

INTERFERENZA DI SINGOLI FOTONI

IL PLS RACCONTATO DA UN INSEGNANTE

di Michela Pavan*

Il Progetto Lauree Scientifiche è stato presentato in alcuni numeri della rivista da diversi coordinatori di livello nazionale o locale, con esemplificazioni delle attività svolte in ambiti accademici diversi. Nel contributo che segue un insegnante di fisica presenta e valuta l'esperienza maturata sul campo da parte di una classe quarta del liceo scientifico che ha realizzato un percorso sperimentale nel campo dei fenomeni quantistici, presso la Facoltà di Fisica dell'Università dell'Insubria di Como.

* Docente di Matematica e Fisica presso il Liceo Scientifico "Galileo Ferraris" di Varese.

Il fisico danese Niels Bohr, nel saggio *I quanti e la vita* così incomincia a raccontare quella rivoluzione del pensiero scientifico che prende il nome di fisica quantistica: «Nella storia della scienza pochi eventi hanno avuto, nel breve giro di una generazione, conseguenze così straordinarie quanto quelle della scoperta di Planck del quanto elementare d'azione. Tale scoperta non costituisce soltanto, e in misura sempre maggiore, la base per l'ordinamento delle nostre esperienze sui fenomeni atomici, [...] ma ha prodotto altresì una radicale trasformazione dei fondamenti stessi della descrizione dei fenomeni naturali». Egli ci dice anche che «se la meccanica quantistica non ci ha scioccato veramente, allora non l'abbiamo capita»; perché questa non è come tante teorie fisiche, quelle del mondo macroscopico, con cui quotidianamente abbiamo a che fare. La fisica quantistica è concettualmente complessa, non legata al nostro modo di immaginare le cose, eppure, se avessimo un'opportuna lente di ingrandimento, ci accorgeremmo che le sue leggi regolano i fenomeni del mondo atomico tutt'intorno a noi. Quelle leggi, infatti non solo vantano innumerevoli conferme sperimentali, ma trovano anche diffusissime applicazioni nei più disparati dispositivi tecnologici. L'importanza, quindi, che la fisica dei quanti riveste nell'ambito delle attuali conoscenze scientifiche, la necessità di sostenere la curiosità sempre più avida di risposte degli studenti moderni e la valenza formativa e di orientamento che l'approccio a tali problematiche può costituire, sono le motivazioni che portano ad avvicinarsi a questo tema anche a livello di scuola secondaria superiore. Ho accolto dunque la proposta dell'Università dell'Insubria nell'ambito del Progetto Lauree Scientifiche e ho guidato una classe quarta a incontrare la fisica quantistica.

Una scelta metodologica

Bisognava scegliere un percorso adatto a classi di scuola secondaria superiore: non esaustivo, non formalmente complesso, ma semplificato, senza perdere però un filo logico conduttore. Spesso sarebbe stato necessario ricorrere all'intuito, a una visione un po' semplicistica dei concetti o a una interpretazione parziale dei significati.

Inoltre era necessario proporre «un piatto gustoso» agli studenti, perché si appassionassero alla questione e si invogliassero a ragionare, a cercare di confrontarsi con qualcosa di concettualmente nuovo e in una qualche misura sconvolgente. Il tutto doveva inoltre essere somministrato in poche ma efficaci «pillole»: il tempo che si poteva ritagliare era di qualche settimana (tre o quattro) al massimo.

L'idea iniziale era di costruire un parallelo tra l'interferenza classica e quella quantistica, osservando che la descrizione matematica dei due fenomeni è analoga, nonostante una diversa interpretazione concettuale. L'importanza dello studio della interferenza quantistica è sottolineato dallo stesso Richard Feynman [1] che scrisse: «abbiamo scelto di esaminare un fenomeno che è impossibile, assolutamente impossibile, spiegare in termini classici, e che è il cuore della meccanica quantistica. In realtà esso contiene l'unico mistero». Aggiunge poi il fisico americano che non possiamo spiegare il mistero ma solo raccontarlo, descriverlo, ovviamente inquadrandolo anche in una teoria, un modello matematico.

Introduzione al mondo dei quanti

Per la classe quarta è stato strutturato un percorso [2] la cui base era l'ottica ondulatoria e corpuscolare. Avevamo discusso, come su ogni testo liceale, la questione del «modello corpuscolare o ondulatorio per la luce», raffrontando le due teorie e dando per (quasi) vincitrice (sull'onda di ciò che successe storicamente) la teoria ondulatoria. Da qui l'approccio seguito è stato parzialmente storico e parzialmente problematico: abbiamo capito (alla Young, Faraday, Maxwell, eccetera) che la luce è un'onda e abbiamo imparato a descrivere i fenomeni, in particolare quelli di interferenza, diffrazione e polarizzazione, in termini ondulatori. Abbiamo accettato, come ci insegnano Planck ed Einstein, che la luce nasconde, dietro alla sua apparenza continua, un aspetto discreto: è fatta da corpuscoli, chiamati fotoni, enti microscopici che si comportano come particelle e che nel loro insieme formano quella luce che noi percepiamo. L'energia che associamo all'onda, legata al concetto di intensità, è quindi la somma delle energie dei fotoni che la costituiscono.

Abbiamo collegato le due descrizioni della luce, quella corpuscola-

re (del discreto) e quella ondulatoria (del continuo), introducendo il «quanto d'azione h », costante che lega nella famosa relazione $E = hf$ le caratteristiche particellari e microscopiche di ciascun fotone alle caratteristiche macroscopiche che noi associamo all'onda.

Ma c'è di più: quell'equazione ci ha detto che in natura l'energia di un'onda di frequenza f non può essere trasportata, emessa o assorbita, in modo continuo, ma solo in pacchetti discreti il cui valore è ben fissato, un multiplo (intero) di hf . Cominciamo a capire che in natura alcune grandezze sono quantizzate: la natura a volte assume valori in un insieme discreto e non continuo. Perché non ce ne siamo accorti prima? Perché la quantizzazione riguarda quantità estremamente piccole, osservabili e misurabili non nell'ambito della fisica classica, studiata fino a questo momento, ma nell'ambito della fisica atomica o subatomica. Quindi solo ora, addentrandoci nel mondo delle entità più piccole, ci accorgiamo di questa inevitabile novità.

Racconta ancora Niels Bohr, ne *I quanti e la vita* [3] a proposito delle idee espresse al Congresso Solvay del 1911, in *Teoria della Radiazione e Quanti*, che «l'introduzione del concetto di fotone sembrò risuscitare l'antico dilemma dei giorni di Huygens e Newton tra struttura corpuscolare e ondulatoria della luce, già risolto in favore di quest'ultima con la teoria ondulatoria delle onde elettromagnetiche. La situazione era quanto mai singolare perché la definizione stessa dell'energia [...], data dal prodotto della costante di Planck per la «frequenza» [...] del fotone fa riferimento diretto a parametri tipici di una descrizione ondulatoria [...]».

Abbiamo quindi capito che la luce nasconde un aspetto duale, di onda e corpuscolo. Ci chiediamo a questo punto se la descrizione corpuscolare e la descrizione ondulatoria siano due modelli diversi di lettura dei fenomeni elettromagnetici, l'uno nel modo del macroscopico e l'altro nel mondo del microscopico, ma equivalenti.

Fotoni: onde o particelle?

Per rispondere a tale domanda cominciamo con l'analizzare il fenomeno della polarizzazione della luce secondo le nostre due possibili chiavi di lettura [2], [4], [5].

Interpretazione ondulatoria

Il fenomeno della polarizzazione delle onde luminose è descritto dalla legge di Malus. Questa formula lega l'intensità della luce incidente su un polaroid all'intensità della luce trasmessa tramite il coseno al quadrato dell'angolo tra le direzioni di polarizzazione del polaroid e della luce. Essa assicura, per esempio, che se facciamo incidere luce polarizzata verticalmente su un polaroid pure polarizzato verticalmente essa passerà inalterata; se ruotiamo il polaroid di

un angolo di 45° l'intensità della luce è ridotta a metà, se ruotiamo ancora nello stesso verso di altri 45° non ci sarà luce che oltrepassa il polaroid.

Interpretazione corpuscolare

Tutti i fotoni con polarizzazione equivalente a quella del polaroid passano, quelli con polarizzazione perpendicolare non passano, quelli che hanno una polarizzazione a 45° rispetto al polaroid hanno una probabilità $1/2$ di riuscire a passare: generalizzando quanto prima si è indotti a supporre che la legge di Malus è rispettata sui grandi numeri, e anzi essa fornisce anche il valore della probabilità con cui un fotone può o no superare il polaroid: il termine angolare che compare nella legge di Malus dice, nel macroscopico, come varia l'intensità della luce trasmessa, cosa che può essere letta nel microscopico come un'informazione sul fatto che i fotoni passino oppure no.

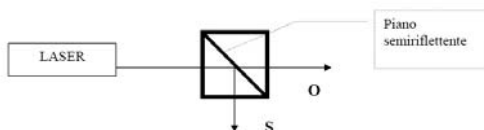
Le due interpretazioni, fondate su un grande numero di fotoni, sono quindi consistenti, e sembrano rappresentare chiavi di lettura equivalenti e sostituibili l'una all'altra.

A questo punto potremmo supporre che i fotoni si possano descrivere come onde solo «quando sono tanti» e danno luogo a fenomeni tipicamente ondulatori come l'interferenza quando, in qualche modo, nel propagarsi nello spazio si influenzano l'un l'altro sommando o sottraendo i reciproci effetti. Potremmo pensare che l'interferenza sia solo un fenomeno che si osserva quando abbiamo una miriade di corpuscoli [6] i quali contemporaneamente vanno a invadere una regione dello spazio, urtandosi e influenzandosi a vicenda. Potremmo supporre che se i corpuscoli fossero isolati uno dall'altro, cioè abbastanza lontani, questi si comportino come enti (biglie, palline, proiettili) che seguono una determinata traiettoria senza dare luogo a interferenza perché sul loro cammino non incontrano nessun altro ente.

Che cosa succederebbe allora se avessimo un solo fotone? Esso non avrebbe modo di interagire con altri: potrebbe dar luogo al fenomeno dell'interferenza? Se le ipotesi precedenti fossero corrette dovremmo rispondere di no (e allora saremmo anche certi che il fotone è un corpuscolo!), altrimenti...

I fotoni: mettiamoli alla prova

Ecco le linee generali dell'esperimento che consentirà di proseguire la nostra indagine. Una sorgente *laser* viene attenuata in modo da emettere un singolo fotone alla volta. Il fotone dà luogo, alla fine del suo cammino nell'apparato sperimentale, a un impulso in un rivelatore; l'impulso è registrato da un computer dedicato all'analisi dei dati.

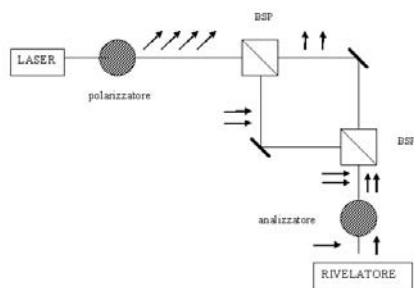


BSP, visione dall'alto

Ci si è avvalsi di strumenti chiamati *Beam Splitter Polarizer* (BSP). Un BSP è un piccolo cubo birifrangente e semiriflettente che separa la luce incidente in due raggi: il raggio O, trasmesso dal BSP, e il raggio S, deviato a 90° . Il raggio O è costituito da luce polarizzata parallelamente al piano semiriflettente, nel nostro caso posto verticalmente; il raggio S è polarizzato, nel nostro caso, orizzontalmente.

¹ Per approfondire l'argomento si legga da *La fisica di Berkeley - fisica quantistica*, vol. 4, Zanichelli, Bologna 1973, pp. 175 e seguenti

Con semplici prove sperimentali si può constatare che il BSP non divide in due i fotoni:¹ quando è colpito da un fotone, questo viene trasmesso o in una direzione o nell'altra, mai in entrambe contemporaneamente. Inoltre se il BSP è investito da luce polarizzata a 45° rispetto alla due direzioni a lui preferenziali, in accordo con la legge di Malus, lascia passare metà dei fotoni incidenti e metà no (li riflette).



L'apparato essenziale dell'esperimento di interferenza quantistica è schematizzato nell'immagine a lato. La sorgente è un laser attenuato, la cui luce incide sul polarizzatore che quindi seleziona fotoni «polarizzati» a 45° . Ecco la strada seguita per descrivere e interpretare l'esperimento.

Si suppone di poter osservare e fare previsioni, in base a quanto imparato, su ciò che in media accade a 4 di questi fotoni. I 4 fotoni sul loro cammino incontrano il primo BSP; 2 fotoni riescono a proseguire con polarizzazione verticale, altri 2 invece vengono riflessi dal BSP stesso e propagano con polarizzazione orizzontale.

Due specchietti opportunamente posti sulla traiettoria dei fotoni li deviano verso un secondo BSP; questo BSP ha come esito quello di riunire in un unico raggio tutti i fotoni, mantenendo le polarizzazioni. I quattro corpuscoli ora giungono a un ulteriore polaroid (analizzatore) posto a 45° rispetto alle direzioni di polarizzazione dei fotoni. Si applica la legge di Malus: solo metà dei fotoni riescono a superare l'analizzatore.

Conclusione: l'intensità luminosa uscente è pari alla metà di quella iniziale. Ma è veramente così?

I fotoni ci ingannano

I risultati sperimentali sono sconcertanti: le previsioni fatte sono totalmente disattese. L'intensità della luce finale è uguale a quella iniziale; ciò significa che, in qualche modo imprevedibile, tutti e quattro i nostri fotoni arrivano al rivelatore dando ciascuno un segnale. Ma c'è di più: se si raccoglie la figura che tanti fotoni formano giungendo nel rivelatore si trova la figura tipica dell'interferen-

za tra onde classiche. Poiché ciascun fotone però viaggia isolato dagli altri nello spazio e non ha informazione alcuna sul fatto che prima o dopo di lui ce ne siano altri, allora in qualche modo esso interferisce... con se stesso!

Ma allora dove passa il fotone? Come fa a interferire? Dove e perché cadono le nostre previsioni sull'esito di questo esperimento?

Inseguiamoli

Per capire che cosa accade ai nostri quattro corpuscoli nel viaggiare attraverso l'esperimento dovremmo posizionare qua e là qualche apparato che ci consenta di tracciare il loro cammino. Ci accorgemmo che succede qualcosa di bizzarro: se riusciamo a intercettare i fotoni tra un BSP e l'altro, se riusciamo a sapere quale cammino percorrono, non si crea più la figura di interferenza.

*Capitoliamo: vanno lasciati liberi
ovvero verso gli stati quantistici e il principio di sovrapposizione*

Tutti questi comportamenti strani dei fotoni, il fatto che non si possono applicare i risultati dei passi sperimentali intermedi per fare una previsione sull'esito globale dell'esperimento di interferenza trovano un loro senso proprio nell'ambito della descrizione quantistica del fenomeno.

Dobbiamo far spazio a nuove idee. Non sarà semplice: qui ci troviamo a dover distruggere ciò che, come insegnanti di fisica, abbiamo costruito in qualche anno. Abbiamo insegnato che la fisica è fatta di modelli matematici che descrivono i fenomeni istante per istante, che ci consentono di fare previsioni sui valori assunti dalle variabili in gioco quando più ci è comodo, che possiamo eseguire misure senza che il sistema se ne accorga. Abbiamo sempre introdotto le grandezze fisiche dandone una definizione comunque legata al senso macroscopico, comune delle cose. Abbiamo sempre matematizzato utilizzando numeri reali.

Ora tutte queste comodità vengono meno: di un sistema si possono stabilire con certezza i valori che assumono le grandezze solo nel momento in cui le misuriamo. Non solo: non è detto che si possa fare una previsione sul valore che ha una grandezza nel momento in cui non la misuriamo, perché questa potrebbe non assumere un valore ben definito, ma addirittura, in un certo senso, assumere più valori. C'è di più: la misura in qualche modo danneggia, altera lo stato del sistema. Queste caratteristiche degli enti quantistici, che si faranno in qualche modo vive nelle varie fasi del nostro esperimento, trovano una opportuna descrizione nell'ambito della meccanica quantistica ad opera della funzione d'onda Ψ (l'ampiezza di probabilità). Essa non ha un significato fisico «diretto», descrive lo stato

della particella, nel senso che è una funzione matematica (complessa) il cui modulo al quadrato è la probabilità di trovare la particella al tempo t in una certa regione dello spazio. Essa soddisfa l'equazione di Schrödinger che è, dal punto di vista matematico, un'equazione d'onda. Per essa varrà il principio di sovrapposizione, analogo quantistico del principio di sovrapposizione delle onde classiche. Esso stabilisce che se per una particella sono permessi due o più stati, allora tutti gli infiniti stati che si ottengono per combinazione lineare dei precedenti sono stati permessi.

Le funzioni d'onda

Vediamo dal punto di vista logico le conseguenze di tale principio: supponiamo che A e B siano due eventi indipendenti con probabilità di verificarsi $p(A)$ e $p(B)$, la probabilità che si verifichi A o B è la somma delle due probabilità: $p(A) + p(B)$. L'analogo quantistico dettato dal principio di sovrapposizione funziona però non sulle probabilità ma sulle funzioni d'onda. Un sistema quantistico infatti si pone sullo stato dato dalla sovrapposizione di tutti gli stati possibili per il sistema: se $\Psi(A)$ e $\Psi(B)$ sono gli stati possibili, allora il sistema si pone in uno stato $\Psi = a\Psi(A) + b\Psi(B)$, combinazione lineare dei precedenti (i coefficienti a e b indicano il peso che ciascuno stato assume nella combinazione). Se a questo punto determiniamo il valore della densità di probabilità $|\Psi|^2$ troviamo un'espressione che presenta un termine rettangolare del tutto simile a quello che si trova sviluppando, con un po' di goniometria, l'interferenza tra onde classiche² [7]

$$|\Psi|^2 = |a|^2 |\Psi(A)|^2 + |b|^2 |\Psi(B)|^2 + \text{termine rettangolare}$$

Il dualismo incomincia a prendere forma: dalla particella alla funzione d'onda, dalla funzione d'onda all'interferenza; e, per una transività dal sapore bizzarro, dalla particella all'interferenza. Inoltre la struttura della teoria stessa, questo descrivere una particella attraverso un'onda, ci spinge a intuire quello che è il principio di complementarità: la descrizione ondulatoria e quella corpuscolare vanno sempre a braccetto, una non esclude mai l'altra, anzi, esse si completano a vicenda. Questo parallelo tra la sovrapposizione di onde classiche e quella di onde quantistiche è il punto nodale su cui abbiamo imperniato il raffronto/scontro tra la visione corpuscolare e quella ondulatoria degli enti microscopici. Notiamo però la differenza concettuale tra la sovrapposizione classica e quantistica: le onde classiche interferiscono nel senso che spazialmente si sovrappongono punto per punto, sommandosi a vicenda; nel mondo del microscopico invece si sovrappongono gli stati: un ente può trovarsi, con probabilità diverse, in più stati contemporaneamente. Non è possibile quindi prevedere con certezza lo stato in cui si trova un sistema,

² L'intensità I_{tot} dell'onda risultante dall'interferenza di altre due di uguale intensità I , sfasate di un angolo θ , risulta infatti $I_{\text{tot}} = 4a^2 \cos^2 \frac{\theta}{2} = I + I + 2\sqrt{I \cdot I} \cos \theta$

ma si possono fare asserzioni quantitative solo sulle probabilità e, quindi, sui valori medi del sistema stesso. Ecco un parallelo un po' grossolano ma efficace: in un mondo classico in cui colorassi un foglio di blu e giallo vedrei alla fine inevitabilmente il colore verde: gli effetti si sarebbero sommati, dando un risultato che porta memoria di entrambi; in un mondo quantistico non avrei verde, ma una sovrapposizione di blu e giallo con probabilità 1/2 per entrambi i casi.

Fine del dilemma

Lo stato di sovrapposizione quantistica è la chiave di volta per sciogliere il nostro dilemma: perché tutti i fotoni del nostro esperimento vengono rivelati, sorpassando ogni ostacolo? Quando i fotoni incontrano il primo BSP si aprono due vie: quella dello stato di polarizzazione O (via O) e quella dello stato S (via S). I fotoni, seguendo i dettami del principio di sovrapposizione, si pongono, dopo il BSP, nello stato:

$$\psi = o\psi(O) + s\psi(S)$$

Essi, in qualche modo, conservano entrambi gli stati di polarizzazione, riuscendo pertanto a superare ogni ostacolo posto sul loro cammino, per giungere infine al rivelatore.

«Come può essere? Come può il fotone sfruttare entrambe le vie se non si divide?» questa la domanda martellante degli studenti. Risponde Feynman nelle sue celebri pagine: questa domanda «[...] è un riflesso del desiderio incontrollabile ma totalmente vano di vedere le cose in termini un po' più familiari. Non ve le descriverò in termini dell'analogia di qualcosa di familiare, ma ve le descriverò semplicemente, [...] la vostra esperienza basata sugli oggetti visti finora è incompleta perché il comportamento delle cose su scala molto più piccola è semplicemente diverso» [1].

Dobbiamo rinunciare a chiederci quindi se i fotoni seguano la via O oppure la via S, perché il concetto di via, di traiettoria, sfuma: è troppo classico e mal si addice agli enti quantistici. Il fotone, pur non passando per entrambe le vie, le sfrutta tutte e due grazie al suo stato quantistico di miscela dei due stati. Riesce così a eludere i BSP, l'analizzatore, e a giungere al rivelatore.

Qui, entrando dalle colonne d'Ercole del mondo osservabile, l'ente quantistico muore e la funzione d'onda collassa: la misura sembra «selezionare» lo stato del sistema, che da questo momento in poi diventa uno stato unico, certo. Questo è anche il motivo per cui, come accennato prima, non si possono fare misure intermedie per stabilire l'esito finale di un esperimento. Le misure annullano gli stati di sovrapposizione quantistica: il nostro foglio colorato dell'esempio, all'atto dell'osservazione, apparirebbe sempre tutto giallo o tutto blu, senza sentore di sovrapposizione dei colori. Quel valore 1/2 della pro-

³ Si leggano in proposito le pagine di Guido Fano, da *Una versione elementare della matematica della meccanica quantistica e del principio di indeterminazione*, in: Supplemento n.1 anno XL a *La Fisica nella scuola*, Quaderno 18 pp. 62-63.

bilità assegnata a ciascun colore significherebbe che, ripetendo molte volte l'esperimento, vedremo il foglio metà delle volte giallo e metà delle volte blu. Se vogliamo far vivere lo stato di sovrapposizione dobbiamo lasciare l'ente libero, catturandolo solo al termine dell'esperimento che vogliamo realizzare. Qui uccideremo la doppia natura dell'ente, intercettandone il solo aspetto corpuscolare. Perché? Qualcuno sostiene che la misura è qualcosa descritta ancora «troppo classicamente», «macroscopicamente».³ L'idea predominante concorda però col pensiero di Werner Heisenberg: ogni apparecchiatura che consenta di determinare la traiettoria di una particella la disturba al tempo stesso, distruggendo il fenomeno dell'interferenza, cioè distruggendo l'aspetto ondulatorio della particella stessa. Si apre qui un altro grande capitolo, quello del principio di indeterminazione, che tanto mette in relazione l'osservazione con l'osservato.

Ricadute didattiche

Se, terminato il lavoro, dovessimo tirare le somme di tutto il percorso effettuato? Non nego che all'inizio ero abbastanza incerta sul fatto di affrontare con una classe quarta (di ordinamento) il tema della meccanica quantistica, per la sua difficoltà e perché cronologicamente meglio collocabile tra gli argomenti dell'ultimo anno di corso. Eppure percepivo come possibile e anche necessario affrontare l'argomento con gli studenti di questa classe: non perché fosse la «classe modello» in grado di affrontare subito ogni difficoltà, ma perché sufficientemente preparata, dotata di discreto senso critico e che vantava conoscenze scientifiche anche non prettamente scolastiche. Conclusa l'ottica classica, lasciando supporre che la luce fosse esclusivamente di natura ondulatoria avrei lasciato insoluti interrogativi che erano nati strada facendo e avrei contemporaneamente barato. Alcune volte lo si fa, sull'onda di quanto avvenuto storicamente, consci del fatto che durante l'ultimo anno di corso si ripara il danno affrontando la crisi della fisica classica, spesso con un metodo che sembra distruggere la fisica classica stessa per poi ricostruire sulle sue rovine la fisica quantistica. Questo metodo alcune volte, però, porta qualche studente dei più deboli a sfiduciare la disciplina, supponendo che ciò che ha studiato fino a quel momento «non valga più».

Lo studio di un esperimento «esemplare» come quello dell'interferenza quantistica di fotoni suggeriva un modo costruttivo per affrontare in quarta un assaggio di teoria del microscopico, procedendo a una rilettura del principio di sovrapposizione applicato ora a onde di probabilità e non di materia e costruendo paralleli tra il comportamento classico e quantistico, alla ricerca della vera natura della luce (e non solo). Non ho voluto addentrarmi oltre. Non solo le tre ore settimanali di fisica concedono poco spa-

zio di manovra, ma sarebbe anche stato, a mio avviso, un azzardo concettuale voler percorrere strade troppo lunghe su terreni così nuovi: ecco perché, per esempio, ho scelto di rimandare alla classe quinta una rilettura dell'esperienza alla luce del principio di indeterminazione.

Le lezioni frontali impiegate per spiegare le varie fasi dell'esperienza sono durate un paio di ore, meno di quelle messe in conto, mentre molto più tempo del previsto è stato speso in discussioni guidate per costruire il nuovo modo di pensare «quantistico»: è sempre difficile rinunciare a immaginarsi le cose in modo simile a come si comportano gli oggetti del mondo macroscopico. Eppure alcune volte sono proprio gli alunni a trovare una strada per vedere le cose con occhi a loro più consoni. Per esempio a proposito della sovrapposizione quantistica e del collasso della funzione d'onda mi ha aiutato l'osservazione di Federico: «su una rivista ho letto che il suono c'è se noi siamo lì ad ascoltarlo, altrimenti non sappiamo se c'è o no». Questa osservazione un po' bizzarra ha dato vita a paralleli che hanno reso più semplice il comprendere le cose.

Per gli alunni questo lavoro innegabilmente impegnativo dal punto di vista concettuale ha permesso di conseguire, oso dire, un duplice guadagno. Il primo più tangibile e peculiare: aver assaporato una briciola di meccanica quantistica, essersi portati a casa un bagaglio di conoscenze da spendere nell'ambito della descrizione del microscopico (la dualità onda/particella scaturita dall'esperienza di interferenza ha permesso di rivisitare i concetti di orbitale atomico e di legame; la quantizzazione dell'energia apre la strada per interpretare durante il quinto anno gli spettri atomici, le leggi di corpo nero, l'effetto fotoelettrico; il funzionamento dei LED). L'altro guadagno è più generale ma forse più importante: aver capito un po' di più *che cosa è la fisica*, quella «strana» scienza che non sa spiegarti che cosa sono le cose (per esempio che cosa è il fotone, o l'elettrone, o lo *spin*) eppure sa sorprendentemente dirti, attraverso le sue comprovate teorie, come queste funzionano. Negli intenti del PLS, grazie al quale questa attività è potuta culminare con l'osservazione diretta dell'esperienza, c'è il miglioramento del rapporto degli studenti con le materie scientifiche di base; ritengo che, nel caso della mia classe quarta, il miglioramento del rapporto alunni/fisica vada inteso nel senso di aver creato una maggiore consapevolezza di ciò che sia il sapere scientifico e di aver aperto la strada a un approccio più profondo degli studenti nei confronti della fisica stessa. ❖

INDICAZIONI BIBLIOGRAFICHE/SITOGRAFICHE

- [1] Feynman Richard, *La legge fisica*, cap.6, Boringhieri, Torino 1971.
- [2] Ghirardi Gian Carlo, *Un'occhiata alle carte di Dio*, Il Saggiatore, Milano 2001.
- [3] Bohr Niels, *I quanti e la vita*, Boringhieri, Torino 1969.
- [4] http://web.uniud.it/cird/secif/mec_q/mq.htm
- [5] *La fisica di Berkeley - fisica quantistica*, vol. 4, cap. 6, Zanichelli, Bologna 1973.
- [6] Amaldi Ugo, *La fisica per i licei scientifici*, vol. 3, Zanichelli, Bologna 1997.
- [7] Palladino, Bosia, Maritza, *Da Galileo ad Einstein*, vol 2, pp. 223 e segg., Petrini, 2004.
- [8] Fano Guido, *Una versione elementare della matematica della meccanica quantistica e del principio di indeterminazione*, pp. 51-65, in: Supplemento n.1 anno XL a *La fisica nella scuola*, Quaderno 18.