso la feritoia della barriera e colpivano il muro opposto. Alice era stupefatta: quando una pallottola toccava il muro, si arrestava immediatamente per poi mettersi lentamente in posizione verticale, rimanendo sospesa in aria proprio davanti al punto di impatto con il muro. "Come puoi notare, l'onda dell'acqua si diffondeva lungo tutto il muro opposto, ma un proiettile colpisce solo in un punto. Tuttavia, in questo esperimento la probabilità che un proiettile colpisca il muro di fondo opposto alla feritoia è maggiore di quella che rimbalzi sul bordo della feritoia e finisca di lato, parecchio lontano. Se aspettiamo un po', potremo vedere come varia la probabilità per i vari punti del muro." Via via che il tempo passava e l'aria si riempiva di pallottole vaganti, il numero di quelle che se ne stavano sospese in aria davanti al muro aumentava stabilmente. Alice poteva ormai distinguere che si stava sviluppando una tendenza ben definita. "Ecco, ora puoi vedere come i proiettili che sono passati per la feritoia si sono distribuiti lungo il muro", osservò il Meccanico, e la mitragliatrice si acquietò. "La maggior parte è finita direttamente davanti alla feritoia, e il numero decresce costantemente se ci si posta, su entrambi i lati. Ora vediamo un po' che succede se apriamo una feritoia a destra invece che a sinistra." Un altro gesto con la mano e la feritoia si spostò un po' a destra del centro, i proiettili sospesi in aria caddero a terra e la mitragliatrice ricominciò a sparare. Nonostante che la dimostrazione fosse piuttosto fracassona e la mettesse tutta sottosopra, per quanto Alice poteva vedere il risultato finale fu esattamente lo stesso della volta prima. Francamente, era alquanto deludente. "Come certamente noti" - disse il Meccanico con malriposta fiducia - "la distribuzione è simile a quella precedente, ma è leggermente spostata a destra, perché il centro è opposto al nuovo punto in cui si trova ora la feritoia." Alice non vedeva nessuna differenza, ma era già preparata ad accettare la sua parola. "Ora", fece il Meccanico con aria drammatica, "guarda che succede se apriamo entrambe le feritoie." Proprio come prima, ad Alice non riuscì di notare la minima differenza, se non nel fatto che essendoci due feritoie aperte, c'erano più proiettili che colpivano il muro di fondo. Questa volta però decise di dire la sua: "Io non lo so, ma mi sembra proprio la stessa cosa tutte le volte", fece con l'aria di scusarsi. "Esattamente!", ribatté il Meccanico tutto soddisfatto. "Eccetto che - come certamente avrai notato - il centro della distribuzione si trova ora opposto al punto di mezzo fra le due feritoie. Abbiamo una distribuzione di probabilità per i proiettili che passano attraverso la feritoia di destra, una per quelli che passano a sinistra. Quando sono entrambe aperte, i proiettili passano attraverso tutte e due le feritoie, cosicché la distribuzione globale è data dalla somma delle probabilità che abbiamo per ciascuna delle due feritoie prese singolarmente, perché i proiettili devono passare attraverso una o l'altra delle due, ma non possono passare attraverso entrambe. Non è vero?" Queste ultime parole erano rivolte al Meccanico Quantistico che stava entrando nella Sala proprio in quel momento. "Questo lo dici tu", rispose il suo collega, "ma come fai a esserne sicuro? Guardate un po' che succede se ripetiamo il tuo esperimento gedanken con degli elettroni. A sua volta il Meccanico quantistico cominciò a fare gesti in direzione del pavimento. Non erano così decisi come quelli del collega, ma sembrava che funzionassero altrettanto bene..."



...Scomparve la mitragliatrice insieme con le piastre corazzate. Il pavimento ritornò a essere di quello strano materiale luccicante che Alice aveva visto all'inizio, ma l'ormai familiare barriera con due fenditure vicino al centro se ne rimase lì a dividere a metà la stanza. Sul muro di fondo era ora apparso un grande schermo che mandava una luminescenza verdastra. "Quello è uno schermo fluorescente", mormorò il Meccanico all'orecchio di Alice. "Fa un lampo. di luce quando un elettrone lo colpisce, così lo si può utilizzare per individuare dove si trovano." Dalla parte opposta della stanza, sul pavimento, dove prima c'era stata la mitragliatrice, c'era ora un altro ordigno. Era un affarino piccolo, simile a una versione in miniatura dei cannoni per sparare gli acrobati che a volte si vedono nei circhi. "Che roba è?", chiese Alice. "Cosa vuoi che sia? Un cannone elettronico, ovviamente." Alice guardò più attentamente e poté vedere che c'era una corta scaletta che conduceva fino alla bocca del cannone e una fila di elettroni che aspettavano di essere sparati. Sembravano parecchio più piccoli dell'ultima volta che li aveva visti. "È chiaro!", disse fra sé e sé.

"Questi sono soltanto elettroni mentali." Mentre li stava osservando, rimase stupita di vederli girarsi e farle cenno con la manina. "Ma come fanno a conoscermi?", si chiese. "Devono essere per forza tutti lo stesso elettrone che ho conosciuto prima!" "Fuoco!", ordinò il Meccanico Quantistico e gli elettroni cominciarono a correre su per la scaletta e a tuffarsi nel cannone che li sparava via con un flusso ininterrotto. Alice non riusciva a distinguerli mentre erano in volo, ma vedeva un lampo di luce brillante sullo schermo, ogni volta che uno di essi lo colpiva. Quando la luce si smorzava, lasciava una stellina luccicante sullo schermo che restava lì a marcare la posizione in cui l'elettrone era arrivato. Come era successo prima con la mitragliatrice, il cannone elettronico continuò a sparare il suo flusso di elettroni, e l'ammasso di stelline luccicanti cominciò ad assumere una distribuzione riconoscibile. In un primo momento Alice non era ben sicura di ciò che vedeva, ma via via che il numero di stelline sullo schermo andava crescendo diventava chiaro che la loro distribuzione era assai diversa da quella rappresentata dal precedente ammasso di proiettili.

I proiettili si erano distribuiti con una lenta e continua diminuzione verso i lati a partire dal numero massimo nel centro. Le stelline invece si erano sistemate in strisce verticali lasciando dei vuoti scuri fra l'una e l'altra. Alice si rese conto che in qualche modo la situazione assomigliava a quella che aveva visto nel caso delle onde, in cui c'erano regioni di forte attività separate da aree più calme. Ora c'erano delle regioni in cui erano stati individuati molti elettroni, e fra l'una e l'altra di queste ce n'erano andati a finire molto pochi. Non fu dunque una gran sorpresa per lei che il Meccanico Quantistico dicesse: "Ecco, vedete: un chiaro effetto di interferenza. Nel caso delle onde nell'acqua avevate ottenuto regioni in cui c'era più o meno moto in superficie. Ora ogni elettrone è andato a colpire una sola posizione, ma la probabilità di scoprire il luogo in cui un elettrone ha colpito varia da una posizione all'altra. La distribuzione delle differenti intensità d'onda che avete osservato prima è ora rimpiazzata da una distribuzione di probabilità. Con uno o due elettroni una tale distribuzione non è ovvia, ma usando un sacco di elettroni se ne trovano di più nelle regioni di probabilità maggiore. Se avessimo tenuto aperta una, sola fenditura avreste potuto vedere che la distribuzione sarebbe andata calando in modo continuo e tranquillo da entrambe i lati, proprio come nel caso dei proiettili o delle onde nell'acqua quando c'era una sola fenditura aperta. In questo caso vediamo invece che, quando sono aperte tutte e due le fenditure, le ampiezze che provengono da esse interferiscono e producono dei picchi e degli avvallamenti nella distribuzione di probabilità. Il comportamento degli elettroni è del tutto diverso da quello delle tue pallottole, vecchio mio", concluse rivolgendosi al Meccanico Classico. Ma Alice era interdetta. "Non capisco", disse. Le sembrava che da un po' di tempo non le riuscisse di profferire altro. "Vuol dire che ci sono così tanti elettroni che riescono a passare che in qualche modo gli elettroni che passano da uno dei buchi interferiscono con quelli che passano dall'altro?" No, non intendo questo, assolutamente no. Guarda che succede se spariamo un solo elettrone alla volta." Batté le mani e gridò: "OK! Facciamolo ancora, ma piano, questa volta". Gli elettroni si misero di nuovo in azione, o, per essere più precisi, uno di loro si arrampicò fino al cannone e si fece sparare contro la barriera. Gli altri se ne rimasero lì dov'erano. Dopo un po' un altro elettrone andò ad arrampicarsi e fu sparato. La cosa andò avanti per un po' di tempo e Alice poté vedere che andava formandosi la stessa figura fatta di gruppi fitti intervallati da vuoti. Questa volta non era così evidente come prima perché, visò il ritmo lento con cui gli elettroni arrivavano allo schermo, non ce n'erano molti nei gruppi più fitti, ma lo schema generale era abbastanza evidente. "Ecco, puoi vedere che l'effetto di interferenza si verifica anche quando c'è un solo elettrone presente in ogni istante. Un elettrone da solo può esibire l'interferenza. Può passare attraverso tutte e due le fessure e interferire con sé stesso, se così si può dire." "Ma questa è una sciocchezza!", esclamò Alice. "Un elettrone non può passare attraverso entrambe le fessure. Non è una cosa sensata, come ha detto lui", disse accennando al Meccanico Classico che la ricambiò con un'occhiata piena di comprensione. Alice si diresse alla barriera per riuscire a sbirciare da vicino cosa succedesse. Voleva provare a vedere dove andavano gli elettroni mentre passavano attraverso le fessure. Sfortunatamente l'illuminazione si era nel frattempo fatta piuttosto scarsa e gli elettroni si muovevano così velocemente che non riusciva a

distinguere attraverso quale fessura passassero. "È tutto ridicolo qui!", pensò Alice. "Mi serve più luce." Aveva dimenticato di trovarsi nella Sala Gedanken e rimase un po' spaventata quando le apparve accanto un riflettore montato sul suo cavalletto. Subito diresse la luce verso le fessure e con suo gran compiacimento scoprì che si vedeva ora un lampo vicino alla fenditura attraverso cui passava l'elettrone. "Ce l'ho fatta!", gridò entusiasta. "Riesco a vedere gli elettroni che passano attraverso le fessure, ed è proprio come dicevo io: ciascuno di essi passa da una parte o dall'altra." "Ah, ma davvero?", ribatté il Meccanico Quantistico con un tono molto particolare. "Ma hai provato a guardare se sullo schermo c'è sempre la figura di interferenza?" Alice si girò a guardare e con sua meraviglia e confusione vide che ora la distribuzione cadeva dal massimo centrale con continuità verso i lati, proprio come era successo con le pallottole del Meccanico Classico. Sembrava che qualcosa non andasse per il verso giusto. "Succede sempre così: non ci puoi fare nulla", la consolò il Meccanico Quantistico. "Se non hai nessuna osservazione che ti mostri da quale foro passano gli elettroni, allora ottieni gli effetti di interferenza fra le due fenditure. Se ti metti a osservare gli elettroni, scopri che effettivamente si trovano o, in un posto o nell'altro. Ma in questo caso si comportano anche come ti aspetteresti chi facessero se devono passare attraverso uno solo dei due fori e allora non hai più l'interferenza. Il problema è che non c'è modo di osservare gli elettroni senza disturbarli, come quando gli hai puntato addosso il riflettore, e il solo fatto di compiere l'osservazione costringe gli elettroni a scegliere un tipo di azione. Non importa se prendi o non prendi nota di quale fenditura l'elettrone attraversi. E non importa nemmeno se tu ti rendi conto di quale sia la fenditura attraverso cui passa. Qualunque osservazione che possa dirtelo disturberà l'elettrone e fermerà l'interferenza. Gli effetti di interferenza si verificano soltanto quando non c'è modo di poter sapere in quale fessura passi l'elettrone. Che tu poi lo sappia o no, non ha alcuna importanza. "Così, come vedi, quando c'è interferenza sembrerebbe che ciascun elettrone passi per entrambe le fessure. Se fai la prova e controlli, scoprirai che gli elettroni passano attraverso una fessura sola, ma allora ciao interferenza! Non puoi vincere a questo gioco." Alice rimase pensierosa per qualche istante, poi sbottò: "Ma è completamente ridicolo!". "Certo che lo è", fece il Meccanico Classico, uscendo dalla Sala Gedanken con aria alquanto scocciata. Il Quantistico invece sorrideva compiaciuto: "Sono d'accordo anch'io, è piuttosto ridicolo, ma, guarda caso, sembra proprio il modo con cui funziona la Natura, e ci tocca a adattarci. Complementarità, dico io!". "Mi spiegherebbe per piacere che cosa vuol dire con complementarità?", chiese Alice. "E perché no? Complementarità per me vuol dire che ci sono certe cose che non si possono conoscere, non tutte in una volta almeno." "Ma la parola complementarità non vuol dir questo!", protestò Alice. "Sì, quando la uso io", ribatté il Meccanico. "Le parole significano quello che scelgo io. E' solo questione di chi è il padrone, tutto qui. Complementarità, dico io!" "L'ha già detto prima", puntualizzò Alice, che non era poi tanto convinta di questa sua ultima asserzione. "No che non l'ho detto. Questa volta significa che ci sono domande che non si possono porre a proposito di una particella quali, per esempio, dove si trovi e, al tempo stesso, che velocità abbia. In effetti, non ha nemmeno un vero senso parlare di un elettrone come se avesse una posizione precisa." "Per essere una parola sola deve significare un bel po' di roba!", fece Alice, piuttosto acidamente. "Questo di sicuro", ribatté il Meccanico. "Ma quando faccio fare gli straordinari a una parola la pago sempre di più. Temo di non poterti spiegare veramente che cosa succeda agli elettroni. Normalmente si chiede che una spiegazione abbia senso in termini di cose che già si conoscono, e questo la fisica quantistica non lo fa. Sembra un nonsense, però funziona. Probabilmente non si sbaglia a dire che nessuno capisce veramente la meccanica quantistica: come faccio io a spiegarla? Però posso dirti come descriviamo quello che succede. Vieni con me nella stanza qui dietro e cercherò di fare del mio meglio. Lasciarono la Sala Gedanken, il cui pavimento aveva ripreso il suo luccicante aspetto originale, seguendo poi il corridoio fino a un'altra stanza arredata con poltroncine disposte qua e là. Si misero comodi e il Meccanico Quantistico continuò. "Quando parliamo di una situazione, tipo quella degli elettroni che passano attraverso le fessure, la descriviamo con un'ampiezza. Si tratta di qualcosa di simile alle onde che hai visto, e in effetti viene spesso chiamata anche funzione d'onda. L'ampiezza può passare attraverso tutte e due fenditure, e non è sempre positiva, come una probabilità. La probabilità minima che puoi avere è zero, ma l'ampiezza può essere negativa o positiva, dimodoché parti di traiettorie diverse si possono cancellare o sommarsi e produrre interferenza, di nuovo proprio come con le onde nell'acqua." "Ma allora dove sono le particelle?", chiese Alice. "Attraverso quale fessura passano veramente?" "L'ampiezza non ti dice nulla su questo, in effetti. Però, se fai il quadrato dell'ampiezza, se cioè la moltiplichi per sé stessa in modo da ottenere un qualcosa di sicuramente positivo, allora essa ti dà una distribuzione di probabilità. Se scegli una posizione qualunque questa distribuzione ti dirà la probabilità di trovarvi una particella quando vai a osservare." "E questo è tutto ciò che potete dire?", esclamò Alice. Devo dire che mi suona molto insoddisfacente. Non si sa mai dove trovare qualcosa. "Sì, c'è del vero. Per una particella non si può dire dove la troverai, se non che non sarà in una posizione in cui la probabilità è nulla, ma questo è banale. Se però hai un gran numero di particelle, allora puoi essere ben sicura che ne troverai di più dove la probabilità è alta e molte, molte meno dove è più bassa. Se ne hai poi un numero veramente grande, allora si può dire in modo piuttosto accurato quante finiranno qui e quante là."