

ALMA MATER STUDIUM • UNIVERSITA' DI BOLOGNA

Scuola di Scienze
Corso di Laurea in Fisica

CORSO-LABORATORIO PLS
“L’ESPERIMENTO PIÙ BELLO”:
ANALISI DI UN’ESPERIENZA DI
INSEGNAMENTO/APPRENDIMENTO DELLA
FISICA QUANTISTICA

Relatore:

Prof.ssa Olivia Levrini

Correlatori:

Dott. Eugenio Bertozzi

Prof.ssa Elisa Ercolessi

Presentata da:

Lucia Stefanini

Sessione II

Anno Accademico 2012 - 2013

Ringraziamenti

Desidero ringraziare la prof.ssa Levrini, relatore di questa tesi, per la grande disponibilità e cortesia dimostratemi, e per tutto l'aiuto fornito durante la stesura della tesi.

Al tempo stesso ringrazio la prof.ssa Ercolessi e il prof. Bertozzi, correlatori della tesi per il loro importante contributo.

*Un ringraziamento speciale a Jju sempre presente;
a Giulia e Emanuele per il tempo che mi hanno dedicato;
a Lalla e agli amici che mi hanno affiancata in questo percorso;*

*Ai professori Forino e Bonsignori che con la loro passione mi hanno ispirata;
agli amici che hanno creduto in me fin dall'inizio;
e ai miei familiari che mi hanno sempre sostenuta e senza di loro non ce l'avrei mai
fatta.*

Grazie a tutti di cuore!

INDICE

ABSTRACT	I
INTRODUZIONE	IX
CAPITOLO 1. QUADRO DI RIFERIMENTO E OBIETTIVO DELLA TESI	1
1.1. INTRODUZIONE	2
1.2. LA FISICA QUANTISTICA A LIVELLO DI SCUOLA SECONDARIA SUPERIORE: STATO DELL'ARTE	2
1.3. PIANO LAUREE SCIENTIFICHE E IL CORSO-LABORATORIO SU L'ESPERIMENTO PIÙ BELLO".....	5
1.4. OBIETTIVO TESI E PIANIFICAZIONE DELLO STUDIO	8
CAPITOLO 2. L'INTERPRETAZIONE DELL'ESPERIMENTO PIÙ BELLO NEL CORSO-LABORATORIO	9
2.1. INTRODUZIONE ALL'ESPERIMENTO PIÙ BELLO.....	10
2.2. L'ESPERIMENTO PIÙ BELLO: DA ESPERIMENTO MENTALE A ESPERIMENTO REALE	10
2.3. I PROBLEMI SUL TAPPETO.....	14
2.4. ALCUNI INGREDIENTI DI BASE PER UNA NUOVA INTERPRETAZIONE	15
2.5. GLI ESPERIMENTI WHICH WAY CON FOTONI E NEUTRONI.....	20
2.6. L'ESPERIMENTO DI STERN E GERLACH.....	24
2.7. APPLICAZIONI DELLA FISICA QUANTISTICA.....	28
CAPITOLO 3. ANALISI DELL'ESPERIENZA	33
3.1. CAMPIONE	34
3.2. SORGENTI DATI.....	35
3.3. DOMANDE DI RICERCA E METODOLOGIA DI ANALISI DEI DATI.....	37
3.4. RISULTATI	39
CONCLUSIONI	53
APPENDICE A	57
APPENDICE B	60

ABSTRACT

In questo elaborato sono stati analizzati i dati raccolti nel Corso-Laboratorio “L’esperienza più bello”, realizzato nel periodo marzo-aprile 2013 nell’ambito delle attività del Piano Lauree Scientifiche del Dipartimento di Fisica e Astronomia di Bologna. Il Corso, frequentato da studenti volontari del quinto anno di Liceo Scientifico, era finalizzato ad introdurre concetti di Fisica Quantistica seguendo, come filo conduttore, l’esperienza di interferenza con elettroni singoli e le sue varianti. I principali dati considerati e analizzati riguardano le risposte degli studenti a questionari proposti a fine Corso per avere un riscontro sul tipo di coinvolgimento e sul livello di comprensione raggiunto.

L’analisi è stata condotta con l’obiettivo specifico di valutare come gli studenti si siano posti di fronte ad alcuni approfondimenti formali sviluppati per interpretare gli esperimenti e come abbiano colto i concetti trattati, ritenuti necessari per entrare nel “nuovo modo di vedere il mondo della quantistica”: il concetto di stato, sovrapposizione, ampiezza di probabilità, entanglement.

ABSTRACT

INTRODUZIONE

Le scoperte del secolo scorso e la formulazione della fisica quantistica come teoria in grado di spiegare i fenomeni del mondo microscopico e non solo, hanno portato una vera rivoluzione della visione del mondo fisico. E' indiscutibile che queste nuove scoperte abbiano avuto una notevole rilevanza sullo sviluppo tecnologico recente essendo basato su effetti specificatamente quantistici. Basti pensare all'energia atomica e nucleare, alla tecnologia dei computer e delle telecomunicazioni, agli orologi digitali, alle nanotecnologie ecc. Tuttavia, fino al 2010, la fisica dell'ultimo secolo non è stata inserita in maniera rilevante nei programmi ministeriali delle scuole secondarie; ciò ha contribuito ad una ridotta diffusione delle conoscenze scientifiche più recenti e innovative.

L'attivazione della riforma Gelmini del Riordino dei Licei, avvenuta a partire dall'anno 2010-11, ha previsto l'inserimento di un modulo di fisica quantistica nel programma del quinto anno di liceo scientifico.

Uno dei motivi che ha causato il ritardo di questa scelta è che la meccanica quantistica è stata sempre ritenuta troppo complessa per studenti di scuola secondaria superiore. La visione classica, ben radicata, impedirebbe di accettare il nuovo modello quantistico e il formalismo matematico sarebbe inaccessibile allo studente.

Da ben prima del 2010, tuttavia, nel mondo della Ricerca in Didattica della Fisica a livello internazionale si cercavano approcci didattici che facessero fronte alle numerose problematiche di insegnamento della fisica quantistica.

In questo lavoro sarà descritto un percorso didattico ideato e realizzato come Corso-Laboratorio nell'ambito del Piano Nazionale Lauree Scientifiche (PLS) da un gruppo di ricercatori del Dipartimento di Fisica e Astronomia di Bologna (DIFA) e del CNR.

La tesi è articolata in 3 capitoli e le conclusioni.

Nel capitolo 1, dopo una presentazione del quadro delle ricerche a livello internazionale, è descritto il contesto in cui il Corso-Laboratorio è stato realizzato. Come indicato dal suo titolo, il Corso verte sull'esperimento d'interferenza di elettroni singoli, realizzato a Bologna nel 1974 e indicato come il più bell'esperimento di fisica di tutti i tempi dai lettori della rivista *Physics World* in un sondaggio del 2002.

Nel capitolo 2, è presentato il percorso concettuale seguito nel Corso e sarà messo in luce come l'approccio concettuale seguito abbia permesso di introdurre degli strumenti matematici non banali con lo scopo di interpretare gli esperimenti descritti nell'ambito

INTRODUZIONE

della fisica quantistica. Gli stessi concetti e strumenti sono stati utilizzati successivamente nella descrizione delle applicazioni moderne che sono state introdotte nel Corso.

Nel capitolo 3 è presentata l'indagine svolta sulle reazioni degli studenti e degli insegnanti che hanno partecipato al Corso. Sono descritti il campione, gli strumenti di indagine progettati e utilizzati per la raccolta dei dati e i risultati ottenuti.

***CAPITOLO 1. QUADRO DI RIFERIMENTO E OBIETTIVO
DELLA TESI***

1.1. INTRODUZIONE

Nel corso dell'ultimo decennio la scuola italiana è stata soggetta ad una complessa e dibattuta riforma scolastica, divenuta indispensabile visti i notevoli cambiamenti della società, i rapidi sviluppi della tecnologia e la necessità di essere a livello degli standard d'istruzione europei. In particolare, nell'anno scolastico 2010-2011 la riforma ha interessato la riorganizzazione strutturale della scuola secondaria superiore, con un aggiornamento dei profili culturali e professionali degli istituti, dei progetti educativi e dell'offerta formativa (Decreto-MIUR, 2010-11).

1.2. LA FISICA QUANTISTICA A LIVELLO DI SCUOLA SECONDARIA SUPERIORE: STATO DELL'ARTE

Il cambiamento dei programmi ministeriali dei Licei Scientifici, in riferimento alle materie scientifiche, è riconducibile, innanzitutto, alla necessità di aggiornare ed estendere gli argomenti affinché questi possano toccare temi e domande oggi socialmente rilevanti.

Dal Seminario "Liceo Scientifico e Scienze Applicate" tenutosi a Bologna il 30 novembre del 2010 (Vittorio, 2010) è emerso quanto l'enorme distanza presente tra lo studio della scienza e le sue applicazioni renda gli studenti poco consapevoli dell'importanza e dell'impatto che essa ha nella vita quotidiana. Tutto questo è in contraddizione con uno degli obiettivi della scuola, dell'Università e del mondo del lavoro: avere persone in grado di interpretare il mondo che li circonda, inclusi gli aspetti tecnologici della società in cui vivono.

Da quanto esposto dal Professor Nicola Vittorio¹ durante il Seminario, è essenziale che "la scuola fornisca risposte sempre più precise e puntuali alle richieste della società, nei tre ambiti socialmente utili quello delle conoscenze, quello delle competenze e quello valoriale".

In questo contesto, la riforma Gelmini del Riordino dei Licei, attivata dall'anno 2010-11, prevede una particolare enfasi sulle conoscenze sviluppate nel XX secolo; in particolare, per quello che riguarda l'insegnamento della fisica, essa prevede, tra i temi da affrontare sulla fisica del XX secolo, anche l'introduzione di alcuni concetti di fisica quantistica

¹Nicola Vittorio è stato Presidente della Conferenza Nazionale dei Presidi delle Facoltà di Scienze e Tecnologie (Con.Scienze) e portavoce del Coordinamento Nazionale delle Conferenze dei Presidi delle Facoltà Italiane, nonché promotore e coordinatore del Piano Lauree Scientifiche (PLS).

(FQ), indispensabili per la comprensione degli sviluppi della fisica e delle nuove applicazioni tecnologiche² (Decreto.n°89, 2010).

Sull'insegnamento della FQ esiste un'ampia letteratura di ricerca in Didattica della Fisica, che si è occupata di studiare vari approcci metodologici e di progettare possibili percorsi didattici, valutando il livello di apprendimento degli studenti e riflettendo su come affrontare le diverse problematiche emerse dall'analisi di situazioni di insegnamento/apprendimento³ (si veda, ad esempio, Rinaudo, 2006\07; Stefanel A., 2007; Marisa Michelini, 2010; Michelini, 2010; Tarozzi, 2010).

Gli studi sull'apprendimento degli studenti hanno, in particolare, evidenziato sistematiche difficoltà a comprendere i concetti quantistici dopo aver studiato a fondo modelli semiclassici e a superare l'idea di poter descrivere i nuovi sistemi con la stessa logica di quella classica. Tutto questo senza escludere la difficoltà di dover abbandonare la possibilità di poter creare un'immagine del fenomeno riconducibile alla quotidianità.

Ad esempio: la logica classica effettua un passaggio dal "discreto", ovvero i punti discreti in cui è stato rilevato il passaggio del corpo in un certo istante, al "continuo" attraverso l'interpolazione offerta dall'equazione del moto che permette di ricostruire con continuità la traiettoria nei punti intermedi. Lo studente, abituato a questa logica, deve imparare a compiere con la FQ il passaggio inverso.

Queste ricerche sono state realizzate per valutare l'esito delle diverse proposte innovative su come affrontare, a livello di scuola secondaria, la FQ con l'obiettivo di superare i problemi di apprendimento riscontrati; inoltre hanno lo scopo di indagare sul tipo di strumenti matematici utilizzabili dagli studenti di scuola superiore ed indispensabili per una chiara e una completa comprensione dei principali fondamenti della fisica quantistica.

Tra i possibili approcci all'insegnamento della FQ se ne possono individuare tre principali: storico, logico e sperimentale.

²"L'affermarsi del modello del quanto di luce potrà essere introdotto attraverso lo studio della radiazione termica e dell'ipotesi di Planck (affrontati anche solo in modo qualitativo), e sarà sviluppato da un lato con lo studio dell'effetto fotoelettrico e della sua interpretazione da parte di Einstein, e dall'altro lato con la discussione delle teorie e dei risultati sperimentali che evidenziano la presenza di livelli energetici discreti nell'atomo. L'evidenza sperimentale della natura ondulatoria della materia, postulata da De Broglie, ed il principio di indeterminazione potrebbero concludere il percorso in modo significativo." Tratto dallo schema di regolamento recante "Indicazioni nazionali riguardanti gli obiettivi specifici di apprendimento concernenti le attività e gli insegnamenti compresi nei piani degli studi previsti per i percorsi liceali di cui all'articolo 10, comma 3, del decreto del Presidente della Repubblica 15 marzo 2010, n. 89, in relazione all'articolo 2, commi 1 e 3, del medesimo regolamento."

³Istituzioni coinvolte nei progetti e nelle ricerche: Università degli studi di Udine; MIUR (Ministero dell'Istruzione dell'Università della Ricerca); PLS (Piano Lauree Scientifiche); collaborazione con docenti di diverse Università d'Italia.

A livello di scuola secondaria e nei libri di testo è molto diffuso un approccio *storico* (Di Biasio, 1992; Giuliani, 1993; Stefanel, 2008) che arriva alla discussione dei modelli atomici passando attraverso riflessioni sull'analisi di "episodi storici", fino ad arrivare all'enunciazione qualitativa del principio di indeterminazione e della complementarità. Tale approccio, se troppo enfatizzato, rischia di essere carente di un formalismo matematico di base e di rendere l'insegnamento della fisica quantistica una trattazione quasi discorsiva limitata alla "vecchia teoria dei quanti", basata ancora su modelli semiclassici che si fissano nella mente degli studenti. Diventa quindi necessario porsi il problema di capire come introdurre una base formale accessibile, che possa fornire un supporto rigoroso alla trattazione della teoria.

Il secondo approccio, di tipo *logico*, parte dalla teoria così come è strutturata oggi, cioè dall'enunciazione formale della meccanica quantistica: meccanica delle matrici, meccanica ondulatoria (Haber-Schaim, 1975; Lawrence, 1996). Questo è l'approccio più vicino a quello universitario, basato sulla convinzione che "è impossibile capire la meccanica quantistica senza possederne le strutture matematiche" (Pospiech, 1999). Pospiech, nei suoi lavori, sostiene che anche se a scuola l'apparato matematico non possa essere del tutto sviluppato, le idee principali possono essere presentate considerando ad esempio lo spin, che non ha analoghi classici, trattandolo formalmente con le matrici di Pauli. Introducendo *ex novo* la trattazione dello spin è possibile arrivare direttamente al cuore della teoria senza passare attraverso rappresentazioni semi-classiche, da cui è difficile staccarsi. Inoltre, la matematica degli spin è relativamente semplice: sono matrici 2x2 che solitamente studenti del liceo sono in grado di trattare. Con l'uso di queste semplici matrici si può dare una base formale a molti concetti importanti della teoria quantistica.

La scelta del formalismo matematico è cruciale in un percorso di fisica quantistica, permane comunque il rischio di scontrarsi con concetti matematici troppo complessi rispetto alle possibilità degli studenti.

Il terzo approccio di tipo *sperimentale* si basa sull'analisi fenomenologica di semplici situazioni sperimentali, con lo scopo di introdurre le idee della teoria quantistica.

Un esempio è quello proposto da Ghirardi⁴, tradotto in una proposta didattica dal gruppo di ricerca di Udine (Stefanel A. , 2007), che analizza la fenomenologia della polarizzazione della luce, mediante esperimenti con polaroid e cristalli di materiali birifrangenti. Motivando gli studenti nella formulazione di ipotesi interpretative, si costruiscono con

⁴ Giancarlo Ghirardi, Professore Ordinario di Istituzioni di Fisica Teorica presso l'Università di Trieste.

gradualità le caratteristiche degli enti formali, che entreranno a far parte del modello interpretativo basato sul principio di sovrapposizione e sull'impossibilità di attribuire una traiettoria a un sistema quantistico. Anche in questo approccio la scelta del formalismo da utilizzare è fortemente vincolata dagli aspetti della teoria che si vogliono sottolineare.

Come sarà descritto nei paragrafi successivi e, più in dettaglio, nel prossimo capitolo, il percorso di fisica quantistica analizzato in questa tesi intreccia diversi piani, dal momento che sceglie come filo conduttore l'esperimento di interferenza di singoli elettroni e ne analizza la portata sul piano sperimentale, storico e logico. Il percorso concettuale, in particolare, è stato costruito per introdurre concetti *genuinamente quantistici* necessari a costruire le “nuove lenti” con cui guardare al mondo e interpretare gli esiti degli esperimenti. Si tratta dei concetti di stato, sovrapposizione quantistica, ampiezza di probabilità, *entanglement*, che sono stati introdotti e discussi utilizzando un linguaggio formale specifico e strumenti matematici di base. Per sottolineare quanto il formalismo sia stato trattato con lo scopo esplicito di mostrare la nuova logica, le “nuove lenti”, con cui la fisica quantistica richiede di guardare alla realtà, si è scelto di chiamare l'approccio seguito “approccio concettuale al formalismo”, in decisa opposizione ad un atteggiamento che vede la matematica della fisica quantistica un puro strumento per far tornare i conti.

Ulteriore elemento di forte caratterizzazione del Corso è stata la scelta di porre l'attenzione su un aspetto poco trattato in letteratura di ricerca in Didattica della Fisica: l'utilizzo degli stessi concetti e strumenti del formalismo per la descrizione di alcune applicazioni tecnologiche descritte durante il Corso, allo scopo di mostrare l'utilità pratica e le potenzialità innovative della FQ.

1.3. PIANO LAUREE SCIENTIFICHE E IL CORSO-LABORATORIO SU L'ESPERIMENTO PIÙ BELLO”

In risposta all'esigenza europea di favorire, anche tramite interventi nelle scuole, innovazione, crescita e occupazione, nel 2004 è stato istituito il Piano nazionale Lauree Scientifiche (PLS)⁵ con lo scopo di creare iniziative necessarie per rafforzare i rapporti tra Università, Scuola e Mondo del Lavoro.

⁵ <http://www.progettolaureescientifiche.eu/il-progetto-lauree-scientifiche>.

Il PLS, frutto della collaborazione del Ministero dell'Università e dell'Istruzione e della Conferenza Nazionale dei Presidi di Scienze e Tecnologie e di Confindustria, ha come obiettivi:

- migliorare la conoscenza e la percezione delle discipline scientifiche nella Scuola secondaria, offrendo agli studenti di partecipare ad attività di laboratorio curriculari ed extra curriculari;
- avviare un processo di crescita professionale dei docenti di materie scientifiche in servizio nella Scuola secondaria;
- favorire l'allineamento e l'ottimizzazione dei percorsi formativi dalla Scuola all'Università e nell'Università per il mondo del lavoro e dare operatività alle nuove Indicazioni ministeriali per i Licei che prevedono l'insegnamento della fisica del XX secolo nell'ultimo anno.

Nell'ambito delle attività PLS realizzate dal Dipartimento di Fisica e Astronomia di Bologna (DIFA), si svolge, dal 2009, un Corso-Laboratorio sull'esperimento d'interferenza di elettroni singoli che è stato individuato come il più bell'esperimento di fisica di tutti i tempi dai lettori della rivista *Physics World* in un sondaggio del 2002.

Il Corso-Laboratorio è realizzato in collaborazione con l'IMM-CNR⁶ e alcune scuole secondarie superiori ed è rivolto a studenti volontari che provengono dall'ultimo anno di liceo scientifico. Il Corso è stato progettato per mostrare come l'analisi dell'esperimento più bello e di sue varianti possa essere l'occasione per affrontare concetti e temi di FQ e dare, al contempo, uno spaccato contemporaneo sulle varie dimensioni della conoscenza fisica.

Nel corso degli anni, si è deciso di dare più spazio all'analisi del funzionamento del microscopio elettronico e alle applicazioni della FQ. In particolare, nell'anno scolastico 2012-13 sono state previste due lezioni dedicate esplicitamente alla costruzione di un formalismo minimale per poter interpretare teoricamente i risultati sperimentali. Più specificamente, il Corso è stato articolato, nell'ultimo anno scolastico, in sei incontri pomeridiani: quattro lezioni e due laboratori. Nel primo è stato introdotto il Corso e l'esperimento di interferenza di elettroni singoli: ne è stata tracciata la storia dal congresso Solvay del 1927 in cui Einstein lo aveva "inventato" come esperimento mentale nel celebre

⁶ Il Corso PLS è una delle attività svolte in collaborazione tra DIFA e IMM-CNR sull'"Esperimento più bello". La collaborazione aveva già portato alla realizzazione di un sito-web, un documentario e altri materiali didattici originali (<http://lesperimento-piu-bello-della-fisica.bo.imm.cnr.it/>).

dialogo con Bohr, fino alla sua realizzazione nel 1974⁷. Nel secondo e nel terzo incontro sono state svolte attività di laboratorio per analizzare con gli studenti il fenomeno dell'interferenza⁸. In particolare, nel secondo incontro gli studenti sono stati guidati a riprendere l'interferenza delle onde sulla superficie di un liquido e l'interferenza della luce; nel terzo è stato affrontato il tema dell'interferenza in relazione allo studio del comportamento ondulatorio degli elettroni con un microscopio elettronico. I successivi due incontri sono stati finalizzati all'interpretazione dell'esperimento più bello, mediante la costruzione di strumenti argomentativi e formali minimali⁹. Infine, nell'ultimo sono state discusse alcune applicazioni della fisica quantistica a partire dall'introduzione del concetto di *entanglement*¹⁰.

Lo scopo dell'intero Corso era quello di:

- fornire agli studenti strumenti concettuali per cogliere le peculiarità dell'esperimento e le conoscenze sul funzionamento di un microscopio elettronico e sui suoi possibili utilizzi nella ricerca fondamentale e applicata;
- stimolare la riflessione sul paradigma interpretativo della fisica classica e sulla sua messa in discussione a fronte di risultati sperimentali e anomalie teoriche;
- introdurre alcuni dei concetti che stanno alla base della fisica quantistica (indeterminazione, misura quantistica, ampiezza di probabilità), adottando un formalismo minimale col quale poter guidare gli studenti all'interpretazione quantistica delle evidenze sperimentali e dare esempi di alcuni ambiti di applicazione della fisica quantistica.

Nell'ultimo anno scolastico, per coinvolgere più scuole e più insegnanti, il Corso è stato "sdoppiato" su due poli, uno presso il Liceo "Augusto Righi" di Bologna e uno presso il Liceo "Augusto Righi" di Cesena. Ogni polo ha coinvolto un gruppo di circa 20 studenti. Dei sei incontri previsti per ogni gruppo, 4 sono stati svolti nel Liceo di riferimento e 2 presso il DIFA di Bologna (l'incontro introduttivo e l'incontro sul microscopio elettronico).

In accordo con gli obiettivi del PLS di creare una cooperazione tra Scuola e Università, gli incontri sono stati gestiti dai docenti universitari in interazione privilegiata con gli studenti.

⁷ Lezione tenuta da Olivia Levrini, DIFA, e Giorgio Lulli, IMM-CNR.

⁸ Laboratorio tenuti da Giorgio Matteucci, DIFA.

⁹ Incontri presentati da: Giorgio Lulli, CNR-IMM; Elisa Ercolessi, DIFA; Vittorio Monzoni, professore attualmente in pensione.

¹⁰ Lezione tenuta da Eugenio Bertozzi, DIFA.

Agli insegnanti è spettato il ruolo di mediatori nel caso la relazione si fosse mostrata problematica, nonché il ruolo di osservare e interpretare la reazione degli studenti.

1.4. OBIETTIVO TESI E PIANIFICAZIONE DELLO STUDIO

Il Corso-Laboratorio, soprattutto nella sua ultima versione, ha mirato a trattare temi disciplinarmente e formalmente impegnativi.

Per questo motivo si è deciso di monitorare quanto è accaduto durante gli incontri e di raccogliere dati per studiare in modo attento le reazioni degli studenti e degli insegnanti coinvolti.

Il lavoro di tesi si colloca in questo contesto e ha come obiettivo generale quello di valutare potenzialità e limiti dell'approccio didattico seguito nel Corso-Laboratorio che, come si diceva, integra aspetti storico-epistemologici, logici e sperimentali. Data l'enfasi, nell'ultimo anno, agli aspetti logici, interpretativi e formali, l'obiettivo specifico della tesi è quello di analizzare e valutare come gli studenti e gli insegnanti si siano posti di fronte a questa dimensione. In questo senso, lo studio realizzato in questa tesi può essere inquadrato come contributo al problema di ricerca più generale e discusso a livello internazionale circa l'individuazione del livello di approfondimento formale cui ci si può spingere con studenti di scuola secondaria.

Per raggiungere questo obiettivo è stata pianificata una specifica raccolta di dati e sono stati costruiti strumenti di indagine che saranno descritti, nel capitolo 3, dopo la presentazione dettagliata del percorso concettuale.

Qui si anticipa però che sono stati costruiti e distribuiti un questionario iniziale per raccogliere informazioni sulle conoscenze già in possesso dagli studenti e un questionario finale finalizzato a valutare l'efficacia degli ultimi tre incontri.

Le ultime tre lezioni di ogni polo sono state registrate al fine di raccogliere i commenti e le domande poste durante la lezione sia da parte degli studenti che degli insegnanti.

Per strutturare la collaborazione con gli insegnanti è stata infine preparata una griglia di analisi e valutazione degli incontri.

Come si argomenterà sulla base della analisi effettuata e riportata nel capitolo 3, la partecipazione diretta di diversi insegnanti, particolarmente motivati sia ad approfondire le loro conoscenze di FQ sia ad osservare la reazione dei propri studenti di fronte al formalismo della fisica quantistica, ha permesso di raccogliere alcuni dati preziosi per riflettere sui problemi di trasferibilità del Laboratorio in contesti curriculari ordinari.

***CAPITOLO 2. L'INTERPRETAZIONE DELL'ESPERIMENTO
PIÙ BELLO NEL CORSO-LABORATORIO***

2.1. INTRODUZIONE ALL'ESPERIMENTO PIÙ BELLO

Come descritto nel precedente capitolo, il Corso PLS è stato progettato e realizzato a partire dalla convinzione che l'esperimento d'interferenza ad elettroni singoli si prestasse:

- a mostrare quanto la conoscenza si potesse/dovesse articolare su diversi piani (piano concettuale, sperimentale, storico, formale, logico-interpretativo);
- ad introdurre alcuni dei principi base della fisica quantistica.

Seguendo il metodo di Feynman è possibile fare emergere dall'esperimento, in maniera chiara, le contraddizioni e i limiti interpretativi della meccanica classica che impongono l'elaborazione di una nuova logica, in grado di superare le incongruenze.

Dall'esperimento è possibile prendere spunto per sviluppare un formalismo minimale, in grado di descrivere ed interpretare quello che c'è di "apparentemente" incomprensibile nei fenomeni quantistici.

In questo capitolo, dopo una breve descrizione di come l'esperimento è stato presentato e discusso nel Corso-Laboratorio (§2.2), si illustreranno nel dettaglio i contenuti delle ultime tre lezioni incentrate sui passaggi logici necessari per la costruzione della nuova teoria quantistica. E' sulla comprensione di questi aspetti concettuali che si è focalizzata l'indagine svolta sugli studenti. Come si mostrerà nei paragrafi 2.3 - 2.6, sono state gradualmente introdotte e analizzate varianti dell'esperimento più bello, al fine di evidenziare sempre di più il cuore del ragionamento quantistico. Queste varianti riguardano esperimenti di interferenza con fotoni, neutroni e, in ultimo, l'esperimento di Stern-Gerlach che è stato la base per introdurre il concetto di *entanglement* sviluppato a chiusura del Corso, per introdurre alcune applicazioni della fisica quantistica.

2.2. L'ESPERIMENTO PIÙ BELLO: DA ESPERIMENTO MENTALE A ESPERIMENTO REALE

La presentazione del Corso (primo incontro) è stata quasi interamente dedicata a "raccontare" la storia dell'esperimento di interferenza di singoli elettroni, dalla sua ideazione come esperimento mentale di Einstein, fino alla sua prima realizzazione nel 1974, utilizzando un microscopio elettronico opportunamente modificato, ad opera di tre fisici bolognesi: Pier Giorgio Merli, Gian Franco Missiroli, Giulio Pozzi. Si è sottolineato fin da subito che l'esperimento è noto come una delle dimostrazioni del cosiddetto

2. L'interpretazione dell'esperimento più bello nel corso-laboratorio

"dualismo ondulatorio-corpuscolare", secondo il quale l'elettrone non si comporta né come onda né come particella materiale.

L'esperimento consiste nell'inviare un singolo elettrone per volta, attraverso un apparato di doppia fenditura e registrare gli impatti degli elettroni su uno schermo.

Come è stato riconosciuto anche dagli studenti dopo una presentazione dell'esperimento, l'aspetto interessante e sorprendente è che: mandando un numero sufficientemente elevato di elettroni, si forma sullo schermo, spot dopo spot, una figura di interferenza, cioè un alternarsi di zone colpite e non colpite dai singoli elettroni. Tale risultato mostra che né la teoria corpuscolare né quella ondulatoria, prese singolarmente, sono capaci di spiegare tutti i fenomeni osservati (spot e figura di interferenza).

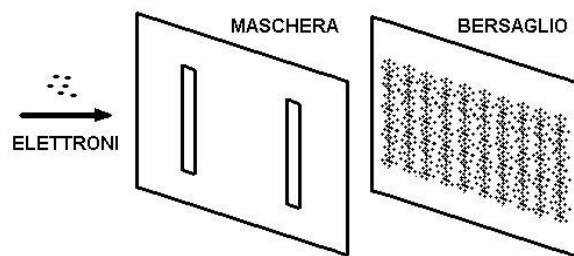


FIG 2.1 – Figura a frange dopo un numero elevato di elettroni emessi.

Nell'introduzione all'esperimento è stato evidenziato agli studenti come esso rivesta un ruolo fondamentale nella fisica moderna; non a caso viene trattato all'inizio di molti libri di meccanica quantistica.

Di esso si iniziò a parlare nel 1927, quando fu oggetto di un acceso dibattito tra due dei fisici di grosso rilievo dell'epoca, considerandolo un *esperimento mentale* impossibile da realizzare in laboratorio a causa delle difficoltà tecniche.

Il primo a ideare il Gedankenexperiment (esperimento mentale) fu lo stesso Einstein, nel tentativo di dimostrare l'erroneità dei principi di complementarità e di indeterminazione sostenuti da Bohr e da Heisenberg. Einstein riteneva di poter misurare simultaneamente variabili complementari come la posizione e l'impulso delle particelle all'interno dell'apparato, con una precisione più grande di quella permessa dalle relazioni d'incertezza di Heisenberg e di poter conoscere da quale fenditura passasse l'elettrone (intesa come informazione sul comportamento corpuscolare dell'elettrone) senza che, per questo, dovesse distruggersi la figura d'interferenza (intesa come manifestazione di un comportamento ondulatorio). Ripetendo l'esperimento con un gran numero di particelle si sarebbe pertanto dovuti essere in grado di ricavare simultaneamente informazioni sul

2. L'interpretazione dell'esperimento più bello nel corso-laboratorio

comportamento sia corpuscolare sia ondulatorio dell'elettrone; tuttavia Bohr dimostrò che, per il principio di indeterminazione, la misura suggerita da Einstein per ricavare il valore dell'impulso dello schermo implicava necessariamente una corrispondente indeterminazione sulla posizione della sorgente del fascio di elettroni e che tale indeterminazione rendeva impossibile l'osservazione dell'interferenza¹¹.

Richard Feynman¹² era solito ripetere che questo esperimento rappresentasse la chiave per la comprensione della Meccanica Quantistica¹³ (Feynman, 1988), per questo l'ha utilizzato nel suo libro "QED, la strana teoria della luce" per descrivere il "comportamento" quantistico degli "oggetti" a scala atomica e sub-atomica.

Feynman ideò un vero e proprio metodo denominato in seguito "somma sui molti cammini" che manteneva come punto di partenza i fenomeni reali e le evidenze sperimentali, ma era basato sull'ipotesi che i concetti quantistici non potessero essere costruiti sull'osservazione e l'interpretazione "classica" dei fenomeni, anzi, che andassero costruiti prevalentemente sulla base di una forte revisione critica e sul ripensamento di essa.

Questo metodo può essere utile per la didattica della fisica quantistica nella scuola secondaria, perché esso analizza il mondo dei quanti sapendo che in esso gli "oggetti" si "comportano" in un modo che non si è mai osservato: non sono né onde né particelle, ma hanno aspetti che ricordano le caratteristiche sia delle une che delle altre, evitando così la dicotomia onda-corpuscolo; inoltre i prerequisiti richiesti sono minimi, sia dal punto di vista della fisica che da quello della matematica.

Un esempio di questo percorso è stato ideato da un gruppo di ricerca dell'Università di Torino nel quale viene rivista l'ottica fisica alla luce del metodo della somma sui molti cammini di Feynman (Rinaudo, 2006\07), con lo scopo di introdurre concetti di meccanica quantistica e vengono mostrati esempi significativi discussi in dettaglio. I concetti di "sovrapposizione" e di "probabilità" sono i due concetti chiave e gli esempi trattati approfondiscono quello che viene chiamato "oscillazione di probabilità", cioè come varia la probabilità quantistica a seconda della somma dei "vettori di fase di tutti i cammini".

Il Corso-Laboratorio "L'esperimento più bello" parte dalla descrizione della storia della realizzazione dell'esperimento di interferenza d'elettrone singolo e struttura un percorso formale interpretativo più ampio rispetto all'esperienza di Torino, introducendo il concetto

¹¹ Si incontrerà un approfondimento di questa dimostrazione nel capitolo successivo .

¹² (Feynman, 2013) http://it.wikipedia.org/wiki/Richard_Feynman.

¹³ (Quantistica, 2013) http://it.wikipedia.org/wiki/Meccanica_quantistica

2. L'interpretazione dell'esperimento più bello nel corso-laboratorio

di stato, di sovrapposizione di stati, di ampiezza di probabilità e di indeterminazione di Heisenberg. Esso fornisce, inoltre, esempi di applicazione che sfruttano fenomeni quantistici dal punto di vista pratico: la crittografia quantistica, il teletrasporto e il computer quantistico. Questi esempi riguardano un ambito che raramente viene affrontato nei corsi introduttivi di FQ.

Come descritto nel documentario realizzato in collaborazione tra CNR-IMM e DIFA e presentato agli studenti durante il primo incontro, i tre fisici bolognesi riuscirono a risolvere le difficoltà tecniche previste da Feynman realizzando le componenti principali per lo svolgimento dell'esperimento. Esse sono:

- la sorgente di elettroni, interna ad un microscopio elettronico modificato ad hoc, in grado di emetterne uno per volta;
- il dispositivo per farli interferire;
- il rivelatore in grado di evidenziare ogni singolo elettrone.

Il problema di avere un sistema di fenditure sufficientemente piccole per ottenere una figura d'interferenza di elettroni è stato risolto mediante la costruzione di un bi-prisma elettronico, costituito da un filo conduttore molto sottile, tenuto a potenziale positivo che devia il percorso degli elettroni in virtù del suo campo elettrico.

Ciò che rese l'esperimento realizzabile con singoli elettroni fu l'utilizzo di un dispositivo, un intensificatore di immagine, installato sul microscopio elettronico, così sensibile da poter visualizzare la traccia di un singolo elettrone e visualizzare la formazione delle frange a partire dall'accumulo di queste tracce.

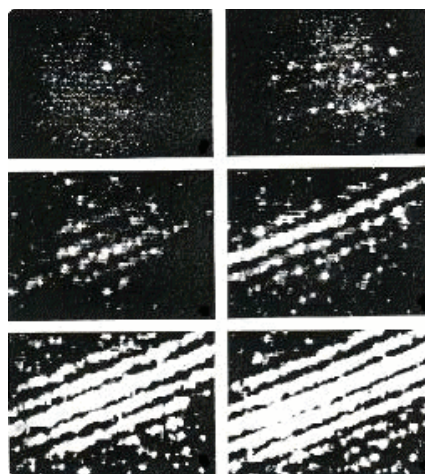


FIG 2.2 – Immagine ottenuta dall'esperimento più bello: i punti luminosi aumentano nel tempo fino ad far comparire la figura a frange

2.3. I PROBLEMI SUL TAPPETO

Per introdurre il percorso che avrebbe portato alla costruzione di un linguaggio e un quadro interpretativo, è stato ripreso l'esperimento coi singoli elettroni e sono state messe sul tappeto alcune questioni che imponevano un cambiamento di paradigma rispetto al linguaggio della fisica classica.

La prima questione sottolineata riguarda il significato stesso di interferenza.

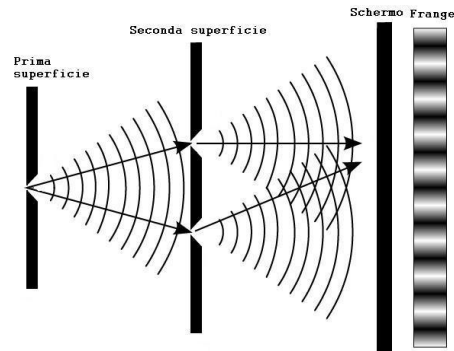


FIG 2.3 – Figura a frange creata da due sorgenti coerenti che si sovrappongono.

Nella definizione classica, l'interferenza è il manifestarsi della sovrapposizione di *due* fenomeni cooperanti e il conseguente sommarsi o elidersi dei loro effetti. Questo esperimento, invece, ha la peculiarità di essere realizzato inviando un solo elettrone alla volta. L'intervallo tra l'invio di un elettrone e il successivo è tale che quando una particella è rivelata sullo schermo, la successiva è ancora nella sorgente. Quindi con che cosa interferisce l'elettrone singolo?

L'ipotesi più semplice è pensare che l'elettrone si divida in due e che ogni metà passi da una fenditura. Per argomentare, con gli studenti, in che senso questa ipotesi non sia accettabile, è stato sottolineato che sul monitor compare sempre un solo elettrone intero, mai una sua frazione. È come se *"ogni fotone [o elettrone] interferisca con se stesso"* (Dirac, 2001).

La seconda questione, non comprensibile nel quadro della fisica classica, è come possa manifestarsi un comportamento ondulatorio da parte di un *oggetto* che, una volta arrivato sullo schermo, mostra caratteristiche di una particella. Nel corso delle tre lezioni la precedente questione si ripropone in maniera inversa anche nell'esperimento eseguito con la luce a bassissima intensità. La luce, concepita dal pensiero classico come di natura ondulatoria, sarà vista mostrare un comportamento analogo alle particelle. Si è perciò

2. L'interpretazione dell'esperimento più bello nel corso-laboratorio

assunto che un oggetto quantistico sia un *oggetto* nuovo perché, rispetto a quelli classici, sembra possedere contemporaneamente “proprietà corpuscolari” e “proprietà ondulatorie”. L'ultima questione problematica che si presenta riguarda la localizzazione dell'impatto del singolo elettrone sullo schermo. Prima dell'urto sul monitor, non è possibile conoscere e prevedere il punto preciso. Analizzando la logica dell'esperimento, si può solo affermare che la probabilità della particella di impattare in un punto preciso dello schermo è elevata se in quel punto si ha un massimo di interferenza ed è bassa se in quel punto si ha un minimo. Il confronto delle immagini ottenute sullo schermo con pochi elettroni e con molti elettroni permette di osservare che il cosiddetto comportamento “ondulatorio” si manifesta, nell'esperimento, come fenomeno statistico: quando si hanno pochi elettroni l'interferenza non è percepibile, la si evince solo dopo l'arrivo di migliaia di particelle.

Per completare il quadro dei fenomeni inspiegabili con la fisica classica, sono stati presentati gli esperimenti denominati “Which way?”, nei quali viene inserito un rivelatore all'interno dell'apparato sperimentale con lo scopo di rilevare da quale cammino (ad esempio, da quale fenditura) passi l'*oggetto*, senza disturbarne il moto.

Gli esiti degli esperimenti “Which way?” hanno mostrato che nel momento in cui viene introdotto un rivelatore, non perturbativo e anche senza leggere la misura, l'interferenza sparisce: nel caso di esperimenti di interferenza da due fenditure, si ottiene un'immagine fatta di due frange come se le fenditure non cooperassero più e fossero separate.

A commento di questi esperimenti, si è sottolineato quanto i risultati mostrino una sorta di interdipendenza tra l'oggetto quantistico, il modo in cui esso si rivela e l'insieme dell'apparato sperimentale predisposto allo studio del fenomeno.

Osservare e misurare in meccanica quantistica significa pertanto interagire con l'oggetto della misura in un modo che modifica, in un certo senso, la sua “natura” o il suo modo di manifestarsi. In meccanica classica questo non avviene e, si assume che la misura non alteri lo stato o le proprietà di un oggetto, se il rivelatore non è perturbativo.

Tutti questi aspetti sono stati presentati per evidenziare la necessità di superare alcune idee basate sull'esperienza classica e di costruire una logica diversa, capace di afferrare le relazioni molto più profonde esistenti tra gli elementi della realtà fisica.

2.4. ALCUNI INGREDIENTI DI BASE PER UNA NUOVA INTERPRETAZIONE

Il primo aspetto introdotto e discusso con gli studenti per costruire il passaggio alla nuova teoria quantistica è quello che emerge dal confronto delle due seguenti relazioni:

2. L'interpretazione dell'esperimento più bello nel corso-laboratorio

$$E = \omega \hbar \text{ relazione Planck e Einstein} \quad \mathbf{p} = \hbar \mathbf{k} \text{ reazione di De Broglie}$$

Queste due equazioni accoppiano due grandezze che in fisica classica appartengono a due ambiti diversi: la pulsazione (ω) e il numero d'onda (\mathbf{k}), legati ai fenomeni delle onde, e l'energia (E) e la quantità di moto (\mathbf{p}), legati al dominio delle particelle. L'anello di congiunzione è la costante di Planck (\hbar) che segna il carattere quantistico del fenomeno.

Il secondo passaggio affrontato per dare una nuova interpretazione ai risultati dell'esperimento viene costruito partendo dai risultati: nell'apparato si hanno due fenditure, la particella o passa in una o passa nell'altra; si vuole costruire un'espressione formale che indichi con quale probabilità la particella colpirà un punto dello schermo. Per fare ciò è discussa la necessità di avere una funzione complessa definita *ampiezza di probabilità*: $a_1(x)$ a cui è associato il passaggio attraverso la fenditura 1; analogamente $a_2(x)$ associata al passaggio attraverso la fenditura 2. Il modulo quadro della funzione esprime l'intensità, cioè la probabilità che la particella colpisca quel punto x dello schermo.

A questo punto si è cercato di mettere in risalto la necessità di definire tale ampiezza nel campo complesso per poter considerare, nell'interferenza dei singoli oggetti quantistici, tutte le differenze di fase, cioè non solo quella nulla (dell'interferenza costruttiva) e di 180° (di quella distruttiva)¹⁴.

Il passo successivo del percorso riguarda il fatto che, se una fenditura è chiusa e l'altra aperta, oppure si ha possibilità di vedere da quale fenditura passa la particella, la conclusione è che non c'è interferenza; se invece tutte e due le fenditure sono aperte e non si ha la possibilità, per come è costituito l'apparato, di misurare da quale fenditura è passata la particella, allora c'è l'interferenza.

Formalmente, questa evidenza si traduce nel fatto che, se è chiusa la fenditura 2, l'intensità sullo schermo data dall'arrivo di elettroni passati attraverso la fenditura 1 è uguale a $I_1(x) = |a_1(x)|^2$ (dove $a_1(x)$ è associata al passaggio attraverso la fenditura 1); invece se è chiusa la fenditura 1, l'intensità data dal passaggio attraverso la fenditura 2 risulta $I_2(x) = |a_2(x)|^2$.

Nel caso in cui si abbia interferenza la probabilità è:

$$I(x) = |a_1(x) + a_2(x)|^2 = |a_1(x)|^2 + |a_2(x)|^2 + 2\text{Re } a_1(x)a_2^*(x),$$

cioè il modulo quadro della somma delle ampiezze.

¹⁴ Questo punto è stato ripreso nella lezione successiva per mostrare come la valutazione della probabilità abbia bisogno di una definizione di ampiezza che possa basarsi sulla struttura moltiplicativa dei numeri complessi. Senza questa, la valutazione della probabilità dell'esito di una misura, in un esperimento che include una serie di dispositivi ad esempio di Stern e Gerlach, non permetterebbe di fare previsioni in accordo con i risultati degli esperimenti.

2. L'interpretazione dell'esperimento più bello nel corso-laboratorio

Se non si ha interferenza l'intensità sullo schermo è data dalla somma delle due intensità:

$$I(x) = |a_1(x)|^2 + |a_2(x)|^2 = I_1(x) + I_2(x),$$

cioè la probabilità che le particelle passino dalla fenditura 1 più la probabilità che passino dalla fenditura 2.

Come si era già sottolineato, il tipo di previsione sperimentale è di natura probabilistica.

Tuttavia, al contrario della meccanica statistica classica, dove l'introduzione di concetti probabilistici è legata alla nostra impossibilità pratica di conoscere con precisione tutte le variabili in gioco, il ricorso alla probabilità non è dovuto alla nostra ignoranza delle condizioni iniziali, ma è intrinseca e relativa ad ogni sistema individuale. È ontologica e non epistemica, e ha origine nella natura stessa non deterministica dei fenomeni fisici.

Come già anticipato, un aspetto sottolineato con particolare attenzione è la differenza tra il principio di sovrapposizione riferito a fenomeni classici e lo stesso principio riferito a fenomeni quantistici. In fisica classica un fenomeno di interferenza implica la presenza di *due* onde che possono sommarsi costruttivamente o distruttivamente. Ma quando il fenomeno dell'interferenza si riferisce a fenomeni quantistici, questo si manifesta anche in presenza di un solo oggetto e non necessariamente due. Questa situazione sembra quasi paradossale. Da un punto di vista logico si può dire che la sovrapposizione tra due oggetti non è più condizione necessaria per avere interferenza, ma se c'è un'interferenza vale il principio di sovrapposizione. A questo punto viene introdotto il concetto di stato per affermare che l'interferenza di un oggetto con se stesso si verifica quando uno stesso sistema è dato da una *sovrapposizione* di *stati diversi*. Essa, quasi con un gioco di parole, è la conseguenza di questo particolare stato di sovrapposizione che si ha quando un sistema ha a disposizione diversi possibili stati.

Riferendosi all'esperimento ogni singolo elettrone, se non viene rilevato, si trova in uno stato di sovrapposizione di due possibili cammini, quello che passa attraverso la fenditura 1 e quello che passa attraverso l'altra, ciascuno pesato con uguale probabilità.

In generale, nel caso in cui ci fossero più cammini lo stato della particella sarebbe allora una sovrapposizione di tutti i possibili stati indicizzati da tutti i possibili percorsi, ciascuno pesato da un coefficiente il cui modulo quadro esprime la probabilità che la particella abbia seguito quel cammino.

Nel limite, infittendo infinitamente lo schema, si può immaginare che ci sia una fenditura e quindi un possibile cammino per ogni punto dello spazio, pesato da una certa probabilità.

Lo stato della particella sarà dato da una sovrapposizione lineare degli stati che indico con $|x\rangle$; ciascuno pesato con un coefficiente (complesso) $\psi(x)$, il cui quadrato $|\psi(x)|^2$

2. L'interpretazione dell'esperimento più bello nel corso-laboratorio

rappresenta la probabilità che la particella si trovi nel punto x . Al variare del punto x , l'oggetto matematico $\psi(x)$ rappresenta una funzione che determina in maniera univoca lo stato della particella.

Riprendendo l'esperimento di diffrazione, è possibile ricavare una relazione fondamentale per l'introduzione della meccanica quantistica: il cosiddetto principio di indeterminazione di Heisenberg, meglio definibile come diseuguaglianza di Heisenberg. Esso è discusso con gli studenti come conseguenza di come è stato descritto uno stato quantico. Questa diseuguaglianza determina la coerenza di tutta la fisica quantistica.

Nella figura di diffrazione il primo minimo è determinato quando i due cammini interferiscono in modo distruttivo, per le onde classiche ($\frac{1}{2}\lambda$).

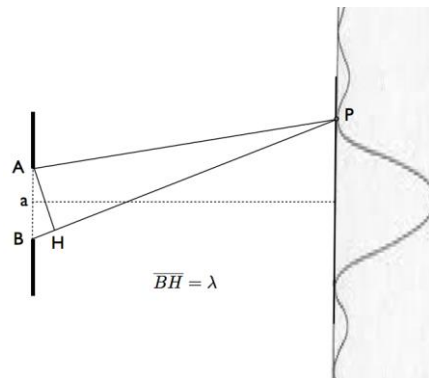


FIG 2.4 – Figura di diffrazione usando atomi freddi.

Se l'“oggetto” entra e arriva nella zona centrale, l'impulso iniziale subisce una modifica e c'è una dispersione angolare dell' “oggetto”. Quando la distanza BH è λ si arriva al primo minimo, il punto P. La larghezza della fenditura è indicata con a . Una volta che l' “oggetto” è passato l'incertezza sulla posizione può essere al massimo $a = \Delta x$

La larghezza angolare del massimo centrale di diffrazione è $\approx \frac{\lambda}{\Delta x}$

L'imprecisione (indeterminazione) sulla componente x del momento dell' "oggetto" è

$$\Delta p_x \approx p \left(\frac{\lambda}{p_x} \right)$$

Usando l'ipotesi di De Broglie: $p = \frac{h}{\lambda}$; risulta: $\Delta p_x \approx \frac{h}{\Delta x}$. Si ottiene così la relazione :

$$\Delta p_x \Delta x \approx \hbar. \text{ La relazione precisa che si ricava è } \Delta p_x \Delta x \geq \frac{1}{2} \hbar.$$

La diseuguaglianza impone l'impossibilità di avere lo stesso grado di precisione per entrambe le misure. L'imprecisione è intrinseca del sistema fisico. Contrariamente ad una terminologia ancora in uso, ereditata dalla difficile e confusa nascita della meccanica

2. L'interpretazione dell'esperimento più bello nel corso-laboratorio

quantistica, la disuguaglianza di Heisenberg non ha nulla a che fare con l'incertezza della misura sperimentale; è, come si diceva, la conseguenza del modo in cui viene descritto lo stato di una particella.

Classicamente una grandezza fisica, per esempio la posizione, ha un valore ben determinato x , che può essere conosciuto con una incertezza sulla misura δx_{exp} . Quantisticamente questa grandezza non ha un valore unico e la dispersione Δx è il range dei suoi possibili valori.

Usando ora le disuguaglianze di Heisenberg è possibile riprendere la discussione sulla possibilità di distinguere le traiettorie in un esperimento di interferenza. Quando l'“oggetto” passa dalla fenditura S_0 , per la conservazione del momento della quantità di moto, questa ha acquistato una componente dell'impulso nella direzione verticale e il primo schermo ha acquistato una componente verticale dell'impulso uguale e opposto. Viceversa se l'“oggetto” passasse per la fenditura S_1 acquisterebbe una componente dell'impulso verticale verso il basso e quindi il secondo schermo acquisirebbe una componente dell'impulso verticale verso l'alto, uguale e opposta. Tutto questo senza perturbare il moto dell'“oggetto”.

Se lo schermo E_0 riceve un momento δp_x che può essere misurato, questo significa che l'incertezza iniziale del momento sullo schermo Δp_x era molto minore di δp_x dovuto allo “oggetto”, che prende una strada o l'altra.

Quindi la posizione iniziale dello schermo è determinata con una incertezza dell'ordine di $\frac{h}{\Delta p_x}$, valendo le disuguaglianze di Heisenberg. Facendo i conti, tale imprecisione sulla posizione dello schermo è sufficiente a distruggere l'interferenza. L'indeterminazione è tale che la posizione delle frange ha un'incertezza uguale alla differenza di posizione tra una frangia e la successiva, ciò non permette di leggere le frange, distruggendo così la figura di interferenza. Quindi la validità delle disuguaglianze di Heisenberg permette di salvaguardare il fatto di non poter distinguere da che parte passa l'“oggetto”¹⁵. Una volta introdotti e discussi con gli studenti questi aspetti, si è sottolineato che ci sono validi motivi per assumere che tutti questi principi e concetti abbiano una coerenza e una validità universale. Essi si sono rivelati significativi per ogni tipo di esperimento indipendentemente dal tipo di oggetto indagato. Per evidenziare questo nel Corso-Laboratorio è stato scelto di esporre la nuova struttura concettuale inserendola

¹⁵ Questa argomentazione è la stessa usata da Bohr per dimostrare la validità del principio di indeterminazione, nel dialogo con Einstein al Congresso di Solvay del 1927 che gli conferì la “vittoria” su Einstein (vedasi paragrafo 1.2.)

2. L'interpretazione dell'esperimento più bello nel corso-laboratorio

nell'interpretazione di diversi tipi di esperimenti, partendo da quello degli elettroni, poi dei fotoni, dei neutroni e infine degli atomi di argento nell'apparato di Stern-Gerlach.

2.5. GLI ESPERIMENTI WHICH WAY CON FOTONI E NEUTRONI

Il primo esperimento reale “which way?” non perturbativo è stato realizzato con fotoni nel 1998, utilizzando un interferometro di Mach-Zehnder (cfr. FIG. 2.5). Esso ha dato un risultato equivalente a quello di interferenza di elettroni con il vantaggio di utilizzare un apparato estremamente semplice concettualmente. Coi i fotoni, inoltre, risulta più facile ricavare l'informazione sul percorso seguito senza esercitare alcun disturbo apprezzabile sul fotone stesso.

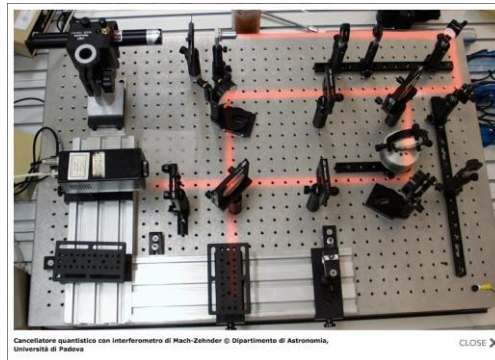


FIG 2.5 – Apparato usato per gli esperimenti di interferenza di fotoni singoli: emettitori e rivelatori; specchi semi-riflettenti (beam splitter); sistemi non perturbativi per “marcare” il passaggio di un fotone.

Nell'interferometro, con set-up classico (cfr. FIG 2.6), c'è una sorgente di fotoni singoli che punta contro una lastrina di vetro semiriflettente, chiamata beam-splitter. Due rivelatori sono messi per raccogliere i fotoni riflessi e quelli trasmessi.

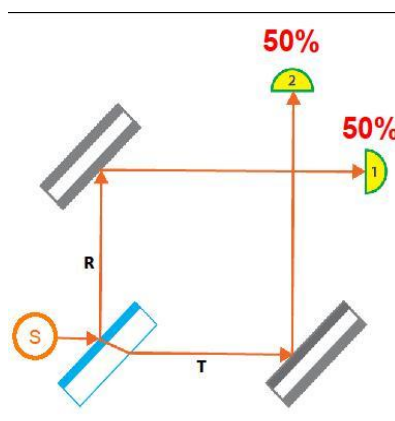


FIG 2.6 – Apparato “classico” con un solo beam splitter.

2. L'interpretazione dell'esperimento più bello nel corso-laboratorio

Ciò che risulta sperimentalmente è che la probabilità di arrivo del fotone in ognuno dei due rivelatori è del 50% e, tutte le volte che viene mandato un fotone, un rivelatore o l'altro "cliccano". Non c'è mai un segnale contemporaneo dei due rivelatori, a dimostrazione che i fotoni non percorrono entrambi i percorsi, non si dividono in due.

L'esperimento diventa interessante se viene aggiunto un altro beam-splitter (cfr. FIG 2.7).

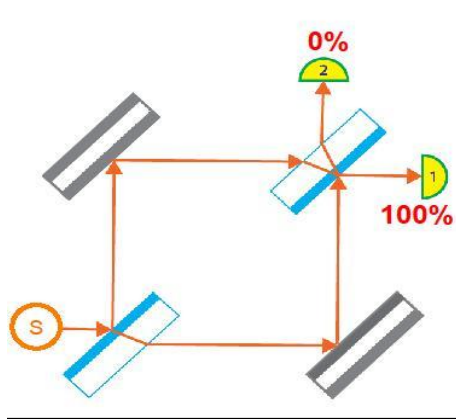


FIG 2.7 – Apparato "quantistico": introduzione del 2° specchio come da interferometro Mach-Zehnder.

Con questa configurazione, i rivelatori non segnalano più il 50% di probabilità di arrivo. Nel rivelatore 1, arrivano tutti i fotoni. Nel rivelatore 2, non ne arriva nessuno. Come mai? Come è possibile interpretare questa evidenza sperimentale?

Questo set-up dell'esperimento è detto quantistico perché il risultato non è interpretabile utilizzando un modello classico di fotoni come particelle che seguono un cammino.

E' invece interpretabile applicando ai fotoni un modello ondulatorio e sapendo che, quando un raggio di luce incide su una superficie, in certe condizioni, si sfasa.

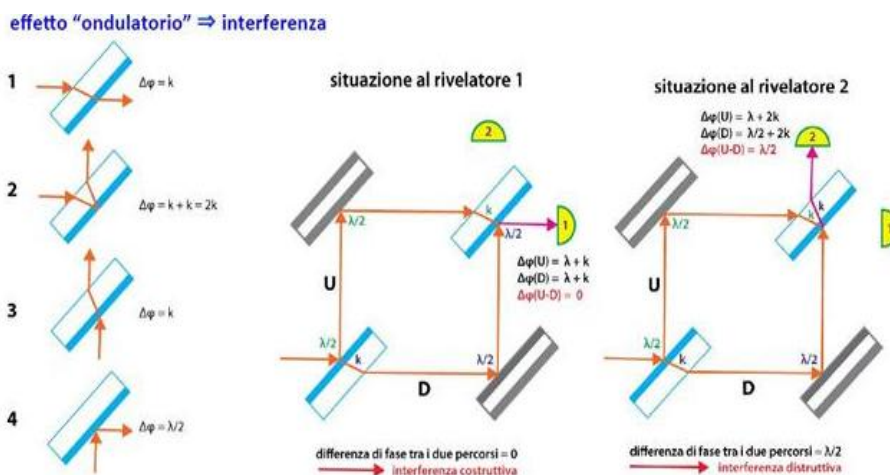


FIG 2.8 – Immagine relativa all'effetto ondulatorio di interferenza dei fotoni

2. L'interpretazione dell'esperimento più bello nel corso-laboratorio

Come mostrato dall'immagine di figura 2.8, se si fa il calcolo nel rivelatore 1 dove arrivano tutti i fotoni, la variazione di fase è la stessa per entrambi, quindi la differenza di fase dei due percorsi è 0: si ha un'interferenza costruttiva. Se si va a vedere l'altro rivelatore e si calcola la differenza di fase dei due percorsi è metà della lunghezza d'onda ($\frac{1}{2}\lambda$), quindi un'interferenza distruttiva. L'effetto è quindi descrivibile con i concetti di fisica delle onde. Se ragioniamo in termini di "particelle" è il 50%. Ma questa spiegazione non può essere completa.

Nella configurazione precedente se un fotone prendeva una direzione poteva arrivare solo ad un rivelatore. Inserendo un secondo specchio si è fatto sì che un fotone avesse due possibili percorsi per arrivare a ciascuno dei due rivelatori; in termini quantistici è come se il fotone si de-localizzasse tra i due possibili percorsi.

I risultati dell'esperimento con singolo fotone in un interferometro di Mach-Zehnder in set-up quantistico è pertanto interpretabile come un fenomeno di interferenza quantistica che deriva dalla sovrapposizione delle ampiezze di probabilità relative ai due percorsi. I due cammini "potenziali" si sovrappongono come sorgenti ondulatorie coerenti, dando origine a interferenza.

Immaginando di fare un passo ulteriore e identificare da che parte passi il fotone, con un esperimento "which way?" si inserisce un apparato-rivelatore non perturbativo che dia la possibilità di ottenere questa informazione. Il risultato che si ottiene è che l'interferenza sparisce e la probabilità su ciascun rivelatore torna ad essere del 50%.

È sufficiente un solo rivelatore posto su uno dei percorsi per avere l'informazione; infatti il rivelatore su un ramo dell'interferometro influisce anche sull'altro ramo e, quindi, sul comportamento delle particelle che si suppongono viaggiare in quel ramo in cui non si effettua la misura: inserendo uno strumento di misura in un cammino, questo influenza ciò che avviene nell'altro e l'interferenza viene distrutta. Ciò che conta è la *possibilità* di fare la misura. Se l'apparato consente di sapere da dove passa il fotone vengono meno i due percorsi possibili e questo distrugge l'interferenza, anche se la misura "which way?" non viene effettivamente registrata.

Formalmente si ha un percorso A : $|A\rangle$, e un percorso B : $|B\rangle$.

Come si è detto anche prima in riferimento alle due fenditure, se i percorsi sono indistinguibili, nel senso che non si sa dove sia passato l'*oggetto* e quindi c'è interferenza, lo stato del sistema è: $|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|A\rangle + |B\rangle)$. In questo caso, la probabilità di un conteggio in

2. L'interpretazione dell'esperimento più bello nel corso-laboratorio

un rivelatore è dato dal modulo al quadrato di $(|A\rangle+|B\rangle)$ e questo include i termini di interferenza.

Se invece i due cammini sono distinguibili e non c'è interferenza, lo stato del sistema può essere $|\psi\rangle = |A\rangle$ oppure $|\psi\rangle = |B\rangle$. In questo caso, la probabilità del conteggio è dato dalla somma delle probabilità che si ottengono considerando un cammino per volta: $|A\rangle|^2 + ||B\rangle|^2$.

È possibile descrivere questo risultato come una manifestazione del principio di complementarità di Bohr: la conoscenza del cammino e gli effetti di interferenza sono due aspetti complementari, che non possono manifestarsi contemporaneamente. Conseguenza: l'interferenza di particelle singole si osserva quando si è in presenza di più cammini per arrivare allo stesso rivelatore e, nello stesso tempo, questi cammini sono indistinguibili.

Il terzo esperimento trattato è quello di interferenza dei neutroni particolarmente chiaro ed elegante. Le tecniche di interferometria con i neutroni hanno avuto un grande sviluppo e permettono una separazione e un'intensità di fasci maggiore. Gli esperimenti furono compiuti negli anni '80 da un gruppo di Innsbruck usando il reattore nucleare dell'Istituto "Laue-Langevin" a Grenoble¹⁶. I neutroni sono prodotti dalla fissione di uranio-235 nel cuore del reattore e quindi incanalati all'interno dell'apparato.

La diffrazione di neutroni attraverso un reticolo cristallino è un esperimento classico da molti anni. Nel frattempo grazie agli sviluppi tecnologici gli esperimenti odierni sono realizzati usando dispositivi macroscopici con fenditure che possono essere viste a occhio nudo. Il calcolo teorico che tiene conto dei vari parametri dell'esperimento è in ottimo accordo con i risultati sperimentali.

La figura a frange di interferenza è costruita con singoli eventi; una differenza cruciale rispetto ad un esperimento di interferenza ottica è che la figura di interferenza è fatta di urti individuali di neutroni isolati ed è ricostruita al termine, quando l'esperimento è compiuto. Il contatore si muove lungo lo schermo nella direzione x e registra in ogni punto dello schermo i neutroni che arrivano in un dato intervallo di tempo. Gli urti isolati sono illustrati nella figura 2.9 per un esperimento compiuto con atomi freddi.

¹⁶ http://en.wikipedia.org/wiki/Institut_Laue%E2%80%93Langevin

2. L'interpretazione dell'esperimento più bello nel corso-laboratorio

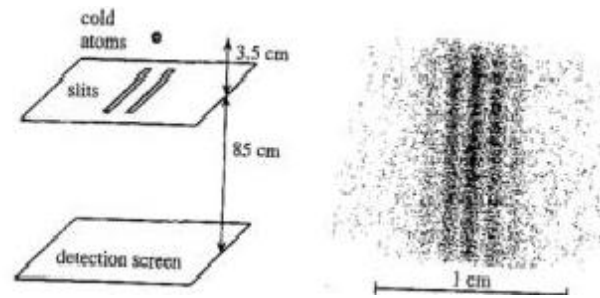


FIG. 2.9 – Diffrazione con atomi freddi

Per concludere questa parte, è stato fatto notare che vi sono tanti buoni motivi per assumere che i risultati visti siano universali, indipendenti cioè dal tipo di particelle: lo stesso comportamento lo si è osservato con elettroni ma anche con oggetti più grandi come i neutroni (situazione macroscopica). Questo significa che la FQ non si occupa solo degli aspetti microscopici ma è applicabile anche a fenomeni che appartengono al macrocosmo. Questa osservazione è stata il punto di partenza per l'ultima variante dell'esperimento più bello presa in considerazione nel Corso: gli esperimenti di Stern e Gerlach con atomi di argento.

2.6. L'ESPERIMENTO DI STERN E GERLACH

L'ultimo esperimento trattato è quello riguardante l'apparato di Stern-Gerlach, con lo scopo di uscire completamente dal mondo delle onde e dei corpuscoli, quindi dalla dicotomia onda-corpuscolo, dimostrare come gli esiti ottenuti siano gli stessi della doppia fenditura e vengano rilevate difficoltà analoghe agli esperimenti precedenti, risolte sfruttando concetti di fisica quantistica.

L'esperimento di Stern-Gerlach è stato eseguito nel 1922 (David H. McIntyre, 2010) con l'obiettivo di determinare se atomi o particelle avessero un momento angolare intrinseco. Per eseguire l'esperimento è stato usato un apparato costituito da una sorgente di atomi d'argento, inviati collimandoli in una certa direzione e fatti passare all'interno di una regione in cui era presente un campo magnetico, generato da due magneti non uguali tra loro: il polo nord a punta e il polo sud con un lato piatto. Nell'esperimento, pertanto, si ha un campo magnetico nella direzione z non uniforme che provoca sugli atomi con momento magnetico non nullo, una forza proporzionale alla variazione del campo magnetico e al coseno dell'angolo tra la direzione del campo e il vettore momento magnetico:

$$F_z = -\frac{ge}{2m_e} S_z \frac{dB_z}{dz} = \text{cost.} \frac{dB_z}{dz} S \cos \theta$$

2. L'interpretazione dell'esperimento più bello nel corso-laboratorio

Il fascio, dopo aver attraversato il campo, si divide in due e termina sullo schermo posto in fondo all'apparato, tracciando due spots molto localizzati: una metà delle particelle arriva sopra l'altra metà sotto. Questa è la dimostrazione che gli atomi possiedono un momento magnetico intrinseco: lo spin.

Il motivo che sta alla base di questo comportamento è la reazione degli atomi alla presenza del campo magnetico. Nel caso degli atomi di argento l'interazione è dovuta al fatto essi che hanno un momento magnetico non nullo, infatti tutti gli orbitali elettronici sono pieni tranne l'ultimo 5s in cui c'è solo un elettrone. Questo fa sì che lo spin di questo atomo sia legato alle proprietà fisiche dell'ultimo elettrone, quindi il momento magnetico dell'atomo è proporzionale al momento di spin S : $\vec{\mu} = -\frac{ge}{2m_e}\vec{S}$.

Classicamente, ci si attende di vedere tutta una distribuzione continua degli atomi che attraversano il campo in un intervallo da zero a π . Invece ciò che si osserva sono atomi deviati solo in due direzioni. Ciò ha come conseguenza che al momento magnetico siano attribuibili soltanto due possibili valori: $+\hbar/2$ e $-\hbar/2$, dove $\hbar=h/2\pi = 1.0546 \times 10^{-34}$ Js.

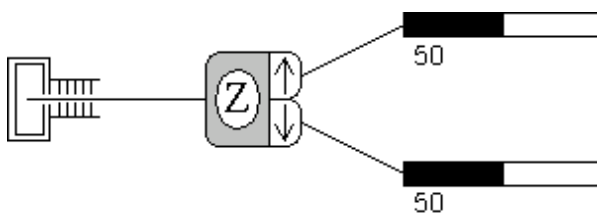


FIG. 2.10 – Apparato di Stern-Gerlach posizionato sulla direzione Z

È stato fatto notare che questo fenomeno può essere interpretato in analogia ai fotoni che possono avere polarizzazione verticale o orizzontale e alle particelle che invece possono passare da una fenditura o dall'altra.

Ogni atomo viene lanciato uno alla volta e sullo schermo finale arriva in un solo spot: quello superiore o quello inferiore. Formalmente ciò è descritto da uno STATO $|\psi\rangle$ che rappresenta lo spin dell'atomo e che può assumere, al momento della misura sullo schermo, solo due valori: spin su : $|+\rangle$ oppure spin giù: $|-\rangle$.

Ripetendo l'esperimento con molti atomi, in media metà atomi vengono deviati nello spot superiore e metà in quello inferiore, quindi un atomo ha il 50% di probabilità di essere rivelato sullo schermo finale con spin su e il 50% con spin giù. Qualsiasi sia la direzione dell'asse in cui si orientano i magneti il risultato è analogo.

2. L'interpretazione dell'esperimento più bello nel corso-laboratorio

Con gli studenti sono stati descritti diversi esempi esplicativi riferiti a diverse configurazioni di apparati di Stern e Gerlach per sottolineare come una logica classica non potesse funzionare per interpretare ciò che, invece, si osservava sperimentalmente ma che, tuttavia, il sistema mostrava una sua regolarità. In particolare ci si è soffermati all'ultimo di questi in cui è stato ricreato un apparato sperimentale composto da quattro dispositivi Stern-Gerlach inseriti in successione: il primo nella direzione Z, il secondo nella direzione X, il terzo ancora in X rovesciato in modo che i due fasci si ricombinino e l'ultimo in Z. Nello specifico: 1000 atomi con spin su (stato $|+\rangle$) escono dal primo e entrano nel secondo, escono 500 atomi con spin su (stato $|+\rangle$) e 500 con spin giù (stato $|-\rangle$), entrano nel terzo e si ricombinano entrandone 1000 nel quarto apparato.

Pensando all'esperimento in modo classico e supponendo che ogni atomo percorra effettivamente uno dei due cammini si arriverebbe alla conclusione che, su 1000 atomi mandati nel secondo dispositivo, dal quarto e ultimo apparato ne dovrebbero uscire 500 atomi con spin su e 500 atomi con spin giù (cfr FIG 2.11).

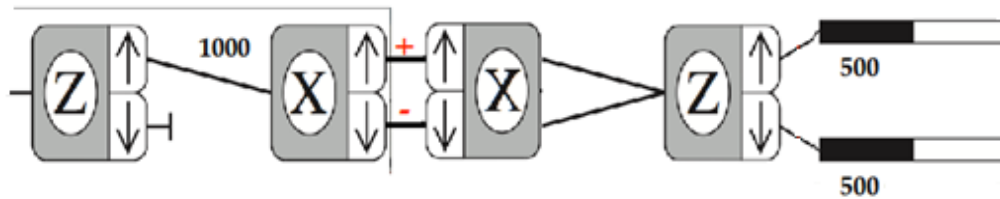


FIG. 2.11 – Quattro apparati Stern-Gerlach posti in successione. Previsione classica: 1000 atomi escono con spin su dal primo e escono 500 atomi su e 500 atomi giù dal quarto e ultimo apparato.

Questa previsione viene smentita sperimentalmente: ciò che esce sono tutti i 1000 atomi con spin su (stato $|+\rangle$) come in figura 2.12. L'assunzione non del tutto esatta viene dal concetto classico di ipotizzare, dopo l'ultimo apparato Z, che l'atomo abbia scelto una delle due alternative spin su o giù anche tra i due apparati X nonostante non venga fatta una misura.

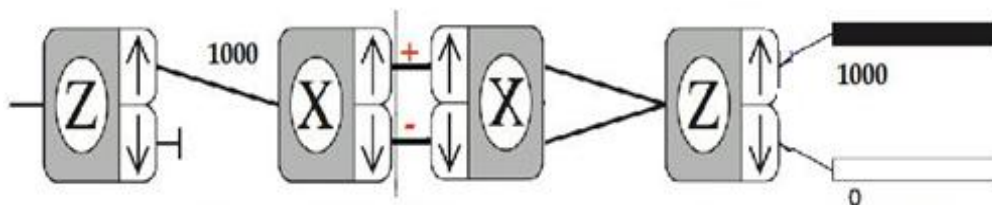


FIG. 2.12 – Quattro apparati Stern-Gerlach posti in successione. Comportamento quantistico: 1000 atomi escono con spin su dal primo e escono 1000 atomi su dal quarto e ultimo apparato.

2. L'interpretazione dell'esperimento più bello nel corso-laboratorio

Per spiegare tale risultato occorre riprendere i concetti già introdotti e concentrarsi sul fatto che, quando l'atomo è tra i due apparati X, esso non ha uno stato definito su o giù, è invece delocalizzato: si trova in uno stato di sovrapposizione, fino al momento in cui viene rilevato col detector. Da un punto di vista della meccanica quantistica se l'atomo è in uno stato $|+\rangle$ significa che ha probabilità 1 di avere spin su e 0 di avere spin giù; se invece è in uno stato $|-\rangle$ significa che ha probabilità 1 di avere spin giù e 0 di avere spin su. Mentre se è nello stato di sovrapposizione $|+\rangle + |-\rangle$ significa che c'è una probabilità $1/2$ di ottenere, nel caso si faccia una misura, il valore spin su e $1/2$ di ottenere spin giù.

Una volta sottolineata la "logica", è stato introdotto lo strumento matematico per descrivere lo stato di un atomo: si tratta di un vettore bidimensionale, che in generale si esprime:

$\vec{v} = \cos \theta \hat{a} + \sin \theta \hat{b}$. Sostituendo i versori (a e b) con gli stati (+ e -) il vettore stato risulta scritto: $|+\rangle_z = \cos \theta |+\rangle_x + \sin \theta |-\rangle_x$.

La probabilità di passaggio nel cammino superiore/inferiore non è più $1/2$ ciascuna, ma è proporzionali al quadrato del coseno/seno dell'angolo. La probabilità totale è pari a 1, poiché $\cos^2 \theta + \sin^2 \theta = 1$, quindi ho probabilità $\cos^2 \theta$ di avere atomi su e $\sin^2 \theta$ di avere atomi giù.

L'esperimento precedente ha mostrato, però, che la probabilità finale di passare attraverso una successione di apparati non è uguale alla somma del prodotto delle probabilità.

Il ragionamento permette di sottolineare che, anche in quest'ultima tipologia di esperimenti, è necessario introdurre il concetto di ampiezza di probabilità, perché il concetto di probabilità classica non è sufficiente, non permette di ottenere i risultati esatti.

Nello stato di sovrapposizione i coefficienti $\cos \theta$ e $\sin \theta$ sono le ampiezze di probabilità; negli apparati in successione sono le ampiezze di probabilità che si moltiplicano. L'ampiezza finale è data dalla somma delle possibili alternative e la probabilità risulta il quadrato dell'ampiezza finale.

Ad esempio se l'angolo θ è 45° , $\cos \theta$ e $\sin \theta$ valgono $1/\sqrt{2}$.

Gli stati risultano:

$|+\rangle_z = \frac{1}{\sqrt{2}} |+\rangle_x + \frac{1}{\sqrt{2}} |-\rangle_x$, composizione di $|+\rangle_z$ che esce dall'apparato Z lungo l'asse x;

$|+\rangle_x = \frac{1}{\sqrt{2}} |+\rangle_z + \frac{1}{\sqrt{2}} |-\rangle_z$, composizione di $|+\rangle_x$ lungo l'asse z;

$|-\rangle_x = \frac{1}{\sqrt{2}} |+\rangle_z - \frac{1}{\sqrt{2}} |-\rangle_z$, composizione di $|-\rangle_x$ lungo l'asse z.

2. L'interpretazione dell'esperimento più bello nel corso-laboratorio

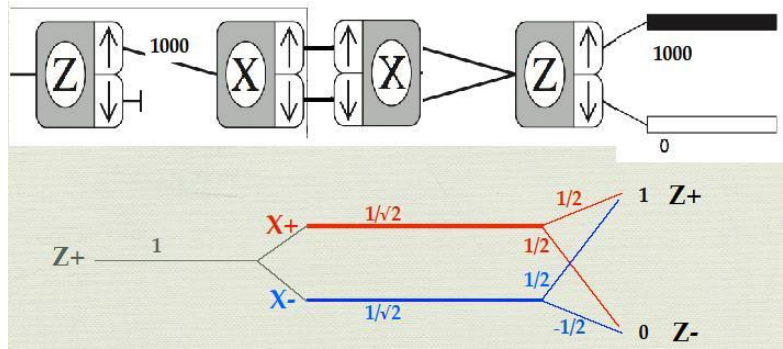


FIG. 2.13 – Composizione delle ampiezze di probabilità

Il coefficiente $\frac{1}{\sqrt{2}}$ dello stato $\frac{1}{\sqrt{2}}|+\rangle_x$ si moltiplica con i coefficienti $\frac{1}{\sqrt{2}}$ e $\frac{1}{\sqrt{2}}$ dello stato $\frac{1}{\sqrt{2}}|+\rangle_z + \frac{1}{\sqrt{2}}|-\rangle_z$ e il coefficiente $\frac{1}{\sqrt{2}}$ di $\frac{1}{\sqrt{2}}|-\rangle_x$ si moltiplica con i coefficienti $\frac{1}{\sqrt{2}}$ e $-\frac{1}{\sqrt{2}}$ di $\frac{1}{\sqrt{2}}|+\rangle_z - \frac{1}{\sqrt{2}}|-\rangle_z$. Quello che si vede sullo schermo in Z_+ usando le ampiezze di probabilità, è la somma del prodotto dei coefficienti, quindi $\frac{1}{2}$ e $\frac{1}{2}$, quindi 1 e quello che si vede sotto in Z_- è la somma di $\frac{1}{2}$ meno $\frac{1}{2}$, cioè zero. È in questo modo che gli atomi di argento uscenti dall'ultimo apparato risultano 1000 (cfr FIG.2.13).

Questo modello concettuale permette di spiegare tutte le situazioni senza legarsi all'interpretazione classica. Un atomo è descritto con precisione matematica da uno stato, che risulta però intrinsecamente probabilistico, rispetto al tipo di osservazioni e di misure che si possono fare su di esso. Non è il risultato dell'incapacità di conoscere, ma è intrinseca alla natura degli oggetti che si descrivono.

Questi concetti sono anti-intuitivi poiché seguono una logica diversa da quella classica, ma una logica coerente e che funziona. È possibile perciò, ricostruire il pensiero che interpreta ciò che si ottiene attraverso la matematica, poiché è inventata dall'uomo, si sa capire e interpretare. È possibile avvicinarsi all'astratto distaccandosi dai concetti classici della realtà quotidiana. La meccanica quantistica è proprio questo: una struttura coerente che permette di astrarsi dai concetti classici e spiegare tutta la fenomenologia.

2.7. APPLICAZIONI DELLA FISICA QUANTISTICA

Questa descrizione dei fenomeni ha trasformato la visione del mondo e, grazie a questi importanti sviluppi concettuali e agli incredibili progressi fatti nella tecnologia, la vita quotidiana è stata invasa da "oggetti" che funzionano sulla base dei fenomeni quantici: laser, lettori ottici, personal computer, telecomunicazioni, energia atomica e nucleare, ma anche quella fotovoltaica.

2. L'interpretazione dell'esperimento più bello nel corso-laboratorio

Nell'ultima lezione del Corso si è voluto dare alcuni esempi applicativi, restringendo il settore ad alcuni campi in espansione che riguardano esclusivamente la fisica quantistica, senza che ci siano connessioni di fisica classica. Sono stati proposti agli studenti tre ambiti: la crittografia, cioè la capacità di codificare l'informazione, il teletrasporto e il computer quantistico.

La crittografia è una pratica molto antica. Veniva usata ogni qualvolta vi fosse la necessità di inviare messaggi segreti: lettere confidenziali, strategie di guerra. L'idea di base è quella di creare un algoritmo, cioè una chiave che contenga l'informazione per decifrare il messaggio. Durante la seconda guerra mondiale gli algoritmi vengono meccanicizzati, grazie all'utilizzo dei computer il messaggio veniva reso decisamente più complesso e quindi più difficile da decodificare. La complessità computazionale al giorno d'oggi è indispensabile per la nostra sicurezza, ad esempio durante gli acquisti in rete.

La crittografia classica ha l'obiettivo di accrescere al massimo le difficoltà computazionali, allo scopo di scoraggiare i tentativi di decodifica. Ma in linea di principio il messaggio può essere decrittato.

La crittografia quantistica, differentemente da quella classica, sfrutta un fenomeno quantistico detto *entanglement*, per creare un cifrario che in linea di principio è impossibile decrittare. Esiste già in commercio un protocollo il cui punto centrale è lo scambio della 'chiave'.

Per spiegare agli studenti in cosa consiste uno stato entanglement è stato ripreso l'esperimento di Stern-Gerlach, affrontato nella lezione precedente trattata nel precedente paragrafo (Ghirardi, 2011).

In esso una sorgente di atomi di argento, posta in mezzo, lancia simultaneamente due atomi in direzioni opposte, verso due sperimentatori che misurano lo spin della particella che ricevono, a scelta lungo l'asse X o l'asse Z.

Se gli atomi sono entangled seguono una certa logica: se gli osservatori misurano la stessa grandezza casualmente e senza saperlo (ad esempio la stessa componente della direzione dello spin), i risultati sono identici. Le misurazioni sono comunque indipendenti e non si influenzano a vicenda. Se invece eseguono misure miste, non ci sono correlazioni.

Il protocollo per la crittografia quantistica prevede quattro fasi: nella prima gli atomi entangled vengono emessi dalla sorgente; durante la seconda entrambi gli sperimentatori eseguono le misure di spin (lungo « z » o « x ») non correlate: si associa "1" per la misura di spin $+\hbar/2$ e "0" per lo spin $-\hbar/2$; poi i due operatori si comunicano la sequenza delle misure fatte senza dirsi il risultato; infine vengono eliminati i casi in cui si sono eseguite

2. L'interpretazione dell'esperimento più bello nel corso-laboratorio

misure diverse. Ciò che rimane è una stringa di risultati identica per entrambi e che corrisponde alla chiave quantistica, casuale e ignota per un eventuale intercettatore.

Per esprimere formalmente questi concetti si definisce con il simbolo $|\psi\rangle$ lo "stato" dell'oggetto che si descrive. I due atomi distinti per i quali si è misurato un valore di spin S_z pari a $+\hbar/2$ e $-\hbar/2$ possono essere scritti: $|\psi\rangle = |1, +\rangle_z |2, +\rangle_z$, (analogamente, per S_x risulta: $|\psi\rangle = |1, -\rangle_z |2, -\rangle_z$).

Per rendere conto della fenomenologia, cioè avere la possibilità di "scegliere la misura", avere la casualità del risultato e ottenere gli stessi risultati quando si effettuano le stesse misure, si devono assumere due principi: di sovrapposizione e di riduzione del pacchetto.

Prima della misura di S_z , lo stato è in sovrapposizione:

$|\psi\rangle = |1, +\rangle_z |2, +\rangle_z + |1, -\rangle_z |2, -\rangle_z$; se all'atto della misura risulta $+\hbar/2$, significa che lo stato si riduce in $|\psi\rangle = |1, +\rangle_z |2, +\rangle_z$; se invece si rileva $-\hbar/2$ si riduce in $|\psi\rangle = |1, -\rangle_z |2, -\rangle_z$.

Analogamente se viene misurato S_x , le formule di passaggio tra x e z sono:

$$|+\rangle_z = \frac{1}{\sqrt{2}} |+\rangle_x + \frac{1}{\sqrt{2}} |-\rangle_x$$

$$|-\rangle_z = \frac{1}{\sqrt{2}} |+\rangle_x - \frac{1}{\sqrt{2}} |-\rangle_x$$

Sostituendo queste espressioni in $|\psi\rangle = |1, +\rangle_z |2, +\rangle_z + |1, -\rangle_z |2, -\rangle_z$ si ottiene:

$$|\psi\rangle = |1, +\rangle_x |2, +\rangle_x + |1, -\rangle_x |2, -\rangle_x.$$

Oltre ai principi di sovrapposizione e di riduzione del pacchetto, vale anche la relazione di indeterminazione che lega queste due grandezze. Se si conosce perfettamente S_z si ha il 50% di probabilità di trovare S_x da una parte o dall'altra, quindi è indeterminata. Nella crittografia questo permette di scartare le misure miste di (S_x e S_z).

Il teletrasporto, nell'accezione comune del termine, è quel fenomeno in cui un oggetto scompare da un luogo per ricomparire quasi istantaneamente in un altro. La cosa fondamentale è che in fisica quantistica non c'è trasporto di materia: non è l'*oggetto* ad essere teletrasportato, ma lo stato quantistico, cioè tutte le informazioni fisiche sull'*oggetto*. Il primo teletrasporto quantistico è stato fatto tra una sponda e l'altra del fiume Danubio, fu pubblicato per quell'occasione un articolo sulla rivista "Nature" intitolato "Quantum Teletransportation across the Danube", nel 2004.

Due sperimentatori posti in due laboratori separati e distanti, condividono una coppia di atomi entangled (1 e 2), il cui stato può essere rappresentato: $|\cdot\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} |1, +\rangle_z |2, +\rangle_z + \frac{1}{\sqrt{2}} |1, -\rangle_z |2, -\rangle_z$ inoltre, il primo sperimentatore ha nel suo laboratorio un'altra particella

2. L'interpretazione dell'esperimento più bello nel corso-laboratorio

(3), non condivisa, che si trova in uno stato di sovrapposizione, non ancora misurato: $|\cdot\rangle_I = \alpha |3, +\rangle_z + \beta |3, -\rangle_z$. Questo stato deve essere teletrasportato sulla particella 2.

Formalmente è necessario staccare le particelle che appartengono ai due sperimentatori e definire lo stato complessivo di tutte e tre espresso come sovrapposizione di quattro stati, cioè il prodotto fra lo stato entangled delle particelle 1, 3 e la particella incognita 2:

$$|\cdot\rangle_{TOT} = |\cdot\rangle_I |\cdot\rangle = \dots = \left[\frac{1}{\sqrt{2}} (|1, +\rangle_z |3, +\rangle_z + |1, -\rangle_z |3, -\rangle_z) \right] (\alpha |2, +\rangle_z + \beta |2, -\rangle_z + \dots + \dots)$$

A questo punto, il primo sperimentatore può effettuare le misure sulla particella incognita, sulla particella condivisa e eseguire misure congiunte su tutte le particelle, trattandole come particelle entangled. Questi rilevamenti distruggono la sovrapposizione e fanno collassare il sistema in uno dei quattro stati. Lo sperimentatore comunica la misura all'altro che a questo punto effettua una operazione per trasformare nella combinazione giusta e ricostruire il primo stato. In questo modo ha nel suo laboratorio la particella 2 che ha assunto lo stato che in precedenza apparteneva alla particella 3 che si trovava nell'altro laboratorio.

Come ultimo argomento si è parlato del computer quantistico, che ha la peculiarità di cambiare il luogo in cui si immagazzina l'informazione. Normalmente un computer classico conserva l'informazione in qualunque sistema fisico che possieda due stati stabili e distinguibili.

Un condensatore carico e scarico rappresenta un bit classico che può assumere due valori: '0' quando è scarico e '1' quando è carico. Attraverso la combinazione tra 0 e 1 è possibile costruire un linguaggio, utilizzando 2 porte logiche che agiscono sul valore dei bit e li cambiano, realizzando così tutte le proposizioni logiche e i calcoli.

Nel computer quantistico l'informazione non si immagazzina nel condensatore ma nell'atomo, che può stare in uno stato fondamentale (0) e uno stato eccitato (1).

Quando l'atomo viene colpito da un fotone, può assorbirlo ed eccitarsi oppure rimanere nello stato fondamentale. In quest'istante il sistema è in uno stato di sovrapposizione. Il q-bit è l'unità di informazione che si può trovare anche nello stato sovrapposto di $|0\rangle$ e $|1\rangle$.

Se i due stati, eccitato e fondamentale vengono usati per immagazzinare l'informazione allora l'atomo quando è in sovrapposizione registra due informazioni simultaneamente. $|0, \text{nessun fotone assorbito}\rangle + |1, \text{fotone assorbito}\rangle$.

Se invece ad ogni atomo è stata associata un'operazione, allora il computer quantistico effettua due operazioni in modo simultaneo, a differenza del modello classico che ne

2. L'interpretazione dell'esperimento più bello nel corso-laboratorio

svolgerebbe una alla volta. È necessario far terminare il processo al computer, poiché analizzare quale operazione sta facendo durante la sovrapposizione, significherebbe far collassare il sistema, quindi ridurlo ad una sola azione.

I computer quantistici possono fattorizzare un numero di 400 cifre in meno di 3 anni. Per questo posso apparire come una minaccia nei confronti dei sistemi di sicurezza. Dall'altro punto di vista appaiono promettenti in tutte le situazioni in cui c'è un altissimo livello di informatizzazione.

La D-Wave Systems, compagnia che produce oggetti di informatica ad alto livello, ha annunciato nel maggio 2011, la nascita e la messa sul mercato del D-Wave One, il primo computer quantistico basato su 128 q-bit, suscitando un certo dibattito all'interno della comunità scientifica.

CAPITOLO 3. ANALISI DELL'ESPERIENZA

3.1. CAMPIONE

Come riportato nei capitoli precedenti, hanno partecipato volontariamente al Corso studenti di classe V di liceo scientifico. Come noto dai dati relativi alle attività del PLS, il motivo principale che spinge gli studenti a seguire un corso come quello in questione è il forte interesse nei confronti della fisica e degli esperimenti che la caratterizzano. Da questo punto di vista i due gruppi di studenti non sono rappresentativi di un "tipico" gruppo classe.

Nei grafici sottostanti sono riportate le principali informazioni riguardanti il campione preso in esame:

- la distribuzione degli studenti in base all'istituto di provenienza (cfr FIG 3.1);
- la distinzione degli iscritti per genere (cfr FIG 3.2) e per polo di appartenenza;
- le presenze degli studenti ad ogni singola lezione (cfr FIG 3.3).

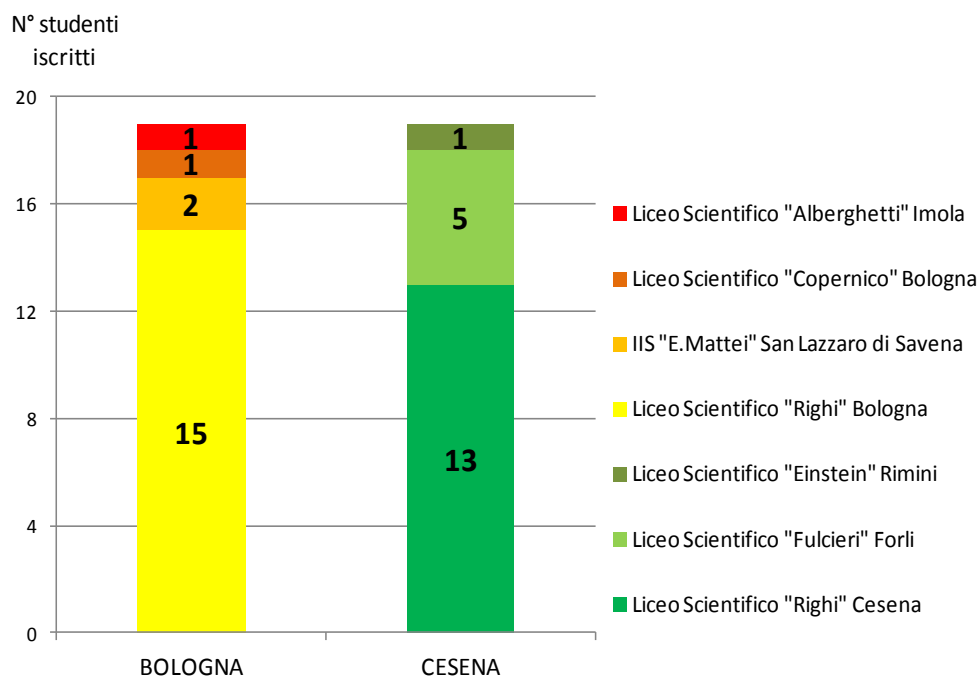


FIG 3.1 – Grafico relativo al campione di studenti iscritti ripartiti per istituto scolastico.

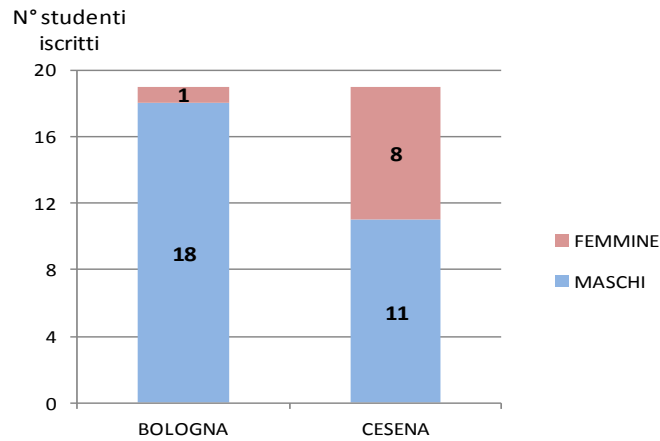


FIG 3.2 – Grafico relativo alla suddivisione per genere del campione di studenti iscritti.

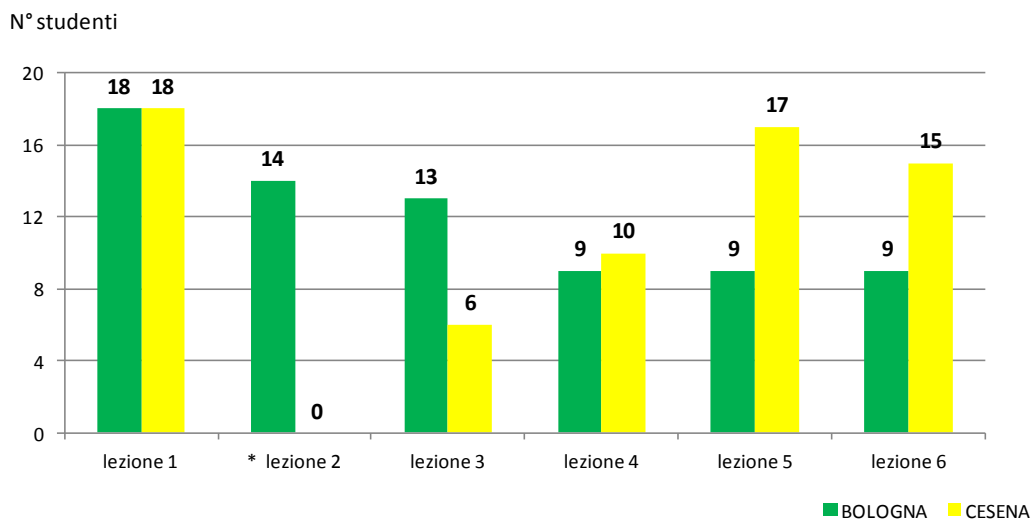


FIG 3.3 – Grafico sulle presenze durante il Corso suddiviso per polo.

Poiché le risposte sembravano, fin da una loro prima lettura, mostrare alcune differenze tra il gruppo di Cesena e quello di Bologna, si è deciso di tenere separati i risultati al fine di rispettare e indagare l'eventuale diversa personalità dei due gruppi.

3.2. SORGENTI DATI

Come anticipato nel Capitolo 1 (§1.3), durante il Corso sono stati utilizzati diversi strumenti di indagine allo scopo di raccogliere al meglio i riscontri e le reazioni degli studenti e degli insegnanti coinvolti.

Inizialmente è stato consegnato un questionario con l'intenzione di avere informazioni sul campione di studenti partecipanti al corso relativamente a:

- conoscenze già possedute riguardanti concetti di fisica quantistica;

- motivi che li hanno spinti a partecipare al Corso;
- commenti e impressioni suscitati dalla prima lezione.

Sono stati monitorati in maniera più approfondita gli ultimi tre incontri, con la registrazione delle lezioni, la distribuzione di un *questionario finale per gli studenti*¹⁷ e un *protocollo di intervista agli insegnanti*¹⁸, e con l'ideazione di un'attività della durata di mezz'ora.

Quest'attività è stata proposta al termine dell'ultima lezione: è stato richiesto agli studenti di dividersi in gruppi e di leggere un articolo di Piero Bianucci¹⁹, tratto dal quotidiano "La Stampa" pagina Cultura del 21/01/2013, che parla del teletrasporto. La consegna ai gruppi è stata quella di commentarlo, ricercare eventuali concetti poco chiari o poco completi, avvalendosi delle nozioni apprese durante le lezioni del Corso-Laboratorio. Al termine del lavoro di gruppo è stato tenuto un breve dibattito in classe per esporre le proprie considerazioni.

In questo lavoro di tesi, coerentemente coi suoi obiettivi, si è deciso di analizzare nel dettaglio solo le risposte ai questionari finali degli studenti e degli insegnanti.

I questionari raccolti sono in totale 16, di cui 7 provenienti dal polo di Bologna e 9 dal polo di Cesena. Tutti i questionari di Bologna sono stati compilati da studenti maschi, mentre quelli di Cesena, 8 sono compilati da ragazze e uno solo da un ragazzo. Il questionario è stato distribuito all'ultima lezione, tutti gli studenti che l'hanno riconsegnato hanno frequentato con regolarità fino alla fine.

Per quanto riguarda il protocollo di intervista, gli insegnanti del polo di Bologna hanno risposto in gruppo, mentre a Cesena ha partecipato al Corso un solo insegnante.

Il questionario degli studenti è stato ideato con l'intento di evitare il più possibile risposte banali o tautologiche, proponendo domande e stimolando commenti in una forma tale da non mettere lo studente nella condizione di sentirsi "interrogato o sotto-esame", ma che si sentisse, invece, libero di esprimere le proprie conoscenze e il proprio pensiero. Esso è composto da 8 domande semiaperte²⁰.

- I primi due quesiti hanno voluto indagare quale immagine di fisica quantistica si sono costruiti gli studenti durante il Corso;

¹⁷ Questionario allegato in APPENDICE A

¹⁸ Protocollo allegato in APPENDICE B. Su richiesta degli insegnanti il protocollo è stato utilizzato non come intervista, ma come un questionario a cui hanno risposto per iscritto singolarmente o in gruppo.

¹⁹ Piero Bianucci, scrittore e giornalista scientifico, editorialista a "La Stampa", di cui direttore del settimanale "Tuttoscienze".

²⁰ Questionario allegato in APPENDICE A

- Il terzo ha voluto indagare il livello di comprensione di alcuni concetti trattati durante le lezioni;
- Gli ultimi 5 quesiti sono stati di carattere più generale e hanno richiesto opinioni sul Corso appena terminato, sulla fisica quantistica e sui concetti matematici trattati.

Il protocollo di intervista agli insegnanti è stato formulato con lo scopo di raccogliere le loro impressioni sulle attività svolte, i loro eventuali suggerimenti per il Corso del prossimo anno e sull'eventualità che il Corso possa divenire un ipotetico percorso di formazione per gli insegnanti (esempio TFA). Esso è composto da 15 domande aperte:

- Le prime 6 di carattere generale-informativo e su come viene affrontato attualmente il tema dell'insegnamento della fisica quantistica;
- Nelle successive 4 domande è stata richiesta la loro opinione in merito all'ipotesi di utilizzare questo Corso in contesti di formazione iniziale e in servizio per insegnanti;
- Le ultime 5 domande hanno riguardato le impressioni che hanno avuto sugli studenti che hanno seguito il Corso, soprattutto in merito al formalismo trattato nelle lezioni.

3.3. DOMANDE DI RICERCA E METODOLOGIA DI ANALISI DEI DATI

L'indagine è stata svolta per rispondere alle seguenti Domande di Ricerca (DR), organizzate sui due temi di novità del percorso:

I. IL FORMALISMO MATEMATICO

DR Ia) la parte del percorso più incentrata sul linguaggio matematico è stata accettata dagli studenti o è stata percepita come una difficoltà insormontabile e fuori dalla loro portata?

DR Ib) quale importanza e quale ruolo sono attribuiti alla descrizione formale nello studio della fisica quantistica?

DR Ic). come si è inserito e come si è integrato il formalismo all'interno delle altre dimensioni interpretative?

II. APPLICAZIONI E PROSPETTIVE tecnologiche

DR IIa) L'argomento ha destato interesse? E' stato ritenuto utile? Se sì, quale tipo di interesse ha scaturito?

DR IIb) Come è stato percepito il ruolo assunto dal formalismo all'interno della trattazione delle applicazioni pratiche?

Per rispondere alle varie domande di ricerca si è posta l'attenzione alle risposte degli studenti a specifiche domande del questionario finale. Nella tabella 3.1 sono riportate le domande del questionario prese principalmente in considerazione per rispondere alla corrispondente domanda di ricerca.

DOMANDA DI RICERCA	DOMANDA/E DEL QUESTIONARIO PRESA IN CONSIDERAZIONE PER RISPONDERE ALLA DR
<i>I_FORMALISMO</i>	
DR Ia	DOM 5
DR Ib	DOM 2
DR Ic	DOM 1 e DOM 3
<i>II_APPLICAZIONI</i>	
DR IIa	DOM 1, DOM 4 e DOM 7
DR IIb	DOM 3

Tabella 3.1 – Corrispondenza domanda di ricerca – dati considerati

L'indagine si è conclusa con l'analisi delle risposte alle restanti domande, dalle quali sono stati colti i punti di forza e di debolezza generali del Corso. Inoltre si è voluto sondare quanto fosse importante per gli studenti inserire l'insegnamento della fisica quantistica durante il ciclo finale dei loro studi. Le potenzialità e i limiti del Corso sono emerse anche dalle risposte fornite dagli insegnanti al questionario predisposto per loro, in qualità anche di adulti che hanno osservato gli studenti durante il Corso e che possono fornire consigli per l'eventuale utilizzo del Corso in contesti di formazione degli insegnanti.

La scelta delle domande di ricerca, delle domande del questionario su cui porre maggiormente l'attenzione e l'ordine con cui condurre l'analisi e presentare i risultati sono stati il risultato di un confronto (triangolazione) tra le diverse persone coinvolte nello studio. L'obiettivo era infatti quello di individuare un modo per studiare e presentare quanto emergeva dai dati che restituisse anche il tono delle risposte e la voci degli studenti. Non si è scelto, cioè, nessun tipo di criterio top-down che potesse o appiattire o forzare l'analisi. Come si vedrà nella presentazione dei risultati, a volte si è optato per un'analisi di tipo quantitativo, a volte per un'analisi di tipo qualitativo. La scelta di un metodo

quantitativo è stata effettuata quando si voleva dare essenzialmente una visione d'insieme delle risposte degli studenti. La scelta di un metodo qualitativo è stata invece effettuata quando si è voluto cercare un'interpretazione di aspetti specifici che si erano notati.

Data la peculiarità del contesto e il numero di studenti, in nessun caso si trarranno conclusioni o si faranno valutazioni che vadano al di là del campione considerato.

3.4. RISULTATI

Di seguito vengono riportati i risultati emersi dall'analisi dei questionari, nell'ordine indicato dalle Domande di Ricerca scelte.

La presenza di numeri non interi in alcuni grafici è dovuta alla scelta di due risposte da parte di certi studenti che hanno però giustificato i motivi nei commenti messi a disposizione.

Come riportato anche in Tabella 3.1, per rispondere alle prime domande di ricerca sono state analizzate le risposte a 4 domande nel questionario degli studenti.

I-FORMALISMO MATEMATICO

La prima domanda del questionario considerata è stata:

DOM 5. Ritieni che gli aspetti matematici introdotti (vettori, numeri complessi, probabilità, ...) siano un ostacolo per la comprensione delle lezioni o un aiuto per entrare nella fisica quantistica?

- 1. Per nulla d'accordo – sono un ostacolo e non aiutano per niente;*
- 2. Parzialmente d'accordo – sono un grosso ostacolo ma aiuterebbero a entrare nella fisica quantistica;*
- 3. Abbastanza d'accordo – sono difficili ma affrontabili e sono necessari per entrare nella fisica quantistica;*
- 4. D'accordo – non sono un ostacolo e sono fondamentali per entrare nella fisica quantistica*

Motiva la risposta

Le risposte date dagli studenti corrispondono al grafico in figura 3.4.

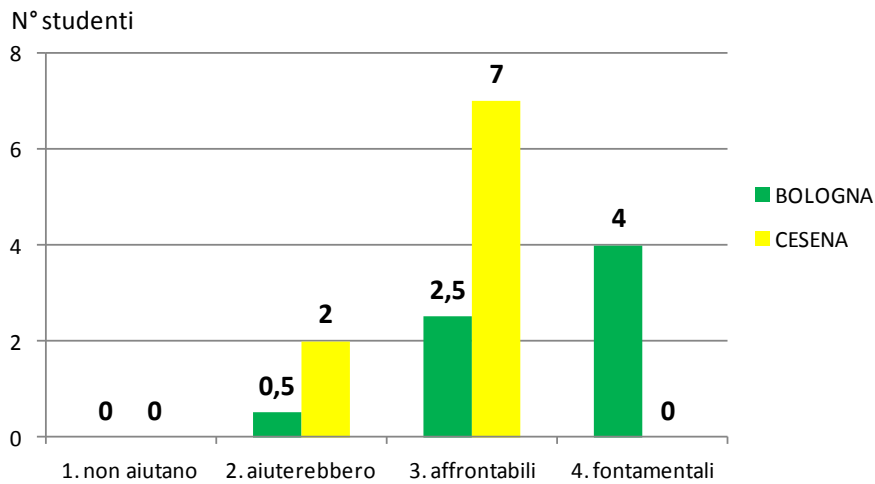


FIG 3.4 – Grafico corrispondente al riscontro sugli aspetti matematici del Corso

Dalla figura 3.4 si può ritenere che la matematica introdotta è stata accettata dagli studenti e non percepita fuori dalla loro portata. La maggioranza delle risposte mostra, infatti, che gli aspetti matematici sono stati difficili ma affrontabili.

Prendendo in esame le risposte alla seconda domanda (DOM 2) è possibile ricavare l'informazione circa una ragione per cui la matematica è stata ritenuta necessaria.

DOM 2. Nel corso è stato discusso quanto l'oggetto quantistico sia diverso da quello classico, sottolineando i seguenti aspetti per marcarne le differenze:

- a) *Il diverso comportamento di un oggetto classico e di uno quantistico negli esperimenti di interferenza;*
- b) *La possibilità/impossibilità di visualizzare l'oggetto con immagini e/o con parole familiari, come onda e corpuscolo;*
- c) *La necessità di introdurre nella descrizione matematica concetti come "ampiezza di probabilità", "relazione di indeterminazione", "sovrapposizione quantistica".*

Quale dei precedenti aspetti, oltre a marcare la differenza con l'oggetto classico ti è sembrato più importante per farti un'idea di oggetto quantistico e, più in generale, della fisica quantistica? (a), (b), (c)? Perché?

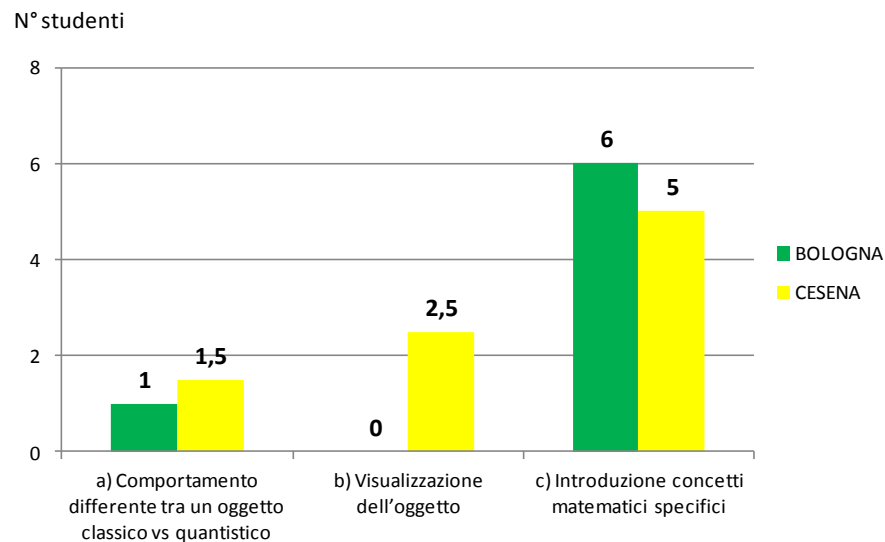


FIG 3.5 – Grafico corrispondente al riscontro sull'aspetto più rilevante dell'oggetto quantistico

Come mostrato nel grafico di figura 3.5, la maggioranza degli studenti si è resa conto che la spiegazione matematica affrontata è stata necessaria per descrivere le proprietà e il comportamento degli oggetti quantistici, per comprenderli e distinguerli in modo chiaro da quelli classici. Da tali risposte si è potuto osservare che il formalismo matematico è stato riconosciuto, quindi, come uno strumento utile per avere un'idea dell'oggetto quantistico e l'interpretazione degli esperimenti trattati.

Mentre a Bologna gli studenti hanno prevalentemente scelto la risposta c), a Cesena non c'è stata una preferenza netta; ciò è il primo segnale di un diverso atteggiamento nei confronti dello studio della fisica quantistica e, più in generale, della fisica.

Per approfondire questo aspetto è stato preso in esame un terzo quesito del questionario:

DOM 1. Nel corso di queste ultime tre lezioni siete stati introdotti ai fondamenti della fisica quantistica, partendo dall'analisi dell'esperimento più bello della fisica, attraverso l'analisi dei concetti teorici, sino alle più recenti applicazioni. In particolare, la fisica vi è stata mostrata come una teoria in grado di:

- a) descrivere con precisione esperimenti che non possono trovare spiegazione all'interno della fisica classica;*
- b) fornire una descrizione matematica coerente dei fenomeni fisici;*
- c) fornire un'interpretazione della realtà;*
- d) prevedere e progettare nuovi esperimenti e applicazioni.*

Ordina le quattro affermazioni da quella che ritieni più importante alla meno importante e commenta la tua scelta.

Per analizzare il risultato di tale quesito sono stati costruiti due grafici:

- nel primo grafico viene riportata per ogni affermazione il numero di volte che essa è stata ritenuta la più rilevante (cfr FIG 3.6);

- nel secondo grafico (cfr FIG 3.7) vengono classificate le risposte assegnando un punteggio decrescente alla rilevanza identificata dagli studenti nelle diverse affermazioni, cioè:

- 1° scelta sono stati assegnati 4 punti
- 2° scelta sono stati assegnati 3 punti
- 3° scelta sono stati assegnati 2 punti
- 4° scelta è stato assegnato 1 punto.

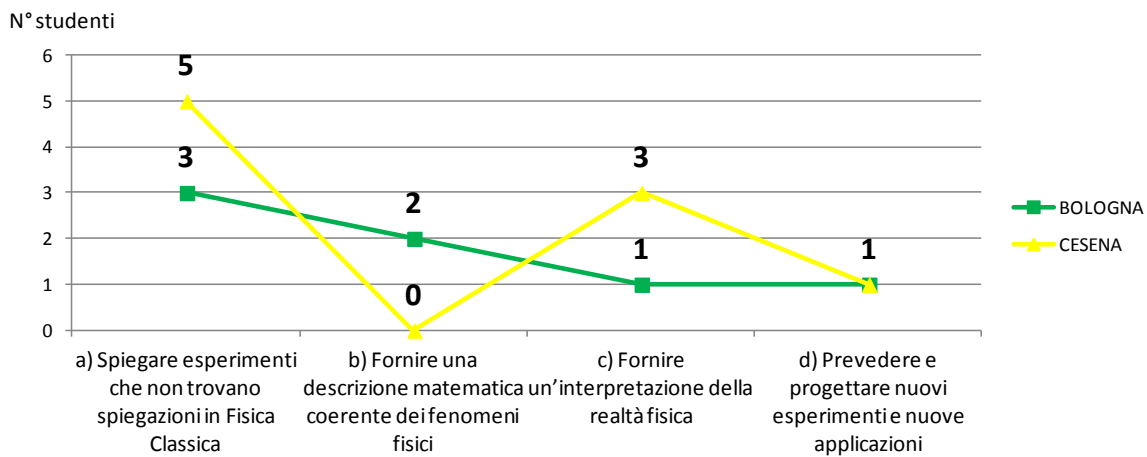


FIG 3.6 – Grafico sulla frequenza di scelta dell'aspetto più rilevante della fisica

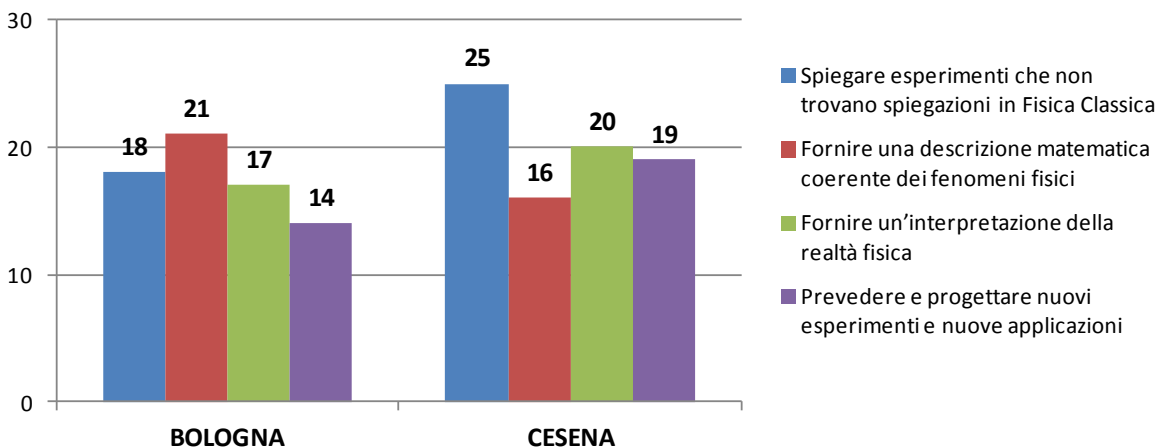


FIG 3.7 – Grafico sulla distribuzione della scelta dell'aspetto più rilevante della fisica

La domanda, nella sua formulazione, aveva l'intento di capire se, secondo gli studenti, la struttura formale introdotta nel Corso avesse un ruolo puramente strumentale o se fosse stata colta la sua portata concettuale e interpretativa. che andava ben oltre il mostrare un "formalismo che funzionasse". Dalle risposte e dai commenti è stato notato che gli studenti hanno interpretato la domanda in modo molto personale, attribuendo un'importanza relativa alle varie dimensioni della fisica in coerenza con un'idea più generale che loro

avevano sullo scopo più importante della fisica e sul significato di progresso delle conoscenze.

Dai grafici di figura 3.6 e figura 3.7 si sono notate alcune differenze fra i due poli; la distribuzione delle risposte a Bologna è più uniforme rispetto a quelle di Cesena. Sono presenti due modi diversi di attribuire importanza alle varie dimensioni della fisica quantistica. Infatti, mentre il gruppo di Bologna ha mostrato un interesse maggiore nei confronti della matematica, il gruppo di Cesena ha attribuito una rilevanza maggiore all'approccio di tipo sperimentale. In particolare, il primo grafico (cfr FIG 3.6) mostra che nessuno studente di Cesena ha scelto l'opzione b), riguardante la descrizione matematica, come quella più importante.

Il risultato che non vi sia una scelta netta in nessuno dei due gruppi è un segnale importante del fatto che il Corso abbia stimolato diversi tipi di interesse e coinvolto studenti con diverse sensibilità.

Nei 16 questionari analizzati sono emerse alcune personalità che si avvicinano a quelli che possono essere dei profili che hanno caratterizzato i due gruppi. Per dare un esempio della varietà delle risposte e delle varie "voci" degli studenti, vengono riportati alcuni argomenti usati dagli studenti per motivare la scelta delle 4 opzioni previste nella domanda 1:

Motivazioni per la scelta a) *"La descrizione degli esperimenti quantistici è fondamentale per distinguerli da quelli classici ..."; "... è importante descrivere dettagliatamente tali esperimenti essendo al di fuori della nostra normale concezione di leggi fisiche ..."*.

Motivazioni per la scelta b): *"... solo la modellizzazione matematica permette il progresso delle conoscenze ..."; "Il linguaggio della fisica è quello matematico ... La rigorosità matematica è certamente cruciale ..."; "... se la dimensione quantistica trascende la fenomenologia ..., la matematica si rende l'unica a poter descrivere ... la realtà."*

Motivazioni per la scelta c): *"... deve esistere un significato profondo e concreto in grado di spiegare la natura ..."; "... trovo che fornire un'interpretazione della realtà sia la base di tutte le teorie scientifiche, tali teorie devono essere supportate da solide basi logico-matematiche ..."; "... credo che l'aspetto più importante di una teoria sia ciò che la riconduce al motivo che ha spinto a formularla ..."*.

Motivazioni per la scelta d): *"... preferisco la parte più pragmatica della fisica quantistica ..."; "... con prevedere e progettare nuovi esperimenti e applicazioni intendo ricavare qualcosa di utile in senso pratico e tecnico ..."; "... essendo abituata a lavorare sempre con qualcosa di più concreto, questo mi permette di capire meglio."*

Una risposta particolarmente articolata e interessante è data da una studentessa del polo di Cesena. La riportiamo per mostrarne la raffinatezza argomentativa e la coerenza:

“... credo che lo scopo principale dello studio della fisica sia proprio cercare una interpretazione della realtà in cui viviamo, una spiegazione del perché e del come avvengono i fenomeni che ci circondano(c). Dopo questa “curiositas” di fondo vengono le applicazioni pratiche, altro aspetto a mio parere molto importante della fisica, perché il conoscere i meccanismi della realtà che ci circonda implica saperli sfruttare, interagire con questa realtà e trarre vantaggio dalla conoscenza di essa (d). Le altre due affermazioni mi sembrano sfaccettature dell'affermazione c)...”.

Considerando tutti i questionari, solo 4 studenti hanno fornito risposte che non mostravano una particolare rielaborazione personale, ovvero risposte del tipo:

“... l'aspetto più importante della FQ è la sua coerenza che ha permesso di spiegare fenomeni prima incomprensibili ...”;

“... grazie agli esperimenti abbiamo potuto comprendere la grande differenza tra fisica classica e quella quantistica ...”.

Per dare un'idea dei due gruppi di studenti, riportiamo nei grafici seguenti (cfr FIG 3.8) la distribuzione degli studenti sulle diverse tipologie di “profilo” che indichiamo, per brevità, lo “sperimentale”, il “teorico”, il “curioso”, il “pragmatico”, “altro”.

Dai grafici emerge che:

- i cosiddetti “teorici” sono presenti solo nel gruppo di Bologna;
- gli studenti che non hanno fornito risposte con una particolare rielaborazione sono distribuiti maggiormente a Cesena;
- i cosiddetti “curiosi” sono distribuiti maggiormente a Cesena.

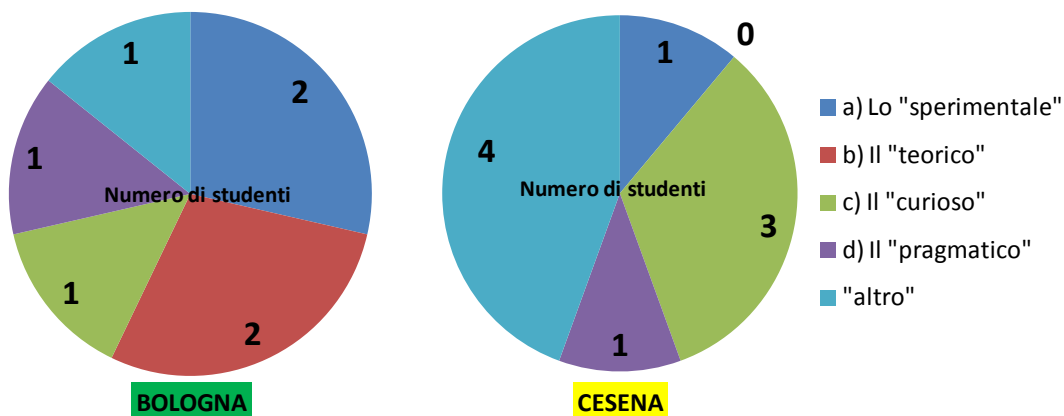


FIG 3.8 – Grafico sulla distribuzione dei “profili” divisi per polo

Per rispondere alla terza domanda di ricerca DR Ic) è stata presa in esame la domanda 3 del questionario:

DOM 3. Durante il corso sono stati introdotti dei concetti tipicamente quantistici:

- (a) “Delocalizzazione” di un oggetto quantistico in due possibili cammini;*
- (b) Stato quantistico e ampiezza di probabilità;*
- (c) Entanglement.*

Riesci a ricostruire il contesto in cui sono stati introdotti e a sottolineare l'importanza assunta in quei contesti?

Questa domanda non è affatto banale. La sua stesura è stata oggetto di diversi scambi e riflessioni tra i docenti del Corso. Con essa si voleva avere un feedback sul grado di comprensione raggiunto dagli studenti su concetti ritenuti chiave, senza però formulare quesiti da compito in classe che potessero ammettere solo una tipologia di risposta esatta. Si voleva, cioè, che la domanda ammettesse un grado di risposta minimale alla portata di tutti gli studenti, ma che potesse anche stimolare qualcuno a elaborare risposte più complesse.

Data la tipologia della domanda, l'analisi delle risposte è stata condotta con lo scopo di:

- mettere in luce il linguaggio utilizzato dagli studenti;
- far emergere ciò che hanno colto dalle lezioni;
- capire se e come alcuni studenti sono stati in grado di interpretare la domanda e proporre una rielaborazione autonoma dei contenuti esposti.

Su 16 questionari hanno risposto 14 studenti. Si sono distinti nell'analisi diversi livelli di risposta. Per ognuno di essi si riporta una risposta a titolo di esempio:

1. Risposta che emerge come risultato di una rielaborazione personale dei concetti trattati.

“Abbiamo introdotto il concetto di “delocalizzazione” riguardo gli esperimenti con l'interferometro Mach-Zendler e quello di stato quantico e ampiezza di probabilità riguardo all'esperimento di Stern-Gerlach, ma in generale questi concetti si riferiscono a 3 esperimenti che sono in un certo senso equivalenti. In tutti e 3 i casi si tratta di avere due possibilità equivalenti (passare attraverso la fenditura 1 o 2, finire nel rivelatore 1 o 2, avere spin su o giù). Il punto cruciale della meccanica quantistica sta nel fatto che noi non possiamo sapere quale di queste due alternative “sceglie” la nostra particella finché non effettuiamo la misura. Anzi solo in quel momento la particella effettivamente “sceglie” una delle due opzioni, ma fino a quel momento essa è caratterizzata dalla delocalizzazione in

due possibili cammini o dalla sovrapposizione di due stati. Dunque non si può ricorrere al concetto classico di alternativa, ma al concetto di ampiezza di probabilità ...”.

2. Risposta buona con l'uso di un linguaggio appropriato;

“La delocalizzazione ci è stata introdotta per spiegare come sia possibile ottenere una figura di interferenza nell'EPB: la particella percorre entrambi i cammini e interferisce con se stessa. È importante perché ci fa diventare pazzi per capirla. A parte gli scherzi, è utile per espandere meglio e fare più chiarezza sulla strano concetto di dualismo onda-particella. Stato quantico e ampiezza di probabilità sono stati introdotti quando abbiamo parlato dei beam-splitter e dell'apparato di Stern-Gerlach. Sono importanti per far tornare la matematica, per predire i corretti risultati di alcuni esperimenti che la fisica classica avrebbe predetto impossibili o in modo sbagliato...”.

3. Risposta scolastica con un linguaggio semiclassicalo meno preciso;

“Abbiamo parlato di delocalizzazione quando abbiamo visto che sparando elettroni e facendoli passare dalle due fenditure si è detto che questi non possono dividersi ma possono prendere solo un cammino, indistintamente, ma non essendoci prove è come se l'elettrone non stesse in un punto preciso ma in tutti i punti contemporaneamente, senza però dividersi. Dato che non è possibile conoscere simultaneamente velocità e posizione di una particella bisogna introdurre lo stato quantico e l'ampiezza di probabilità. Questo perché si crea uno stato di indeterminazione che non è causato dagli strumenti ma è caratteristica intrinseca della materia ...”

4. Risposta confusa e parziale.

“Una singola particella viene “messa” di fronte a due fenditure e noi non possiamo sapere con certezza in quale delle due passerà; dopo un po' di tempo la particella risulta de-localizzata, non le si può attribuire una posizione certa, ma viene a trovarsi in due posizioni diverse e anche spazialmente lontane. Parlando del principio di sovrapposizione ci ha permesso di capire meglio l'esperimento di Stern-Gerlach ...”.

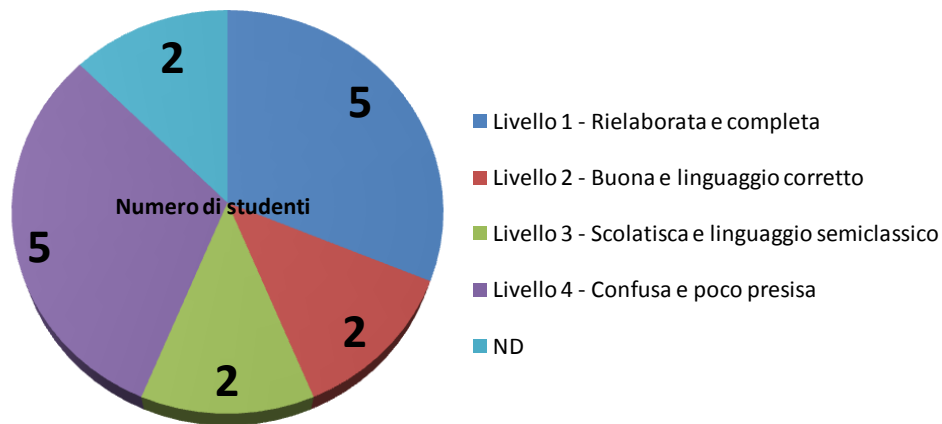


FIG 3.9.1 – Grafico sul livello di comprensione dei concetti degli studenti di entrambi i poli

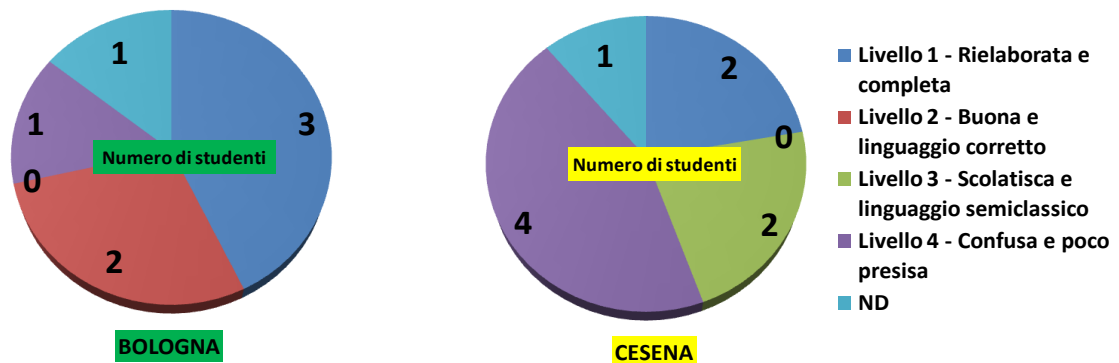


FIG 3.9.2 – Grafico sul livello di comprensione dei concetti diviso per polo

II. APPLICAZIONI E PROSPETTIVE tecnologiche

Tra le ragioni che hanno motivato gli studenti a ritenere importante e utile affrontare la fisica quantistica e le sue applicazioni²¹ è stata quella di avere un contatto con le tecnologie moderne e possedere gli strumenti per “interpretare” il presente. Per citare alcune risposte:

“... la scuola dovrebbe fornire strumenti per interpretare non solo il passato ma anche il presente ...”, “... prevedere nuove applicazioni future potrebbe portare al progresso di nuove tecnologie ...”; “... è importante che gli studenti vengano a conoscere nuove realtà ...” “... offre uno sguardo più ampio sulla fisica usata ai nostri giorni ...”

La Tabella 3.2 sottostante riporta gli argomenti che gli studenti hanno spontaneamente scelto e giudicato i più sorprendenti, interessanti e difficili, raccolti nelle risposte alla seguente domanda:

DOM 4. In relazione a tutto il corso:

qual è il fenomeno/argomento che ti è sembrato più sorprendente?

²¹Commenti e esempi riguardanti DOM 1 già trattata nelle pagine precedenti e parte della DOM 7, le cui risposte verranno mostrate al termine del paragrafo.

*Quale argomento hai trovato più interessante e vorresti approfondire?
Quale argomento hai trovato più difficile da comprendere?*

ARGOMENTO	BOLOGNA			CESENA		
	SORPRENDENTE	INTERESSANTE	DIFFICILE	SORPRENDENTE	INTERESSANTE	DIFFICILE
	N°Studenti	N°Studenti	N°Studenti	N°Studenti	N°Studenti	N°Studenti
teletrasporto	2	0	0	1	1	0
ampiezza di probabilità	1	0	3	2	0	1
entanglement	1	2	1	1	0	1
esperimenti interferenza	1	0	0	4	0	1
esperimenti "which way?"	0	0	0	1	1	0
misura\delocalizzazione	0	0	1	0	2	3
spin\Stern-Gerlach	1	0	0	0	2	1
stato di sovrapposizione	0	0	1	0	0	2
computer quantistico	1	3	1	0	0	0

Tabella 3.2 – Valutazione degli studenti sui principali argomenti del Corso

Tra i concetti segnalati dagli studenti, vi è in particolare il computer quantistico, il teletrasporto e il concetto di entanglement, che sono gli argomenti trattati nella lezione sulle applicazioni. Ciò documenta il fatto che questi concetti siano rimasti impressi e abbiano colpito gli studenti.

Il linguaggio utilizzato inerente al concetto (c) della domanda 3 illustrata in precedenza è molto pertinente. Riguarda un concetto di cui, in particolar modo, gli studenti non hanno mai sentito parlare prima e, di conseguenza, sono portati ad attenersi ad un lessico simile a quello impiegato durante il Corso. Come ad esempio:

“... l'entanglement è rilevante nei sistemi che si basano sulla sovrapposizione contemporanea di più stati quantici ...”; “... permette di generare una chiave casuale nota a entrambe le persone che devono comunicare, ma ignota a un possibile intercettatore ...”; “... si è parlato di sistemi entangled - inseparabili - formati da più sistemi coinvolti ...”; “... In una misura entangled se Alice e Bob misurano lo spin di atomi entrambi sullo stesso asse ottengono risultati identici, mentre se eseguono misure miste ottengono valori diversi ...”

Come si evince in queste e altre risposte gli studenti hanno colto i collegamenti con le lezioni precedenti e hanno utilizzato concetti inerenti al formalismo per spiegare e interpretare i fenomeni tecnologici.

Le risposte alle domande 6 e 7 hanno fatto emergere risultati molto positivi; mentre l'analisi della domanda 8 ha fornito spunti di riflessione per migliorare e rendere più completo il Corso. Come si mostrerà, anche nelle risposte a queste domande è possibile ricavare un feedback sull'efficacia della lezione sulle applicazioni.

*DOM 6. Gli incontri fatti:*A. *Ti hanno incuriosito*

1. (per nulla); 2. (poco) 3. (abbastanza) 4. (molto)

B. *Ti hanno coinvolto*

1. (per nulla); 2. (poco) 3. (abbastanza) 4. (molto)

C. *Ti hanno fatto intravedere un "mondo nuovo"?*

1. (per nulla); 2. (poco) 3. (abbastanza) 4. (molto)

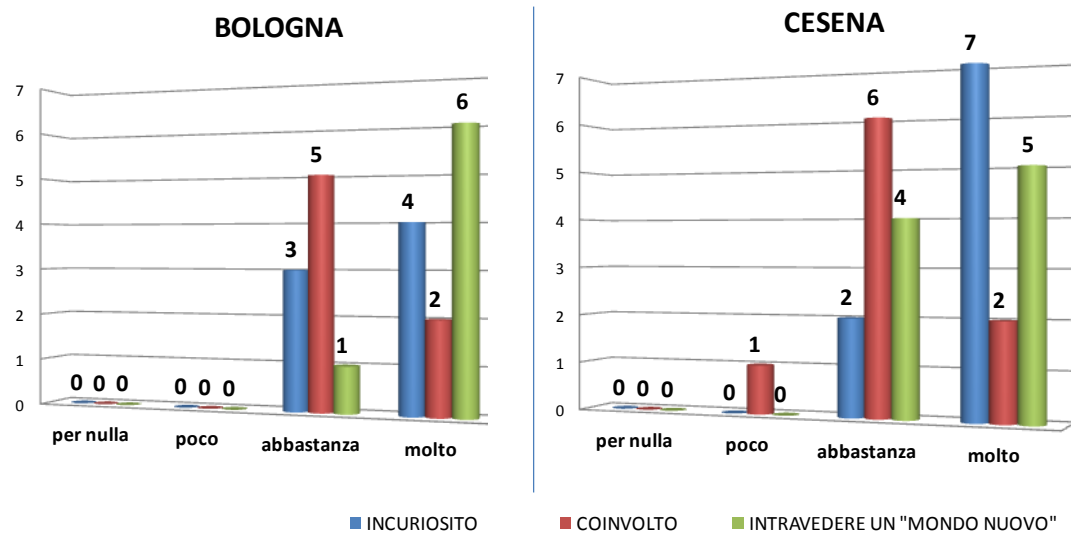


FIG 3.10 – Grafico di gradimento del Corso suddiviso per polo

In particolare il grafico di figura 3.10 descrive l'indice di gradimento al Corso da parte degli studenti che si sono sentiti tutti "abbastanza" o "molto" interessati, incuriositi e hanno potuto intravedere, dalla nuova interpretazione degli esperimenti, un "mondo nuovo". Si ritiene che anche questa reazione sia un effetto della scelta di portare l'insegnamento della fisica quantistica ai nostri giorni e di far intravedere le frontiere della ricerca e della tecnologia. Questa "vicinanza temporale" ha infatti sicuramente stimolato negli studenti quell'atteggiamento di curiosità e di interesse necessario per accettare un nuovo modo di guardare e interpretare la realtà.

DOM 7. Ritieni utile sperimentare un modulo sulla fisica quantistica in V liceo?

1. (per nulla); 2. (poco) 3. (abbastanza) 4. (molto)

*Motiva brevemente**Se si, per tutti o solo per una scelta volontaria?*

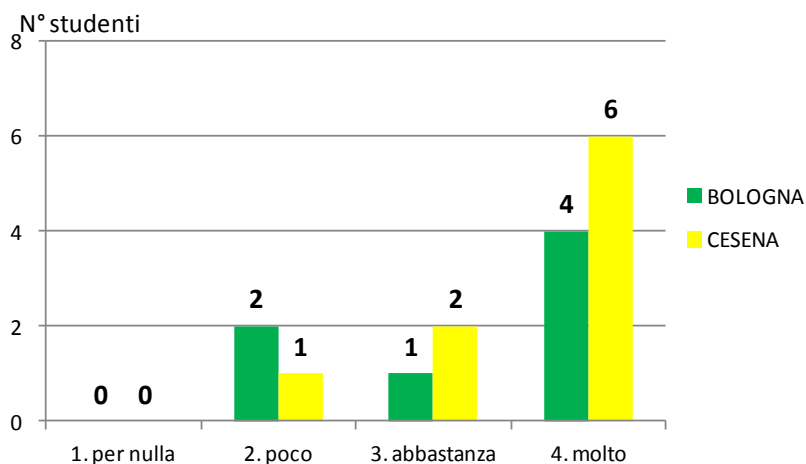


FIG 3.11.1 – Grafico sull'utilità della fisica quantistica

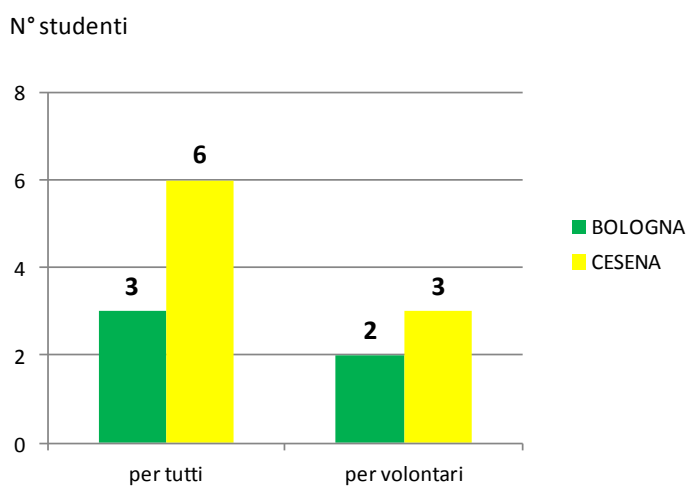


FIG 3.11.2 – Grafico sull'utilità della fisica quantistica

Nei grafici di figura 3.10.1 e 3.10.2 la maggioranza degli studenti sia di Bologna che di Cesena ritengono che sia molto utile sperimentare un modulo di FQ in V liceo, per tutta la classe.

L'ultima domanda analizzata ha fornito spunti di riflessione sui possibili miglioramenti da effettuare sul Corso per i prossimi anni.

DOM 8. Se dovessi indicare un' area di miglioramento quale sarebbe?

- a) *Contenuto delle lezioni;*
- b) *Modalità di coinvolgimento durante le lezioni;*
- c) *Attività sperimentali;*
- d) *Altro ...*

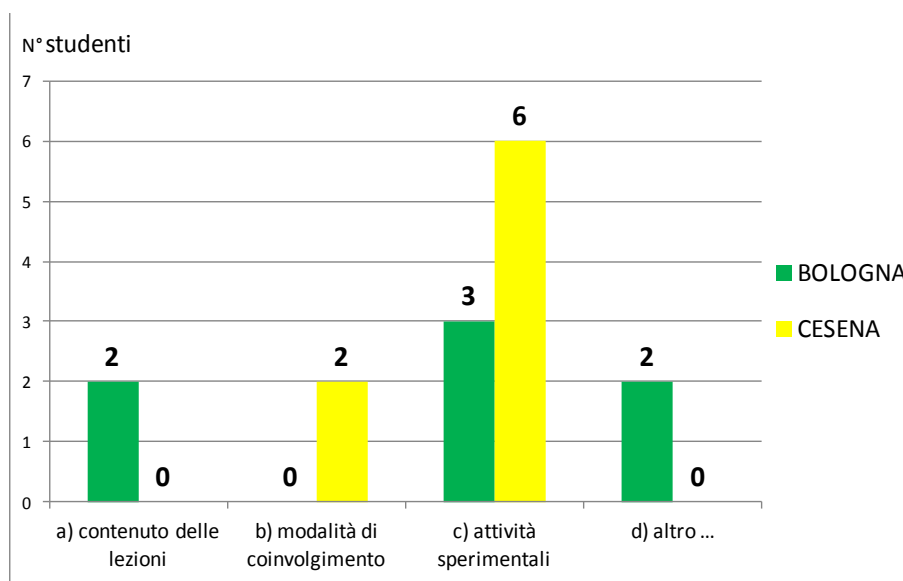


FIG 3.12 – Grafico sulle Potenzialità del Corso emerse dagli studenti

Per rilevare ulteriori potenzialità e limiti del Corso sono state analizzate le risposte dei protocolli di intervista agli insegnanti²², in particolare sono state prese in esame le seguenti domande:

DOM 5. Quale valutazione complessiva dai al corso?

DOM 6. Hai condiviso l'impostazione generale del corso? Se no che cosa non ti ha convinto?

DOM 7. Ritieni che la proposta nel suo complesso sia utile da proporre in contesti di formazione degli insegnanti?

DOM 8. Quali aspetti pensi siano più interessanti per un insegnante? Quali approfondiresti, modificheresti, toglieresti?

DOM 10. Pensi che un insegnante riproporrebbe i temi trattati nel corso nelle sue classi o si tratta di un tipico corso di approfondimento per studenti particolarmente interessati?

DOM 12. Quale impressione generale hai avuto circa la reazione degli studenti?

DOM 13. Ritieni che la proposta nel suo complesso sia stata compresa e abbia interessato?

DOM 14. Ritieni che sia stata in qualche modo utile? Perché?

DOM 15. Pensando agli studenti, quale aspetto enfatizzeresti, approfondiresti, modificheresti e/o toglieresti?

Come è successo per gli studenti anche nelle risposte degli insegnanti si sono notate delle differenze di opinione tra il polo di Bologna e quello di Cesena.

Da parte di entrambi la valutazione complessiva del Corso è stata buona. Il Corso è stato utile perché ha sollevato questioni nuove e suscitato riflessioni e affrontato argomenti che gli studenti conoscevano in modo superficiale o nullo.

Gli studenti che hanno seguito tutte le lezioni si sono mostrati molto interessati.

²² Protocollo allegato in APPENDICE B

Un'altra opinione condivisa è stata che la proposta nel suo complesso sia utile da proporre in contesti di formazione per gli insegnanti, con le dovute calibrature, organizzando un percorso più organico, con argomentazioni di didattica adatta a tutti gli studenti.

Gli insegnanti di Bologna hanno condiviso e apprezzato i diversi livelli degli approcci proposti e sarebbero propensi a riproporre i temi trattati, lasciando però la parte più specifica e approfondita agli studenti più interessati.

Mentre l'insegnante del polo di Cesena ha considerato il Corso un po' troppo astratto e teorico più vicino ad un corso di approfondimento per studenti interessati.

Interessanti sono state le osservazioni e i suggerimenti fatti, utili per potenziare l'efficacia del Corso:

- Introdurre un piccolo questionario al termine di ogni lezione per una autovalutazione dei contenuti appresi;
- Prevedere ad ogni incontro una parte di discussione-dibattito stimolata da frasi emblematiche, immagini o domande;
- Approfondire l'approccio sperimentale con maggiori esempi pratici.

In breve: all'interno dell'ambito del PLS il Corso ha dato, nel complesso, risultati positivi, pur riconoscendo la particolarità del campione studiato.

Grazie ai questionari forniti si sono potuti trarre riscontri interessanti sia da parte degli studenti che da parte degli insegnanti.

Si è rilevato un forte interesse nei confronti dei temi trattati e un atteggiamento propositivo nell'affrontare concetti nuovi e complessi.

In generale, non si sono riscontrate grosse difficoltà nell'affrontare la parte del Corso incentrata sul linguaggio matematico, ritenuto importante per descrivere e interpretare i fenomeni quantistici, distinguendoli da quelli classici.

Ciò non esclude il fatto che gli studenti abbiano bisogno di maggiore tempo per comprendere meglio i concetti trattati e che possa essere utile una lezione introduttiva iniziale dei concetti matematici, che verranno poi utilizzati nel Corso.

Non si hanno purtroppo sufficienti informazioni per approfondire i motivi alla base delle differenze tra il polo di Bologna e Cesena, per quanto riguarda il livello di comprensione dei concetti trattati.

Opinione condivisa riguarda l'utilità e l'interesse scaturito dalla trattazione delle applicazioni tecnologiche, che hanno fornito un valido esempio di attualità e motivato ancora di più gli studenti ad interessarsi a questi temi.

CONCLUSIONI

Affrontare tematiche di fisica quantistica è diventato oramai indispensabile per la cultura e il curriculum formativo di uno studente di liceo. Ciò nonostante, il problema dell'insegnamento della fisica quantistica a scuola rimane molto delicato perché si scontra, oltre che con le difficoltà degli studenti, con le preoccupazioni degli insegnanti, soprattutto se laureati in matematica e con l'impegno richiesto loro per costruire e curare vere collaborazioni finalizzate a ripensare metodologie didattiche.

In questo elaborato sono stati analizzati i dati raccolti da studenti e insegnanti coinvolti in un percorso didattico "L'esperimento più bello", nell'ambito del PLS, finalizzato ad introdurre concetti di fisica quantistica che possano essere adatti ad una classe del V anno di liceo scientifico.

Obiettivo generale della tesi era valutare potenzialità e limiti dell'approccio didattico seguito nel Corso-Laboratorio e come obiettivo specifico quello di analizzare e valutare come gli studenti e gli insegnanti si siano posti di fronte a questo nuovo approccio, in particolare nei confronti degli approfondimenti formali affrontati.

Come conclusione del lavoro, si può ritenere che in generale la matematica introdotta è stata accettata dagli studenti e non percepita fuori dalla loro portata. Inoltre, si è osservato che il formalismo matematico è stato riconosciuto come uno strumento utile per l'interpretazione e la comprensione degli esperimenti trattati e per farsi un'idea sul tipo di fisica che possono incontrare all'Università. In questo senso, si può affermare che la strada seguita può essere ulteriormente studiata anche come contributo al tema di ricerca internazionale circa il tipo di formalizzazione che risulta opportuno, necessario e possibile per l'introduzione della fisica quantistica a scuola.

In diverse risposte del questionario si è notata inoltre una grande varietà di interessi tra gli studenti ad indicare che il Corso, per la sua multi-dimensionalità, è stato in grado di stimolare diverse tipologie di curiosità e di valorizzare diversi tipi di approcci alla conoscenza scientifica. Un aspetto che ha incuriosito è stato tuttavia il diverso comportamento di gruppo. Mentre il gruppo di Bologna ha mostrato un interesse maggiore nei confronti della matematica, quello di Cesena ha attribuito una rilevanza maggiore all'approccio di tipo sperimentale. Sarebbe stato interessante capire se e quali fattori hanno determinato questi due comportamenti collettivi e se c'è, in qualche modo, anche un elemento legato al genere, visto che il gruppo di Bologna era formato da ragazzi mentre quello di Cesena da quasi tutte ragazze. Dall'andamento dei grafici sul livello di

comprensione e rielaborazione dei concetti esposti si è arrivati alla conclusione che il gruppo di Bologna fosse maggiormente predisposto al livello di formalismo affrontato.

Dalle risposte riportate nei questionari si è potuto comunque concludere che gli studenti hanno ritenuto importante e utile affrontare la fisica quantistica e le sue applicazioni per avere un contatto con le tecnologie moderne e possedere gli strumenti per “interpretare” il presente. Gli studenti hanno inoltre colto il linguaggio del formalismo all’interno della trattazione delle applicazioni quantistiche e spesso lo hanno sfruttato nella loro rielaborazione dell’apprendimento.

Anche la valutazione complessiva degli insegnanti partecipanti al Corso è stata buona ed è stato ritenuto utile affrontare certi argomenti e valutare le reazioni degli studenti.

Si è rilevato un forte interesse nei confronti dei temi trattati e un atteggiamento propositivo nell’affrontare concetti nuovi e complessi.

Le osservazioni e i suggerimenti che sono stati colti all’interno dei questionari hanno fatto emergere alcuni possibili miglioramenti del Corso:

- l’introduzione di un’eventuale lezione preliminare di matematica che possa anticipare i concetti trattati nel Corso;
- l’introduzione di un piccolo questionario al termine di ogni lezione per una autovalutazione dei contenuti appresi;
- l’inserimento di ulteriori modalità di coinvolgimento durante le lezioni, come ad esempio un eventuale dibattito al termine dell’incontro, stimolato da frasi emblematiche, immagini o domande;
- l’aumento di laboratori che prevedano un approfondimento dell’approccio sperimentale.

In definitiva il progetto ha ottenuto riscontri molto positivi e ha mostrato un grosso potenziale per approfondimenti futuri. Infatti il campione preso in esame non può ritenersi chiaramente esaustivo per generalizzare i risultati ottenuti. Non si ritiene pertanto che possa essere concluso l’aspetto di Ricerca di Didattica attuata. Sono ancora molti gli aspetti che possono essere analizzati e verificati. Non si esclude però che lo studio effettuato in questa tesi possa essere un utile contributo al problema di ricerca più generale e discusso a livello internazionale sull’individuazione del livello di approfondimento formale cui ci si può spingere con studenti di scuola secondaria.

Personalmente questo lavoro è stato di grande utilità per i miei progetti futuri. Mi ha permesso di sperimentare un’importante esperienza nell’ambito dell’insegnamento e di

mettere a frutto le conoscenze acquisite negli ultimi anni del mio percorso di studi. Mi ha dato un'ulteriore conferma e stimolo nella volontà di continuare questo percorso che ha come traguardo finale l'insegnamento della fisica.

APPENDICE A

QUESTIONARIO FINALE SUL CORSO-LABORATORIO “ESPERIMENTO PIU’ BELLO”

DOMANDA 1

Nel corso di queste ultime tre lezioni siete stati introdotti ai fondamenti della fisica quantistica, partendo dall'analisi dell'esperimento più bello della fisica, attraverso l'analisi di concetti teorici, sino alle più recenti applicazioni.

In particolare, la fisica quantistica vi è stata mostrata come una teoria in grado di:

- a) descrivere con precisione esperimenti che non possono trovare spiegazione all'interno della fisica classica
- b) fornire una descrizione matematica coerente dei fenomeni fisici
- c) fornire un'interpretazione della realtà fisica
- d) prevedere e progettare nuovi esperimenti e applicazioni

Ordina le 4 affermazioni da quella che ritieni più importante (1) alla meno importante (4) e commenta la tua scelta.

B)	→
----	---

A)	→
----	---

D)	→
----	---

C)	→
----	---

Commenti: _____

Illustra con esempi e/o a parole tue il significato che attribuisce all'affermazione per te più importante: _____

DOMANDA 2

Nel corso è stato discusso quanto l'oggetto quantistico sia diverso da quello classico, sottolineando i seguenti aspetti per marcarne le differenze:

- a) il diverso comportamento di un oggetto classico e di uno quantistico negli esperimenti di interferenza;
- b) la possibilità/impossibilità di visualizzare l'oggetto con immagini e/o con parole familiari, come onda e corpuscolo;
- c) la necessità di introdurre nella descrizione matematica concetti come “ampiezza di probabilità”, “relazione di indeterminazione”, “sovrapposizione quantistica”.

Quale dei precedenti aspetti, oltre a marcare la differenza con l'oggetto classico, ti è sembrato il più importante per farti un'idea dell'oggetto quantistico e, più in generale, della fisica quantistica? (a), (b) o (c)? Perché? _____

DOMANDA 3

Durante il corso sono stati introdotti alcuni concetti tipicamente quantistici:

- a) “Delocalizzazione” di un oggetto quantistico in due possibili cammini;
- b) Stato quantistico e ampiezza di probabilità;
- c) Entanglement.

Riesci a ricostruire il contesto in cui sono stati introdotti e a sottolineare l'importanza da loro assunta in quei contesti? _____

DOMANDA 4

In relazione a tutto il corso:

Qual è il fenomeno/l'argomento che ti è sembrato più sorprendente? _____

Quale argomento hai trovato più interessante e vorresti approfondire? _____

Quale argomento hai trovato più difficile da comprendere? _____

DOMANDA 5

Ritieni che gli aspetti matematici introdotti (vettori, numeri complessi, probabilità, ...) siano un ostacolo per la comprensione delle lezioni o un aiuto per entrare nella fisica quantistica?

1. *per nulla d'accordo – sono un ostacolo e non aiutano per niente*
2. *parzialmente in disaccordo – sono un grosso ostacolo ma aiuterebbero a entrare nella fisica quantistica*
3. *abbastanza d'accordo – sono difficili ma affrontabili e sono necessari a entrare nella fisica quantistica*
4. *d'accordo – non sono un ostacolo e sono fondamentali per entrare nella fisica quantistica*

Motiva la risposta: _____

DOMANDA 6

Gli incontri fatti:

- a) ti hanno incuriosito?
1 (*per nulla*) 2 (*poco*) 3 (*abbastanza*) 4 (*molto*)
- b) ti hanno coinvolto?
1 (*per nulla*) 2 (*poco*) 3 (*abbastanza*) 4 (*molto*)
- c) ti hanno fatto intravedere un "mondo nuovo"?
1 (*per nulla*) 2 (*poco*) 3 (*abbastanza*) 4 (*molto*)

DOMANDA 7

Ritieni utile sperimentare un modulo sulla fisica quantistica in V liceo?

1 (*per nulla*) 2 (*poco*) 3 (*abbastanza*) 4 (*molto*)

Motiva brevemente _____

Se sì, per tutti o solo per scelta volontaria? _____

DOMANDA 8

Desideri fare altri commenti e/o dare suggerimenti per modificare e migliorare il corso? _____

Se dovessi indicare un'area di miglioramento quale sarebbe:

- a) contenuto delle lezioni
- b) modalità di coinvolgimento durante le lezioni
- c) attività sperimentali
- d)

Barra la risposta

 a

 b

 c

 d

Nome Cognome _____

Scuola e Città _____ Classe _____

GRAZIE PER LA TUA COLLABORAZIONE!!!!

APPENDICE B

PROTOCOLLO INTERVISTA INSEGNANTI

Premessa. Con questa intervista ci piacerebbe raccogliere le tue impressioni sul corso, pensando che questo possa essere riproposto il prossimo anno nell'ambito del PLS, nonché in contesti di formazione degli insegnanti (esempio TFA).

Informazioni/riflessioni generali

1. In quale scuola insegni?
2. Affronti, di solito, temi di fisica quantistica? Se sì, quali materiali/testi usi? Quanto tempo riesci a dedicare a questo tema? Quale importanza culturale e educativa attribuisce alla fisica quantistica?
3. Quali problemi vedi nell'insegnamento della fisica quantistica?
4. Quali motivazioni ti hanno spinto a partecipare a questa iniziativa?
5. Quale valutazione complessiva dai del corso?
6. Hai condiviso l'impostazione generale del corso? Se no, che cosa non ti ha convinto?

Sul corso, pensato come da riproporre ad insegnanti

7. Ritieni che la proposta nel suo complesso sia utile da proporre in contesti di formazione degli insegnanti? Perché?
8. Quali aspetti pensi siano i più interessanti per un insegnante? Quali approfondiresti, modificheresti e/o toglieresti?
9. Hai proposte di riorganizzazione complessiva del corso?
10. Pensi che un insegnante riproporrebbe i temi trattati nel corso nelle sue classi o si tratta di un tipico corso di approfondimento per studenti particolarmente interessati?

Sul corso, pensato come da riproporre a studenti di quinto anno di Liceo (nel contesto del PLS o affini)

11. Hai riconosciuto una particolare tipologia di studenti tra quelli che hanno deciso di seguire il corso? Sai dirci quale tipo di motivazioni li hanno portati a sceglierlo?
12. Quale impressione generale hai avuto circa la loro reazione?
13. Ritieni che la proposta nel suo complesso sia stata compresa e abbia interessato?
14. Ritieni che sia stata in qualche modo utile? Perché?
15. Pensando agli studenti, quali aspetti enfatizzeresti, approfondiresti, modificheresti e/o toglieresti?

BIBLIOGRAFIA

David H. McIntyre, C. A. M. T., 2010. *Paradigms in Physics: Quantum Mechanics*. Oregon State University: s.n.

Decreto_legge_n.89, 2010-11. *La Riforma della scuola secondaria superiore*.
http://archivio.pubblica.istruzione.it/riforma_superiori/nuovesuperiori/index.html#regolamenti
[Accessed 14 ottobre 2013].

Decreto_legge_n.89, 2010. *Istituto Nazionale di Documentazione per l'Innovazione e la Ricerca Educativa*.
http://www.indire.it/lucabas/lkmw_file/licei2010///indicazioni_nuovo_impaginato/_decreto_indicazioni_nazionali
[Accessed 14 ottobre 2009].

Di Biasio V, C. C. B. L. G. U., 1992. *Proposte didattiche per l'insegnamento della fisica quantistica, La Fisica nella Scuola, XXVI, 2 I.R., Q2..* s.l.:s.n.

Dirac, P., 2001. *principi della meccanica quantistica*. s.l.:Boringhieri.

Feynman, R., 2013. *HYPERLINK*.
http://it.wikipedia.org/wiki/Richard_Feynman

Feynman, R. P., 1988. CAP 1. Comportamento quantistico. In: *QED: The Strange Theory of Light and Matter*. Princeton University Press: s.n.

Genovese, M., 2011. *La fisica di Star Trek. [as] asimmetrie12. Rivista dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN)*.
<http://www.asimmetrie.it/index.php/fotoni-e-segreti>
[Accessed 25 ottobre 2013].

Ghirardi, G., 2011. *Fotoni e segreti. [as] asimmetrie12. Rivista dell'Istituto di Fisica Nucleare (INFN)*.
<http://www.asimmetrie.it/index.php/fotoni-e-segreti>
[Accessed 25 ottobre 2013].

Giuliani G., R. N., 1993. *La Fisica nella scuola, XXVI, 2 I.R., Q2, p. p. 16.*

Quantistica, M., 2013. *Wikipedia*.

http://it.wikipedia.org/wiki/Meccanica_quantistica

[Accessed ottobre 2013].

Rinaudo, G., 2006\07. *La Meccanica Quantistica nella Scuola Secondaria*.

<http://www.iapht.unito.it/fsis/didfis/did9-06-mq.pdf>

[Accessed 14 ottobre 2013].

Vittorio, N., 2010. *costruire i nuovi licei*.

http://nuovilicei.indire.it/content/index.php?action=lettura&id_m=7782&id_cnt=11868

Zeiliger, A., 1012. *La danza dei fotoni. Da Einstein al teletrasporto quantistico*. Le Scienze ed. s.l.:s.n.