

## GLI INSEGNANTI RIFLETTONO SUI NODI CONCETTUALI DELLA MECCANICA QUANTISTICA

**M. Michelini, L. Santi, A. Stefanel**

*Unità di Ricerca in Didattica della Fisica, Università di Udine*

### 1. Introduzione

Accanto alla formazione in rete sulla meccanica quantistica (MQ) nell'ambito di IDIFO sono state proposte diverse attività nei workshop in presenza. Esse erano in particolare mirate alla riflessione e alla discussione sui nodi concettuali fondanti della teoria:

- una tavola rotonda di presentazione e confronto sulle diverse impostazioni delle proposte sull'insegnamento della MQ offerte in IDIFO (Sperandeo 2004; Stefanel 2008, Battaglia et al. 2010) e delle esperienze di sperimentazione
- una serie di seminari partecipati sui suoi contenuti concettuali, epistemologici, storici
- un work-shop di analisi approfondita di una proposta didattica basata sulla ricerca (Ghirardi et al. 1997; Michelini et al. 2000)
- approfondimenti sull'analisi di casi proposti in forma problematica, come angoli di riflessione di percorsi didattici sulla MQ, in particolare incentrati su: logica quantistica; formalismo; aspetti storici; nodi concettuali

È stato messo a punto un questionario a risposte aperte, con l'obiettivo di costruire un filo conduttore di riferimento alle discussioni sulla MQ previste nelle sopraelencate attività in presenza. I punti del questionario sono stati proposti come elementi di riferimento e guida per le discussioni e progettazioni di materiali didattici in questo campo e come griglia per la elaborazione del report finale di ciascun corsista sul workshop in presenza. Il questionario è stato elaborato a seguito di una serie di approfondite discussioni concernenti contenuti e obiettivi delle diverse attività del work-shop sopraindicate<sup>1</sup>.

Vengono qui presentati gli elementi di base a partire dai quali è stata sviluppata la progettazione del questionario, la sua struttura finale e i nodi su cui è stato costruito, l'analisi di casi in merito alle risposte dei corsisti e le conclusioni in particolare in merito a:

- risposte tipiche dei corsisti
- nodi disciplinari e didattici che esse evidenziano
- indicazioni per la formazione dei docenti sull'insegnamento/apprendimento della meccanica quantistica nella scuola superiore.

### 2. La progettazione del questionario

Nella progettazione del questionario ci si è proposti l'obiettivo di costruire uno strumento aperto per la raccolta di concezioni degli insegnanti sui nodi principali della MQ e al modo in cui li si può affrontare in classe con gli studenti.

Si sono tenuti in conto quattro diversi riferimenti:

- A) la prospettiva didattica del dibattito sui fondamenti concettuali della teoria quantistica per un riferimento generale sui nodi disciplinari a cui guardare (D'Espagnat 1976; Cohen-Tannoudji et al. 1977; Sonego 1992; Ghirardi 1997; Styer 2002; Newton (2002); Pospiech et al. 2008)
- B) i questionari e i quesiti proposti nelle ricerche sull'apprendimento della MQ, per un quadro dei contesti indagati e delle modalità con cui sono stati esplorati (Fischler, Lichtfeldt 1992; Niedderer, Daylitz 1999; Johnston et al. 1998; Singh 2001; Cataloglu, Robinett 2002; Muller, Wiesner 1999, 2002)

<sup>(1)</sup> Tali discussioni sono state condotte dagli autori insieme con R. Giannitrapani, L. Marinatto, G. Pospiech che hanno contribuito in diverse attività del workshop in presenza.

- C) le principali proposte basate sulla ricerca sull'insegnamento/apprendimento della MQ nella scuola superiore dell'Europa continentale e nei college dell'area anglosassone, per un riferimento sui nodi da esse affrontati (Zollman 1999; Phs.Educ 2000; AJP 2002)
- D) le ricerche sulla formazione insegnanti, da un lato quelli centrati sull'integrazione dei contenuti disciplinari e i contenuti pedagogici (Shulman 1986; Michelini 2004) e la loro valutazione (Eylon, Bagno 2006; Hanley et al. 2008; Schuster et al. 2009) e dall'altro quelle mirate all'innovazione didattica in particolare in MQ (Olsen 2002; Sperandeo 2004; Michelini et al. 2004; Stefanelli et al. 2004; Asikainen 2005; Justi et al. 2005), per le scelte dei nodi da indagare e la tipologia di questionario da proporre

Tali riferimenti hanno fatto da sfondo a un articolato confronto sui diversi piani e diversi aspetti individuati, tra i quali i più dibattuti sono stati: indeterminazione dei processi fisici e incertezza nella misura; interpretazione probabilistica/statistica del processo di misura; proprietà di un sistema e misura; stato, sua rappresentazione, proprietà di un sistema; proprietà intrinseche e proprietà dinamiche; evoluzione dello stato in MQ; logica quantistica e logica classica; il ruolo del formalismo nella teoria; snodi storici come il ruolo della termodinamica nella nascita della MQ e il dibattito onda/particella; differenza tra sovrapposizione classica e quantistica; stati puri e miscele statistiche; interferenza quantistica.

Come esito di tale confronto sono stati distillati pochi nodi problematici proposti su due diversi piani come viene specificato nell'analisi successiva sulla struttura del questionario, lasciando gli altri alla discussione nei workshop in presenza e nei forum di approfondimento in rete.

### 3. La struttura del questionario

Il questionario prevede, oltre alla prima sezione di raccolta dei dati personali e a una breve presentazione dello scopo per cui è stato progettato, due sezioni: la prima focalizzata sui nodi concettuali fondanti della MQ dal titolo "*Elementi su cui focalizzare la riflessione intorno all'insegnamento/apprendimento della MQ*", la seconda su finalità e aspetti rilevanti per una didattica della MQ, dal titolo "*La MQ a scuola*".

#### 3.1 I quesiti della prima parte:

##### *Elementi su cui focalizzare la riflessione intorno all'insegnamento/apprendimento della MQ*

La prima parte del questionario è formata dai seguenti cinque quesiti:

- Q1.1** Il comportamento quantistico: quali sono gli elementi che lo caratterizzano/identificano.
- Q1.2** Le proprietà di un sistema: conoscerle o non conoscerle implica l'esistenza di tali proprietà?
- Q1.3** La misura: come cambiano significato e ruolo della misura in MQ rispetto alla fisica classica?
- Q1.4** Il risultato di una misura: sua prevedibilità e natura oggettiva delle proprietà misurate
- Q1.5** Il dominio della MQ: Si può applicare la MQ ai sistemi macroscopici?

In risposta al primo quesito, focalizzato sugli elementi che caratterizzano il "comportamento quantistico", ci si aspetta che vengano prese in considerazione le due diverse evoluzioni previste in MQ: l'evoluzione unitaria dello stato di un sistema imperturbato, deterministica/reversibile/causale basata sull'equazione di Schrödinger; quella intrinsecamente stocastica/indeterministica che si ha nel processo di misura, sancita nel postulato del collasso. Si vuole in particolare vedere se esse vengono riportate entrambe, se vengono distinte, se esse vengono delineate rimarcando sulla dicotomia deterministico/indeterministico, oppure sulla complementarietà espressa dal dualismo onda-corpuscolo ovvero dal principio di indeterminazione.

Ci si aspetta inoltre che emergano tipici nodi non risolti: l'identificazione della funzione d'onda o del vettore di stato con un ente fisico; il mancato riconoscimento che nella MQ è prevista una doppia evoluzione; il comportamento stocastico dei sistemi microscopici in interazione con un apparato di misura attribuito a perturbazioni casuali piuttosto che alla natura intrinseca di tali interazioni.

Il secondo quesito è focalizzato sulle proprietà dei sistemi e sulla correlazione conoscenza-esistenza delle proprietà. Ci si attende che venga focalizzata l'attenzione sulla possibilità o meno di attribuire una proprietà a un sistema quantistico, sul significato di proprietà in fisica quantistica (ammesso che si accetti la possibilità di attribuirle) e in ogni caso sulla impossibilità di attribuire proprietà a un sistema quantistico senza averlo prima sottoposto a un processo di misura. Ci si può attendere allora anche maggiore enfasi sulla possibilità di attribuire una qualsiasi proprietà a un sistema quantistico, quantomeno come esito del processo di misura secondo una posizione realista (Einstein et al. 1935, Baily 2010), ovvero maggiore enfasi sulla natura astratta della funzione d'onda e sul fatto che "dire che lo stato di un sistema è  $C$  è un'affermazione sulla probabilità di ottenere, per una data variabile dinamica, certi determinati risultati dalla sua misura" (Newton 2004).

Il terzo quesito si correla direttamente al precedente, riguardando in modo esplicito il confronto tra il ruolo del processo di misura in MQ e quello in fisica classica. Nelle risposte a questo terzo quesito ci si attende che venga riconosciuto il processo di misura quantistico come preparazione dello stato di un sistema, ovvero di produzione di proprietà dinamiche di detto sistema. Ci si aspetta in sostanza che venga rilevato il carattere di processo intrinsecamente irreversibile che ha la misura in MQ, ossia di creazione dello stato del sistema sottoposto a misura e, in una prospettiva realista, delle proprietà del sistema misurato che lo determinano, rispetto al ruolo del processo di misura in fisica classica di registrazione di uno stato preesistente a tale processo.

Il quarto quesito approfondisce su quest'ultimo punto in particolare per far emergere la natura non-epistemica dell'uso della probabilità in MQ, rispetto alla natura sempre epistemica del suo uso in fisica classica. Questo quarto quesito esplora inoltre in modo esplicito la natura oggettiva/non-oggettiva delle proprietà dei sistemi quantistici, su cui ci si aspetta vengano focalizzate le risposte.

Dalle risposte ai quesiti 2-4 ci si può attendere che emergano tipici nodi non risolti: l'attribuzione a un sistema di proprietà preesistenti in un processo di misura, pur senza assumere esplicitamente e coerentemente un approccio a variabili nascoste; il mancato riconoscimento dell'entanglement, ovvero la convinzione che si possano attribuire proprietà a sottosistemi di un sistema entangled, ossia che si possano considerare separatamente e che continuino ad avere una loro unitarietà e distinguibilità sottosistemi entangled.

Il quinto ed ultimo quesito riguarda il dominio di applicabilità della MQ. Ci si attende che venga prioritariamente esplicitata l'assenza nella teoria quantistica di un limite di applicabilità e quindi la legittimità di quantizzare anche un sistema macroscopico. D'altro canto ci si può anche aspettare che l'esplicita richiesta in merito all'applicabilità della MQ a sistemi macroscopici attivi considerazioni sul ben noto problema del macrorealismo, sull'entanglement di un sistema quantistico e uno macroscopico, come si ha nel paradosso del gatto di Schrödinger o nell'accoppiamento tra un sistema (quantistico) sottoposto a misura e un misuratore (classico).

Ci si può, infine, attendere che emerga la convinzione che la MQ non possa essere applicata laddove valga la fisica classica e problemi legati alla continuità tra la fisica classica e la fisica quantistica.

### 3.2 I quesiti della seconda parte - La MQ a scuola

La seconda parte del questionario è composta dai seguenti quesiti:

**Q2.1** Perché insegnare MQ?

**Q2.2** Concetti di base irrinunciabili in una proposta didattica in MQ. Spiegare le ragioni delle scelte.

**Q2.3** Quali aspetti privilegiare (formali, storici, logici, concettuali, applicativi)?

I tre quesiti mirano a raccogliere le convinzioni degli insegnanti rispetto alle motivazioni per insegnare la MQ nella scuola, ai concetti irrinunciabili e agli aspetti da privilegiare in una proposta didattica. Ci si aspetta che emerga l'importanza della MQ nella attuale visione del mondo microscopico, il suo ruolo di teoria paradigmatica, il ruolo che essa può avere nella costruzione del pensiero teore-

tico e formale. Ci si aspetta inoltre che emerga il contributo formativo che può avere il ripercorrere la nascita della teoria e i contributi al dibattito epistemologico e filosofico.

Riguardo al secondo quesito ci si aspetta che emerga il concetto di stato quantico e il principio di sovrapposizione. Se vengono inclusi aspetti della fisica dei quanti, ovvero aspetti come l'entanglement e la non-località.

L'obiettivo è quello di raccogliere i principali aspetti indicati, i modi con cui detti aspetti compaiono, le indicazioni sui bisogni formativi degli insegnanti.

#### 4. Contesto e criteri di analisi

I questionari sono stati proposti a un gruppo di 22 insegnanti frequentanti il master IDIFO, come base per l'attività di confronto nel workshop in presenza e per il lavoro di riepilogo. È stato proposto ai corsisti di IDIFO come strumento di lavoro, lasciando libera la restituzione. Solo pochi sono i questionari restituiti compilati (6 in totale). Dato il basso numero di cui è formato il campione si è scelto di effettuare un'analisi prettamente qualitativa delle risposte a ciascuna domanda individuando i diversi elementi emersi, con riferimento a quelli individuati a priori nel paragrafo precedente. Si indicheranno comunque gli aspetti indicati da tutti gli insegnanti del campione o quelli comunque più frequenti, ovvero gli aspetti indicati da singoli. Si tratta quindi di analisi di casi che forniscono, comunque, indicazioni significative sulle concezioni che gli insegnanti hanno maturato nella fase centrale del loro percorso formativo del Mater, sui loro bisogni formativi e su quali indicazioni possono emergere per la formazione insegnanti.

#### 5. Alcuni casi

##### Q1.1 Il comportamento quantistico: quali sono gli elementi che lo caratterizzano/identificano?

Gli elementi che tutti gli insegnanti rilevano come caratteristici del comportamento quantistico sono:

- A1) "l'indeterminismo" o la stocasticità ("l'intrinseca **indeterminazione** che mostrano i sistemi fisici", "La caratteristica forse più peculiare dei sistemi quantistici è il comportamento di tipo stocastico")
- A2) "la non località", in genere associandola all'entanglement.

Vengono anche indicati da singoli i seguenti aspetti: "una descrizione probabilistica per descrivere i fenomeni", "il principio di sovrapposizione", "l'incompatibilità delle osservabili".

I diversi aspetti vengono più spesso associati al comportamento di sistemi (come fatto nella metà dei casi, di cui ai sopracitati esempi); richiamati senza alcuna specificazione (in 2/6 dei casi); riferiti alla descrizione dei fenomeni (in un caso: "necessità di utilizzare una descrizione probabilistica per descrivere i fenomeni").

È interessante osservare che l'accento è sempre posto sul processo di misura, senza per altro esplicitarlo e specificarlo in alcun caso, e solo in un caso anche sul principio di sovrapposizione. L'evoluzione unitaria dei sistemi imperturbati, invece, non viene mai citata.

Emerge l'esigenza formativa di bilanciare la rilevanza data al processo di misura nella teoria quantistica evidenziandone le peculiarità rispetto alla fisica classica, con il riconoscimento del carattere fondante del principio di sovrapposizione e dell'evoluzione unitaria e lineare.

##### Q1.2. Le proprietà di un sistema: conoscerle o non conoscerle implica l'esistenza di tali proprietà?

Tutti i corsisti affermano che una proprietà non esiste prima di essere misurata ("una proprietà non esiste finché non è misurata"; "In meccanica quantistica le proprietà di un sistema nascono con la misura"; "Dopo la misura si può ritenere che il sistema posseda tale proprietà, mentre prima della misura no").

In un solo caso, accanto alla precedente asserzione, emerge la precisazione che in situazioni limite si può essere certi dell'esito di una misura: "a parte il caso eccezionale di un sistema che si trova già in un autostato ben definito". Emergono, inoltre, come asserzioni di singoli: il confronto tra una "teoria ortodossa" e una teoria alla Bohm o a molti mondi; la distinzione tra fisica classica e fisica quantistica ("In fisica classica gli oggetti hanno proprietà fissate che la misura rende solo evidenti. In meccanica quantistica, prima di effettuare una misura non possiamo affermare che un oggetto possiede una proprietà"); il conoscere come atto umano associato alla misura ("Il termine conoscenza presume che si sia fatta una misura relativa alla proprietà del sistema").

Accanto alla sostanziale uniformità delle risposte si possono rilevare alcune espressioni che dovrebbero essere oggetto esse stesse di negoziazione e condivisione: "Secondo l'interpretazione di Bohr, finché una grandezza fisica non è misurata, questa **non è ben determinata**", "prima di effettuare una misura non possiamo affermare che un oggetto possiede una proprietà, ma solo parlare di **probabilità che possieda una proprietà**", "Il termine conoscenza presume che si sia fatta una misura **relativa alla proprietà del sistema**". Le espressioni indicate in grassetto sono ambigue perché possono attivare l'idea che anche in MQ si misurino proprietà preesistenti la misura. Si tratta di aspetti sottili, che tuttavia possono dare luogo a problemi nell'apprendimento degli studenti, in quanto almeno in parte contraddicono le asserzioni da tutti condivise sulla non esistenza delle proprietà prima di una misura, ossia spostano continuamente il riferimento teorico da una interpretazione standard della teoria quantistica a una a variabili nascoste (Bell 1987). Se, come comincia ad emergere da alcuni studi, l'approccio più spontaneo alla fisica quantistica è di tipo realista (Baily, Finkelstein 2010), ovvero secondo riferimenti che richiamano teorie a variabili nascoste (Michellini, Stefanel 2008), è importante curare in modo particolare il linguaggio con cui vengono proposte agli studenti, ovvero discusse con gli insegnanti.

### **Q1.3 La misura: come cambiano significato e ruolo della misura in MQ rispetto alla fisica classica?**

In merito a questa domanda le risposte degli insegnanti sono essenzialmente di un unico tipo, includendo la preesistenza delle proprietà misurate in fisica classica, il ruolo del processo di misura nel determinare/far acquisire la proprietà misurata: "In fisica classica la misura di una proprietà registra una caratteristica del sistema che era preesistente alla misura stessa. In meccanica quantistica, invece, la misura ha un ruolo attivo, nel senso che contribuisce alla determinazione della proprietà misurata"; "In fisica classica l'operazione di misura da indicazioni sul valore di una grandezza che il sistema possedeva un istante prima della misura. In MQ no, l'operazione di misura non fornisce informazioni su proprietà preesistenti del sistema ma è l'operazione di misura stessa che fa sì che il sistema acquisisca una proprietà".

In 4 casi si precisa la natura probabilistica dell'esito della misura ("passare da uno stato di sovrapposizione ad uno stato ben definito, anche se la scelta di quale autostato il sistema raggiungerà è essenzialmente di tipo probabilistico"; "il risultato della misura è di tipo stocastico").

Si rileva qui infine: l'accento sul ruolo attivo del processo di misura, esplicitato nella prima delle risposte riportate, ma presente anche nelle altre come elemento sostanziale; il ruolo del processo di misura nel trasformare uno stato di sovrapposizione in un autostato.

### **Q1.4 Il risultato di una misura: sua prevedibilità e natura oggettiva delle proprietà misurate**

Le risposte dei corsisti a questo quesito mettono in campo i seguenti elementi:

la impossibilità di fare previsioni deterministiche ("il valore che si ottiene in una misura non può essere previsto in modo deterministico") ovvero tout court di fare previsioni (il risultato di una misura non è prevedibile in meccanica quantistica");

- la distribuzione probabilistica dei risultati ("se facciamo infinite copie di uno stato ed eseguiamo infinite misure della stessa osservabile, non otteniamo sempre lo stesso risultato, ma una distribu-

zione di risultati”), ossia la possibilità di fare su di essi soltanto previsioni di tipo probabilistico (“sarà solamente possibile calcolare la probabilità dell’esito della misura”).

Più spesso le risposte richiamano o solo l’indeterminismo o solo l’aspetto probabilistico. Una minoranza delle risposte coinvolge entrambi gli elementi (“Se il sistema non si trova in un autostato della grandezza che voglio misurare, il risultato della misura non sarà preventivamente determinabile, ma sarà solamente possibile calcolare la probabilità dell’esito della misura”).

È interessante osservare, che le asserzioni qui riportate senza ulteriori specificazioni potrebbero essere riferite anche a misure classiche: in una qualsiasi misura ripetuta, infatti, si ottiene sempre una distribuzione di risultati e l’esito della singola misura è indeterminato, seppure atteso all’interno di un certo intervallo.

Di nuovo emerge l’esigenza di creare un linguaggio condiviso attraverso cui esplicitare le peculiarità dell’indeterminismo quantistico e dell’uso della probabilità in MQ e caratterizzarle in modo specifico rispetto al contesto classico.

Riguardo all’oggettività delle proprietà di un sistema, le risposte si dividono tra:

- chi sottolinea lo specifico caso in cui il sistema si trovi in un autostato dell’osservabile misurato, fatto questo che presuppone una precedente misura (“Se il sistema si trova in un autostato dell’osservabile che intendo misurare, posso sicuramente affermare il risultato della misura (sarà l’autovalore corrispondente) – il conoscere però lo stato del sistema presuppone una precedente misura!”).
- chi, in questo caso la maggioranza (2/3), non attribuisce oggettività alle proprietà del sistema (“non si può più parlare di proprietà oggettive di un sistema”, “Le proprietà misurate non hanno una natura oggettiva ma si creano solo nel momento della misura”).

Per quanto nessuna delle risposte chiarisca fino in fondo la portata delle asserzioni fatte, la prima tipologia di risposte sembra richiamare una posizione realista in merito alle proprietà di un sistema quantistico, mentre le altre risposte sembrano rifiutare tale realismo.

L’oggettività/non oggettività delle proprietà di un sistema quantistico dovrebbe essere un nodo affrontato nella formazione insegnante, insieme con una discussione sulla diversa natura delle proprietà intrinseche, che per esempio permettono di definire la natura di una particella rispetto ad altre, e delle proprietà dinamiche, che sono correlate al sistema quando si trova in un ben definito stato.

### **Q1.5 Il dominio della MQ: Si può applicare la MQ ai sistemi macroscopici?**

In merito al dominio di applicazione della MQ, emergono due posizioni principali: A) la non esistenza di limiti di applicabilità della MQ (“Non vi sono limiti di scala all’applicabilità della MQ”) (4/6); B) l’applicabilità della MQ al solo ambito microscopico (“No! La MQ si applica solo ai sistemi microscopici”) (2/6).

Nel primo caso c’è chi supporta la propria posizione richiamando i recenti esperimenti di diffrazione e interferenza realizzati con macromolecole e chi completa la propria risposta affermando che i sistemi macroscopici sono troppo complessi ed è preferibile descriverli con la meccanica classica piuttosto che con complicati calcoli quantistici.

Nel secondo caso vengono richiamati alcuni nodi su cui si scontra l’applicabilità della MQ ai macrosistemi: “Quali sono le dimensioni al di sotto delle quali un sistema è soggetto alle leggi della MQ?”; “Come mai un sistema macroscopico” viene “descritto dalla FC?”; “Come mai per i sistemi macroscopici valgono delle leggi diverse di quelle valide per i sistemi microscopici?”.

In un processo formativo è necessario che le due posizioni emerse, che come si vede compaiono distintamente, si integrino. Da un lato infatti è importante riconoscere che la MQ non ammette limitazioni di principio, né ambiti in cui non sia empiricamente chiaro se applicarla o meno. Dall’altro è importante anche andare a discutere del problema del macrorealismo e del nodo della separabilità di sistema-misuratore (quantistico il primo, classico il secondo) come nodi aperti della ricerca sui fondamenti.

## Parte 2 - La MQ a scuola

### Q2.1 Perché insegnare MQ

In merito alle motivazioni per insegnare MQ nella scuola secondaria, il punto centrale citato da tutti i corsisti è il “valore culturale della MQ”, il fatto di essere una delle “teorie fondamentali della fisica di oggi”, necessaria per “spiegare tutti i fenomeni microscopici”.

In prevalenza (4/6) viene inoltre aggiunto che: “è interessante perché introduce idee assolutamente nuove e contro intuitive rispetto alla fisica classica e al senso comune”; “fornisce una nuova visione della natura fondamentalmente diversa da quella fornita dalla fisica classica”.

In un caso isolato viene portata la motivazione che è importante insegnarla perché permette di evidenziare i limiti di una teoria: “nel caso specifico la FC non è in grado di spiegare il comportamento dei sistemi microscopici e quindi non può essere a questi applicata”.

Il valore culturale e paradigmatico della teoria quantistica, le sue “idee” base, strutturalmente diverse da quelle della fisica classica, e la possibilità di esplorare i limiti di applicabilità della teoria classica sono tra le motivazioni, che anche la letteratura di ricerca ha messo in luce come principali (Pospiech et al. 2008).

### Q2.2 Concetti di base irrinunciabili in una proposta didattica in MQ. Spiegare le ragioni delle scelte.

Tutti i corsisti hanno indicato il principio di sovrapposizione come concetto base irrinunciabile: “Il principio di sovrapposizione è essenziale per comprendere gli stati sovrapposti, e quindi la necessità di una descrizione probabilistica”. In quattro casi vengono inclusi anche l’indeterminismo o il principio di indeterminazione, perché fornisce una visione nuova della realtà. In un caso emerge la convinzione che “la scelta dei concetti base da ritenersi imprescindibili dipende dalla impostazione scelta. La scelta dell’approccio e quindi dei concetti che si ritengono irrinunciabili, dipende da considerazioni didattiche proprie del docente”.

Le indicazioni più frequenti degli insegnanti sono rivolte ai concetti cardine della teoria quantistica e sono coerenti con quanto indicato nelle risposte alla prima parte del questionario. Dato che il questionario è stato proposto a metà del corso di Master, mostra che è stata superata la separazione tra CK e PCK che caratterizza le idee sulla MQ e la sua didattica di insegnanti privi di una specifica formazione al riguardo, come è emerso nell’analisi del corso sull’impostazione alla Dirac (Battaglia et al. 2009). È interessante rimarcare la posizione autoreferenziale dell’insegnante che ritiene che la scelta dei concetti “irrinunciabili” dipenda dalla sua libera scelta dell’impostazione da seguire, piuttosto che sia dettate da una comunità scientifica di riferimento.

### Q2.3 Quali aspetti privilegiare (formali, storici, logici, concettuali, applicativi)?

In merito a questa risposta tutti i docenti avocano a sé il diritto e la “competenza” della scelta: “Qui si tratta di scelte che dipendono anche dalle preferenze personali”; “non si può dare una risposta univoca ma più che mai la scelta è di competenza del docente”. La richiesta di autonomia espressa dai corsisti non è mai accompagnata dalla esplicitazione di criteri scientifici. In questo caso emerge più forte la convinzione che siano preferibili scelte personali del docente, piuttosto che scelte dettate da riferimenti di ricerca. È d’altro canto interessante notare come tutti questi corsisti, a metà del loro percorso formativo, pongano l’accento sui concetti (“privilegerei una trattazione concettuale”). In particolare vengono centrati gli aspetti fondanti della MQ e gli aspetti che la distinguono dalla fisica classica. Nelle rilevazioni in ingresso, di cui si è discusso in altro lavoro (Battaglia 2008), in cui gli stessi insegnanti avevano indicato tra i temi da affrontare: Il dualismo onda-corpuscolo; il principio di indeterminazione; la quantizzazione delle variabili.

Più varia risulta la posizione dei corsisti in merito al formalismo, come esemplificato nelle seguenti:

“è importante introdurre il più possibile anche una struttura formale”; “Per quanto riguarda il formalismo credo che debba essere limitato all’essenziale”, “ritengo alquanto improbabile poter introdurre i concetti di spazio di Hilbert e di operatore”.

Anche in merito alla trattazione di aspetti storici non si ravvisa una posizione univoca, come emerge in questi due spunti: “Il ruolo della storia credo debba essere meno significativo, perché rischia di creare confusione, sovrapponendo concetti superati con idee più moderne”, “Gli aspetti da privilegiare sono quello storico (per mostrare come si è giunti a questa teoria) e concettuale (per illustrare gli aspetti veramente peculiari e distintivi della teoria)”.

L’aspetto delle applicazioni è stato indicato, seppure in modo molto generico, solo da una persona, (“Ritengo importante anche presentare alcune applicazioni della M.Q.”).

## 6. Sintesi e indicazioni per la formazione degli insegnanti

Dalle risposte dei corsisti alla prima parte del questionario sono emerse alcune indicazioni generali su quali aspetti includere in una discussione sulla MQ, mirata a specifici obiettivi formativi, nella prospettiva di una sperimentazione sull’insegnamento/apprendimento della MQ nella scuola superiore.

L’analisi delle peculiarità della misura in fisica quantistica, l’esplicitazione del ruolo attivo che ha il processo di misura in MQ, e l’entanglement fanno emergere gli elementi distintivi della MQ rispetto alle assunzioni di fondo della fisica classica. Focalizzano tuttavia l’attenzione su aspetti specifici e in particolare soltanto su uno dei modi in cui è prevista l’evoluzione in MQ, come hanno evidenziato i corsisti con le loro risposte. Gli elementi che fanno della meccanica quantistica una teoria e non solo un insieme di congetture e regole devono emergere facendone riconoscere gli elementi costruttivi di base: il principio di sovrapposizione che ne sancisce la linearità; le modalità con cui si determinano i possibili esiti delle misure e le probabilità a priori dei suddetti esiti; la natura unitaria dell’evoluzione imperturbata dei sistemi quantistici e quella irreversibile nel processo di misura; le modalità con cui si quantizza un sistema.

L’introduzione del formalismo di base è importante non tanto per farne vedere le potenzialità applicative, ben al di là delle competenze e potenzialità di qualsiasi studente, ma piuttosto per mostrare come esso consenta una descrizione compatta e unitaria dei contenuti fondanti e dei loro significati, includendo, intrinsecamente nel principio di sovrapposizione lineare l’indeterminismo non epistemico, che caratterizza i processi di misura e l’informazione probabilistica ad essi associata.

La negoziazione e condivisione di significati, importante in qualsiasi processo formativo, acquista nel caso della MQ una valenza concettuale in quanto nel linguaggio, con cui comunemente si descrivono fenomeni e processi, vi sono implicite assunzioni deterministiche e causali. Ambiguità lessicali, sottintesi, come sono emersi in qualche caso nelle risposte dei corsisti, nel caso della MQ hanno valenze concettuali determinanti ancora più che in meccanica classica, perché le categorie descrittive dei processi sono sempre classiche. La richiesta di coerenza, in particolare rispetto ad uno specifico riferimento interpretativo (ortodosso o a variabili nascoste che sia) è indispensabile premessa per la costruzione da parte degli studenti di schemi a loro volta coerenti. Il linguaggio deve rispecchiare questa coerenza come già è stato evidenziato anche da Bell (1987).

Un linguaggio specifico va costruito per caratterizzare la misura in MQ e differenziarla rispetto alla misura in meccanica classica, non è sufficiente richiamarne genericamente la natura interminata e probabilistica, che è in realtà specifica di una qualsiasi misura. È necessario specificare l’indeterminismo intrinseco e non-epistemico dell’esito di un processo di misura quantistico e il carattere non classico della probabilità in meccanica quantistica, che emerge laddove non è possibile utilizzare il teorema di Bayes per calcolare le probabilità e invece è necessario tenere in conto dell’interferenza quantistica.

L’oggettività/non-oggettività delle proprietà di un sistema quantistico è un ulteriore nodo da affrontare nella formazione insegnanti sul piano dei contenuti fondanti. Va inoltre affiancato alla discussione sulla diversa natura delle proprietà che possiamo chiamare intrinseche di un oggetto quantistico, che per esempio ne permettono di definire la natura (es. una particella rispetto ad altre), e delle proprietà dinamiche, che sono associate a uno stato, aspetto emerso come nodo nelle risposte di alcuni docenti.

Infine è importante far riconoscere che la MQ non ammette limitazioni di principio, né ambiti in cui non sia empiricamente chiaro se applicarla o meno, che come si è visto non è un punto chiaro a tutto. Dall'altro è importante anche discutere a fondo il problema del macrorealismo e quello coinvolto nella necessità di prevedere la separabilità del sistema osservato dal misuratore, come nodi aperti della ricerca sui fondamenti importanti in un percorso formativo in quanto alla base di difficoltà nell'apprendimento.

Dal punto di vista didattico si può osservare che il questionario ha consentito di riconoscere che il percorso formativo, per quanto non concluso ha prodotto quell'integrazione tra contenuti concettuali e contenuti didattici, che era uno dei nodi aperti nella situazione iniziale e costituiva strumento e obiettivo della formazione.

Le indicazioni sin qui riepilogate indirizzano verso una formazione dei docenti sulla meccanica quantistica, che preveda: una riflessione sulla epistemologia della disciplina; la formazione su criteri scientifici per riconoscere le diverse impostazioni disciplinari, ossia i diversi modi con cui all'interno di una comunità scientifica viene proposta la meccanica quantistica in modo sistematizzato, vengono delineati i contenuti e concetti fondanti, le sue metodologie proprie; l'impiego ed esplicitazione delle metodologie messe a punto dalla ricerca didattica per la costruzione di percorsi didattici basati sulla ricostruzione didattica dei contenuti (Duit 2006), aspetto che nel caso della meccanica quantistica è quanto mai urgente; renda conto degli esiti di ricerche sulle difficoltà che gli studenti incontrano nell'affrontare i concetti fondanti della meccanica quantistica e li traduca operativamente in approcci di tipo Inquiry (McDermott, Shaffer 2000), problem solving (Watts 1981), sui dettagli critici (Viennot 2002) e si incentri sull'integrazione dei diversi piani delle CK e delle PCK (Schulman 1986; Michelini 2004; Sperandeo 2004; Michelini et al 2004a,b).

Un ruolo strutturale della ricerca in didattica della fisica nella formazione insegnanti può costituire l'elemento che permette agli insegnanti di superare l'autoreferenzialità evidenziata anche in alcune risposte della seconda parte del questionario. Esso costituisce nello specifico della formazione all'insegnamento/apprendimento della MQ un elemento imprescindibile per l'innovazione.

Il questionario qui discusso costituisce uno strumento aperto, esportabile in altri contesti e in particolare utilizzabile come pre/post test per l'analisi delle concezioni di insegnanti all'inizio e alla fine di un processo formativo e facilmente trasformabile per essere proposto come questionario per gli studenti. È stato utilizzato, oltre che con gli insegnanti di IDIFO, anche con gli studenti delle scuole estive di fisica moderna per studenti degli ultimi anni delle scuole superiori realizzate a Udine nel 2007 e 2009 (Gervasio et al. 2010, Cassan et al 2010) e presentato in lingua inglese in un apposito workshop rivolto a ricercatori in occasione del Congresso Girep 2008 (Pospech et al. 2008).

## Bibliografia

- AJP, Am. J. Phys. (2002), Special Issues 70 (3).
- Asikainen M. (2005) *A study of students' learning processes on a new quantum physics course for preservice and inservice teachers*. Proceeding of the Esera Summerschool 2005, in press.
- Baily C. and Finkelstein N. D. (2010) *Teaching and understanding of quantum interpretations in modern physics courses*, Phys. Rev. St Phys. Educ. Res. 6, 010101.
- Battaglia R.O., Cazzaniga L., Corni F., De Ambrosis A., Fazio C., Giliberti M., Levrini O., Michelini M., Mossenta A., Santi L., Sperandeo R.M., Stefanel A. (2010) *Master IDIFO (Innovazione Didattica in Fisica e Orientamento): a community of Italian physics education researchers for a community of teachers as a model for a research based in-service teacher formation model on modern physics*, in *Community and Cooperation, selected paper from*, L. Rogers, GIREP-EPEC & PHEC Conference 2009, University of Leicester-Girep, Leicester.
- Bell J. S. (1987) *Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics*, Cambridge Univ. Press, Cambridge.
- Cataloglu E., Robinett R.W. (2002) *Testing the development of student conceptual and visualization understanding in quantum mechanics through the undergraduate career*, Am. J. Phys. 70 (3), pp. 238-251.

- Cassan C., Colombo M., Michelini M., Mossenta A., Santi L., Stefanel A., Vercellati S., Viola R. (2010) *Scuola Estiva di Fisica Moderna per studenti di scuole secondarie superiori*, LFNS.
- Cohen-Tannoudji C., Diu B., Laloë F. (1977) *Quantum Mechanics*, Hermann e Wiley, Paris.
- D’Espagnat B. (1976) *Conceptual foundation of Quantum Mechanics*, 2nd ed., Benjamin Menlo Park.
- Duit R. (2006) *Science Education Research – An Indispensable Prerequisite for Improving Instructional Practice*, ESERA Summer School, Braga, July 2006 (<http://www.naturfagsenteret.no/esera/summerschool2006.html>).
- Eylon B., Bagno E. (2006) *Research-design model for professional development of teachers: Designing lessons with physics education research*, Phys. Rev. St Phys. Educ. Res. 2, 020106.
- Einstein A., Podolsky B., Rosen N. (1935) *Can Quantum Mechanical description of Physical Reality Be Considered Complete?*, Physical Review, 47, pp. 777-780.
- Fischler H., Lichtfeldt M. (1992) *Modern physics and students’ conceptions* Int. J. Sci. Educ. 14 pp. 181-90.
- Gervasio M., Michelini M., Mossenta A., Santi L., Sciarratta I., Stefanel A., Vercellati S., Viola R. (2010) *Attività di laboratorio nell’ambito della scuola estiva di fisica moderna dell’università di Udine*, XLVIII Congresso AIF.
- Ghirardi G.C. (1997) *Un’occhiata alle carte di Dio*, Milano: Il Saggiatore, p. 33; Sneaking a look at God’s Cards (2004), Princeton University Press USA.
- Ghirardi G.C., Grassi R., Michelini M. (1997) *Introduzione delle idee della fisica quantistica e il ruolo del principio di sovrapposizione lineare*, La Fisica nella Scuola, XXX, 3 Sup., Q7, pp. 46-57.
- Hanley P., Maringe F., Ratcliffe M. (2008) *Evaluation of Professional Development: Deploying a process-focused model*, International Journal of Science Education, 30 (5), pp. 711-725.
- Johnston I.D., Crawford K. and Fletcher P.R. (1998) *Student difficulties in learning quantum mechanics*, International Journal of Science Education, 20, No 4, pp. 427-446.
- Justi R.S., Souza V.C.A., Ferreira P.F.M. (2005) *Analogies for the atom: students’ and teachers’ (mis) understandings*, R. Pinto ed. Cresils, Barcelona.
- McDermott L.C., Shaffer P S (2000) *Preparing teachers to teach physics and physical science by inquiry*, Phys. Educ. 35 (6), pp. 411-416.
- Michelini M. ed. (2004) *Quality Development in teacher Education and training*, Second International Girep seminar, Forum, Udine.
- Michelini M. (2008) *Approaching the theory of quantum mechanics: the first steps towards a coherent synthesized interpretation with a supporting formalism*, in *Frontiers of Physics Education*, Jurdana-Sepic R. et al eds., Girep-Epec book of selected contributions, Rijeka, Zlatni, pp. 93-101.
- Michelini M., Stefanel A. (2008) *Learning Paths Of High School Students In Quantum Mechanics*, in *Jurdana-Sepic R.*, Frontiers of Physics Education, Girep-EPEC Conf. 2007, sel. Contrib., Rijeka, Zlatni, pp. 337-343.
- Michelini M., Stefanel A. (2010) *High school students face QM basic concepts*, in *New Trends in Science and Technology Education*, Santoro G. ed Book of Selected Papers, Clueb, Bologna.
- Michelini M, Ragazzon R, Santi L, Stefanel A (2000) *Proposal for quantum physics in secondary school*.
- Michelini M., Sartori C. (1998) *Esperienze di laboratorio didattico in una struttura di raccordo*, Università & Scuola, III, 1/R, pp. 18-29.
- Michelini M., Ragazzon R., Santi L. Stefanel A. (2004) *Implementing a formative module on quantum physics for pre-service teacher training*, in *Quality Development in the Teacher Education and Training*, Girep book of selected papers, M. Michelini ed., Forum, Udine, pp. 429-435.
- Michelini M., Stefanel A. (2008) *Learning Paths Of High School Students In Quantum Mechanics*, in *Frontiers of Physics Education*, in *Jurdana-Sepic R.*, Girep-EPEC Conf. 2007, sel. Contrib., Jurdana-Šepić R., Labinac V., Žuvić-Butorac M., Sušac A. Eds, Rijeka, Zlatni, ISBN: 978-953-55066-1-4, pp. 337-343.
- Müller R., Wiesner H. (1999) *Students’ Conceptions of Quantum Physics*, in *Research on Teaching and Learning Quantum Mechanics*, Zollman 1999, loc. Cit.

- Müller R., Wiesner H. (2002) *Teaching quantum mechanics on an introductory level*, Am. J. Phys. 70 (30), pp. 200-209.
- Newton R. G. (2004) *What is a state in quantum mechanics?*, American Journal of Physics 72 (3).
- Niedderer, H., Deylitz, S. (1999) *Evaluation of a new approach in quantum atomic physics in high school*. In D. Zollman (Ed.), *Research on teaching and learning quantum mechanics* (pp. 23-27): National Association for Research in Science Teaching.
- Olsen R.V. (2002) *Introducing quantum mechanics in the upper secondary school: a study in Norway*, International Journal of Science Education, 24, 6, pp. 565-574.
- Phys Educ. (2000) Special Issues 35 (6).
- Pospiech G., Micheli M., Stefanel A., Santi L. (2008) *Central Features of Quantum Theory in Physics Education, Discussion Workshop B*, in *Frontiers of Physics Education, Girep-EPEC Conf. 2007*, sel. Contrib., Jurdana-Šepić R., Labinac V., Žuvić-Butorac M., Sušac A. Eds, Rijela, Zlatni, ISBN: 978-953-55066-1-4, pp. 85-87.
- Shulman L.S. (1986) *Those Who Understand: Knowledge Growth in Teaching*, Educational Researcher, Vol. 15, No. 2. (Feb., 1986), pp. 4-14.
- Schuster D., Cobern W.W., Applegate B., Schwartz R. S., Undreiu A. (2009) *Assessing Pedagogical Content Knowledge of Inquiry Physics Teaching*, AAPT Winter Meeting, Chicago 2009; Schuster D., Undreiu L., Undreiu A (2009) *Interactive PS Tutorials Through Visual Programming*, Compadre Document Delivery, <http://www.compadre.org/PER/document/ServeFile.cfm?ID=8121&DocID=754>.
- Singh C. (2001) *Student understanding of quantum mechanics*. Am. J. Phys., 69 (8), pp. 885-895.
- Sonego S. (1992) *Conceptual foundations of quantum theory: a map of the land*, Ann. de la Fond. L. de Broglie 17, 405; Sonego S. (1993) *errata*: ibid. 18, p. 131.
- Sperandeo R.M. (2004) *The pre service physics teacher education model implemented by the FFC research project involving & Italian Universities: Guidelines and preliminary results*, in *Quality Development in teacher Education and Training*, M. Micheli, Girep-Forum, Udine, pp. 89-95.
- Stefanel A. (2008) *Impostazioni e percorsi per l'insegnamento della MQ nella scuola secondaria*, Giornale di Fisica 49 (1), pp. 15-33.
- Stefanel A., Micheli M., Ragazzon R., Santi L. (2004) *Blended activity on quantum mechanics knots for pre-service teachers*, in proc. Girep Conference – Ostrava (Cz), M. Melchova et al eds. Girep-Univ. Ostrava, pp. 206-208.
- Styer D.F., Balkin M.S., Becker K.M., Burns M.R., Dudley C.E., Forth S.T., Gaumer J.S., Kramer M.A., Oertel D.C., Park L.H., Rinkoski M.T., Smith C.T., and Wotherspoon T.D. (2002) "Nine Formulations of Quantum Mechanics," *American Journal of Physics* 70, pp. 288-297.
- Viennot L. (2002) *Enseigner la physique*, De Boeck.
- Zollman D. (Ed.) (1999) *Research on teaching and learning quantum mechanics*. National Association for Research in Science Teaching.



Università  
degli Studi di Udine  
Dipartimento di Fisica



M.I.U.R.  
Ministero dell'Istruzione  
dell'Università e della Ricerca



PLS  
Progetto Lauree  
Scientifiche

Progetto IDIFO

## Fisica moderna per la scuola

Materiali, aspetti e proposte  
per l'innovazione didattica  
e l'orientamento.

Il Progetto IDIFO, presentato al Progetto Lauree Scientifiche nel 2006 dall'Unità di Ricerca in Didattica della Fisica dell'Università degli Studi di Udine, con partner le Università degli Studi di Bologna, Milano, Milano Bicocca, Napoli, Palermo, Pavia, Roma La Sapienza, Torino e la collaborazione delle Università degli Studi di Bari, Bolzano, Lecce, Modena e Reggio Emilia, Trento, Trieste, ha visto coinvolte nella sua realizzazione anche le Università della Basilicata e della Calabria, soprattutto nella sua prosecuzione nell'ambito del Progetto Lauree Scientifiche 2. Il Progetto IDIFO ha realizzato dal 2006 al 2009, oltre ad un Master biennale per insegnanti in rete telematica, una Scuola Estiva nazionale di Fisica Moderna per studenti e tre Workshop in presenza a Udine. Il primo di essi è stato tutto dedicato agli insegnanti del Master (WS1). Il secondo si è proposto di realizzare la ricaduta sul territorio del Progetto IDIFO per studenti ed insegnanti del Friuli Venezia Giulia (WS2). Il terzo è stato dedicato agli insegnanti del Master ed agli studenti selezionati per la partecipazione alla Scuola Estiva di Fisica Moderna, tenutasi a Udine nel luglio 2007 (WS3). Questo volume raccoglie i contributi più significativi delle attività in presenza a Udine nei Workshop.

### Curatore

Marisa Michelini, *Università degli Studi di Udine*

### Comitato scientifico

Bocchicchio Mario, *DIDA, Università degli Studi del Salento*

Bonanno Assunta, *Università degli Studi della Calabria*

Comelli Giovanni, *Direttore del Sincrotrone ELETTRA di Trieste*

Compagno Cristiana, *Rettore dell'Università di Udine*

Corni Federico, *Università degli Studi di Bolzano e di Modena e Reggio Emilia*

Corvaja Pietro, *Direttore del Dottorato di Ricerca in matematica e fisica, Università degli Studi di Udine*

De Ambrosis Anna, *Università degli Studi di Pavia*

Fabbro Franco, *Preside della Facoltà di Scienze della Formazione, Università degli Studi di Udine*

Fazio Claudio, *Università degli Studi di Palermo*

Ferraro Speranzina, *Direzione Generale dello Studente, MIUR*

Gagliardi Maria Paola Francesca, *Università degli Studi di Bologna*

Giliberti Marco Alessandro, *Università degli Studi di Milano*

Honsell Furio, *Sindaco di Udine*

Levrini Olivia, *Università degli Studi di Bologna*

Marcolini Lorenzo, *Segretario Sezione AIF di Udine*

Michelini Marisa, *Università degli Studi di Udine*

Monroy Gabriella, *Università degli Studi di Napoli Federico II*

Oss Stefano, *Università degli Studi di Trento*

Ottaviani Giampiero, *Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia*

Pastore Giorgio, *Università degli Studi di Trieste*

Peressi Maria, *Università degli Studi di Trieste*

Picciarelli Vittorio, *Università degli Studi di Bari*

Piccinini Livio Clemente, *Direttore della Scuola Superiore, Università degli Studi di Udine*

Rinaudo Giuseppina, *Università degli Studi di Torino*

Rocca Filomena, *Direzione Generale degli Ordinamenti Scolastici, MIUR*

Santi Lorenzo, *Università degli Studi di Udine*

Sciarratta Isidoro, *Segretario Sezione AIF di Pordenone*

Sperandeo Rosa Maria, *Università degli Studi di Palermo*

Stefanel Alberto, *Università degli Studi di Udine*

Stella Rosa, *Università degli Studi di Bari*

Tarantino Giovanni, *ANSAS Palermo*

Tarsitani Carlo, *Università degli Studi di Roma La Sapienza*

Tasso Carlo, *Preside della Facoltà di Scienze Matematiche Fisiche e Naturali, Università degli Studi di Udine*

Toppano Elio, *Responsabile PLS – Matematica, Università degli Studi di Udine*

### Segreteria redazionale

Cristina Cassan

Donatella Ceccolin

Chiara Geretti

© Copyright Università degli Studi di Udine

ISBN 978-88-97311-02-7