

L'aspetto fondamentale della teoria nella didattica della fisica quantistica

Marco Giliberti • Università degli Studi di Milano – marco.giliberti@unimi.it

The fundamental aspect of the theory in quantum physics education

La maggior parte delle presentazioni didattiche della fisica quantistica mostra difficoltà interpretative che risalgono ai primi anni del '900 ed è carente sull'analisi del significato di "realtà" che emerge dalla teoria. Non stupisce, perciò, che i percorsi scolastici che ne derivano lascino spesso confusi gli studenti, a tutti i livelli d'età. Il problema principale nasce dalla mancanza di consapevolezza della natura delle teorie fisiche e del loro rapporto con l'esito degli esperimenti possibili.

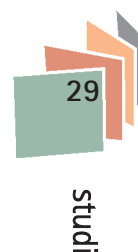
Discuteremo tale natura sia dal punto di vista epistemologico che da quello relativo alla didattica della disciplina e forniremo indicazioni per fondare su basi sempre più solide le ricostruzioni didattiche dei contenuti, per quanto riguarda la fisica moderna e anche per quello della fisica classica e, perciò stesso, per contribuire a creare le condizioni per una migliore didattica della fisica in generale.

Parole chiave: fisica quantistica, meccanica quantistica, teoria quantistica dei campi, scuola secondaria, didattica, teorie

Most educational presentations of quantum physics show interpretative difficulties dating back to the early '900 and lacking a suitable analysis of the meaning of "reality" that emerges from the theory. No wonder, therefore, that school paths derived from them often leave students confused, at all age levels. The main problem stems from the lack of awareness of the nature of physical theories and their relationship with the outcome of possible experiments.

We will discuss this nature both, from the epistemological and the educational point of view and give indications to provide an increasingly solid foundation for the educational reconstructions of the content, for quantum as well as for classical physics, and therefore, to contribute to create conditions for a better teaching of physics in general.

Keywords: quantum physics, quantum mechanics, quantum field theory, secondary school, education, theories



L'aspetto fondamentale della teoria nella didattica della fisica quantistica

1. Introduzione

Le nuove indicazioni ministeriali per la scuola secondaria italiana di secondo grado (http://www.indire.it/lucabas/lkmw_file/licei2010/indicazioni_nuovo_impaginato/_decreto_indicazioni_nazionali.pdf) prevedono, in maniera significativa, l'introduzione di elementi di fisica quantistica nell'ultimo anno dei licei. Questo fatto rappresenta una straordinaria opportunità per la formazione culturale di insegnanti e studenti, soprattutto per la possibilità che fornisce di rivedere con una nuova prospettiva l'intera programmazione dell'insegnamento della fisica e del suo ruolo nell'educazione della società, del cittadino moderno e dell'individuo nella sua specificità.



Esse forniscono immediatamente opportunità per riflettere su quale fisica quantistica proporre nella scuola, per quali scopi, con quali contenuti e con quale approccio, interroga su quali possano/debbero essere i rapporti tra la programmazione scolastica di ciascun insegnante e i manuali, ma anche sui quali debbano essere i rapporti tra la ricerca in didattica della fisica e la prassi scolastica.

Nascono così alcune domande. Quali aspetti concettuali fondamentali della fisica quantistica il cittadino di media cultura dovrebbe conoscere? Perché? È davvero possibile presentare in maniera onesta e significativa la fisica quantistica nella scuola secondaria? Quali obiettivi culturali e disciplinari relativi alla fisica quantistica sono proponibili a studenti di scuola secondaria di secondo grado? Quale ruolo gioca il formalismo matematico all'interno di tali obiettivi? Quali ricostruzioni didattiche dei contenuti possono rappresentare quadri concettuali opportuni per ottenere tali obiettivi?

Come contraltare un po' acritico ai problemi posti da queste domande, troviamo la pressoché universale presenza nei manuali scolastici, anche della scuola primaria, di schemi e disegni riguardanti l'atomo raffigurato in maniera elementare come una pallina centrale, rappresentante il nucleo, circondato da palline più piccole (gli elettroni) che gli ruotano intorno, come se questo fosse possibile, come se questo aiutasse a capire.

I risultati delle ricerche in didattica della fisica sono chiari e conosciuti da almeno una ventina d'anni. Molti allievi (anche studenti universitari di corsi di laurea scientifici) mostrano grandi difficoltà nella comprensione degli aspetti rilevanti della fisica quantistica. Nel 2002, al Mount Holyoke College, una delle prestigiose Gordon Research Conference è stata interamente dedicata all'argomento e un intero numero dell'*American Journal of Physics* (*Am. J. Phys.*, 2002) ha messo in luce le difficoltà di apprendimento della meccanica quantistica da parte di studenti universitari. Anche in Italia, il problema viene studiato da più di vent'anni dai principali gruppi di ricerca in didattica della fisica, che hanno formulato interpretazioni e proposte (vedi ad esempio: Michelini, 2008; Tarsitani, 2008; Giliberti, 2002a, 2002b, 2007, 2008).

Ne è emerso che, spesso gli insegnanti di scuola secondaria superiore (peraltro molti laureati in matematica) non possiedono un quadro coerente della fisica

quantistica e gli studenti hanno grandi difficoltà ad affrontare i principali aspetti concettuali della stessa.

L'approccio tradizionale all'insegnamento della fisica quantistica è causa di profondi fraintendimenti e incomprensioni e non basta un insegnamento concettualmente attento e coerente per risolvere il problema, se si rimane all'interno dell'insegnamento "standard".

In questo lavoro, proporremo che, per poter risolvere almeno parte di queste difficoltà, come condizione per ogni approccio significativo alla didattica della fisica quantistica, ci si debba riferire in maniera rigorosa al formalismo matematico della teoria per capirne il significato e la nozione di realtà da essa implicata. Questa raccomandazione, che pare per molti aspetti ovvia, in generale non viene neppure presa in considerazione, così che, nelle interpretazioni della fisica quantistica, vengono aggiunti moltissimi concetti estranei alla teoria che provengono probabilmente da schemi di senso comune o da idee molto ambigue sulla natura e sullo scopo della fisica stessa (Cavallini, Giliberti, 2008; Giliberti, 2014a).

2. La spiegazione in Fisica

Molte volte per spiegare qualcosa facciamo un'analogia con altre cose che conosciamo, che ci sono familiari e che, spesso, proprio per questo non riteniamo necessario spiegare. Per esempio, che una confezione con sei bottiglie d'acqua pesi di più di una che ne contenga una soltanto non ha bisogno di spiegazioni, ci sembra evidente.

Anche nell'ambito della didattica della fisica, si ritiene che le analogie possano efficacemente essere utilizzate per sviluppare modelli mentali "corretti" da parte degli studenti (Duit, 1996). Ma, perché ciò possa accadere risulta importante riflettere e approfondire questioni legate alla natura della scienza.

In fisica, la spiegazione avviene attraverso la costruzione di un modello. Lo spessore semantico di quest'ultima parola (anche quando ci si limiti alla sola fisica) è vario: è un modello quello di Drude che spiega la conduzione elettrica sulla base della meccanica e dell'elettromagnetismo; ma è un modello anche quello dell'atomo di Bohr, che costituisce sostanzialmente una spiegazione *ad hoc* basata su nuove regole difficilmente generalizzabili a contesti diversi; così come è un modello anche il Modello Standard della fisica delle particelle, che è, invece, una teoria, la più generale che possediamo.

Noi, seguendo il progetto (finanziato dal CNR) italiano TIDIFI (Tecnologie dell'Informazione nella Didattica della Fisica e nella formazione degli Insegnanti), intenderemo con "modellizzazione" quel processo cognitivo che costruisce la spiegazione di un fenomeno fisico reale per mezzo di schemi e principi fondamentali appartenenti a una precisa teoria fisica. In tale accezione, l'attività di modellizzazione parte mettendo in evidenza alcune regolarità dei fenomeni naturali osservati e producendo quello che possiamo chiamare un modello *descrittivo* che mette in relazione quantità fenomenologiche misurabili direttamente. Ne è un esempio la legge di Boyle che connette temperatura e volume di una fissata quantità di gas. L'attività continua, poi, con la costruzione di un modello esplicativo che "spiega" le proprietà messe in evidenza dal modello descrittivo. Per fare ciò utilizza la struttura astratta di una teoria e, in generale, presuppone l'esistenza di proprietà non direttamente osservabili, ma che sono fondamentali nell'interpretare le proprietà messe in evidenza dal modello descrittivo. Nel nostro esempio, un modello esplicativo è quello cinetico, nel quale i gas sono pensati come costituiti da atomi soggetti alle leggi della



meccanica newtoniana (cfr. http://www.uop-perg.unipa.it/IMOFI/Imofi_It/IMO-FI.html).

La costruzione di una teoria fisica segue lo stesso schema che abbiamo appena delineato per i modelli per quanto riguarda le fasi iniziali. In generale, infatti, l'indagine fisica comincia con schemi e concetti che non riteniamo abbiano bisogno di essere spiegati; per i quali utilizziamo linguaggio e nozioni di uso comune (nel nostro esempio, dobbiamo innanzitutto considerare un cilindro contenente un gas, aria per fissare le idee, dotato di un pistone che possiamo comprimere – possiamo immaginare una pompa da bicicletta – accorgerci che la compressione scalda le pareti del cilindro, ecc.; in questa descrizione, utilizziamo senso, linguaggio e schemi comuni). In seguito, procede introducendo altre idee o addirittura concetti per mezzo di quelle che possiamo chiamare “preteorie” (schemi comuni per la spiegazione di comportamenti dati per veri, come quello di elementari strumenti di misura; per riferirci sempre all'esempio precedente, per fare misure utilizzeremo un termometro del quale abbiamo un'idea schematica di comportamento; inoltre dovremo avere una definizione, seppure primitiva, almeno operativa, di pressione). Infine, l'indagine fisica arriva a costruire teorie vere e proprie, determinate dai concetti di base introdotti sopra attraverso gli schemi comuni di spiegazione, più le “preteorie” e con l'aggiunta fondamentale di nuovi concetti ben definiti e ben formalizzati; strumenti concettuali astratti che definiscono la struttura nella quale costruire modelli esplicativi; (nel nostro esempio, la meccanica statistica che ci suggerisce l'interpretazione di temperatura come misura dell'energia cinetica media delle molecole) (Ludwig, Thurler, 2007).

Una spiegazione scientifica si configura quasi come una storia riguardante il modo in cui alcune entità immaginarie (elementi astratti, abitanti in precisi spazi matematici dotati di strutture più o meno ricche), ma pensate come reali, potrebbero agire insieme, obbedendo alla loro stessa natura (dettata dalle loro proprietà matematiche), per produrre il fenomeno da spiegare (Ogborn, 2010). Nel nostro esempio, la legge di Boyle è spiegata da una modellizzazione newtoniana (Hestenes, 1992) nella quale gli atomi sono pensati come punti materiali la cui variazione di quantità di moto nell'urto con le pareti genera una forza e, quindi, una pressione che risulta proporzionale all'energia cinetica media degli atomi stessi, così come risultava proporzionale alla temperatura nella legge di Boyle; ed è questo uno dei motivi (degli altri che concorrono verso la stessa interpretazione non ci occuperemo) che fornisce la ben nota “spiegazione”, del concetto di temperatura cui abbiamo fatto riferimento poco sopra.

È così l'insieme del formalismo matematico di una teoria, dei fenomeni cui si può “applicare” e delle regole di corrispondenza tra questi due che noi consideriamo realtà fisica (Cavallini, Giliberti, 2008).

Risulta evidente, allora, come ciò a cui diamo il nome di “realtà” sia soggetto a continui cambiamenti perché lo *status* delle entità che formano questa “realtà” risulta molto flessibile in quanto dipendente dalla teoria. Esempi di questo sono i concetti di tempo e di atomo nella loro lunga storia (Bellone, 2008) o, addirittura, quelli di enti che prendono vita e poi svaniscono come non esistenti, come l'etere. Perciò, non è possibile separare l'oggetto della conoscenza dallo strumento di conoscenza: essi devono essere considerati come un tutto unico. E sono proprio le teorie quelle costruzioni mentali che ci aiutano a definire, a trovare e a studiare la realtà e a utilizzare le sue risorse.



3. La fisica quantistica e le sue teorie

L'espressione "fisica quantistica" comprende idee e aspetti molto differenti, che possono essere raggruppati in almeno tre grandi categorie.

La prima è la cosiddetta "Vecchia fisica quantistica" e consiste in alcuni fatti sperimentali connessi alla cosiddetta crisi della fisica classica e a una loro prima interpretazione. Esempi di questo sono l'analisi sperimentale e la spiegazione data da Planck nel 1900 della radiazione emessa da un corpo nero, le leggi dell'effetto fotoelettrico e la loro spiegazione fornita da Einstein nel 1905 e il famoso modello dell'atomo di Bohr. Si tratta di un insieme articolato di modelli aventi in comune l'idea di fondo dell'esistenza dei quanti e di alcune regole dette "di quantizzazione", ma non si tratta di una teoria unica, con principi precisi ben formulati. Infatti, ad esempio, la radiazione di corpo nero sarà coerentemente spiegata soltanto con l'utilizzo della "nuova" statistica quantistica di Bose e la struttura dell'atomo (di ogni atomo, non solo quello dell'idrogeno) dovrà aspettare la meccanica ondulatoria per essere capita.

La seconda categoria è data dalla meccanica quantistica, nata a partire dal 1925. Questa sì è una vera e propria teoria, dotata di assiomi che descrivono il comportamento di un numero finito di particelle interagenti. Ci sono molte formulazioni differenti della meccanica quantistica, che utilizzano formalismi differenti. La più famosa è quella ondulatoria, basata sull'equazione di Schrödinger e l'interpretazione di Born. Poi c'è la versione di Heisenberg e Jordan detta meccanica delle matrici, ma anche quella basata sull'integrale sui cammini e la cosiddetta seconda quantizzazione non relativistica; non solo, si possono trovare anche formulazioni non ortodosse, come quella di Bohm che parte dall'idea di De Broglie dell'onda pilota (Styer, 2002; Giliberti, 2014a).

Per ultima, troviamo la categoria della teoria quantistica dei campi, che è una teoria quantistica relativistica, che descrive un insieme qualsiasi di particelle relativistiche interagenti. Sappiamo che ogni teoria quantistica relativistica avrà l'aspetto della teoria quantistica dei campi a energie di interazione sufficientemente basse (Weinberg, 1995). L'elettrodinamica quantistica, la teoria delle interazioni tra elettroni e fotoni, è formulata in termini di teoria quantistica dei campi e, addirittura, soltanto in teoria dei campi è possibile definire e descrivere correttamente il concetto di fotone; lo stesso Modello Standard della fisica delle particelle è una teoria quantistica dei campi. Insomma, la nostra attuale descrizione del mondo fisico è data nei termini definiti e precisi di questa teoria.

4. Considerazioni per la didattica della fisica

Prima di trovare strategie e metodi perché la didattica della fisica possa essere efficace e culturalmente e personalmente significativa per gli studenti, ci si deve chiedere di che cosa vogliamo parlare, qual è l'oggetto del nostro agire e della nostra proposta didattica. Le risposte, in generale, sono piuttosto ovvie e semplici, perché ci occuperemo di fisica, o meglio, di suoi aspetti specifici, di "argomenti" particolari, come la meccanica, l'ottica, e così via. Nel fare questo avremo come obiettivo la costruzione e la comprensione degli aspetti fondamentali della fisica in oggetto. Per esempio (e non certamente in maniera esaustiva) per quanto riguarda la meccanica, dovremo comprendere i concetti di punto materiale, di velocità, di accelerazione, di massa, di forza e come questi siano tra loro collegati



dai tre principi della dinamica. Oppure, dovremo comprendere il concetto di raggio e le leggi di Snell, per quanto concerne l'ottica geometrica. La metodologia didattica utilizzata dipenderà da scelte personali basate sulle ricerche in didattica della fisica e certamente potrà/dovrà occuparsi delle concezioni comuni, dello sviluppo storico della disciplina e non potrà sottovalutare le difficoltà interpretative, ma, in ogni caso, avrà come obiettivo l'appropriazione dei concetti fisici fondamentali. Così, in ottica geometrica, il cammino didattico affronterà l'idea di sorgente di luce, l'importanza dell'occhio nella visione e magari anche l'ottica degli antichi greci, con l'obiettivo di costruire e rendere credibili e utili per gli studenti le leggi di Snell per interpretare il mondo. Magari lasciando un po' di spazio per la discussione dei limiti della teoria. Allo stesso modo, in termodinamica, i concetti di temperatura, calore ed energia saranno costruiti in maniera da soddisfare i principi della termodinamica.

Purtroppo, però, nella prassi scolastica, i concetti fisici vengono spesso considerati come realtà in sé, indipendenti dalla teoria. Per riprendere il discorso sull'ottica geometrica, ad esempio, i raggi di luce vengono spesso insegnati come avessero realtà fisica effettiva e non come idealizzazioni (è comunissimo sentir parlare di "raggio" laser per intendere il *fascio* di luce prodotto da un laser): gli studenti pensano spesso che la luce sia "costituita" da raggi che escono dalla sorgente e non che quella a raggi sia una teoria esplicativa e con un ambito di applicabilità piuttosto limitato. Ancora più chiaro, forse, è il caso delle forze che vengono percepite dagli studenti come elementi appartenenti al piano della realtà fisica e non come elementi teorici formali che assumono il loro significato fisico soltanto all'interno della meccanica classica, per mezzo delle loro proprietà formali fissate assiomatiche dai tre principi della meccanica. Il fatto appartenente alla realtà fenomenologica che un sasso lasciato libero cade vero il suolo viene spiegato a scuola con l'esistenza di una forza di gravità "oggettiva" appartenente allo stesso piano di realtà.

Il fisico viene visto come un archeologo che scopre un'anfora sotto la sabbia, e dal momento che l'ha trovata la mostra in bella vista, in modo che possa essere osservata da tutti: quell'anfora c'era già prima, solo che era nascosta (Giliberti, 2014b). Così, ad esempio, viene presentato il conosciutissimo secondo principio della dinamica, $F=ma$; come se fosse stato difficile scoprirlo, un lavoro durato secoli, ma, da quando Newton l'ha trovato, come non vederlo chiaramente all'opera in mille manifestazioni quotidiane?

Ma non è andata così. Newton non ha scoperto le famose leggi del moto andandole a cercare da qualche parte; esse non sono neppure "scritte" negli esperimenti. Spesso, invece, si pensa proprio in questo modo; e che, perciò, basti un acuto e preparato osservatore per scoprire leggi fisiche. Il piano fenomenologico e quello interpretativo sono sovrapposti: perciò il fatto che un fisico di professione possa leggere i fenomeni meccanici quotidiani come risultato dell'azione di $F=ma$ non viene considerato come esprime le potenzialità interpretative della teoria newtoniana, ma come evidenza dell'esistenza delle forze *in sé* e della validità dei principi della dinamica come illustrazione del comportamento delle forze stesse.

Da questo punto di vista, il famosissimo brano del "Saggiatore" di Galileo "La filosofia naturale è scritta in questo grandissimo libro [...] io dico l'universo, ma non si può intendere se prima non s'impara a intender la lingua e conoscer i caratteri nei quali è scritto. Egli è scritto in lingua matematica" è fonte di fraintendimenti, infatti le equazioni che spiegano i fenomeni non sono già scritte, è piuttosto il fisico che le scrive; o meglio, è la fisica in generale l'autrice del libro, con mille cancellazioni e riscritture di interi capitoli.



Nell'atteggiamento appena discusso, si nasconde un grande problema, evidenziato in maniera particolare dalla fisica quantistica. Infatti, come abbiamo appena detto, anche per quanto riguarda la fisica classica, i concetti vengono presentati come elementi di realtà indipendenti dalla teoria e la matematica viene vista in maniera un po' banale come un linguaggio che descrive tali elementi. Così si pensano come esistenti in maniera ingenua le forze, il calore, l'energia... e si considerano le leggi fisiche, scritte in termini matematici, come relazioni tra questi enti. Ma nella descrizione della fisica quantistica il problema diventa ancora più grande. Infatti le parole che contraddistinguono gli enti e i concetti di ogni teoria quantistica possono condurre a idee molto fuorvianti. Facciamo l'esempio del concetto di particella e, più specificamente ancora, quello di elettrone. Quando ne parliamo dovremmo (ma quanto raramente accade a scuola) innanzitutto stabilire il contesto in cui lo facciamo, cioè la teoria di cui vogliamo avvalerci. Per esempio, non possiamo certamente utilizzare la "Vecchia teoria dei quanti" perché, come abbiamo già detto, e a dispetto del suo nome, essa non è affatto una teoria, ma, piuttosto un coacervo di modelli costruiti *ad hoc* per spiegare questa o quella fenomenologia. Per fissare le idee, supponiamo, quindi, di scegliere come contesto quello dato dalla teoria della meccanica quantistica in una delle sue formulazioni, per esempio quella di Schrödinger (Styer et al, 2002). A questo punto dobbiamo capire con chiarezza quello che intendiamo, quello che la teoria ci permette e quello che non ci permette di dire con quella parola/concetto. Nel nostro esempio (e in maniera un po' sbrigativa) intenderemo con "elettrone" l'insieme costituito da una precisa carica e , una fissata massa m e $spin\ \frac{1}{2}$ che andranno a determinare univocamente l'espressione esatta dell'equazione di Schrödinger da utilizzare e lo spazio di Hilbert in cui cercarne le soluzioni. Dal punto di vista sperimentale, utilizzeremo la "regola di corrispondenza" per la quale si dirà di aver rivelato un elettrone, in presenza di un evento in cui in un rivelatore verrà scambiata una carica e , una massa m e un momento angolare intrinseco $\frac{1}{2}$. Di questo (ma non certamente soltanto di questo) la teoria parla e, perciò di questo effettivamente si può parlare dal punto di vista della fisica.

Attenzione, invece, a non implementare l'idea che le particelle indichino precise entità fisiche nel senso del realismo ingenuo e che queste entità (ingenua) coincidano con i quanti della teoria. Abbiamo detto che nella costruzione fisica la realtà emerge dall'insieme delle interpretazioni coerenti della teoria di riferimento. La parola "particella" riferita all'elettrone ha una forte connotazione metaforica proveniente dal linguaggio quotidiano cui, però, corrispondono precise grandezze ben formalizzate nella teoria. È l'evento di interazione elementare (di rivelazione di un quanto) che ci conduce alla parola "particella" con un uso, appunto, metaforico della parola presa dalla fisica classica e dal senso comune. Ma la parola "particella" genera un'immagine nella nostra mente e, come dice Wittgenstein nelle "Philosophical Investigations", "[l'immagine] [...] allude già a un impiego determinato. Così si beffa di noi." In sostanza ci impedisce di capire se non ci concentriamo sul significato della teoria. Per continuare l'esempio, in meccanica quantistica particelle dello stesso tipo sono identiche: non solo hanno la stessa massa, la stessa carica, uguale $spin...$ ma non sono neppure distinguibili dalla loro posizione (come accadrebbe, invece, per due identiche palle da biliardo). Insomma, due particelle identiche hanno proprio *tutte* le stesse proprietà fisiche. Così, in un sistema costituito da due elettroni con diversa energia, potremo dire che un elettrone ha una certa energia e che l'altro ne ha un'altra, ma potrebbe essere non soltanto in pratica, ma anche in teoria, impossibile rispondere alla domanda: "Quale elettrone ha quale energia?". Perciò questa domanda dovrebbe risultare addirittura impensabile quan-



do il concetto di particella quantistica fosse compreso. In termini più formali, infatti, la funzione d'onda ottenuta dallo scambio di queste due particelle porterebbe alle stesse previsioni in qualsiasi esperimento di fisica. È per quanto detto qui sopra che il contenuto semantico intuitivo della parola “particella” dato ai quanti della meccanica quantistica non è, in generale, adeguato e non si può in alcun modo interpretare la teoria a partire dalle immagini che le parole generano inevitabilmente nella nostra mente. È proprio così, ad esempio, che nascono i cosiddetti aspetti paradossali della meccanica quantistica (come ad esempio il paradosso su “quale cammino?” nell'esperimento della doppia fenditura): essi sono paradossali soltanto quando si guardino con gli occhi riempiti dalle immagini evocate con forza dalle parole (nel nostro esempio si considerino gli elettroni come oggetti materiali); ma non sono, in alcun modo paradossi della teoria.

5. Considerazioni per la didattica della fisica quantistica



Dalle brevi considerazioni svolte fin qui, risulta evidente la totale asimmetria di trattamento che si dà, nella prassi scolastica, alla presentazione della fisica classica e di quella quantistica. Mentre la prima viene presentata avendo in mente (sia pure in maniera molto ingenua) che le grandezze fisiche introdotte obbediscono a principi ed equazioni di una teoria di riferimento, per esempio campo elettrico e campo magnetico sono costruiti in maniera che obbediscano alle equazioni di Maxwell; la seconda, con la scusa della difficoltà del formalismo matematico, è introdotta con parole e termini che fanno riferimento ai modelli della vecchia teoria dei quanti. E, perciò stesso, in quanto non riferiti a una teoria coerente, sono incomprensibili e, soprattutto sono completamente avulsi dal *corpus* delle conoscenze fisiche acquisite dalla disciplina. Sarebbe come se, in meccanica ad esempio, considerassimo le forze come grandezze che permangono nei corpi e che si esauriscono col tempo e non, invece, dovute all'interazione tra due corpi e soggette ai principi della dinamica; e questo venisse giustificato dal fatto che, per qualche tipo di scuola ritenessimo troppo difficile dal punto di vista formale l'equazione $F=ma$.

Al contrario, ciò che è opportuno fare è scegliere una teoria fisica di riferimento (in una delle sue formulazioni), identificare i concetti della teoria (quello di cui parla e quello di cui si può parlare) e, infine, capire le loro relazioni e il loro significato all'interno della teoria.

Se si agisce in maniera diversa, si rischia, fra l'altro, di non avere alcuna risposta alle domande poste da studenti interessati. Per meglio capire la questione, riporto qui di seguito alcune domande fatte da studenti dopo o durante un insegnamento che ha seguito il percorso tradizionale.

“...Dall'esperimento della doppia fenditura abbiamo concluso che non si può parlare di traiettoria per i fotoni. Eppure quando faccio l'esperimento la luce esce dal laser e arriva sulla lastra fotografica in puntini precisi. Ma allora, che cosa fanno i fotoni che escono dal laser e arrivano sulla lastra?”

“Prof., Prima ci ha parlato della luce come un'onda, poi ci ha parlato dei fotoni, poi del dualismo. Ma insomma cos'è davvero la luce?”

“Cos'è il fotone?”

“...Ci parlava dell'ambito di validità delle teorie... qui è lo stesso: per gli esperimenti della fisica classica usiamo la teoria ondulatoria, per il corpo nero e l'effetto fotoelettrico usiamo i fotoni...”

“Insomma De Broglie disse che gli elettroni come i fotoni si muovono di moto sinusoidale, o no?”

“Ci diceva che Thomson ha preso il premio Nobel... ma a fare un modello così... con gli elettroni come l'uvetta, che poi non funziona neanche... sono capace anch'io!”

“Mi può spiegare perché i livelli di energia dell'atomo sono quantizzati?”

“Insomma, abbiamo visto tanti modelli di atomo... ma lei l'atomo come se lo raffigura?”

“Ma se l'elettrone non ha una traiettoria come fa a ruotare su se stesso?” (Lo studente si sta riferendo allo *spin*)

In generale, nell'organizzazione di una efficace didattica della fisica quantistica, l'insegnante, prima di scegliere quale immagine ne vuole dare, nella scuola o nella società, riteniamo che debba avere:

- Consapevolezza che lo sviluppo teorico della fisica quantistica non si è esaurito con la formulazione della meccanica quantistica nel 1926, ma si è sviluppato nella teoria quantistica dei campi.
- Consapevolezza della necessità di avere come riferimento una precisa teoria fisica formale.
- Consapevolezza del cambiamento di significato di alcuni fondamentali concetti quantistici nel passaggio dalla vecchia teoria dei quanti, alla meccanica quantistica e infine alla teoria quantistica dei campi di oggi, anche alla luce di esperimenti recenti.
- Consapevolezza della dipendenza delle concezioni difformi degli studenti dal tipo di approccio seguito per la presentazione della fisica quantistica.
- Consapevolezza dell'importanza, ai fini di una presentazione didattica, di rivedere “la fisica” anche quella cosiddetta “classica” dal punto di vista della fisica “di oggi”.
- Consapevolezza della non univocità delle scelte didatticamente efficaci, da cui discende la libertà (da parte dell'insegnante) di proporre una propria *Weltanschauung*, vincolata dalla conoscenza delle interrelazioni tra formulazioni diverse e delle loro soggiacenti rappresentazioni del mondo.

In relazione, poi, alla prassi consolidata e alle indicazioni ministeriali italiane, riteniamo indispensabili, almeno da un punto di vista pragmatico, che vengano affrontati i seguenti contenuti disciplinari (ovviamente alla luce di quanto sopra esposto): il concetto di quanto come fondamentale nella descrizione delle interazioni microscopiche; il concetto di stato quantistico e della sua evoluzione temporale; la necessità di una teoria lineare nella descrizione dei sistemi quantistici; la genuinità della descrizione probabilistica in fisica quantistica; le relazioni di De Broglie; le relazioni di Heisenberg; la comparsa di livelli energetici discreti per i sistemi confinati; e l'applicazione di quanto visto in precedenza a qualche caso concreto per mostrare come la fisica quantistica sia in grado di spiegare il mondo intorno a noi.

Per quanto riguarda la nostra ricerca didattica (Giliberti, 2008) riteniamo del tutto inopportuna l'insistenza su quella che viene tradizionalmente chiamata “crisi” della fisica classica utilizzando con approccio (pseudo)storico. Oggi, infatti, conosciamo molta fisica in più, molti più fatti sperimentali di quanto conoscessimo più di un secolo fa. E allora perché complicarci la vita invece di utilizzare le nuove conoscenze, talvolta molto eloquenti e anche più facilmente comprensibili? (Vedi Arndt, Olaf Nairz, Voss-Andreae, Keller, Gerbrand van der Zouw, Zeilinger, 1999, come esempio di un'esperienza eclatante all'interno di una lunghissima serie di esperimenti di grande valore didattico). Da questo punto di vista, riteniamo del



tutto inopportuno partire dal problema dell'emissione di corpo nero (ci vuole proprio troppa fisica per capirlo), anche l'insistenza sui modelli atomici basati sulla vecchia meccanica quantistica (come il modello di Bohr) non sono affatto utili per una comprensione del problema, anzi sono nettamente fuorvianti; così come è inopportuno discutere gli aspetti epistemologici della fisica quantistica a livello divulgativo e senza avere come riferimento una precisa teoria, sia questa la meccanica quantistica o la teoria quantistica dei campi.

Per quanto riguarda quest'ultimo punto, e nonostante le grandi difficoltà formali, riteniamo che l'approccio fornito dalla teoria quantistica dei campi sia più adatto a una trattazione didattica per la scuola superiore di secondo grado, perché a nostro avviso chiarisce in maniera più netta alcuni aspetti determinanti della quantizzazione. Per esempio, considerare i quanti come legati alle eccitazioni dei modi normali di un campo descritto nello spaziotempo (come fatto dalla teoria quantistica dei campi), invece che collegati a una funzione nello spazio delle configurazioni, è nettamente più comprensibile e rende evidente il fatto che tali quanti sono identici e indistinguibili (Giliberti, Lanz, Cazzaniga, 2004; Cavallini, Giliberti, 2008).

Come già accennato, inoltre, riteniamo che i cosiddetti paradossi della fisica quantistica vadano, sì discussi per chiarire l'impossibilità di una ingenua teoria dei quanti, ma non come aspetti paradossali della teoria! Il cosiddetto dualismo onda-corpuscolo non è per niente paradossale quando si faccia riferimento alla teoria, unico criterio di spiegazione scientifica.

Semmai potrebbe valere la pena discutere un aspetto peculiare della meccanica quantistica e che di solito non viene neppure menzionato nelle trattazioni elementari e cioè il fatto che all'interno della teoria si nasconde una dicotomia ineludibile. Infatti, perché la teoria stessa possa essere formulata, l'apparato di misura delle grandezze fisiche e il contesto sperimentale, devono comportarsi in maniera "classica", mentre il sistema in esame sarà, invece, soggetto alle leggi quantistiche. Ad un'analisi superficiale, questo potrebbe non sembrare un fatto strano: infatti abbiamo già detto che ogni teoria si basa, per la sua costruzione e per i fatti nuovi che emergono e che necessitano di spiegazione, sul comportamento di strumenti di misura che obbediscono a teorie precedenti. Il punto delicato è però che, per tutte le teorie non quantistiche, le pre-teorie possono essere rilette, reinterpretate, spiegate in termini delle nuove teorie scoperte. Invece, nel caso delle teorie quantistiche, la situazione è un po' differente. Infatti, per ottenere una misura dobbiamo produrre un processo di amplificazione che produca un cambiamento macroscopico nell'apparato. Ma, siccome anche l'apparato di misura è, in linea di principio, descrivibile in termini quantistici, ne nasce un'aporìa (Ghirardi, 2015) che ha generato molte ipotesi tecniche, la cui risposta non sembra definitiva, o che ci fa chiedere se esista un parametro di macroscopicità che permetta di distinguere i due comportamenti ("classico" e "quantistico"); ma anche di questo, almeno finora non se ne ha traccia (basta considerare, a questo proposito tutti gli esperimenti di interferenza con le macromolecole, come ad esempio il già citato Arndt, Olaf Nairz, Voss-Andreae, Keller, Gerbrand van der Zouw, Zeilinger, 1999).

6. Conclusioni

Così come già facciamo (certe volte inconsciamente) con la fisica classica, quando ci occupiamo di didattica della fisica quantistica, risulta indispensabile fare riferimento in maniera chiara e precisa a una precisa formulazione della teoria. A seconda della propria visione del mondo e della vita e del contesto scolastico,



possiamo scegliere tra una delle molte formulazioni della meccanica quantistica o della teoria quantistica dei campi. Personalmente, le scelte cadono su quest'ultima, principalmente per alcuni aspetti interpretativi ed epistemologici che risultano più chiari quando collegati formalmente a specifici campi nello spaziotempo invece che a più astratti vettori in uno spazio delle configurazioni; e poi perché ci sembra più chiara la struttura dinamica attribuita ai quanti.

I percorsi scolastici sviluppati dovranno, inoltre, tenere conto che la teoria deve essere utile per spiegare fenomeni: la struttura degli atomi, gli spettri atomici, i solidi, la superconduttività ecc. e non essere soltanto un interessante e affascinante “gioco” concettuale. Ribadiamo che qualsiasi presentazione didattica non può evitare di fare riferimento a una teoria precisa e di servire a spiegare “cose del mondo”.

Purtroppo, molti percorsi di insegnamento sono estremamente carenti su un punto cruciale: il significato e la “realtà” della fisica quantistica (così come quello di ogni altra teoria) vanno cercati nella teoria stessa. Così come il concetto di “forza” trae il suo significato dalla meccanica di Newton e quello di “campo elettrico” è inseparabile dalle equazioni di Maxwell, quello di particella, di stato o di evoluzione hanno fondamento nella meccanica quantistica.

Molte difficoltà didattiche emergono proprio dalla mancanza di consapevolezza della natura delle teorie, che vanno identificate con il loro formalismo matematico corredato da una interpretazione fisica che ne fissi le regole di corrispondenza con gli esperimenti possibili. Invece, spesso si propongono concetti fisici riferendosi a una miscela di idee prese acriticamente da altri ambiti e da altre teorie, con l'aggiunta di schemi di senso comune o pre-scientifici.

Perciò, in didattica della fisica quantistica, proponiamo di attenerci rigorosamente al formalismo matematico (della Meccanica Quantistica o della Teoria Quantistica dei Campi) per evitare interpretazioni fuorvianti; cosa che capita spesso quando concetti quantistici vengono accomunati a concetti classici utilizzando schemi di senso comune.

Per questo, risulta indispensabile una ricostruzione didattica dei contenuti con un preciso riferimento alla teoria e che sappia costruire come “casi limite” i concetti più consueti già conosciuti.

La fisica quantistica, in questo senso, è poi particolarmente utile perché chiarisce anche molti aspetti relativi a concetti chiave della fisica classica, mettendone in evidenza connessioni e interpretazioni non sempre consuete.



Riferimenti bibliografici

- Arndt M., Olaf Nairz O., Voss-Andreae J., Keller C., Gerbrand van der Zouw G., Zeilinger A. (1999). Wave-particle duality of C₆₀, *Nature* 401, 680-682.
- Bellone E. (2008). *Molte nature*. Milano: Raffello Cortina.
- Cavallini G., Giliberti M. (2008). La lezione dalla Fisica Quantistica, *Epistemologia* 31(2), 219-240.
- Duit R., Glinn S. (1996). Mental modelling. In G. Welford, J. Osborne (Eds), *Research in science education in Europe: current issues and themes* (pp. 166-176). London: Falmer Press.
- Ghirardi G. (2015). *Un'occhiata alle carte di Dio. Gli interrogativi che la scienza moderna pone all'uomo*. Milano: Il Saggiatore.
- Giliberti M. (2002a). Alcuni elementi di didattica della fisica moderna nel corso di “Teorie Quantistiche” della S.I.L.S.I.S.-MI; *La Fisica Nella Scuola*, XXXV (2), Supplemento, 56-75.
- Giliberti M. (2002b). A modern teaching for modern physics in pre-service teachers train-

- ing. In M. Michelini, M. Cobal (Eds.) *Developing Formal Thinking in Physics. Selected Contributions of the First International GIREP Seminar* (pp. 403-408). Udine: FORUM.
- Giliberti M. (2007). *Elementi per una didattica della Fisica Quantistica*. Milano: CUSL.
- Giliberti M. (2008). Campi e particelle: introduzione all'insegnamento della fisica quantistica. In P. Guidoni, O. Levrini (Eds.), *Approcci e proposte per l'insegnamento-apprendimento della fisica a livello preuniversitario* (pp. 161-181). Udine: FORUM.
- Giliberti M. (2014a). Theories as crucial aspects in quantum physics education. In B. G. Sidharth, M. Michelini, L. Santi (Eds.), *Frontiers of Fundamental Physics and Physics Education Research* (pp. 497-503). New York: Springer.
- Giliberti M. (2014b). *Fisica a teatro*. Roma: Aracne.
- Giliberti M., Lanz L., Cazzaniga L. (2004). Teaching Quantum Physics to student Teachers of S.I.L.S.I.S.-MI. In M. Michelini (Ed.), *Quality Development in Teacher Education and Training, Selected Contributions* (pp. 425-429). Second International GIREP Seminar Udine: FORUM Editrice Universitaria Udinese.
- Hestenes D. (1992). Modeling Games in the Newtonian World, *Am. J. Phys.* 60, 732-748.
- Ludwig G., Thurler G. (2007). *New foundation of physical theories*, Heidelberg: Springer-Verlag.
- Michelini M., Santi L., Ragazzon R., Stefanel A. (2008). La meccanica quantistica nella scuola superiore per costruire il pensiero teorico. In P. Guidoni, O. Levrini (Eds.), *Approcci e proposte per l'insegnamento-apprendimento della fisica a livello preuniversitario*. Udine: FORUM.
- Ogborn J (2010). Science and Commonsense. In M. Vicentini, E. Sassi (Eds.), *Connecting Research in Physics Education with Teacher Education*. New Delhi: ICPE. Estratto da <https://web.phys.ksu.edu/icpe/publications/teach2/Ogborn.pdf>
- Styer D. et al (2002). Nine formulation of quantum mechanics. *Am. J. Phys* 70(3), 288-297.
- Tarsitani C. (2008). Le linee essenziali di un approccio alla fisica quantistica: problemi didattici e concettuali. In P. Guidoni, O. Levrini (Eds.), *Approcci e proposte per l'insegnamento-apprendimento della fisica a livello preuniversitario*. Udine: FORUM.
- Weinberg S. (1995). *The quantum theory of fields, vol. I*. Cambridge: Cambridge University Press.

