

ALMA MATER STUDIORUM · UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

Scuola di Scienze
Corso di Laurea Magistrale in Fisica

PROCESSI DI APPROPRIAZIONE NELLO STUDIO
DELLA FISICA QUANTISTICA:
ANALISI DI UNA SPERIMENTAZIONE DIDATTICA IN
UNA QUINTA LICEO SCIENTIFICO

Relatore:
Prof.ssa Olivia Levrini

Presentata da:
Luca Lodovico

Correlatore:
Dott.ssa Paola Fantini
Dott.ssa Giulia Tasquier

Sessione III
Anno Accademico 2014/2015

ABSTRACT

In questa tesi sono stati analizzati i dati raccolti nella sperimentazione di un percorso di fisica quantistica in una quinta liceo scientifico – indirizzo musicale, svolta nel periodo Marzo-Giugno 2015. Il percorso, progettato dai ricercatori in Didattica della Fisica del DIFA di Bologna, comprende una parte “genuinamente” quantistica sviluppata a partire dall’“Esperimento più bello della Fisica”. Il percorso è stato progettato sulla base dei criteri che definiscono l’*appropriazione*, costruito che esprime un particolare tipo di apprendimento attraverso cui lo studente “fa proprio” un concetto.

L’analisi è stata condotta con l’obiettivo di osservare casi di *appropriazione* tra gli studenti e di rifinire il costrutto di *appropriazione*, valutando in particolare l’efficacia del questionario sociometrico, uno strumento appositamente progettato dall’autore di questa tesi per valutare una delle dimensioni di cui si compone il costrutto di *appropriazione*.

I principali dati analizzati per dare risposta agli obiettivi della tesi riguardano le risposte degli studenti a interviste realizzate alla fine del percorso scolastico, nonché gli esiti di altre attività appositamente progettate: svolgimento di un compito in classe, elaborazione di un tema scientifico, compilazione di questionari.

I risultati mostrano come si siano ritrovati tre punti molto delicati che possono ostacolare l’*appropriazione*: il tempo a disposizione, le dinamiche di classe e soprattutto il rapporto che hanno avuto gli studenti con i concetti quantistici del percorso. Tali fattori hanno portato reazioni molto diverse: chi è stato stimolato e questo ha favorito l’*appropriazione*, chi ha compreso la fisica quantistica ma non l’ha accettata, chi l’ha compresa e accettata senza troppi problemi, chi si è rifiutato di studiarla perché “troppo grande per sé”.

INDICE

RINGRAZIAMENTI	p. 9
INTRODUZIONE	p. 11
CAPITOLO 1 - Quadro di riferimento e stato dell'arte.....	p. 15
1.1 L'insegnamento della fisica quantistica a livello di scuola secondaria superiore	p. 16
1.2 Gli approcci e i percorsi elaborati dal gruppo di bologna	p. 21
1.3 Modelli di apprendimento: il caso dell'appropriazione	p. 25
CAPITOLO 2 - Il percorso concettuale e didattico	p. 31
2.1 Criteri per la rielaborazione	p. 32
2.2 Risultato della rielaborazione	p. 34
2.3 Il percorso: le attività e le tre parti	p. 36
CAPITOLO 3 - La sperimentazione	p. 55
3.1 Contesto della ricerca	p. 55
3.2 Scansione temporale degli incontri e materiale utilizzato	p. 56
3.3 Strumenti di raccolta dati e metodi di analisi	p. 58
CAPITOLO 4 - I risultati	p. 67
4.1 Analisi dei compiti in classe (dimensione disciplinare).....	p. 68
4.2 Analisi dei temi (dimensione disciplinare e idiosincratca)	p. 77
4.3 Analisi sociometrica (dimensione sociale ed epistemologica).....	p. 85
4.4 Analisi delle interviste	p. 96
4.5 Risposta alle domande di ricerca	p. 120
CONCLUSIONI	p. 125

BIBLIOGRAFIA	p. 129
---------------------------	---------------

APPENDICI:

APPENDICE A – Questionario iniziale	p. 137
APPENDICE B – Compito in classe	p. 145
APPENDICE B1 – Risposte dal compito in classe relativo alla pars destruens	p. 147
APPENDICE C – Tema	p. 153
APPENDICE C1 – Esempi disciplinari dei temi	p. 157
APPENDICE D – Questionario sociometrico	p. 159
APPENDICE E – Compito su Stern e Gerlach	p. 161
APPENDICE F – Attività finale	p. 163
APPENDICE G – Protocollo di intervista	p. 167
APPENDICE H – Griglia di osservazione per focal students	p. 169
APPENDICE I – Diario di bordo	p. 171

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 3.2.1 Tabella in cui sono riportate la data e le ore dedicate in classe alle tre parti e alle attività perviste dal percorso	p. 57
Tabella 3.3.1 Quadro degli strumenti di raccolta dati	p. 58
Tabella 4.0 Sorgenti di dati e dimensioni	p. 67
Tabella 4.1.1 Argomenti della pars destruens e relativi tempi e date di svolgimento...	p. 69
Tabella 4.1.2 Struttura del compito sulla pars destruens	p. 69
Tabella 4.1.3 Griglia di valutazione per gli esercizi del compito	p. 70
Tabella 4.1.4 Griglia per la valutazione delle risposte alle domande aperte su corpo nero ed effetto fotoelettrico	p. 71
Tabella 4.1.5 Griglia per la valutazione delle risposte alla domanda aperta sul modello atomico di Bohr	p. 72
Tabella 4.1.6 Corrispondenza fra genere e codice per ciascuno studente	p. 73
Tabella 4.1.7 Voti del compito e punteggi ottenuti per ogni singola domanda	p. 75
Tabella 4.2.1 Griglia di valutazione delle Conoscenze utilizzata dalla docente di italiano	p. 78
Tabella 4.2.2 Griglia di valutazione delle Competenze utilizzata dalla docente di italiano	p. 78
Tabella 4.2.3 Griglia di valutazione di Bologna per la dimensione idiosincratICA	p. 79
Tabella 4.2.4 Griglia di valutazione di Bologna per la valutazione della dimensione disciplinare	p. 80
Tabella 4.2.5 Confronto fra i punteggi date attraverso la griglia del gruppo di ricerca e la griglia della docente di italiano	p. 83
Tabella 4.3.1 Griglia con i cinque approcci proposti agli studenti	p. 86
Tabella 4.3.2 Tabella in cui sono riportati in ordine decrescente il numero di nomine ottenute da ciascuno studente nel questionario sugli approcci	p. 88
Tabella 4.3.3 Griglia con i 3 studenti più votati dai compagni di classe per ciascun approccio	p. 89
Tabella 4.3.4 Tabella con i 3 studenti più votati per ciascuna categoria	p. 91
Tabella 4.3.5 Tabella in cui si riporta la sequenza degli interventi, indicando quale studente è intervenuto e in che modo.....	p. 95

INDICE DELLE FIGURE

Figura 2.3.1 Metafora del cilindro di Lévy-Leblond	p. 45
Figura 2.3.2 Forma dei magneti in un apparato di Stern e Gerlach	p. 48
Figura 2.3.3 Il formarsi di due spot in un apparato di Stern e Gerlach	p. 48
Figura 2.3.4 Dati di realtà ottenuti da esperimenti di Stern e Gerlach	p. 49
Figura 2.3.5 Configurazioni degli esperimenti di Stern e Gerlach	p. 49
Figura 2.3.6 Configurazioni degli esperimenti di Stern e Gerlach	p. 50
Figura 2.3.7 Quattro apparati Stern e Gerlach posti in successione. In alto è riportata la previsione classica, in basso l'esito dell'esperimento	p. 51
Figura 2.3.8 Calcolo classico e calcolo quantistico della probabilità per l'esito del quarto apparato di Stern e Gerlach	p. 52
Figura 2.3.9 Due apparati di Mach-Zehnder	p. 53
Figura 4.1.1 Numero di studenti in funzione del voto ottenuto nel compito	p. 74
Figura 4.1.2 Distribuzione dei punteggi dei 21 studenti per i 6 esercizi del compito ..	p. 74
Figura 4.1.3 Distribuzioni dei punteggi per le 3 domande aperte	p. 74
Figura 4.1.4 Distribuzione dei voti in fisica per il primo quadrimestre	p. 76
Figura 4.2.1 Punteggio per la dimensione disciplinare e per quella personale di ciascuno studente, ottenuto applicando le griglie di Bologna	p. 84
Figura 4.3.1 Grafico a barre percentuale riguardante gli approcci attribuiti a ciascuno studente dai compagni di classe.	p. 87
Figura 4.3.2 Grafico a barre percentuale riguardante l'autorevolezza attribuita a ciascuno studente dai compagni di classe per ciascuno dei campi analizzati	p. 90

RINGRAZIAMENTI

Desidero ringraziare la Prof.ssa Olivia Levrini, relatore di questa tesi, per il prezioso tempo dedicatomi e per il grande incoraggiamento rivoltomi durante tutto l'arco del lavoro di tesi. Desidero ringraziarla anche per essersi sempre adattata alle mie esigenze e per aver sempre valorizzato le mie osservazioni e il mio lavoro.

Desidero ringraziare la Dott.ssa Paola Fantini, correlatore di questa tesi, per avermi aiutato e sostenuto nel raggiungere questo grande traguardo. Desidero ringraziarla anche per avermi permesso di affiancarla e avermi coinvolto nel suo lavoro di insegnante.

Desidero ringraziare la Dott.ssa Giulia Tasquier, correlatore di questa tesi, per la generosa disponibilità con cui mi ha seguito, per le attente correzioni e per i validi consigli che mi ha dato.

Desidero ringraziare Marta Gagliardi per la disponibilità e l'entusiasmo mostrati sia durante la progettazione del percorso sia per il prezioso lavoro di trascrizione delle interviste.

Desidero ringraziare Silvano Baggio, Laura Branchetti, Michele Canducci, Alessia Cattabriga, Michela Clementi, Fabio Filippi, Elisa Garagnani, Antti Laherto e Giovanni Ravaioli per le loro osservazioni e per la passione e la curiosità mostrate durante gli incontri di progettazione.

Desidero ringraziare gli studenti della classe VA del Liceo Scientifico "A. Einstein" di Rimini, a.s. 2014-15, per la loro simpatia, per la loro semplicità e per l'entusiasmo con cui mi hanno accolto in classe.

INTRODUZIONE

Il periodo della scuola superiore coincide con quel periodo dell'esistenza di una persona in cui ci si cimenta con la scoperta dei propri talenti e con il desiderio di comprendere la realtà. La scuola diventa così uno dei luoghi chiave in cui può avvenire questa ricerca di significato, attraverso lo studio delle varie discipline e il confronto con gli scrittori, gli artisti, i filosofi e gli scienziati.

Spesso però discipline come la matematica e la fisica sono proposte agli studenti come verità indiscutibili, che non lasciano spazio a punti di vista personali e a confronti che permettono invece allo studente di scoprire i propri talenti e attribuire al mondo significati personali.

Con l'entrata in vigore della Riforma Gelmini del Riordino dei Licei, avvenuta a partire dall'anno 2010-11, è stato inserito un modulo di fisica quantistica nei programmi di tutte le quinte di liceo scientifico. L'introduzione nei programmi scolastici della fisica del XX secolo, che ha portato una vera rivoluzione nella visione del mondo, potrebbe aiutare gli studenti a comprendere sia le recenti innovazioni tecnologiche, sia come la fisica sia una disciplina in cui c'è spazio per significati personali, per punti di vista differenti e per il loro confronto.

In questa tesi si analizza la sperimentazione, in una classe quinta di liceo scientifico – indirizzo musicale, di un percorso didattico di fisica quantistica progettato da ricercatori del Dipartimento di Fisica e Astronomia (DIFA) dell'Università di Bologna e con insegnanti di fisica delle scuole superiori.

INTRODUZIONE

Il percorso è stato progettato a partire da criteri guida derivanti dal costrutto di *appropriazione*, un particolare tipo di apprendimento attraverso cui lo studente è in grado di “fare proprio” un concetto e di esprimerlo con parole autentiche e personali. L’*appropriazione* è stata trasformata in un costrutto operativo dal gruppo di ricerca in Didattica della Fisica di Bologna, analizzando una sperimentazione di termodinamica (Fantini, 2014; Levrini, Fantini, Tasquier, Pecori, & Levin, 2014). L’obiettivo di questa tesi è rifinire tale costrutto, verificando se il percorso progettato ha favorito o ostacolato l’*appropriazione* e se gli strumenti progettati per osservare in classe l’*appropriazione* si sono rivelati efficaci.

Il principale contributo dell’autore di questa tesi, che ha contribuito alla progettazione del percorso e ha assistito alla sua sperimentazione in classe, è l’aver raccolto e analizzato i dati. In particolare, l’autore ha progettato uno strumento innovativo e originale, il questionario sociometrico, che si ipotizza sia in grado di rivelare la distribuzione delle autorevolezze tra gli studenti. L’autorevolezza è collegata ad una delle dimensioni che compongono l’*appropriazione*.

La tesi si articola in 4 capitoli e le conclusioni.

Nel capitolo 1, dopo una presentazione del quadro delle ricerche a livello nazionale e internazionale sulle sperimentazioni di percorsi didattici di fisica quantistica per le scuole superiori, sono descritte le precedenti sperimentazioni realizzate dai ricercatori in Didattica della Fisica del DIFA di Bologna. Gli aspetti più originali di tali sperimentazioni sono stati recuperati e rielaborati in questa nuova sperimentazione. Nel capitolo 1 viene anche descritto il costrutto di *appropriazione* e il suo legame con gli obiettivi di questa sperimentazione.

Nel capitolo 2 sono riportate le domande di ricerca ed è presentato il percorso di fisica quantistica sperimentato, che prevede, nella terza parte, l’introduzione di un formalismo matematico minimale finalizzato a interpretare l’esito degli esperimenti descritti in tale parte. Tra gli esperimenti proposti compare l’interferenza da singolo elettrone, votato l’“Esperimento più bello della Fisica” e realizzato per la prima volta da ricercatori di Bologna. Nel capitolo 2 vengono anche descritti due fili concettuali inseriti per problematizzare il percorso e coinvolgere maggiormente gli studenti.

Nel capitolo 3 si descrivono una delle classi in cui è avvenuta la sperimentazione, la sequenza temporale degli argomenti trattati e delle attività del percorso, la metodologia di analisi dei dati e gli strumenti utilizzati per ottenere informazioni circa il contesto in cui è avvenuta la sperimentazione e sugli studenti che potrebbero essersi appropriati dei contenuti del percorso.

INTRODUZIONE

Infine nel capitolo 4 sono riportate le analisi dei dati raccolti tramite le diverse attività previste dalla sperimentazione. Il capitolo prosegue con l'analisi delle interviste di alcuni studenti e della loro eventuale *appropriazione* e termina con la risposta alle domande di ricerca e alcune considerazioni finali.

INTRODUZIONE

CAPITOLO 1

Quadro di riferimento e stato dell'arte

L'obiettivo di questa tesi è contribuire a raffinare il costrutto dell'*appropriazione* elaborato da Levrini, Fantini, Pecori, Tasquier e Levin in un articolo del 2014, "Defining and operationalizing appropriation in science education". In tale lavoro di ricerca, basato sulla sperimentazione di un percorso di termodinamica in una classe quarta liceo scientifico, è emerso che non solo gli studenti avevano appreso i concetti chiave del percorso, ma avevano anche trovato modi personali e autentici per parlare dei concetti scientifici come calore e temperatura. Questo modo di parlare e di discutere di fisica da parte degli studenti è stato analizzato da Levrini e colleghe al fine di individuare quelle caratteristiche del discorso degli studenti che ne indicano, appunto, l'"appropriazione", il fatto che lo abbiano "fatto proprio".

Il presente lavoro di tesi intende valutare se e come il costrutto dell'*appropriazione*, utilizzato per costruire e analizzare un percorso di termodinamica, può essere utilizzato per elaborare un percorso di fisica quantistica che permetta agli studenti dei Licei Scientifici di *appropriarsi* dei concetti di fisica quantistica proposti nel percorso. I risultati dell'analisi permetteranno anche di individuare i punti critici per l'*appropriazione* dei concetti trattati da parte degli studenti, indicando elementi del percorso da riprogettare, ulteriori attività da inserire e le difficoltà che si presentano al ricercatore che vuole osservare in classe le caratteristiche previste dall'*appropriazione*.

Come sarà descritto nel paragrafo 1.1, la scelta di progettare e realizzare un percorso di fisica quantistica è legata innanzitutto all'entrata a regime della Riforma Gelmini e all'obbligo per tutte le classi quinte Liceo Scientifico e Liceo Scientifico-Opzione Scienze Applicate di studiare la fisica quantistica. Questo aspetto vincola il percorso didattico a trattare determinati

PARAGRAFO 1.1

argomenti seguendo una struttura ben definita, ma lascia comunque spazio ad una molteplicità di approcci possibili.

Prima di descrivere l'approccio al percorso, sarà presentato lo stato dell'arte sui vari approcci adottati a livello nazionale e internazionale per quanto riguarda la costruzione di possibili percorsi per l'insegnamento della fisica quantistica per gli studenti delle scuole superiori, in modo da evidenziarne successi e problematiche legate all'apprendimento dei ragazzi e comprendere meglio le scelte operate dal gruppo di Bologna per la progettazione di percorsi di fisica quantistica, descritte nel paragrafo 1.2.

Nel paragrafo 1.3 verrà descritto il costrutto dell'*appropriazione* e il suo legame con l'approccio adottato nella costruzione dei percorsi di fisica quantistica progettati dal gruppo di Bologna.

1.1 L'INSEGNAMENTO DELLA FISICA QUANTISTICA A LIVELLO DI SCUOLA SECONDARIA SUPERIORE

L'insegnamento di elementi di fisica quantistica nella scuola secondaria superiore è un problema didattico dibattuto da tempo, divenuto particolarmente urgente in Italia con l'entrata a regime della Riforma dei programmi di fisica per i Licei Scientifici.

Il cambiamento dei programmi ministeriali è riconducibile, innanzitutto, alla necessità di aggiornare gli argomenti scolastici affinché questi possano toccare temi e domande oggi socialmente rilevanti. Lo scopo dei percorsi liceali è infatti quello di:

“fornire allo studente gli strumenti culturali e metodologici per comprendere in maniera approfondita la realtà, per seguire lo sviluppo della ricerca scientifica e tecnologica e per individuare le interazioni tra le diverse forme del sapere [...]” (Art. 2 comma 2 del regolamento recante “Revisione dell'assetto ordinamentale, organizzativo e didattico dei licei”, 2008)

Attraverso la Riforma Gelmini del Riordino dei Licei, attiva a partire dalle classi prime dall'anno scolastico 2010-11, si è così scelto di dare particolare enfasi alle conoscenze sviluppate nel XX secolo; in particolare, per quello che riguarda l'insegnamento della fisica nei Licei Scientifici e Scientifici - Opzione Scienze Applicate, essa prevede, tra i temi da affrontare sulla fisica del XX secolo, anche l'introduzione di alcuni concetti di fisica

PARAGRAFO 1.1

quantistica, indispensabili per la comprensione dei recenti sviluppi scientifici e delle moderne applicazioni tecnologiche:

“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.

La dimensione sperimentale potrà essere ulteriormente approfondita con attività da svolgersi non solo nel laboratorio didattico della scuola, ma anche presso laboratori di Università ed enti di ricerca, aderendo anche a progetti di orientamento.” (Indicazioni Nazionali per i Licei, D.M. 7 ottobre 2010, n. 211)

L’approccio delineato dalle Indicazioni Nazionali è descrivibile come un approccio pseudo-storico e qualitativo, che si concentra quasi esclusivamente sulla “vecchia teoria dei quanti”. Questo approccio è stato ampiamente criticato dalla ricerca in didattica della fisica a livello internazionale in quanto richiede agli studenti di rinunciare a concetti e categorie di pensiero della fisica classica, senza fornire loro nuovi strumenti per comprendere la nuova interpretazione dei fenomeni offerta dalla fisica quantistica. Come verrà descritto meglio più avanti, il risultato di questo approccio è la permanenza negli studenti di concetti e categorie di pensiero che sono profondamente radicati in un modo classico di interpretare i fenomeni quantistici.

Le indicazioni ministeriali lasciano comunque spazio agli insegnanti per introdurre nel percorso scolastico approfondimenti di fisica quantistica o per scegliere approcci differenti da quello riportato nelle Indicazioni Nazionali.

Nella ricerca internazionale in didattica della fisica si sottolinea da anni l’importanza di investire in questo ambito della conoscenza, progettando percorsi didattici che pongano agli studenti affascinanti sfide concettuali, e mostrino come la fisica sia una disciplina in continua evoluzione, la cui conoscenza permette di spiegare il funzionamento delle moderne applicazioni tecnologiche e in cui c’è spazio per il confronto tra punti di vista differenti.. Dai risultati di ricerca emerge che tali argomenti appassionano molto gli studenti, probabilmente perché offrono spunti per riflessioni che gli studenti sentono utili per la costruzione del proprio modo di pensare, per la propria concezione del mondo e per decidere circa il proprio futuro professionale. Come riferisce Sjøberg infatti:

PARAGRAFO 1.1

“Un aspetto chiave nella vita dei giovani è la ricerca di significato e di rilevanza. Piacciono quelle discipline in cui la loro voce è tenuta in seria considerazione, in cui le loro visioni contano. La scienza e la matematica hanno un’immagine di autorità, almeno come materie scolastiche. [...]. Il venir meno di un significato personale e l’idea che esistano verità eterne e risposte corrette allontanano molti più giovani oggi di ieri.” (Sjøberg, 2001)

La letteratura di ricerca sull’insegnamento/apprendimento della fisica quantistica da tempo propone possibili approcci metodologici e progetta percorsi didattici, valutando il livello di apprendimento degli studenti e riflettendo su come affrontare le diverse problematiche che emergono dall’analisi di situazioni di insegnamento/apprendimento.¹ Tra i possibili approcci all’insegnamento della fisica quantistica se ne possono individuare tre principali: storico, logico-filosofico e fenomenologico.

L’approccio *storico* che sta alla base delle Indicazioni Nazionali è quello più tradizionale e diffuso nei libri di testo (si vedano: Amaldi, “L’Amaldi per i licei scientifici”; Halliday, Resnick & Walker “Fondamenti di Fisica”). Si analizzano il problema della radiazione corpo nero, l’effetto fotoelettrico, l’effetto Compton e l’atomo di Bohr per arrivare all’enunciato del principio di indeterminazione di Heisenberg e della complementarità di Bohr. Tale approccio si limita ad una trattazione quasi discorsiva riguardante la “vecchia teoria dei quanti” che, come si è accennato, non permette di mostrare allo studente l’interpretazione del mondo offerta dalla fisica quantistica. Ciò che invece mostra è un “territorio” concettualmente sconnesso formato da frammenti di informazione, spesso legati tra loro solo dall’ordine cronologico delle loro scoperte.

Da esperienze di ricerca in didattica della fisica² si è osservato che una conseguenza problematica di questa frammentazione concettuale è che gli studenti, nel loro sforzo di colmare le lacune tra i frammenti di informazione, tendono ad assegnare proprietà classiche ai sistemi quantistici, ottenendo come risultato conclusioni insoddisfacenti che rivelano un profondo scetticismo sulla fisica quantistica. Reazioni tipiche, riportate in Tarozzi, 2005 sono:

“Secondo me era tutto così chiaro fino a prima e ora sono confuso, ma è possibile che cambino le leggi solo perché faccio un cambio di scala? Forse si deve aspettare che arrivi un altro Newton che faccia rientrare tutto in un’unica legge, come per la gravità.”(M.)

¹ Istituzioni coinvolte nei progetti e nelle ricerche: Università degli studi di Udine; MIUR (Ministero dell’Istruzione dell’Università della Ricerca); PLS (Piano nazionale Lauree Scientifiche).

² Esempi di studi empirici che mostrano questo tipo di comportamento tra studenti di scuola superiore secondaria e/o universitari sono: Giliberti & Marioni (1997); Ireson (1999); Kalkanis, Hadzidaki & Stavrou (2003); Mashaldi (1996); Seifert & Fischler (1999).

PARAGRAFO 1.1

“Secondo me qui bisogna che gli scienziati si diano una mossa, perché non hanno ancora scoperto tutto. Per ora hanno creato solo una grande confusione, manca qualcosa, questa è l'unica spiegazione, che ancora dobbiamo scoprire per riuscire a spiegare quello che succede” (T.)

Reazioni come queste mostrano come l'uso di un approccio tradizionale nell'insegnamento della fisica quantistica, in cui non si è cercato di problematizzare il discorso disciplinare ma, al contrario, lo si è portato avanti attraverso connessioni semplici con idee familiari allo studente, ma fuorvianti, generi confusione e insoddisfazione negli studenti.

Sul tema della visualizzazione, la letteratura di ricerca riporta inoltre che l'uso di connessioni semplici con idee familiari determina il permanere nella mente degli studenti di immagini semi-classiche degli oggetti quantistici e del loro comportamento. Nonostante le numerose problematiche dell'approccio storico, tale approccio si presta, con i dovuti accorgimenti, ad offrire spunti per riflettere sulla natura epistemologica della disciplina e le sue regole metodologiche, che rischiano di rimanere implicite usando altri approcci

Il secondo approccio, di tipo *logico-filosofico*, parte dalla struttura odierna della teoria quantistica, cioè dalla struttura assiomatica della fisica quantistica (Haber-Schaim, 1975; Lawrence, 1996). Questo approccio, simile a quello universitario, si basa sulla convinzione che sia “impossibile capire la fisica quantistica senza possederne le strutture matematiche” (Pospiech, 1999). Sebbene il formalismo matematico non possa essere totalmente sviluppato nelle scuole superiori, Pospiech, nei suoi lavori, sostiene che sia possibile arrivare con successo alla comprensione delle idee principali della fisica quantistica a partire dallo spin, che non ha analoghi classici, e dalle matrici di Pauli. Introducendo da zero la trattazione dello spin è possibile arrivare al principio di sovrapposizione e agli altri elementi della struttura assiomatica, senza passare attraverso rappresentazioni semi-classiche, in cui gli studenti rischiano di rimanere bloccati. Le nozioni matematiche a cui ricorre l'approccio di Pospiech sono relativamente semplici: le matrici di Pauli sono infatti matrici 2×2 che solitamente gli studenti dei licei scientifici sono in grado di trattare. L'uso di queste matrici permette di dare una base formale a molti concetti fondamentali della teoria quantistica e di spiegare l'esito di esperimenti come quello di Stern e Gerlach. L'applicazione del formalismo a varie configurazioni sperimentali ha lo scopo di aiutare gli studenti a comprendere come queste due dimensioni sono connesse, in modo da restituire loro un'immagine meno astratta della fisica quantistica. Nei suoi lavori Pospiech argomenta, in modo molto convincente, quanto questo approccio sia adatto ad evidenziare gli aspetti fondamentali della fisica quantistica, legati ai

PARAGRAFO 1.1

seguenti temi: principio di sovrapposizione/non determinismo, complementarità-indeterminismo, entanglement-non separabilità, indistinguibilità, processo di misura (Pospiech, 2010). Il merito di questo approccio è quello di aver mostrato come concetti astratti e impegnativi siano alla portata degli studenti di scuola secondaria superiore.

Il terzo approccio, di tipo *fenomenologico*, introduce i concetti della fisica quantistica a partire dall'analisi fenomenologica di situazioni sperimentali. Un esempio è quello proposto da Ghirardi e tradotto in percorso didattico dal gruppo di ricerca di Udine (Michelini, M., Ragazzon, R., Santi, L. & Stefanel, A., 2000; Stefanel, 2007). In tale percorso si analizza la fenomenologia della polarizzazione della luce attraverso esperimenti con filtri polaroid e cristalli di materiali birifrangenti. Attraverso la formulazione di ipotesi interpretative, che richiede agli studenti di partecipare attivamente allo sviluppo del percorso, sono progressivamente ricavate le proprietà del fotone, arrivando al principio di sovrapposizione e all'impossibilità di attribuire una traiettoria all'oggetto quantistico. La scelta del formalismo da utilizzare è legata in questo approccio agli aspetti della teoria che si vogliono mostrare.

Gli esiti della sperimentazione del gruppo di Udine, riportati in Stefanel (2007), riferiscono che sul piano concettuale buona parte degli studenti è riuscita a comprendere le differenze tra stato quantistico e stato classico, anche se non sono risultate sempre chiare per tutti gli studenti le conseguenze dell'esistenza di osservabili non compatibili. Un'altra difficoltà degli studenti osservata nella sperimentazione è legata all'indeterminazione e la rinuncia del determinismo classico. Per quanto riguarda il formalismo, Stefanel riporta che non ha ostacolato l'apprendimento degli studenti, ma al contrario lo ha favorito.

Una seconda sperimentazione molto interessante legata all'approccio fenomenologico è quella proposta da Malgieri, 2015, dell'Università di Pavia. L'approccio è basato sul metodo dei cammini di Feynman, e si avvale dell'apporto di simulazioni interattive realizzate con il software open-source GeoGebra, che permettono attività di esplorazione e indagine altrimenti difficilmente eseguibili in laboratorio. Ricorrendo di volta in volta a esperimenti diversi (esperimenti classici di ottica ondulatoria di diffrazione e interferenza, esperimento di Young con fotoni, elettroni, neutroni e molecole di C_{60} (fullerene), esperimento di Grangier, esperimenti di Mach-Zehnder e di Zhou-Wang-Mandel, esperimenti con particelle quantistiche confinate) viene discusso per ciascun esperimento il significato concettuale.

“Come conseguenza finale di risultati a prima vista incoerenti, viene offerta allo studente una visione via via più ampia della profondità del conflitto con il paradigma classico.

In questo modo viene mostrata agli studenti la necessità di introdurre di volta in volta nuovi concetti e un nuovo formalismo in grado di spiegare l'esito degli esperimenti. Attraverso questo percorso, che abbandona completamente il filo storico pur rimanendo nei vincoli

PARAGRAFO 1.1

scolastici, si mira a fornire agli studenti sia una visione chiara della struttura concettuale ed epistemologica della teoria quantistica, sia gli strumenti per risolvere alcuni tipici problemi che si incontrano nell'ambito quantistico.

L'approccio di Feynman consente agli studenti di esprimere in modo chiaro e comprensibile ciò che avviene quando si manifestano aspetti problematici della fisica quantistica come il "dualismo onda-particella", l'impossibilità di assegnare una traiettoria definita all'oggetto quantistico o il problema della misura, aiutandoli a costruire modelli mentali consistenti e quindi soddisfacenti" (Malgieri, 2015, p. 89).

1.2 GLI APPROCCI E I PERCORSI ELABORATI DAL GRUPPO DI BOLOGNA

In questo contesto di molteplici sperimentazioni di percorsi didattici di fisica quantistica per gli studenti delle scuole superiori si è inserito il gruppo di Bologna. Il primo percorso elaborato è descritto in Tarozzi (2005) e in Levrini & Fantini (2013) e nasce, come sarà descritto, per rendere l'ambiente di apprendimento ricco e complesso, navigabile da parte degli studenti in tanti modi diversi. Il secondo è stato elaborato da un gruppo di ricercatori del dipartimento di fisica e astronomia in collaborazione con il CNR-IMM di Bologna al fine di offrire a studenti volontari, nell'ambito delle attività del Piano Lauree Scientifiche, l'opportunità di cogliere gli elementi essenziali della visione quantistica del mondo, a partire dall'Esperimento più bello della fisica (<http://l-esperimento-piu-bello-della-fisica.bo.imm.cnr.it/>; Lulli, 2013; Levrini, Lulli, Bertozzi, Ercolessi, Matteucci, Monzoni & Pecori, 2014a; Stefanini, 2013).

Il primo dei due percorsi descritti è stato sperimentato dalla docente Paola Fantini in una quinta Liceo Scientifico – Indirizzo PNI nell'anno scolastico 2004-05.

“L'approccio adottato si caratterizza per l'aver utilizzato tre criteri guida, scelti per problematizzare la conoscenza e valorizzarne la portata culturale:

- Multi-prospettiva: gli stessi contenuti fisici (fenomenologie) sono analizzati da diverse prospettive in modo da incoraggiare lo sviluppo di connessioni multiple tra contenuti e strade concettuali.

PARAGRAFO 1.2

- Multi-dimensionalità: le differenti prospettive e connessioni multiple sono analizzate e confrontate anche per le loro peculiarità filosofiche ed epistemologiche, così come per le loro relazioni con esperimenti e formalismo.
- Longitudinalità: l'apprendimento della fisica è un continuo processo di ampliamento, rifinitura e rivisitazione di conoscenze già acquisite. Il “gioco” della modellizzazione dei fenomeni quantistici è sistematicamente analizzato e confrontato con i modelli già incontrati dagli studenti durante lo studio di altri argomenti di fisica (meccanica classica, relatività ristretta, termodinamica).” (Levrini & Fantini, 2013)

Questi tre criteri sono stati scelti in coerenza con una precisa immagine di scienza dove sono legittimi (e possibili) più punti di vista e dove non solo gli studenti "naturalmente" interessati possono avere un ruolo riconosciuto.

Per applicare i primi due criteri di complessità, sono state realizzate analisi guidate di dibattiti storico-epistemologici, in modo da presentare diverse visioni dei fisici coinvolti nei dibattiti (multi-prospettiva), sia lo sviluppo di una dimensione epistemologica (multi-dimensionalità). Il sistematico confronto tra la fisica quantistica e le teorie classiche (longitudinalità) è stato esplicitamente realizzato attraverso la scelta della seguente domanda come filo conduttore: “Come cambia il concetto di oggetto nel passare dalla fisica classica alla fisica quantistica?”

“Questo filo ha portato ad articolare il percorso didattico in due parti, ognuna di esse divisa in due fasi. Ciascuna delle quattro fasi è caratterizzata da un taglio fortemente diverso (rispettivamente storico ed epistemologico le prime due, fenomenologico-descrittivo e formale le seconde due fasi) al fine di poter rispondere a esigenze differenti degli studenti.

Il filo conduttore della prima parte è un’analisi storico-epistemologica di come cambia il concetto di oggetto nel passaggio dalla fisica classica alla fisica quantistica, portato avanti attraverso lo studio della “vecchia teoria dei quanti”, dei concetti di indeterminazione e complementarità e dell’analisi di brani e dibattiti dei protagonisti di quel periodo. La seconda parte va nella direzione di una sistematizzazione formale dei concetti già introdotti, sviluppata attraverso un’analisi fenomenologica di esperimenti alla Stern e Gerlach. La trattazione prevede sia una introduzione formale di carattere generale utilizzando una notazione alla Dirac, sia un ancoraggio all’esempio specifico della rappresentazione matriciale dello spin utilizzando le matrici di Pauli.” (Tarozzi, 2005)

PARAGRAFO 1.2

L'analisi dei dati raccolti durante la sperimentazione ha fatto emergere che le difficoltà degli studenti sono state trasformate in sfide culturali che hanno molto coinvolto gli studenti. In particolare, i dati mostrano come gli studenti, immersi in un ambiente di apprendimento ricco e complesso, siano in generale molto disposti a mettersi in gioco e a sperimentare l'opportunità di riflettere sulla complessità del pensiero fisico. Le loro espressioni, durante discussioni collettive, hanno mostrato un coinvolgimento profondamente autentico (Levrini & Fantini, 2013). Tuttavia non erano state previste interviste individuali e non è stato possibile analizzare nel dettaglio cosa sia avvenuto a livello di apprendimento individuale.

Sebbene la sperimentazione abbia dato esiti positivi, diversi sono i problemi legati all'uso di questo percorso in una generica quinta di Liceo Scientifico. Innanzitutto il tempo a disposizione: il percorso appena descritto è stato sperimentato in una quinta Liceo Scientifico – indirizzo PNI. Gli studenti avevano dunque a disposizione quattro ore alla settimana, contro le tre ore settimanali dedicate alla fisica nelle altre sezioni dei Licei Scientifici. Questo ha permesso di poter trattare più argomenti e di soffermarsi di più su ciascuno di essi, favorendo le connessioni tra gli argomenti e i confronti collettivi tra studenti.

Altro aspetto del percorso legato al PNI è il formalismo matematico utilizzato. E' stato infatti possibile ricorrere alle matrici di Pauli poiché gli studenti erano a conoscenza di tale strumento matematico, essendo presente nei programmi di matematica del quarto anno PNI. E, più in generale, le classi PNI selezionavano naturalmente studenti con un particolare interesse per la fisica e la matematica. Classi di Liceo scientifico tradizionali sono più variegate, da questo punto di vista, e il problema di coinvolgere gli studenti in sfide culturali di alto respiro assume una diversa connotazione. Il percorso sperimentato in questa tesi è dunque una revisione del percorso appena descritto per renderlo adatto a classi quinte d'ordinamento, così come sono previste dalla riforma Gelmini.

Il percorso, nella sua revisione, ha risentito profondamente dell'altra esperienza di progettazione realizzata a Bologna da ricercatori del Dipartimento di Fisica e Astronomia (Eugenio Bertozzi, Elisa Ercolessi, Olivia Levrini, Giorgio Matteucci & Barbara Pecori) in collaborazione con Giorgio Lulli, del CNR-IMM di Bologna e Vittorio Monzoni dell'Università di Ferrara. Questa esperienza si è concretizzata nella progettazione e realizzazione, a partire dal 2009, di un Corso-Laboratorio nell'ambito del PLS³ (Piano nazionale Lauree Scientifiche) (Levrini et al., 2014a).

Il Corso-Laboratorio, avviato nel 2009, si intitola "L'esperimento più bello", poiché è incentrato sull'esperimento d'interferenza di elettroni singoli, esperimento in grado di rivelare il "cuore" della fisica quantistica secondo Feynman e realizzato per la prima volta da tre

³ www.progettolaureescientifiche.eu

PARAGRAFO 1.2

professori di Bologna, Pier Giorgio Merli, Gian Franco Missiroli, Giulio Pozzi, ottenendo il riconoscimento di “più bell’esperimento di fisica di tutti i tempi” dai lettori della rivista *Physics World* in un sondaggio del 2002.

Il Corso-Laboratorio è un corso extrascolastico, dunque libero dai vincoli scolastici, che si compone di sei lezioni pomeridiane da circa tre ore ciascuna, frequentato da un gruppo di 10-15 studenti volontari provenienti dall’ultimo anno di Liceo Scientifico, appassionati di fisica e già interessati al mondo quantistico. Come è ben descritto nella tesi di Lucia Stefanini:

“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 fisica quantistica e dare, al contempo, uno spaccato contemporaneo sulle varie dimensioni della conoscenza fisica (piano concettuale, sperimentale, storico, formale, logico-interpretativo).

Come suggerito da Feynman è possibile far emergere in maniera chiara dall’esperimento d’interferenza di elettroni singoli le contraddizioni e i limiti interpretativi della meccanica classica, che impongono l’elaborazione di una nuova logica in grado di superare le incongruenze. Il corso infatti prevede che dall’esperimento si prenda spunto per sviluppare un formalismo minimale, in grado di descrivere ed interpretare quello che c’è di “apparentemente” incomprensibile nei fenomeni quantistici.

Nel Corso-Laboratorio si ricorre dunque ad un approccio didattico in cui si intrecciano diversi piani descritti in letteratura: sperimentale, logico-concettuale, applicativo, storico-filosofico. Il percorso, 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, introdotti e discussi utilizzando un linguaggio formale specifico e strumenti matematici di base (tra cui non compaiono le matrici di Pauli). 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.” (Stefanini, 2013)

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

PARAGRAFO 1.2

descritte durante il Corso, allo scopo di mostrare l'utilità pratica e le potenzialità innovative della fisica (Levrini et al, 2014a).

Dalla sperimentazione descritta nella tesi di Stefanini (2013) è emerso come:

“gli studenti sono stati in grado di accettare la matematica introdotta e non l'abbiano percepita al di fuori della loro portata. Si è osservato inoltre che il formalismo matematico è stato riconosciuto come uno strumento utile per l'interpretazione e la comprensione degli esperimenti trattati. In diverse risposte dei questionari, sottoposti agli studenti per ottenere un feedback sui vari aspetti del percorso, 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. Gli studenti hanno anche colto il linguaggio del formalismo all'interno della trattazione delle applicazioni quantistiche e spesso lo hanno sfruttato nella loro rielaborazione dell'apprendimento. Il progetto del PLS ha dunque ottenuto riscontri molto positivi, sia dagli studenti sia dagli insegnanti, e ha mostrato un grosso potenziale per un suo possibile utilizzo come percorso didattico nelle quinte Liceo Scientifico.” (Stefanini, 2013)

Nel prossimo capitolo verrà mostrato come, partendo dai due percorsi progettati a Bologna e dai risultati ottenuti da queste due sperimentazioni, si è arrivati al percorso didattico di fisica quantistica utilizzato lo scorso anno scolastico in classi di Licei scientifici d'ordinamento.

1.3 MODELLI DI APPRENDIMENTO: IL CASO DELL'APPROPRIAZIONE

Il percorso di fisica quantistica utilizzato nella sperimentazione oggetto di questa tesi è stato progettato non solo con lo scopo di permettere agli studenti la comprensione dei concetti e fenomeni alla base della fisica quantistica, ma anche con l'obiettivo di favorire l'*appropriazione* di tali concetti da parte degli studenti.

L'interesse del gruppo di ricerca di Bologna per il tema dell'*appropriazione* nasce, come già si è anticipato, dall'analisi dei dati ottenuti durante la sperimentazione di un percorso di termodinamica, realizzata nel 2009 dalla docente Paola Fantini, in una classe quarta liceo scientifico.

L'approccio del percorso si è basato anche in questo caso sui tre criteri descritti in precedenza: multi-prospettiva, multi-dimensionalità, longitudinalità.

PARAGRAFO 1.3

Dall'analisi dei dati (Fantini, 2014; Levrini et al., 2014), raccolti attraverso registrazioni di discussioni di classe, compiti in classe e interviste a singoli studenti, è emerso che durante le attività di classe molti studenti avevano raggiunto una conoscenza profonda dei contenuti, ma dai dati è anche emerso che tali studenti avevano proiettato, nella loro comprensione dei contenuti di termodinamica, significati personali, evento già parzialmente osservato in occasione della sperimentazione di fisica quantistica nella quinta PNI, descritta sopra. Nel caso della sperimentazione della fisica quantistica, tuttavia, non c'erano abbastanza dati per analizzare e capire il fenomeno.

Il modo personale con cui gli studenti hanno affrontato lo studio della termodinamica è diventato l'aspetto centrale che ha orientato l'analisi e a cui si è cercato di "dare un nome che potesse catturare quel particolare significato dell'apprendimento e enfatizzare due aspetti importanti: l'autenticità del processo di apprendimento e la responsabilità dello studente nel farsi carico e prendersi cura del proprio apprendimento" (Fantini, 2014, p.11).

La parola *appropriazione* sembrava al gruppo particolarmente adatta perché proprio perché condivide il significato etimologico con *autenticità* (*appropriazione* deriva dal termine latino "proper" e *autenticità* dal corrispettivo greco "autos"), ma anche perché il processo di *appropriazione* indica un processo riflessivo, di cui ognuno è responsabile: "Io faccio *mio* qualcosa".

Il termine *appropriazione* non è nuovo in letteratura di ricerca: è stato introdotto in campo linguistico da Bakhtin (1981). L'*appropriazione* di un discorso è quel processo che il soggetto mette in atto per adattare "a word living in a world of others" al proprio mondo personale, attribuendo alla parola intenzioni, accenti, intenti idiosincratici. Come descrive Fantini nella sua tesi di Dottorato:

"L'*appropriazione* di un discorso, per il fatto stesso che riflette la storia personale di ciascuno, non necessariamente deve essere circoscritta al campo linguistico, ma può essere estesa a diverse forme di discorso: per esempio al discorso scientifico. Ma il discorso scientifico può diventare oggetto dell'*appropriazione* solo se si considera la conoscenza fisica una conoscenza plastica: una conoscenza che può essere trasformata personalmente dallo studente con accenti personali, senza uscire dai vincoli disciplinari. Nell'*appropriazione* di un contenuto scientifico (fisico in particolare) termini scientifici (*parole*), come ad esempio calore e temperatura, o *espressioni* del discorso scientifico diventano la principale unità di *appropriazione*. Seguendo la visione di Bakhtin, ogni studente prende queste parole dalle bocche degli altri membri della comunità (compagni e insegnante) e le trasforma arricchendole di sfumature, intenzioni, significati personali,

PARAGRAFO 1.3

in modo che il discorso scientifico possa diventare parte della sua storia personale.”
(Fantini, 2014)

La nozione di *appropriazione* di Bakhtin, sorta in campo linguistico, è stata poi sviluppata in campo socio-cognitivo ed educativo da Vygotsky (1978), Rogoff (1995), Sfard (2007) e adattata in modo da considerare appunto il discorso scientifico (Delgatto, 2011).

E' in questo filone di ricerca sull'*appropriazione* del discorso scientifico che si è inserito il gruppo di Bologna. Il gruppo di ricerca, tenuto conto della letteratura e dei dati emersi dal percorso di termodinamica, ha in particolare costruito una definizione operativa di *appropriazione* in ambito scientifico, ovvero una definizione che potesse essere utilizzata per stabilire se e perché un discorso di un studente rivela che è diventato “proprio”.

Nello specifico, nella tesi di dottorato di Fantini (2014) e nell'articolo di Levrini et al. (2014) si mostra come l'*appropriazione* possa essere riconosciuta operativamente quando il discorso degli studenti, in relazione ad un termine o una espressione scientifica è:

- A. sviluppato dal singolo studente attorno a un insieme di parole-chiave e espressioni ripetute diverse volte in modo da esprimere, rispetto alla fisica, un'idea **autentica** e **idiosincratica**; le idee sono riconoscibili come autentiche e idiosincratiche perché sono differenti da studente a studente; inoltre le scelte linguistiche e il tono usato mostrano che queste idee non sono “prese in prestito” da un'autorità esterna (insegnante, libro di testo, compagno di classe...);
- B. **fondato sul piano disciplinare** nel senso che le idee idiosincratiche sono state usate dagli studenti per selezionare elementi di conoscenza disciplinare e ricomporli poi in un modo significativo da un punto di vista disciplinare (rispettoso delle regole e dei vincoli della fisica);
- C. “**spesso**” nel senso che l'idea idiosincratica include elementi che appartengono alla dimensione meta-cognitiva (che cosa significa per me imparare la fisica) e a quella epistemologica (che immagine di fisica ha senso per me);
- D. **non occasionale** nel senso che l'idea idiosincratica la si ritrova nelle diverse attività che hanno coinvolto gli studenti (e non solo nell'intervista);
- E. veicolo **di relazioni sociali** nel senso che l'idea idiosincratica è difesa dallo studente di fronte alla classe e lo posiziona all'interno della comunità di classe (“l'ingegnere”, il “filosofo”, il “mediatore”...) e, viceversa, lo sviluppo dell'idea idiosincratica non è separabile dalle dinamiche di classe.

PARAGRAFO 1.3

L'individuazione dei precedenti indicatori operativi ha permesso la formulazione della seguente *definizione di appropriazione*:

“L'*appropriazione* è un processo complesso (C) di trasformazione del discorso scientifico (cioè di parole e frasi della scienza) finalizzato ad *incorporare* tale discorso all'interno di una propria storia personale (D).

Questo processo:

popola il discorso scientifico di scopi e intenzioni personali, idiosincratici (A);

rispetta le regole e i vincoli disciplinari (B);

ha, intrinsecamente, una natura sociale (E): è sensato sia per se stessi, sia all'interno del contesto sociale della classe.” (Fantini, 2014)

Per esemplificare la definizione di *appropriazione* e gli indicatori operativi verrà mostrato il caso di Matteo alle prese con il percorso di termodinamica, riportato in Levrini (2014). “Matteo non era uno studente che amava in modo particolare la fisica e, soprattutto, trovava faticoso e di poca soddisfazione l'aspetto formale della disciplina. Nel percorso di termodinamica, tuttavia, è riuscito a trovare una sua strada e un suo modo per entrare nella disciplina, coglierne gli aspetti concettuali e anche accettare la sua struttura formale. Questo è stato possibile perché Matteo ha potuto assecondare il suo interesse per la filosofia e trasformarlo in una via di *appropriazione* anche della fisica. L'intervista individuale fatta a Matteo alla fine del percorso si sviluppa infatti attorno alle parole filosofiche “essere” e “divenire”, da lui ripetute diverse volte. Da questa evidenza si può riconoscere, come idea “autentica” e idiosincratica, la distinzione filosofica tra “essere” e “divenire”.

L'idea “autentica” è fondata sul piano disciplinare nel senso che, nel caso di Matteo, lo ha aiutato a dare senso ai concetti stessi di termodinamica. Infatti, quando è stato intervistato sul concetto di temperatura, Matteo ha rivelato di aver focalizzato la sua attenzione sulla distinzione tra ΔT (gradiente di temperatura) e T (temperatura), poiché ha visto, in questa distinzione, la differenza filosofica tra essere (lo stato) e divenire (il cambiamento). In particolare nella legge della calorimetria ($Q = mc\Delta$), Matteo ha riconosciuto l'espressione del divenire: “c'è un cambiamento [a causa di ΔT] che significa che qualunque cosa non è stabile, ogni cosa non è essere, c'è qualcosa che cambia.” Nella legge dei gas Perfetti ($PV = nRT$) Matteo ha invece riconosciuto una espressione dell'essere: “[C'è] una temperatura assoluta T, che non cambia. Non c'è Δ [differenza di temperatura], non c'è cambiamento”. Già in altre attività di classe, Matteo aveva mostrato un forte interesse per la filosofia e il suo apprendimento della fisica è stato fortemente influenzato dal suo orientamento per la filosofia. In questo senso l'idea idiosincratica non è occasionale ed espressione di una posizione

PARAGRAFO 1.3

epistemologica (“spessa”) all’interno della fisica e una posizione personale – il filosofo – all’interno della classe (veicolo di relazioni sociali).

Matteo, come altri studenti che si sono appropriati di parole ed espressioni di termodinamica, non ha ripetuto la definizione di temperatura fornita dall’insegnante o dal libro di testo. Invece ha riferito quello che era significativo secondo il suo gusto personale. In particolare, ha concentrato la sua attenzione su pezzi di conoscenza relativi alla temperatura e ri-assemblati in accordo con la sua idea “autentica” e idiosincratice. Per dirla con le parole di Bakhtin, Matteo, quando sceglie e riassembla pezzi di conoscenza, popola una parola disciplinare (temperatura) con le proprie intenzioni e propositi. E’ in questo processo, sia idiosincratice che sociale, che è stato possibile osservare studenti intenti a giocare con il proprio sé e ad esplorare quei “pattern di modi di fare (e dire) le cose” (diSessa, 2014) che progressivamente risultano in quella che può essere chiamata costruzione della propria identità.” (Levrini, 2014) L’*appropriazione* non è un processo che avviene in un singolo istante di tempo. Piuttosto, l’*appropriazione* di contenuto disciplinare è un processo di trasformazione del discorso scientifico complesso e riflessivo, inserito nella propria storia personale. Levrini e colleghe ipotizzano che il fenomeno dell’*appropriazione* avvenga negli studenti sia grazie alla struttura complessa del percorso sia grazie all’insegnante, in grado di creare nel tempo un complesso ambiente di apprendimento basato su un’immagine di fisica in cui gli studenti sono incoraggiati a scoprire e costruire una relazione personale e profondamente sentita con il contenuto scientifico (Levrini, Fantini, Levin & Tasquier, 2014b).

Le tre esperienze appena descritte, le due sperimentazioni di fisica quantistica in una quinta PNI e nel Corso-Laboratorio del PLS e la sperimentazione di termodinamica sull’*appropriazione*, convergono in questo lavoro di tesi il cui scopo è fornire un contributo a raffinare il costrutto dell’*appropriazione* appena descritto, utilizzandolo come:

- principio guida nella progettazione del percorso di fisica quantistica;
- criterio di progettazione degli strumenti di analisi della sperimentazione;
- strumento per la verifica del tipo di coinvolgimento degli studenti per capire se è produttivo sul piano disciplinare e autentico.

A ciascuno di questi punti è dedicato un capitolo della tesi, rispettivamente i capitoli 2, 3 e 4. In questo modo sarà possibile verificare se e come il costrutto teorico dell’*appropriazione* può essere utilizzato in un contesto disciplinare diverso dalla termodinamica e valutare se il percorso di fisica quantistica progettato sulla base delle precedenti esperienze e sui tre criteri di complessità (multi-prospettiva, multi-dimensionalità e longitudinalità) ha favorito l’*appropriazione*, come sembrano suggerire i risultati delle precedenti sperimentazioni.

PARAGRAFO 1.3

CAPITOLO 2

Il percorso concettuale e didattico

Come già anticipato, con l'entrata in vigore della Riforma Gelmini la fisica quantistica è oggetto di studio, a partire dall'anno scolastico 2014-15, in tutte le quinte Liceo Scientifico e Liceo Scientifico – Opzione Scienze Applicate. Questo ha portato il gruppo di ricerca in Didattica della fisica di Bologna a recuperare i due percorsi di fisica quantistica progettati per altri contesti (Liceo Scientifico – indirizzo PNI il primo, Corso-Laboratorio extrascolastico per studenti volontari il secondo), per sviluppare un percorso didattico di fisica quantistica che rispettasse i vincoli imposti dalla riforma (relativi sia agli argomenti di fisica sia alle conoscenze matematiche) e che fosse dunque utilizzabile in classi di Liceo Scientifico.

L'esito positivo del percorso di termodinamica ha portato inoltre il gruppo a utilizzare, come strumento di progettazione del percorso di fisica quantistica, il costrutto di *appropriazione* descritto nel paragrafo 1.3. Nello specifico, la volontà di favorire processi di *appropriazione* come era avvenuto nel percorso di termodinamica determina gli obiettivi di questo lavoro di tesi, espressi dalle seguenti domande di ricerca:

DR1: Nonostante il cambiamento di tema e di contesto è possibile osservare casi di appropriazioni in questo contesto?

DR2: Quali condizioni hanno favorito o ostacolato l'appropriazione?

DR3: Quale contributo questo studio empirico offre per rifinire il costrutto di appropriazione?

PARAGRAFO 2.1

In questo capitolo viene descritto il nuovo percorso di fisica quantistica: nel paragrafo 2.1 sono riportati i vincoli e le esigenze di progettazione e le principali novità di questo percorso rispetto ai due precedenti percorsi di fisica quantistica.

Nel paragrafo 2.2 si mostra come l'implementazione dei 3 criteri (multi-prospettiva, multi-dimensionalità e longitudinalità) legati all'*appropriazione* abbia determinato la scelta dei materiali e delle attività proposte nel percorso, nonché la suddivisione stessa del percorso in 3 parti, e abbia portato all'introduzione di due fili concettuali: uno sul cambiamento delle proprietà di oggetto e processo nel passaggio dalla fisica classica alla fisica quantistica (con particolare enfasi alla dicotomia continuo-discreto), l'altro sul tema dell'intuibilità in fisica quantistica.

Infine, nel paragrafo 2.3, sono descritti la struttura, le attività e i materiali del percorso.

2.1 CRITERI PER LA RIELABORAZIONE

Nel rielaborare il percorso di fisica, partendo dalle precedenti sperimentazioni, si è cercato di tenere in considerazione:

- L'esigenza degli insegnanti e della programmazione scolastica.
- L'esigenza di costruire materiale analogo a quello di termodinamica per favorire l'*appropriazione*.

Nelle Indicazioni Nazionali per i Licei sono riportati gli argomenti che il Ministero dell'Istruzione ha decretato essere argomenti obbligatori della programmazione scolastica. Per quanto riguarda la fisica quantistica, gli argomenti obbligatori sono quelli relativi alla "vecchia teoria dei quanti", descritti nel paragrafo 1.1. Nelle Indicazioni Ministeriali si suggerisce di concludere il percorso con lo studio dell'evidenza sperimentale della natura ondulatoria della materia, postulata da De Broglie, e del principio di indeterminazione di Heisenberg.

Nel paragrafo 1.1 è stato spiegato come questo percorso, se realizzato come avviene tradizionalmente seguendo i libri di testo, impedisca agli studenti di accedere alla fisica quantistica, bloccandoli nel migliore dei casi in una visione semi-classica dei fenomeni, basata sul "dualismo onda-corpuscolo". Gli esiti di numerose sperimentazioni, come quelle

PARAGRAFO 2.1

riportate nel paragrafo 1.1 e 1.2, rivelano che è possibile (e fornisce grande valore culturale) introdurre le basi vere e proprie della fisica quantistica come teoria e costruire i concetti di stato, sovrapposizione, indeterminazione, misura e ampiezza di probabilità. Per questo motivo il percorso progettato dal gruppo di Bologna prosegue il percorso descritto sopra con una parte “genuinamente” quantistica che rivela, attraverso lo studio del principio di sovrapposizione e degli esperimenti di Stern e Gerlach, Mach-Zehnder e di interferenza di singolo elettrone, la necessità di abbandonare i concetti classici o semi-classici per introdurre un nuovo concetto (l’oggetto quantistico), dotato di nuove proprietà. Questo richiede di adottare un nuovo formalismo matematico, in grado di descrivere le nuove proprietà tipicamente quantistiche.

Oltre ai vincoli ministeriali si è dovuto considerare nella progettazione altri vincoli di sistema: innanzitutto la vicinanza del percorso di fisica quantistica con l’esame di maturità. Lo studio della fisica quantistica è affrontato negli ultimi mesi dell’anno scolastico, dopo lo studio dell’elettromagnetismo e della relatività ristretta. Il rischio di non limitarsi agli argomenti ministeriali per proporre un percorso culturalmente rilevante e didatticamente completo è dunque quello di fare agli studenti una richiesta troppo impegnativa in un momento delicato dell’anno scolastico, in cui il pensiero e il tempo degli studenti sono prevalentemente rivolti alla tesina e alle prove d’esame. Nella progettazione e nella sperimentazione, dunque, non si è mai perso di vista questo aspetto e si è deciso fin da subito di essere pronti, in un qualsiasi momento, ad alleggerire e completare il percorso qualora gli studenti manifestassero troppe difficoltà e potesse essere compromessa la loro tranquillità per concludere nel migliore dei modi il secondo quadrimestre e affrontare al meglio l’esame di stato.

Un secondo rischio che si è discusso fin dalla fase di progettazione era legato al fatto che, nell’anno scolastico in corso (2014-15), il commissario di matematica e fisica all’esame di stato era esterno. Ci si è quindi posti il problema di come metterlo nelle condizioni per valorizzare un lavoro che, ovviamente, non era tenuto a conoscere nei suoi dettagli di progettazione e sperimentazione.

Ultimo aspetto considerato riguardava il coinvolgimento del collegio docenti e del commissario interno, perché le attività potevano creare alcuni disagi per la programmazione complessiva delle attività di classe. Il percorso prevedeva infatti una uscita pomeridiana per assistere al seminario del dott. Giorgio Lulli “sull’Esperimento più bello della Fisica”. Altro motivo di disagio poteva essere la richiesta di alcune ore scolastiche ad altri docenti per

PARAGRAFO 2.1

svolgere una delle verifiche scritte previste nel percorso: il tema scientifico di italiano, tipologia B (saggio breve o articolo di giornale), della durata di 3 ore.

Per rispondere alle esigenze “di sistema” si è deciso di operare coinvolgendo esplicitamente gli studenti, il collegio docente e, in particolare, i docenti di Italiano che sarebbero stati i commissari interni. Si è quindi operato per preparare documenti piuttosto dettagliati per i commissari esterni di matematica e fisica. I risultati su questo piano sono stati molto positivi e saranno descritti nel paragrafo 4.5:

Un secondo tipo di esigenza che ha vincolato la progettazione del percorso è legata all'*appropriazione* e a come favorirla. Come già discusso, una delle ipotesi del gruppo di Bologna sui fattori che hanno potuto favorire l'*appropriazione* del percorso di termodinamica si riferisce a particolari principi di progettazione, in grado di creare un ambiente di apprendimento inclusivo e sufficientemente ricco, in cui ci sia spazio per punti di vista personali (Levrini et al., 2014b). Si è così scelto di adottare una struttura del percorso e di progettare materiali e attività che fossero analoghi a quanto adottato nel percorso di termodinamica per favorire l'*appropriazione*. Questo ha significato adottare i tre criteri di complessità, descritti nel paragrafo 1.2 e utilizzati come criteri guida per il percorso di termodinamica: multi-prospettiva, multi-dimensionalità e longitudinalità.

2.2 RISULTATO DELLA RIELABORAZIONE

In questo paragrafo vengono presentate le due maggiori novità del percorso di fisica quantistica che verrà descritto per intero nel prossimo paragrafo. La volontà di strutturare il percorso sulla base delle esigenze appena descritte ha determinato lo sviluppo di due fili concettuali che recuperano e amplificano due temi già accennati nel percorso di fisica quantistica elaborato da Levrini e Fantini (2013) per le quinte Liceo Scientifico – Indirizzo PNI: il tema del cambiamento delle proprietà di oggetto e processo nel passaggio dalla fisica classica alla fisica quantistica e il tema della visualizzabilità o intuibilità della fisica quantistica.

Il tema del cambiamento delle proprietà di oggetto e processo è stato arricchito con il tema matematico del confronto continuo-discreto, in modo da aiutare gli studenti a cogliere tale

PARAGRAFO 2.2

cambiamento. Si è quindi scelto di elaborare un primo filo concettuale sviluppato sulle seguenti domande:

“Come cambiano i modelli di oggetto e di processo con la fisica quantistica?

Ovvero, quale contributo dà la fisica quantistica al dibattito continuo-discreto?” (Levrini, Branchetti, Ercolessi, Fantini, Garagnani, Lulli, Monzoni & Tasquier, 2015)

Lo sviluppo di questo filo concettuale ha lo scopo di tenere insieme i vari argomenti del percorso e favorire il sistematico confronto tra la fisica quantistica e la fisica classica, rispondendo al criterio di longitudinalità.

Nella “vecchia teoria dei quanti” il concetto di continuo sembra lasciar spazio al discreto (con il passaggio da onda elettromagnetica a fotone e con la discretizzazione dei processi atomici). Le teorie di De Broglie e Bohr portano ad una complementarità di questi due concetti e quindi di quelli di onda e corpuscolo. Con il percorso descritto in questa tesi, si vuole procedere in modo significativo rispetto a questo punto e mostrare come lo sviluppo di un nuovo formalismo e di nuove riflessioni imponga il superamento del dualismo per arrivare alla definizione dell’oggetto quantistico, il *quantone*, le cui proprietà non sono riconducibili alla semplice e semi-classica dicotomia onda-corpuscolo (Lévy-Leblond, 2003).

Il secondo filo concettuale del percorso corrisponde ad una metariflessione sul seguente tema:

“Quanto è intuibile la fisica quantistica e l’immagine della realtà che essa restituisce? Quali vie e strumenti per la comprensione, l’immaginazione e l’intuibilità ci sono in fisica?” (Levrini et al., 2015)

Il principio di sovrapposizione e la relazione di indeterminazione problematizzano la possibilità di costruirsi rappresentazioni spazio-temporali dell’oggetto quantistico e dunque la possibilità di formarsi immagini mentali familiari, per esempio dell’oggetto quantistico e della sua traiettoria. Questo ha portato i fisici a discutere, elaborare e proporre nuove strade per “l’intuibilità” della fisica quantistica, rivelando una notevole ricchezza di possibili approcci (fatti emergere nel percorso attraverso l’analisi di brani e dibattiti dei maggiori fisici dell’epoca). Si è così scelto di recuperare le osservazioni fatte su questo tema nel percorso di fisica per il PNI e di elaborare un vero e proprio filo concettuale “sull’intuibilità”, in modo da

PARAGRAFO 2.2

rendere il materiale multi-prospettico e multi-dimensionale e quindi favorire l'*appropriazione*.

Così come per il filo concettuale sul continuo e discreto, anche per questo secondo filo concettuale sono state pensate opportune attività scolastiche e sono stati introdotti nel percorso materiali innovativi.

I due fili appena esposti permettono di trasformare i vincoli riportati nel paragrafo 2.1 in obiettivi strategici dal grande valore culturale, personale, emotivo e sociale. Innanzitutto i due fili portano gli studenti a essere coinvolti in sfide culturali e personali di alto livello: il confronto tra continuo e discreto, associato già al pensiero greco, è molto suggestivo e lungi dall'essere concluso (si veda: Longo & Fabbrichesi, 2006); il tema dell'intuibilità permette invece agli studenti di riflettere sul proprio modo di comprendere la fisica, qual è la strada per ciascuno più intuitiva, a cui immediatamente si ricorre, per comprendere un concetto. L'uso di questi due fili permette di valorizzare la visione personale di ciascuno studente e offre la possibilità di "giocare" con la propria visione personale nel contesto di classe, favorendo il confronto tra i compagni e tra lo studente e il professore, nonché l'attribuzione di un ruolo sociale e disciplinare a ciascuno studente.

2.3 IL PERCORSO: LE ATTIVITÀ E LE TRE PARTI

QUESTIONARIO INIZIALE

Il questionario iniziale, riportato in appendice A, rappresenta una delle attività di maggior originalità di questa sperimentazione.

La prima parte del questionario è dedicata all'analisi delle proprietà che definiscono continui e/o discreti oggetti quali l'atomo e l'onda elettromagnetica, e processi quali l'urto tra oggetti e la possibilità di seguire la traiettoria di un oggetto. Oltre alla possibilità di fornire agli studenti un quadro riassuntivo dello stato della fisica alla fine del XIX secolo, grazie anche alla lettura di brani che discutono la continuità o discontinuità di oggetti e processi, questa parte del questionario è stata pensata per accendere la dimensione longitudinale, legata al filo continuo/discreto.

La seconda parte del questionario, sviluppata in collaborazione con il gruppo di ricerca in Didattica della Fisica dell'Università di Pavia, si concentra sul metodo utilizzato in fisica,

PARAGRAFO 2.3

proponendo, attraverso la lettura di 3 brani, il confronto tra tre possibili metodi per descrivere e comprendere un fenomeno: la costruzione di immagini, la costruzione di analogie e la costruzione di modelli matematici. Mostrando la varietà dei possibili approcci si accendono negli studenti le altre due dimensioni ritenute necessarie ai fini dell'*appropriazione*: la multi-prospettiva e la multi-dimensionalità.

Il questionario è pensato per essere distribuito agli studenti prima dell'inizio del percorso. Agli studenti è chiesto di rispondere, individualmente, per iscritto. Sulla base delle risposte degli studenti si organizza una discussione di classe collettiva finalizzata a:

a) esplicitare agli studenti le ragioni del questionario e la sua articolazione in due parti. È l'occasione per sottolineare, fin da subito, che il percorso di fisica quantistica ha l'obiettivo, oltre a quello di introdurre concetti nuovi, di fornire spunti per rispondere a due domande (filì conduttori):

1. Come cambiano i modelli di oggetto e di processo con la fisica quantistica? Ovvero, quale contributo dà la fisica quantistica al dibattito continuo-discreto?

*2. "Quanto è intuibile la fisica quantistica e l'immagine della realtà che essa restituisce?"
Che cosa significa "comprendere e riconoscere come ragionevole, familiare in fisica?"*

La discussione collettiva è pensata per avviare un confronto sui due filì di ragionamento, da sviluppare e riprendere con altre attività.

b) costruire un quadro di partenza condiviso circa la continuità dei processi e il dibattito continuo-discreto riferito agli oggetti che poi è messo in discussione con la fisica quantistica;

c) capire quanto le espressioni "immagini, analogie fisiche, modelli matematici" siano familiari agli studenti e capire se tra gli studenti c'è un andamento comune (ad esempio, una maggior importanza attribuita alle immagini) e/o se ci sono diversità significative tra di loro;

d) far cogliere agli studenti che lo studio della fisica quantistica sfida l'intuibilità e impone un processo fortemente individuale di riflessione di cosa significa "capire" e di che cosa renda una teoria comprensibile, intuibile e convincente.

PARAGRAFO 2.3

PARS DESTRUENS

La *pars destruens* si articola attorno ai quattro fenomeni fondamentali relativi alla “vecchia teoria dei quanti” previsti dalle Indicazioni Ministeriali: corpo nero, effetto fotoelettrico, effetto Compton e modello atomico di Bohr.

Rispetto al tradizionale insegnamento di questi argomenti scolastici, si è scelto di arricchire questa parte del percorso sviluppandola secondo un obiettivo ben preciso: sottolineare le modellizzazioni di oggetto e processo proposte nei quattro argomenti, con particolare attenzione all’evoluzione del modello di interazione radiazione-materia, a cui si lega il filo continuo-discreto. L’analisi delle modellizzazioni permette sia di mostrare agli studenti come opera la scienza, sia di comprendere meglio le operazioni che si andranno a fare nelle successive due parti.

Il percorso comincia con lo studio del corpo nero: si parte dalla ricostruzione del contesto storico, che rivela come tale argomento nasca dall’esigenza industriale di sviluppare lampadine sempre più efficienti. Da qui nasce l’esigenza di costruire un modello di assorbitore ed emettitore ideale chiamato corpo nero (elaborato da Kirchhoff). Nel trattare e analizzare il modello della cavità di Kirchhoff, si pone particolare attenzione a distinguere i fenomeni di assorbimento e di emissione, portando gli studenti a riconoscere perché anche il sole può essere modellizzato come un corpo nero e perché l’emissione non è un fenomeno di riflessione. Questi sono due punti molto delicati messi in evidenza come ostacoli nella comprensione da più studi (cfr. ad esempio Besson et al. 2010; Tasquier, 2015). Nella trattazione del corpo nero, si suggerisce di mettere gli studenti nelle condizioni di comprendere come il problema sia un problema di confine tra elettromagnetismo, termodinamica e ottica e di insistere su come il modello dei risonatori di Planck sia il risultato di un processo ricco che ha visto, anche storicamente, l’intrecciarsi di evidenze fenomenologiche, leggi empiriche, modelli matematici e analogie procedurali. Dopo la discussione sulle leggi di Stefan-Boltzmann e di Wien, si introduce infatti il contributo di Planck, sottolineando come la sua distribuzione sia stata proposta, prima, come un puro modello matematico e, poi, sia stato interpretato sulla base del modello fisico dei risonatori. Considerando la situazione in cui la cavità è in equilibrio (la sua temperatura è costante) e pensando alle pareti della cavità come costituite da oscillatori lineari, il modello di Planck permette, riprendendo i procedimenti statistici di Boltzmann, di modellizzare il processo di interazione tra la radiazione all’interno della cavità e i risonatori stessi e di trovare la distribuzione spettrale come quella che massimizza la funzione entropia. Il punto cruciale è

PARAGRAFO 2.3

che, per aver accordo tra i dati sperimentali e i dati teorici, il processo deve risultare discreto, ovvero l'energia scambiata tra risonatori e radiazione deve avvenire per pacchetti discreti. Tale discretizzazione è matematicamente espressa dalla presenza della costante naturale h , nella formula che esprime l'energia scambiata tra radiazione e oscillatore.

Per approfondire il modello dei risonatori di Planck, tipicamente poco trattato nei percorsi scolastici, e per dare maggiore enfasi alla discretizzazione del processo di interazione radiazione-materia, si consiglia la lettura di brani di Tarsitani (1983, pp. 207-223), in modo da aiutare gli studenti a riprendere il questionario iniziale e sviluppare il filo del continuo-discreto.

L'effetto fotoelettrico e l'effetto Compton sono trattati seguendo un percorso più tradizionale, in cui si parte dall'analisi delle evidenze sperimentali, si presentano gli effetti non spiegabili con la fisica classica e si arriva alle ipotesi rispettivamente di Einstein e di Compton. Sebbene il percorso non si discosti molto da quelli tradizionali, è ben presente l'intenzione di non perdere e sviluppare il filo della modellizzazione. Il passo avanti compiuto dall'effetto fotoelettrico è legato alla situazione sperimentale differente rispetto al corpo nero, con la radiazione che non riempie più una cavità, ma incide una lastra metallica. I dati sperimentali, non spiegabili con i modelli classici di oggetto e interazione radiazione-materia, rivelano come il tempo di esposizione alla radiazione non sia influente per l'osservazione della ionizzazione e come sia presente una frequenza di soglia al di sotto della quale la ionizzazione non avviene. Questo porta Einstein a modellizzare la radiazione come formata da un numero discreto, finito di fotoni o pacchetti di energia $h\nu$, localizzati nello spazio, che si muovono senza suddividersi e interagiscono per pacchetti interi. Il modello di interazione radiazione-materia che ne consegue è un modello di urto tra un singolo fotone e un singolo elettrone legato. Anche in questo caso è possibile enfatizzare le discretizzazioni operate per mezzo di brani come quelli riportati in Tarsitani (1983, cap. 4-5-6).

La differenza fondamentale dell'effetto Compton rispetto all'effetto fotoelettrico risiede nell'aver a che fare con un elettrone che non è più legato alla struttura cristallina e il processo, dunque, non richiede di considerare l'energia di legame. Il passo avanti nella modellizzazione compiuto dall'effetto Compton è dunque la possibilità di trattare l'interazione radiazione-materia come urto tra due corpi entrambi liberi e quindi come se avvenisse in un sistema isolato, cosa che rende possibile ricorrere alla semplice trattazione matematica basata su conservazione di energia e quantità di moto. L'effetto Compton completa, tradizionalmente, il percorso che porta dal quanto di luce di Einstein alla costruzione del concetto di fotone.

PARAGRAFO 2.3

L'ultimo argomento della *pars destruens* è lo studio dei modelli atomici e il loro progressivo “complicarsi” per poter spiegare le evidenze sperimentali. Il percorso parte dal modello a “panettone” di Thomson a cui segue il modello planetario di Rutherford, non in grado però di spiegare la stabilità dell'atomo né gli spettri a righe. Proprio la stabilità elettronica e meccanica, da cui seguono spettri sempre uguali per uno stesso elemento, spinsero Bohr a modellizzare l'atomo introducendo livelli discreti di energia per gli elettroni atomici, dunque legati. L'emissione (e assorbimento) di energia che ne deriva è modellizzata come processo discreto: il salto da un livello energetico ad un altro. Per aiutare gli studenti nella visualizzazione dei processi che avvengono nell'atomo di Bohr i testi ricorrono a figure come quelle riportate al punto 3 in Appendice B. Molta attenzione è posta sul rimarcare che tale rappresentazione non è da considerare come una visualizzazione spaziale dell'atomo quanto un modo per rappresentare il processo di interazione radiazione-materia.

COMPITO SULLA PARS DESTRUENS

Il compito, riportato in appendice B, è una delle attività di verifica dell'apprendimento del percorso. Gli argomenti trattati sono il corpo nero, l'effetto fotoelettrico e il modello atomico di Bohr. Si compone di tre esercizi e di tre domande aperte: i primi intendono verificare la corretta padronanza delle relazioni formali; le seconde richiedono agli studenti di descrivere le modellizzazioni di oggetto e processo proposte nei vari argomenti della *pars destruens*.

Il compito è pensato per soddisfare sia le esigenze della scuola e dei docenti sia le esigenze di ricerca per cui il percorso è costruito. Gli esercizi, infatti, sono tipici esercizi da libro di testo e rispondono in modo preciso agli obiettivi d'apprendimento delle Indicazioni Ministeriali. Le domande aperte costituiscono una seconda tappa per fare il punto sul filo continuo-discreto.

RACCORDO

Il problema che si pone alla fine della *pars destruens* è elaborare una base teorica in grado di interpretare, in una visione unitaria, le nuove consapevolezze via via acquisite analizzando le fenomenologie che hanno messo in crisi il paradigma classico. Nel *raccordo* sono presentati i primi passi e i dibattiti che hanno portato alla ricerca della base teorica e del formalismo della fisica quantistica, descritto poi nella *pars construens*.

Gli argomenti trattati in questa seconda parte riguardano l'indeterminazione, la complementarità e l'“Esperimento più bello della Fisica”.

PARAGRAFO 2.3

La costruzione di una base teorica comincia con lo studio delle relazioni $\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$, note come “principio di indeterminazione di Heisenberg”, presentate nell’articolo “Sul contenuto intuitivo della cinematica e della meccanica quantistiche”, del 1927. L’indeterminazione è trattata per evidenziare alcuni aspetti della descrizione quantistica del mondo: l’introduzione di un tipo di probabilità non-epistemica, la necessità di rinunciare ad un principio causale di tipo classico e al concetto di traiettoria, l’introduzione del concetto che un sistema/oggetto quantistico non abbia proprietà definite da un unico valore e che ci siano coppie di grandezze tra di loro “coniugate”. In particolare, lo scopo della trattazione dell’indeterminazione è quella di arrivare ad argomentare, come dicono Lévy-Leblond e Balibar, che “While for classical entities, the physical properties take on unique and determined numerical values, for quantons they are characterised by numerical spectra, extended sets of numerical value.” (Lévy-Leblond & Balibar, 1990). Se, poi, si considerano coppie di variabili coniugate, esiste una “correlazione tra le ampiezze dei loro rispettivi spettri, per cui, per esempio, più è stretta la distribuzione spaziale, più è ampia la distribuzione della quantità di moto” (Lévy-Leblond, 2003). Per dare un’idea qualitativa del concetto di variabili coniugate, si propone agli studenti una metafora tratta da un testo molto noto di Brian Greene, la metafora del menù cinese:

“Per capire di che cosa si tratta [il principio di indeterminazione], pensiamo al menù a prezzo fisso di alcuni ristoranti cinesi: le pietanze sono elencate in due colonne, A e B. Se ordiniamo il primo piatto della colonna A, non possiamo ordinare il primo della colonna B; se ordiniamo il secondo piatto della colonna A, non possiamo ordinare il secondo della colonna B, e così di seguito. In questo modo il ristorante istituisce una sorta di dualismo alimentare, una complementarità culinaria (che impedisce, in particolare, al cliente di scegliere tutti i piatti più cari). Nei menù cinesi a prezzo fisso possiamo avere l’anatra alla pechinese o l’aragosta alla cantonese, ma non entrambe.

Il principio di indeterminazione di Heisenberg fa una cosa molto simile: a grandi linee, inserisce le caratteristiche fisiche del mondo microscopico in due elenchi distinti A e B. La conoscenza della prima caratteristica dell’elenco A compromette sostanzialmente la capacità di conoscere la prima della lista B; la conoscenza della seconda caratteristica dell’elenco A compromette la capacità di conoscere la seconda dell’elenco B, e così via. Inoltre, proprio come se ci fosse concesso di assaporare un piatto contenente un po’ di anatra alla pechinese e di aragosta alla cantonese, ma solo in proporzioni tali da corrispondere allo stesso prezzo totale, quanto più precisa è la nostra conoscenza di un

PARAGRAFO 2.3

aspetto della lista A, tanto meno precisa sarà quella dell'aspetto corrispondente della lista B. L'incapacità fondamentale di determinare simultaneamente tutte le caratteristiche dei due elenchi, ossia di stabilire con certezza tutte le proprietà del mondo microscopico, è l'indeterminazione illustrata dal principio di Heisenberg." (Greene, 2004)

D'accordo con i docenti del gruppo di lavoro, si è ritenuto utile anche prevedere, nel percorso, la trattazione dell'esperimento mentale del microscopio a raggi γ . Esso è infatti ancora presente in molti libri di testo e rappresenta il principale argomento utilizzato per introdurre, a scuola, l'indeterminazione, nonostante tutte le fondamentali critiche che, fin dal 1927, gli sono state rivolte. Si è quindi optato per trattarlo, per mostrarne le potenzialità ma soprattutto i limiti. Heisenberg, nell'ideare l'esperimento mentale, sceglie un approccio "operazionista" per cui posizione e velocità hanno significato solo se riferite a, o definite da, procedure necessarie per misurarle. Se da una parte l'analisi dell'esperimento mentale di Heisenberg evidenzia il problema della misura, dall'altro introduce la cosiddetta "interpretazione a disturbo" dell'indeterminazione, oggi non più accettata. Tale interpretazione risuona, cognitivamente, con l'idea che l'oggetto possieda di fatto un valore delle proprietà che si stanno misurando ed è il disturbo prodotto dall'atto della misura che introduce una forma di incertezza. In questo senso l'indeterminazione sarebbe di natura sperimentale e non ontologica. Per questo motivo la presentazione sull'indeterminazione prosegue con lo studio del dibattito tra Bohr e Heisenberg sull'origine di tale indeterminazione (anche attraverso brani o brevi video tratti da "Copenaghen" di Frayn, 2009). Nel dibattito Bohr contesta ad Heisenberg l'interpretazione a disturbo e afferma che l'indeterminazione sia la conseguenza del dualismo onda-corpuscolo, ritenuto da Bohr – e non più oggi – la vera base teorica per la costruzione del nuovo formalismo quantistico. A partire dalle obiezioni di Bohr si accenna al concetto di variabili coniugate come ulteriore enunciato della complementarità e si collega questa versione di complementarità all'indeterminazione, così come è stata già introdotta con le citazioni di Lévy-Leblond e Balibar.

Questo è l'avvio, e un cenno alle conclusioni, del secondo tema di questa parte di percorso: la complementarità, trattata mostrando l'evoluzione della sua interpretazione a partire da Bohr per arrivare a Lévy-Leblond. Per Bohr, così come emerge fin dal dibattito con Heisenberg, la complementarità era legata alla possibilità dell'oggetto di mostrare il comportamento corpuscolare o quello ondulatorio a seconda di come fosse congegnato l'esperimento attraverso cui lo si voleva osservare. Come l'interpretazione a disturbo di Heisenberg, anche

PARAGRAFO 2.3

questa versione di complementarità è una “trappola” semi-classica che rischia di bloccare gli studenti nel percorso verso la formulazione di una teoria quantistica.

Per discutere e approfondire la complementarità, si introduce quindi il dibattito storico tra Bohr e Einstein, avvenuto al V° Congresso Solvay nel 1927, riguardo l’esperimento mentale di interferenza di singola particella. Il dibattito è stato affrontato anche, e soprattutto, con l’obiettivo di aprire verso l’“Esperimento più bello della Fisica” e, quindi, per entrare nel vivo dell’interpretazione quantistica dal momento che, come diceva Feynman, l’esperimento mentale dell’interferenza da singolo oggetto quantistico porta al “cuore” della fisica quantistica.

Per la trattazione dell’“Esperimento più bello della Fisica”, così come per la *pars construens*, il percorso fa tesoro di quanto elaborato per il corso del PLS e, quindi, dei materiali e delle riflessioni sviluppate da Giorgio Lulli del CNR-IMM di Bologna. Questi materiali, oltre a descrivere e spiegare l’esperimento nella sua versione mentale, illustrano dettagliatamente anche la sua realizzazione pratica (che ha ottenuto il riconoscimento di “più bell’esperimento di fisica di tutti i tempi” dai lettori della rivista *Physics World* in un sondaggio del 2002). La realizzazione era ritenuta dallo stesso Feynman impossibile a causa delle difficoltà tecniche e invece l’esperimento fu realizzato per la prima volta nel 1976 da tre professori dell’Università di Bologna: Pier Giorgio Merli, Gian Franco Missiroli e Giulio Pozzi. Dall’esperimento di interferenza di elettroni singoli, mostrato agli studenti attraverso slide e materiali audio-visivi tratti dal DVD “Interferenza di elettroni - l’esperimento più bello”⁴ è possibile far emergere, 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. L’aspetto sorprendente è che, inviando un elettrone dopo l’altro, si forma sullo schermo, spot dopo spot, una figura di interferenza, ovvero l’alternarsi di zone chiare dello schermo, in cui sono riconoscibili i singoli spot, e zone scure, dovute all’assenza di spot. Questo risultato mostra che né la teoria ondulatoria né quella corpuscolare, prese singolarmente, sono capaci di spiegare tutti i fenomeni osservati: spot e figura di interferenza.

Attraverso l’“Esperimento più bello della Fisica” si mostra dunque agli studenti la necessità di dover operare un cambiamento radicale rispetto ai concetti della fisica classica, per poter spiegare l’esito dell’esperimento. Innanzitutto occorre ridefinire l’interferenza, che non avviene tra due fenomeni cooperanti, ma è dovuta all’invio di un singolo elettrone per volta

⁴ Il DVD, realizzato nell’ambito di un progetto MIUR dedicato alla diffusione della cultura scientifica, oltre alla versione rimasterizzata nel 2010 del Film “Interferenza di elettroni” (1976) contiene un documentario originale che racconta la storia dell’esperimento più bello, con testimonianze dalla viva voce dei protagonisti.

PARAGRAFO 2.3

che, come dimostra lo spot sullo schermo, non si divide in due. Occorre inoltre rivedere il modello di oggetto: nel quadro della fisica classica non è infatti comprensibile come possa manifestarsi un comportamento ondulatorio da parte di un oggetto (fotone o elettrone) che, una volta arrivato sullo schermo, mostra le caratteristiche di una particella.

Questi elementi, insieme all'indeterminazione, portano dunque a dover definire un nuovo modello di oggetto, l'oggetto quantistico, il cui comportamento non è riconducibile né al modello di onda né a quello di corpuscolo.

Le considerazioni sviluppate attraverso gli argomenti appena descritti conducono ad un ulteriore problema non incontrato in fisica classica, quello della visualizzabilità degli oggetti quantistici. Come afferma Schrödinger:

“l'immagine della materia, che devo costruire davanti ai vostri occhi, non esiste affatto, per il momento, ma ne esistono appena dei frammenti, con un valore di verità più o meno parziale. [...] Tanto nell'immagine corpuscolare quanto in quella ondulatoria c'è un contenuto di verità, al quale non possiamo rinunciare. Ma non sappiamo come fondere insieme queste due verità”. (Schrödinger, 1959)

Per mostrare quanto il problema sia cruciale e quanto oggi vada superato un semplicistico dualismo onda-corpuscolo, si suggerisce l'utilizzo di metafore, quali quelle del cilindro e dell'ornitorinco di Lévy-Leblond, presentate rispettivamente in Lévy-Leblond (1990) e Lévy-Leblond (2003).

Nella prima metafora, riassunta visivamente in figura 2.3.1, si paragona l'oggetto quantistico ad un cilindro. A seconda di come lo si osserva, il cilindro può “collassare” nel rettangolo o nel cerchio, ma risulta evidente come il cilindro non sia né il rettangolo, né il cerchio, né l'unione dei due. Il cilindro, sebbene possa essere ricondotto al rettangolo e al cerchio, possiede proprietà che né il rettangolo, né il cerchio possiedono, così come l'oggetto quantistico possiede proprietà (messe in luce per esempio dall'“Esperimento più bello della Fisica”) che né l'onda, né il corpuscolo possiedono.

PARAGRAFO 2.3



Figura 2.3.1 Metafora del cilindro di Lévy-Leblond.

La seconda metafora, quella dell'ornitorinco, è simile alla metafora del cilindro e si basa sulla storia vera della nomenclatura zoologica di questo animale, nominato in un primo momento "talpanatra". In questo modo si fornisce agli studenti una seconda immagine intuitiva e affascinante in grado di far capire come l'oggetto quantistico non sia né onda, né corpuscolo. La metafora dell'ornitorinco è così descritta da Lévy-Leblond:

"That the true nature of quantum objects has long been misunderstood is proved by their still all too common description in terms of an alleged "wave-particle duality". It must be remarked first of all that this formulation is at best ambiguous. For it may be understood as meaning either that a quantum object is at once a wave and a particle, or that it is sometimes a wave and sometimes a particle. Neither one of these interpretations in fact make sense. "Wave" and "particle" are not things but concepts, and incompatible ones; as such, they definitely cannot characterize the same entity. While it is true that quantum objects may in some cases look like waves, and in other cases like particles, it is truer still that in most situations, particularly the ones explored by the elaborate modern experiments, they resemble neither one nor the other. The situation here is reminiscent of that encountered by the first explorers of Australia, when they discovered strange animals dwelling in brooks. Viewed from the forefront, they exhibited a duckbill and webbed feet, while, seen from behind, they showed a furry body and tail. They were then dubbed "duckmoles". It was later discovered that this "duck-mole duality" was of limited validity, and that the zoological specificity of these beasts deserved a proper naming, which was

PARAGRAFO 2.3

chosen as “platypus”. Bunge’s proposal to call them “quantons”, building on the common terminology (electrons, photons, nucleons, etc.) and extending it to a common categorization, is most to the point, and it is to be hoped that this terminology gradually gains ground.” (Lévy-Leblond, 2003).

Le metafore rivelano come l’oggetto quantistico non sia né a volte onda a volte corpuscolo, né sia onda sia corpuscolo; l’oggetto quantistico è né onda né corpuscolo e merita dunque un nome tutto suo: “Quantone” (Lévy-Leblond, 2003). Attraverso questi aspetti è possibile 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.

Per completare l’analisi dell’esperimento mentale di Einstein, vengono mostrate e discusse situazioni sperimentali in cui si inserisce un rivelatore all’interno dell’apparato sperimentale con l’obiettivo di rivelare da quale cammino (ad esempio, da quale fenditura) passi il quantone, senza alterarne il moto. I risultati degli esperimenti mostrano che nel momento in cui si introduce un rivelatore, anche se questo non perturba l’oggetto e anche se non si registrano le misure, l’interferenza scompare. In questo modo si sottolinea agli studenti quanto i risultati rivelino una sorta di interdipendenza tra il quantone, il modo in cui è rivelato e l’insieme dell’apparato sperimentale con cui si effettua la misura. Osservare e misurare in fisica quantistica significa pertanto costruirsi un modo di guardare ad una situazione per cui apparato di misura e oggetto stesso sono “entangled” ed è solo con l’atto stesso della misura che oggetto e apparato si separano. Questo è il primo punto in cui si introduce, qualitativamente, il concetto di non-separabilità quantistica, che si ritiene possa poi essere sviluppato una volta introdotto anche formalmente il concetto di stato e di sovrapposizione quantistici.

TEMA

Un’altra attività originale progettata per questo percorso in collaborazione con Malgieri e il gruppo di Pavia è la stesura di un componimento scientifico di italiano, tipologia B.

Il tema è riportato in appendice C. La somministrazione del tema richiede la collaborazione della professoressa di italiano e ha, come scopo, quello di favorire un processo di riflessione individuale circa gli strumenti e le vie per accettare una teoria e costruirsi la sensazione di

PARAGRAFO 2.3

capirla. Il tema pertanto rappresenta una tappa importante del filo sull'intuibilità e, come si vedrà, ha rappresentato un momento di particolare soddisfazione per gli studenti.

PARS CONSTRUENS

Lo scopo di questa terza e ultima parte è quello di costruire un nuovo linguaggio in grado di restituire la logica dell'interpretazione quantistica. Il messaggio principale che si punta a trasmettere è che, benché diversa dall'interpretazione classica e apparentemente sorprendente, la fenomenologia quantistica è interpretabile logicamente, ha una "sua logica".

Per passare questo messaggio la *pars construens* si apre con una metafora tratta dal testo di McIntyre, Manogue & Tate (2013). La metafora sarà anche il filo conduttore, ossia sarà un riferimento costante nell'analisi della fenomenologia quantistica che si discuterà in questa parte.

“Erwin aveva una collezione di calzini molto semplice:

- rossi o blu, per andare a scuola o per giocare a pallone
- corti o lunghi, per i pantaloni o i pantaloncini.

Erwin teneva i calzini in due cassetti. In uno teneva i calzini rossi e nell'altro quelli blu. Riteneva di poter capire se erano lunghi e corti semplicemente toccandoli. Sfortunatamente questo modo di organizzare i calzini non funzionava. Ogni volta che dal cassetto dei calzini rossi, estraeva due calze lunghe o due calze corte, c'era una probabilità del 50% che ognuno dei due fosse rosso o blu. I risultati dal cassetto “blu” erano gli stessi.

I calzini sembravano aver dimenticato la proprietà che Erwin aveva determinato precedentemente di essere rossi o blu. Erwin quindi decise di organizzare i calzini nei cassetti a seconda della lunghezza. C'era il cassetto dei calzini lunghi e quello dei calzini corti. Quando però da uno dei due cassetti andava a prendere due calze rosse o due calze blu, la probabilità che ognuna di esse fosse lunga o corta era del 50%. Avevano “dimenticato” la proprietà di essere lunghi o corti.” (McIntyre, Manogue & Tate, 2013)

La sistematizzazione formale dei concetti già introdotti si sviluppa seguendo l'approccio messo a punto dalla professoressa Elisa Ercolessi, dell'Università di Bologna, per il Corso-

PARAGRAFO 2.3

Laboratorio del PLS⁵. L'approccio prevede innanzitutto un'analisi fenomenologica di esperimenti alla Stern e Gerlach. Per prima cosa si illustra l'utilizzo degli atomi di argento e la forma del magnete (cfr. figura 2.3.2) che permette di generare un campo magnetico, lungo l'asse z, non uniforme e dunque di deviare ciascun atomo del fascio con una forza pari a:

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

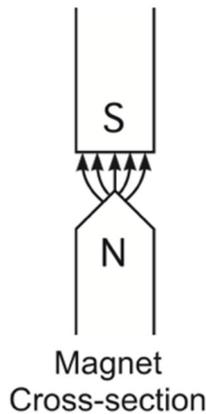


Figura 2.3.2 Forma dei magneti in un apparato di Stern e Gerlach.

Si studiano quindi i risultati dell'esperimento: poiché sullo schermo non si ottiene una distribuzione continua degli atomi deviati dal magnete, ma solo due spot (cfr. figura 2.3.3), si assume che gli atomi possiedono un momento magnetico intrinseco (lo spin) a valori discreti.

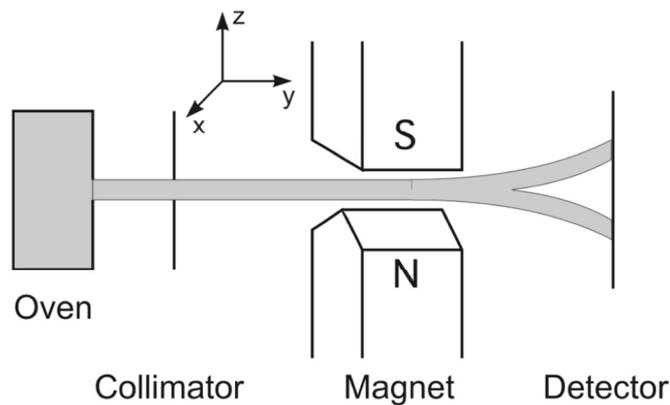


Figura 2.3.3 Il formarsi di due spot, inviando atomi d'argento, in un apparato di Stern e Gerlach.

In particolare, per elementi come l'argento, i risultati portano a ritenere che lo spin possa assumere due soli valori. L'apparato di Stern e Gerlach può dunque da "analizzatore"

⁵ Anche le immagini riportate in queste pagine sono tratte dalle slide utilizzate dalla prof.ssa Ercolessi nei corsi PLS (si veda, ad esempio, <http://l-esperimento-piu-bello-della-fisica.bo.imm.cnr.it/didattica/materialepls2014.html>)

PARAGRAFO 2.3

in grado di separare in due il fascio e a ciascun fascio può essere conferito uno stato a spin su o giù. Si guida così gli studenti a guardare il fenomeno per stati, la base del formalismo quantistico. Ripetendo l'esperimento con molti atomi, si osserva che 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 (cfr. figura 2.3.4)

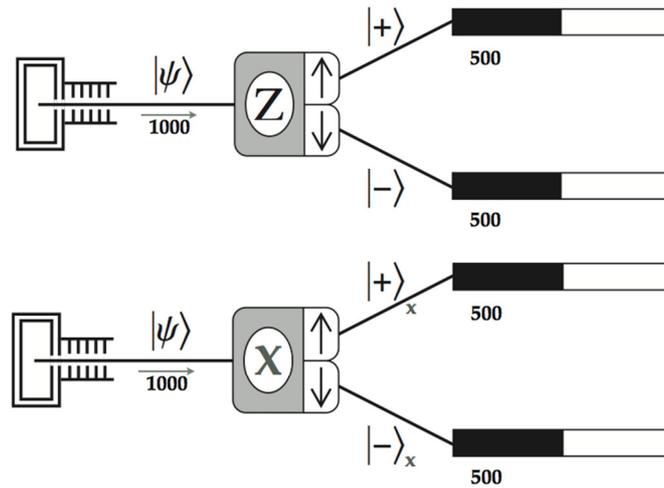


Figura 2.3.4 Dati di realtà ottenuti da esperimenti di Stern e Gerlach.

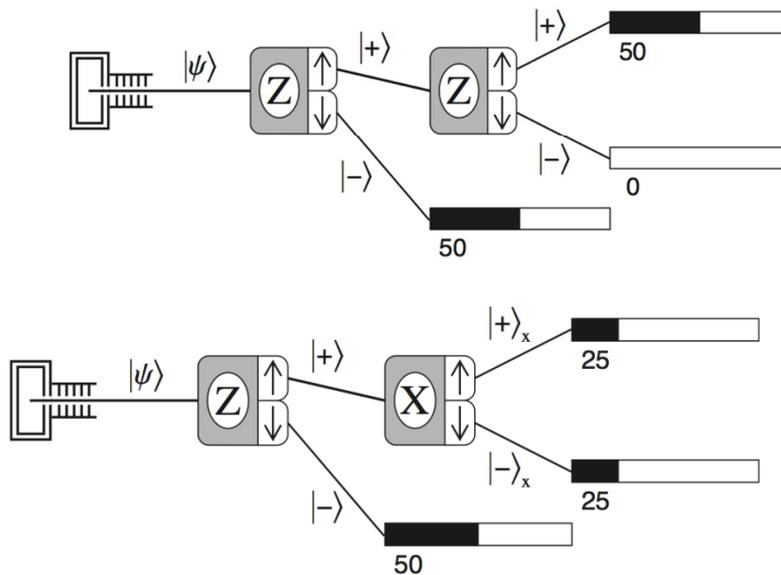


Figura 2.3.5 Configurazioni degli esperimenti di Stern e Gerlach.

PARAGRAFO 2.3

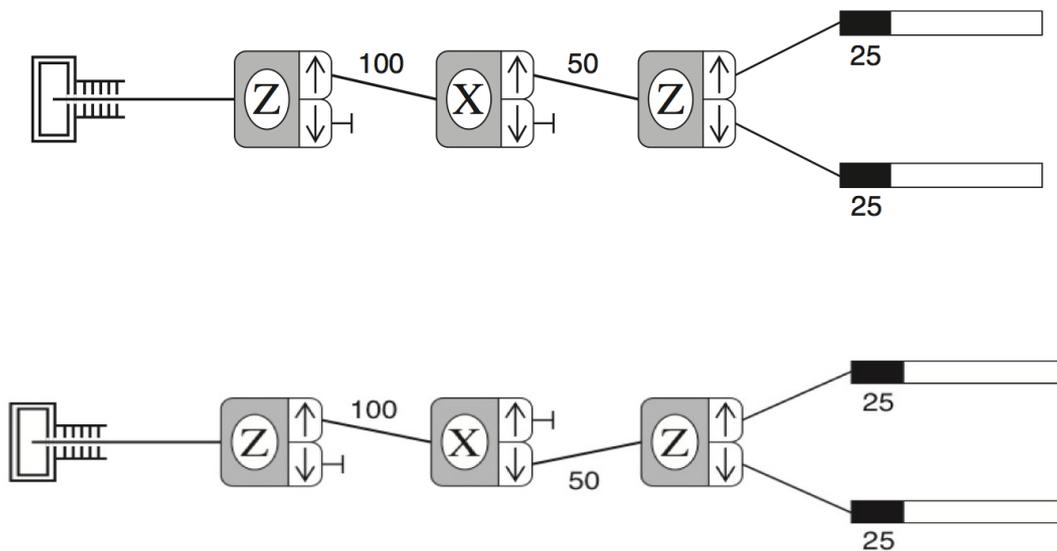


Figura 2.3.6 Configurazioni degli esperimenti di Stern e Gerlach.

Agli studenti sono presentate e discusse diverse configurazioni di apparati di Stern e Gerlach (figure 2.3.4, 2.3.5 e 2.3.6), in modo da sottolineare diversi elementi di realtà (e quindi proprietà del sistema) e la progressiva costruzione di una logica interpretativa: la costruzione delle ipotesi circa la probabilità di ottenere una misura su un singolo oggetto a partire dall'osservazione sperimentale della distribuzione statistica di un fascio di oggetti; l'introduzione del concetto di preparazione di un sistema; la costruzione del vettore di stato come strumento che permette di raccogliere tutte le informazioni che si possono avere sul comportamento dell'oggetto in relazione con un dato apparato di misura e, quindi, la costruzione del concetto di stato come sovrapposizione di alternative classiche; il riconoscimento delle componenti di spin lungo z e lungo x come variabili coniugate e, quindi, il tema della "dimenticanza" dello stato precedente nel collasso in un nuovo stato (qualora si abbiano variabili coniugate per le quali, quindi, vale una relazione di indeterminazione). Per aiutare gli studenti a comprendere quest'ultima proprietà, classicamente anti-intuitiva, si riprende la metafora dei "Calzini di Erwin" e la si confronta con i risultati sperimentali.

La scelta iniziale di Erwin di avere calzini di colore rosso viene "dimenticata" nel momento in cui Erwin vuole distinguere i calzini rossi in lunghi o corti; allo stesso modo la selezione iniziale per esempio degli spin $|+\rangle_x$ ⁶ viene persa in seguito alla selezione degli spin lungo un asse diverso grazie ad un secondo apparato di Stern e Gerlach orientato lungo questo secondo asse.

⁶ Si indicano con $|+\rangle$ e con $|-\rangle$ i due possibili stati dello spin lungo un certo asse.

PARAGRAFO 2.3

Le configurazioni proposte via via si complicano in modo da preparare gli studenti all'ultima configurazione, in cui è ricreato un apparato sperimentale composto da quattro dispositivi Stern e Gerlach inseriti in successione, figura 2.3.7.

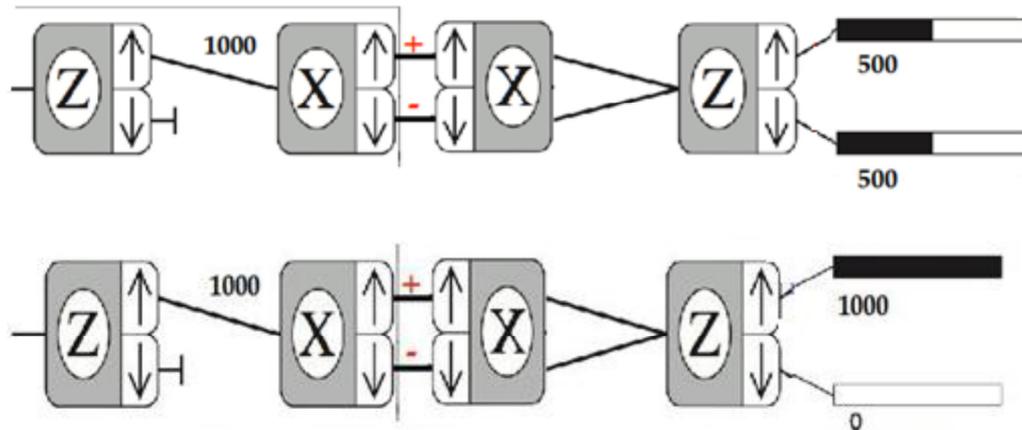


Figura 2.3.7 Quattro apparati Stern e Gerlach posti in successione. In alto è riportata la previsione classica, in basso l'esito dell'esperimento.

Attraverso questa configurazione viene mostrato agli studenti il definitivo punto di rottura con la fisica classica, nonché uno dei principi alla base della teoria quantistica: il principio di sovrapposizione quantistica. Dopo aver attraversato i due apparati X in figura 2.3.7, l'atomo giunge in Z in uno stato di sovrapposizione e vi resta fino a quando attraversa l'ultimo apparato Z. Solo a quel punto lo stato di sovrapposizione “collassa” e viene rilevato sullo schermo in uno dei due possibili stati.

Questo è il punto più delicato del percorso, in cui si richiede allo studente di fare il passo decisivo per entrare nel “mondo quantistico” e di essere disposto a comprenderlo attraverso la costruzione del concetto di ampiezza di probabilità, che sta al cuore della nuova logica quantistica.

Innanzitutto si mostra allo studente come attraverso la probabilità classica non sia possibile prevedere l'esito della misura. Partendo dai vettori e dall'algebra lineare si introduce poi lo stato di sovrapposizione come il vettore di stato: $|+\rangle_z = \cos\theta|+\rangle_x + \sin\theta|-\rangle_x$; dove θ è l'angolo compreso tra la direzione del campo magnetico del primo apparato, x, e quella del secondo apparato, z. In questo modo si introduce anche il concetto di ampiezza di probabilità. Se, come in figura, si utilizzano apparati in cui il campo magnetico varia di 90° , si ottiene:

PARAGRAFO 2.3

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

Per poter arrivare alle probabilità finali secondo questo nuovo formalismo e senza ricorrere alle matrici, si introducono le tre regole dell'ampiezza di probabilità:

1. In successione le ampiezze di probabilità si moltiplicano;
2. L'ampiezza finale è la somma delle possibili alternative;
3. La probabilità finale è il quadrato dell'ampiezza finale.

La procedura, differente dal caso classico e mostrata in figura 2.3.8, mostra come il concetto di ampiezza di probabilità porti a rinunciare all'immagine del cammino e permetta di interpretare gli esiti della misura.

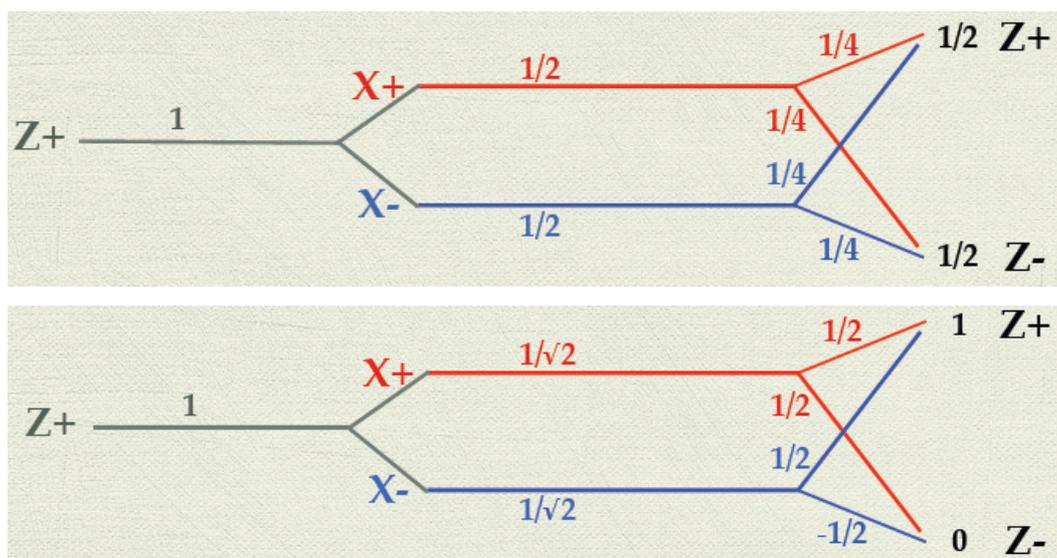


Figura 2.3.8 Calcolo classico, sopra, e calcolo quantistico, sotto, della probabilità per l'esito del quarto apparato di Stern e Gerlach.

Questa parte di percorso si conclude con l'analisi dell'origine della probabilità quantistica. In questo modo si vuole aiutare gli studenti a non interpretare il ricorso alla probabilità come dovuto ad una impossibilità sperimentale di conoscere lo stato dell'oggetto quantistico, interpretazione che li bloccherebbe in una visione semi-classica; la probabilità quantistica deve essere interpretata come proprietà intrinseca, ontologica, dell'oggetto quantistico.

PARAGRAFO 2.3

Per mostrare agli studenti come quello appena costruito sia un formalismo matematico generale e non costruito *ad hoc* per l'esperimento di Stern e Gerlach, si ricorre ad un secondo esperimento, quello dell'interferometro di Mach-Zehnder. Anche questo esperimento, come quello di Stern e Gerlach, ricorre ad un apparato estremamente semplice dal punto di vista concettuale, alla portata dunque degli studenti.

L'apparato sperimentale è costituito da una sorgente che emette fotoni singoli contro una lastrina di vetro semiriflettente, chiamata beam-splitter, e che equivale dunque al magnete dell'esperimento di Stern e Gerlach. Altre due lastrine di vetro permettono di far arrivare i fotoni verso due rivelatori che ricevono i fotoni trasmessi e quelli riflessi dal beam-splitter. In figura 2.3.9 sono riportati due diversi set-up, uno con un solo beam-splitter e l'altro con due beam-splitter e i rispettivi esiti sperimentali. Attraverso il principio di sovrapposizione e l'ampiezza di probabilità è possibile giustificare l'esito sperimentale del secondo set-up, non ricavabile classicamente.

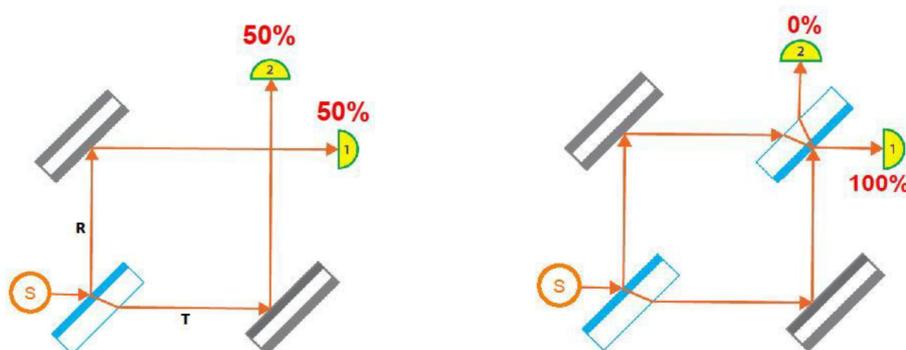


Figura 2.3.9 Due apparati di Mach-Zehnder: a sinistra è presente un solo beam-splitter, a destra ne sono presenti due.

ATTIVITA' CONCLUSIVA

L'attività conclusiva, riportata in appendice F, ha lo scopo di far applicare agli studenti le nozioni incontrate in quest'ultima parte del percorso e farli riflettere su come i nuovi concetti quantistici si differenzino da quelli classici. In questo modo sono recuperati e conclusi i due fili concettuali del percorso.

L'attività è stata progettata insieme a Malgieri e al gruppo di Pavia ed è articolata in tre parti. Sono presenti infatti l'esperimento a raggi γ , l'esperimento di Mach-Zehnder e l'esperimento di interferenza di singolo elettrone. Per il primo esperimento si chiede agli studenti quali punti non siano più accettabili come scientificamente corretti. Per il secondo esperimento si richiede di descrivere e analizzare formalmente due configurazioni di Mach-Zehnder, entrambe con

PARAGRAFO 2.3

due beam-splitter; nella seconda configurazione in uno dei due cammini è presente un terzo rivelatore non perturbativo. Sono presenti inoltre domande aperte sulle proprietà quantistiche di oggetto e processo che emergono dagli esperimenti e sull'intuibilità della fisica quantistica. Infine viene proposto l'esperimento mentale di Einstein per arrivare a descriverne la fenomenologia attraverso il formalismo e il linguaggio costruito nella *pars construens*, in modo da acquisire maggiore consapevolezza sulle differenze tra i modelli classici di onda e corpuscolo e il modello quantistico di quantone.

CAPITOLO 3

La sperimentazione

In questo capitolo vengono forniti un quadro complessivo della classe oggetto di questa sperimentazione (paragrafo 3.1), la scansione temporale degli argomenti e delle attività proposti nel percorso (paragrafo 3.2) e la metodologia e gli strumenti di raccolta dati progettati per poter rispondere alle domande di ricerca riportate nel capitolo 2 (paragrafo 3.3). I risultati dell'analisi dei dati verranno discussi nel capitolo 4.

3.1 CONTESTO DELLA RICERCA

La costruzione del percorso, avviata a Dicembre 2014, è terminata a Maggio 2015. Gli incontri del gruppo di progettazione, svolti inizialmente ogni tre settimane, si sono svolti ogni due settimane a partire da Marzo 2015 fino alla fine dell'anno scolastico.

Le classi V in cui ha avuto luogo la sperimentazione sono state tre: una classe del liceo scientifico - indirizzo musicale "A. Einstein" di Rimini (docente Paola Fantini, laureata in fisica); due classi di liceo scientifico - indirizzo tradizionale, una del liceo "A. Righi" di Bagno di Romagna (docente Laura Branchetti), e l'altra del liceo scientifico – sezione scientifica "Archimede" di San Giovanni in Persiceto (docente Elisa Garagnani); entrambe laureate in matematica. Tutte e tre le insegnanti hanno partecipato alla progettazione del percorso.

PARAGRAFO 3.1

Il contesto scelto per la sperimentazione analizzata in questa tesi è la classe VA del liceo scientifico “A. Einstein” di Rimini, dove era docente Paola Fantini che collabora da anni con il gruppo di ricerca in Didattica della Fisica dell’Università di Bologna.

La classe fa parte di un percorso di liceo scientifico a indirizzo musicale; gli studenti hanno avuto da orario tre ore di fisica a settimana. La prof.ssa Fantini ha insegnato fisica e matematica il IV e il V anno. Il percorso è stato avviato il 6 Marzo 2015 e concluso il 5 Giugno 2015, con un totale di 31 ore dedicate alle lezioni, alle interrogazioni e alle varie attività previste dalla sperimentazione. Tutte le attività sono state svolte dalla docente Fantini e hanno visto la partecipazione dell’autore di questa tesi, nel ruolo di osservatore. Come descritto dalla docente, la classe, composta da 23 studenti (7 femmine e 16 maschi), “è una classe atipica per un liceo scientifico, l’impegno nello studio non è costante e, buona parte degli studenti non mette in atto quella profondità di pensiero e disciplina intellettuale richiesta per portare avanti un percorso di fisica. Molti degli studenti vivono lo studio in maniera discontinua e breve, senza darsi il tempo per apprendere. Pochi di loro vivono l’apprendimento della fisica in modo non trasmissivo, intervenendo spontaneamente durante la lezione con osservazioni o domande.”

Come si evince dalle date, il percorso di fisica quantistica è stato affrontato nell’ultima parte del secondo quadrimestre, immediatamente prima della prova di maturità. Questo ha rappresentato un problema innanzitutto per l’insegnante che, nel portare avanti il percorso di fisica quantistica, ha dovuto evitare che gli studenti perdessero quanto precedentemente studiato in elettromagnetismo e relatività. Per questo motivo le lezioni sulla fisica quantistica sono terminate il 20 Maggio con lo studio degli esperimenti di Stern e Gerlach e l’introduzione del formalismo matematico della fisica quantistica, dedicando le successive ore di lezione al ripasso del programma di quinta.

Negli studenti la vicinanza della fine dell’anno scolastico e della prova di maturità ha avuto due effetti negativi: innanzitutto ha fatto sì che gli studenti avessero meno tempo da dedicare allo studio della fisica quantistica, inoltre ha fatto sì che buona parte degli studenti non fosse disposta a fare lo sforzo intellettuale richiesto dall’ultima parte del percorso.

3.2 SCANSIONE TEMPORALE DEGLI INCONTRI E MATERIALE UTILIZZATO

A determinare la scansione temporale del percorso nella classe VA sono stati: l’esigenza di dedicare molte ore alla *pars destruens* (sia a causa dei vincoli ministeriali, sia in preparazione

PARAGRAFO 3.2

al compito in classe), i limiti di tempo per sviluppare il percorso di fisica dovuti all'imminente prova di maturità e la difficoltà degli studenti nel portare avanti il percorso.

Questa difficoltà degli studenti ha fatto sì che la docente dovesse continuamente riprendere il filo del discorso durante la lezione (in quasi tutte le lezioni il primo quarto d'ora è stato utilizzato per recuperare quanto trattato nelle lezioni precedenti). Questo ha ridotto la disponibilità temporale e non ha permesso alla docente di creare in classe momenti di dialogo collettivo in cui gli studenti potessero confrontarsi coi compagni di classe. L'unico momento di dialogo collettivo è stato all'inizio del percorso con la discussione in classe delle risposte al questionario iniziale. La mancanza di momenti di dialogo collettivo potrebbe essere alla base di alcuni risultati circa le dinamiche di classe riportati e discussi nel capitolo 4.

Il percorso si è dunque svolto secondo le tempistiche riportate in tabella 3.2.1.

Tabella 3.2.1 Tabella in cui sono riportate la data e le ore dedicate in classe alle tre parti e alle attività previste dal percorso.

Data	Argomenti e attività	Ore
6/3	Discussione del questionario iniziale	[1h]
Dal 2/4 al 22/4	Lezioni sulla pars destruens	[9h]
Dal 29/4 al 9/5	Lezioni sul raccordo	[4h]
29/4	Seminario Lulli a Cesena sull'“Esperimento più bello della Fisica”	[3h]
6/5	Compito su pars destruens	[1h]
8/5	Tema	[3h]
Dal 15/5 al 20/5	Lezioni sulla pars construens (Stern e Gerlach)	[2h]
Dal 21/5 al 4/6	Interrogazioni su elettromagnetismo, relatività e fisica quantistica	[7h]
28/5	Consegna del Questionario sociometrico	
Dal 3/6 al 5/6	Interviste a 10 studenti	[40 minuti ognuno]
5/6	Compito su Stern e Gerlach	[1h]

Rispetto al percorso riportato nel paragrafo 2.3, si è dovuto rinunciare alla parte relativa agli esperimenti di Mach-Zehnder per dedicare le ultime due settimane di lezione ad un ripasso dell'intero programma di fisica di quinta superiore. Questo ha fatto sì che per l'attività conclusiva non sia stato utilizzato il compito descritto al termine del paragrafo 2.3, ma un test concettuale su Stern e Gerlach, descritto nel prossimo paragrafo.

PARAGRAFO 3.2

Per il resto, il percorso è stato svolto secondo le modalità pensate in fase di progettazione.

3.3 STRUMENTI DI RACCOLTA DATI E METODI DI ANALISI

Al fine di rispondere alle domande di ricerca, sono stati costruiti e utilizzati diversi strumenti di raccolta dati. La varietà di tali strumenti nasce dalla necessità di ottenere informazioni circa le varie dimensioni coinvolte in un ambiente di apprendimento e necessarie ai fini dell'analisi: la comprensione dei concetti (Dimensione Disciplinare – DD), lo sviluppo di una propria strada per accedere e dare significato alla conoscenza (Dimensione Idiosincratica – DI) le competenze epistemologiche e metacognitive (Dimensione Epistemologica – DE), il ruolo sociale dello studente, le dinamiche collettive, le strategie di orchestrazione (Dimensione Sociale – DS). La tabella 3.3.1 fornisce il quadro degli strumenti utilizzati per la raccolta dati. Si osserva come per ciascuna dimensione siano stati utilizzati più sorgenti di dati, in modo da triangolare le osservazioni e conferire attendibilità ai dati (Anfara, Brown & Mangione, 2002).

Tabella 3.3.1 Quadro degli strumenti di raccolta dati.

Legenda della tabella: IND: individuale, COL: collettivo; PD (Pars Destruens), R (Raccordo), PC (Pars Construens), T (durante Tutto il percorso); DD (Dimensione Disciplinare), DI (Dimensione Idiosincratica); DE (Dimensione Epistemologica), DS (Dimensione Sociale).

Strumenti	Momento di utilizzo				Dimensione indagata				
	PD	R	PC	T	IND	DI	DE	DS	COL
Questionario iniziale	x				x	x	x	x	x
Compito sulla pars destruens	x				x				
Tema		x			x	x			
Questionario Sociometrico			x				x	x	
Compito sugli esperimenti di Stern e Gerlach			x		x	x	x		
Interviste			x		x	x	x	x	
Diario di bordo				x	x	x	x	x	x
Griglia di osservazione				x	x	x	x	x	x
Registrazioni audio delle lezioni				x	x	x	x	x	x

PARAGRAFO 3.3

La quinta dimensione dell'*appropriazione* (Indicatore D) viene valutata recuperando le informazioni raccolte attraverso i vari strumenti riportati in tabella 3.3.1 e analizzando tali dati alla luce di quanto emerso nell'intervista dello studente.

Di seguito vengono descritti obiettivi e struttura dei vari strumenti.

Questionario iniziale (Appendice A)

Dimensioni coinvolte: DD, DI, DE, DS.

Il questionario iniziale, consegnato e discusso all'avvio delle attività, è suddiviso in due parti: lo scopo della prima parte è quella di far recuperare agli studenti i modelli di oggetto e processo osservati in fisica classica, distinguendone le proprietà continue e/o discrete (avviando così il filo sul continuo e discreto). La seconda parte intende far ragionare gli studenti sui vari modi possibili per capire e dare significato ad una teoria fisica, per esempio, tramite immagini, analogie, esperimenti e analisi di dati di realtà e/o modelli matematici.

Alla compilazione individuale del questionario è seguita una discussione collettiva, guidata da Levri. Lo scopo della discussione collettiva è stato far emergere le diverse visioni degli studenti, far sì che gli studenti si rendessero conto della ricchezza delle interpretazioni possibili, far sì che gli studenti familiarizzassero con termini come modello, oggetto e processo e che si iniziasse a creare un clima di apprendimento collettivo che favorisse l'*appropriazione*.

Compito sulla *pars destruens* (Appendice B)

Dimensione coinvolta: DD.

Il compito sulla *pars destruens*, effettuato al termine di tale parte, presenta tre quesiti, rispettivamente su corpo nero, l'effetto fotoelettrico e il modello atomico di Bohr. Ogni quesito è formato da due categorie di problemi: gli esercizi e le domande aperte. Con gli esercizi si è voluto valutare se e come il percorso fosse stato in grado di sviluppare quelle conoscenze e quelle abilità minime richieste dalle Indicazioni Ministeriali.

Con le domande aperte, che rappresentano una novità per la classe VA, si è voluto valutare la comprensione dei passaggi argomentativi e interpretativi che hanno portato Planck, Einstein e Bohr a proporre i loro modelli di oggetto e processo e le novità che hanno introdotto.

I voti degli studenti, oltre a fornire informazioni sulle competenze disciplinari di ciascuno studente, permettono di ottenere un quadro sul livello disciplinare raggiunto dalla classe.

PARAGRAFO 3.3

Tema (Appendice C)

Dimensioni coinvolte: DD, DI.

Il carattere discorsivo del *raccordo* e la vicinanza della prova di maturità ha portato a scegliere come attività di valutazione della comprensione di questa seconda parte del percorso la stesura di un elaborato scientifico, simulando la prima prova della maturità (tema scientifico – tipologia B: saggio breve o articolo di giornale).

La consegna era: “Fisica quantistica e rappresentazione della realtà: possibili strade per l’immaginazione e l’intuibilità”. Con questo strumento si è voluto recuperare il filo di riflessione sull’intuibilità, riportando brani in cui si espongono le difficoltà dei fisici sull’intuibilità della fisica quantistica e possibili approcci alla fisica quantistica. I brani forniti a supporto del tema sono infatti affermazioni dei protagonisti di questa seconda parte del percorso: Einstein, Bohr, Schrödinger, Heisenberg, Dirac e il contemporaneo Lévy-Leblond (riportati in appendice C).

Attraverso la proposta di un tema scientifico si è cercato di far uscire gli studenti dal contesto puramente disciplinare e di farli sentire liberi di legare al contenuto scientifico una visione personale, idiosincratica. Alla stesura, vaglio e correzione dell’elaborato hanno partecipato anche alcuni docenti di italiano, commissari interni all’esame di stato nell’anno scolastico 2014-15.

Compito sull’esperimento di Stern e Gerlach (Appendice E)

Dimensioni coinvolte: DD, DE.

Attraverso questo compito si è voluta valutare la comprensione degli studenti dell’ultima parte del percorso. Nel compito si chiede agli studenti di descrivere le diverse configurazioni sperimentali studiate in classe e di giustificare, ricorrendo al formalismo matematico, l’esito della configurazione di Stern e Gerlach non spiegabile attraverso la probabilità classica. Si richiede inoltre di descrivere le proprietà dell’oggetto quantistico che emergono da questi esperimenti e di argomentare come poter rendere intuibili tali proprietà alla luce delle metafore incontrate.

Il compito è stato affrontato dagli studenti l’ultimo giorno di lezione, senza preavviso e con la consapevolezza che non sarebbe stato valutato dall’insegnante. Tali modalità di somministrazione del compito hanno fatto sì che le risposte degli studenti fossero tutte molto simili e poco accurate, non permettendo di ottenere informazioni significative dal punto di vista della ricerca.

Per questo motivo tale compito non verrà discusso nel capitolo 4, dove si presenta l’analisi dei dati ottenuti dai vari strumenti.

PARAGRAFO 3.3

Questionario sociometrico (Appendice D)

Dimensioni coinvolte: DE, DS.

Il questionario sociometrico rappresenta uno strumento di ricerca originale, appositamente progettato dall'autore di questa tesi per rispondere agli obiettivi dello studio.

Lo scopo del questionario sociometrico è quello di ottenere informazioni sugli approcci e sul livello di autorevolezza in fisica che ciascuno studente ha agli occhi della classe. In questo modo è possibile ottenere informazioni sia sull'eventuale ruolo sociale che contraddistingue uno studente, sia sull'approccio a cui ricorre ciascuno studente per comprendere la fisica.

Per ottenere tali informazioni il questionario si compone di due parti: la prima parte è dedicata agli approcci, la seconda alle autorevolezze degli studenti.

Nella prima parte del questionario, dopo una breve descrizione della gamma di approcci che si ritiene sia possibile avere nei confronti della fisica, viene chiesto a ciascuno studente di attribuire a se stesso al massimo due dei cinque approcci proposti, quelli che lo studente riconosce di avere nei confronti della fisica, e di riportare per ciascun approccio il nome di al massimo tre compagni di classe che nelle ore scolastiche ed extrascolastiche hanno manifestato tale approccio alla disciplina.

La seconda parte del questionario sociometrico ha lo scopo di indagare l'autorevolezza che alcuni studenti hanno acquisito nel tempo agli occhi dei compagni di classe e dunque di ottenere informazioni sulle dinamiche di classe. Per tale indagine è stato utilizzato, riadattandolo agli scopi di questa tesi, il sociogramma, strumento tipicamente utilizzato in sociometria, scienza che studia la dinamica dell'interazione e della socialità nei gruppi. L'analisi sociometrica ordinaria si concentra sia sugli aspetti socio-affettivi di stima, affetto, simpatia o antipatia che si creano tra gli studenti della classe, sia su quelli socio-funzionali di collaborazione e competizione. Per ottenere informazioni su questi aspetti sono rivolte allo studente domande progettate secondo i criteri che verranno descritti a breve; allo studente si richiede di rispondere esprimendo per ciascuna domanda al massimo tre preferenze ovvero scrivendo i nomi di al massimo tre compagni di classe che secondo lo studente soddisfano al meglio ciascuna domanda del questionario. La possibilità di esprimere tre preferenze serve per evitare che nelle risposte la componente affettiva dei rapporti prevalga su quella dell'autorevolezza. Per maggiore chiarezza se ne riporta una tipicamente usata nelle indagini sociometriche e che è stata utilizzata come modello per formulare le domande della seconda parte del questionario:

“Tra i tuoi compagni di classe quali sono quelli con cui vorresti costituire un gruppo di studio per prepararti al prossimo compito in classe di matematica?” (Pennella, 2009)

PARAGRAFO 3.3

Le domande delle indagini sociometriche devono rispettare i seguenti criteri:

- 1) circoscrivere l'ambito delle scelte ai soli componenti della classe (questo è molto importante se non si vuole rischiare di avere risposte inutilizzabili o di fantasia);
- 2) fare riferimento in modo chiaro a situazioni concrete effettivamente eseguibili e direttamente connesse alla realtà quotidiana in cui gli studenti sono inseriti (non aliena, dunque, all'esperienza degli studenti);
- 3) specificare il tipo e le finalità della situazione associativa proposta.

Per gli obiettivi di questa tesi, le domande di questa seconda parte del questionario sociometrico riguardano prevalentemente gli aspetti socio-funzionali dei rapporti tra gli studenti, essendo l'interesse rivolto al ruolo socio-disciplinare che ciascuno studente occupa all'interno della classe, ovvero all'autorevolezza di ciascuno studente in merito, per esempio, alla risoluzione degli esercizi o allo svolgimento delle attività di laboratorio. Il ruolo socio-disciplinare si ricollega infatti all'indicatore E dell'*appropriazione*, quello associato al modo in cui l'idea idiosincratica posiziona lo studente all'interno della realtà di classe conferendogli un ruolo ben preciso e, viceversa, al modo in cui le dinamiche di classe favoriscono lo sviluppo dell'idea idiosincratica (Levrini et al, 2014).

Sempre per gli obiettivi di questa tesi, l'analisi delle risposte non ricorre al sociogramma, grafo che rappresenta il network di relazioni tra i compagni di classe, ma ad un grafico a barre percentuale (il ricorso a tale strumento avviene anche per le risposte alla prima parte del questionario sociometrico).

Audio registrazioni, diario di bordo e griglia di osservazione (Appendici I e H)

Come riportato in precedenza, l'autore di questa tesi ha assistito a tutte le lezioni e le attività svolte durante la sperimentazione, audio-registrando e annotando sul diario di bordo gli interventi e le discussioni avvenute in classe. Oltre al diario di bordo, che ha permesso di annotare gli interventi degli studenti, l'autore di questa tesi ha utilizzato per l'osservazione in classe anche una griglia di osservazione: la griglia ha predisposto lo sguardo del ricercatore a rilevare elementi riconducibili al costrutto di *appropriazione* e, in questo senso, è stata predisposta per focalizzare l'attenzione del ricercatore su alcuni studenti (*focal students*) e sulle dinamiche collettive circa le dimensioni dell'*appropriazione*.

PARAGRAFO 3.3

Interviste

Dimensioni coinvolte: DD, DI, DE, DS.

Al termine del corso sono state realizzate dall'autore di questa tesi dieci interviste individuali semi-strutturate, tra il 3 e il 5 Giugno 2015, ciascuna della durata di 40 minuti circa. I dieci studenti intervistati sono stati selezionati in base:

- al livello raggiunto per la dimensione idiosincratICA nel tema;
- al voto ottenuto nel compito in classe sulla *pars destruens*;
- al livello di autorevolezza in fisica emerso dal questionario sociometrico;
- alla volontà di intervistare sia studenti sia studentesse;
- alla volontà di intervistare un set di studenti rappresentativo della diversità di partecipazione durante le lezioni e del differente rendimento scolastico.

Le interviste sono state realizzate seguendo un protocollo (riportato in appendice G) suddiviso in tre parti:

A) *Domande su concetti disciplinari* - in questa prima parte sono state poste domande relative alla comprensione dei fenomeni e delle tematiche trattate: quantone, relazione di indeterminazione, principio di sovrapposizione;

B) *Domande di carattere più generale sul percorso* - in questa seconda parte sono state poste domande sui materiali e sulle attività del percorso, su dialoghi avuti con i compagni di classe e sul coinvolgimento del singolo studente intervistato;

C) *Domande specifiche sullo studente* - in questa terza parte sono state poste domande sulla tesina e sul futuro percorso di studio dello studente, nonché su eventuali immagini o metafore elaborate dallo studente stesso per rendere più intuibili i concetti studiati durante il percorso.

Alle domande del protocollo sono state aggiunte domande specifiche per ciascuno studente, che permettessero di chiarire affermazioni riportate nel tema o espresse durante le lezioni.

Attraverso le interviste è stato possibile dunque ottenere informazioni sia sulla comprensione disciplinare dei concetti quantistici: indeterminazione, sovrapposizione, quantone, ruolo della misura, ampiezza di probabilità, sia su un'eventuale rielaborazione autentica di tali concetti. Sono inoltre state ottenute importanti informazioni sull'aiuto offerto dalle attività e dai materiali progettati alla comprensione disciplinare degli studenti, così come sul livello di interesse che tali attività e materiali hanno generato negli studenti.

PARAGRAFO 3.3

I dati raccolti dalle interviste, uniti a quelli ottenuti attraverso i compiti sulla *pars destruens*, i temi e i questionari sociometrici, sono stati utilizzati per la costruzione del profilo di cinque studenti; nei profili è contenuta l'analisi delle cinque dimensioni dell'*appropriazione*.

Metodologia di analisi dati

La metodologia di analisi dati utilizzata in questo lavoro di tesi fa riferimento alla *Grounded Theory* (Glaser & Strauss, 1967), una delle metodologie di analisi qualitativa dei dati più note e diffuse (Denzin & Lincoln, 1994; Anfara et al., 2002), utilizzata in ricerche di didattica della fisica e non solo.

Dalla *Grounded Theory* derivano i criteri di attendibilità della ricerca (credibilità, affidabilità, confermabilità e trasferibilità) e le modalità di validazione dei risultati necessarie per garantire l'attendibilità della ricerca. In questa tesi sono state utilizzate: la *triangolazione delle sorgenti di dati e degli analisti*, il cosiddetto *inquiry audit* e il *peer-to-peer debriefing*. (Anfara et al., 2002; Fantini 2014).

Tali modalità di validazione permettono di descrivere e interpretare in maniera attendibile quanto emerge dal particolare contesto in cui si svolge una sperimentazione e di poter ottenere dei risultati che siano confrontabili con altri contesti.

I dati raccolti attraverso gli strumenti precedentemente descritti sono stati analizzati attraverso un procedimento in cui a fasi *bottom-up*, finalizzate a individuare gli aspetti dei dati rilevanti per rispondere alle domande di ricerca e a sviluppare ipotesi interpretative, sono seguite fasi *top-down*, finalizzate a confermare le ipotesi interpretative formulate dai ricercatori coinvolti nell'analisi.

Il *peer-to-peer debriefing*, utilizzato in entrambe le fasi del procedimento di analisi, ha permesso di raffinare l'analisi dei dati e la formulazione delle ipotesi interpretative, facendo emergere eventuali distorsioni o forzature nei ragionamenti dei ricercatori.

L'approccio *bottom-up* è stato utilizzato anche per la costruzione degli strumenti stessi di valutazione dei temi e dei compiti sulla *pars destruens*; si rimanda al capitolo 4 sia la descrizione delle griglie di valutazione utilizzate sia il loro processo di affinamento avvenuto tramite *analysts triangulation*.

La *triangolazione delle sorgenti* ha invece permesso di dare affidabilità e confermabilità al quadro collettivo della classe emerso dall'analisi dei temi, dei compiti e dei questionari sociometrici.

Entrambi i processi di *triangolazione* hanno richiesto fasi di analisi individuale seguite da fasi di discussione collettiva tra i ricercatori coinvolti nel processo di analisi.

PARAGRAFO 3.3

Per ottenere ulteriore attendibilità i risultati dell'analisi del contesto di classe che verrà mostrata nel prossimo capitolo sono stati letti dall'insegnante di fisica e da quella di italiano della classe VA (*inquiry audit*), in modo da ottenere conferme o smentite circa i risultati.

Nel descrivere i risultati del prossimo capitolo, verranno di volta in volta riportate le modalità di validazione utilizzate e il loro scopo, in modo da rendere il più possibile chiara la metodologia di analisi e permettere la trasferibilità e il confronto degli strumenti e dei risultati dell'analisi per altri contesti e future sperimentazioni.

PARAGRAFO 3.3

CAPITOLO 4

I risultati

Per rispondere alle domande di ricerca si analizza innanzitutto la risposta complessiva della classe al percorso di fisica quantistica, in modo da capire se gli argomenti trattati erano alla portata di tutti e se, complessivamente, l'aver problematizzato il percorso ha creato un ambiente di apprendimento coinvolgente e stimolante. Una volta costruita la visione d'insieme, ci si focalizzerà su alcuni studenti, individuati come casi interessanti per valutare la reazione dei singoli al percorso e per capire se e come gli studenti sono riusciti a trovare una propria strada per accedere e appropriarsi del percorso.

Come già detto nel precedente capitolo, sono stati raccolti diversi tipi di dati in modo tale da poter monitorare sia l'andamento collettivo che quello individuale. La tabella 4.0 fornisce una schematizzazione di come le singole sorgenti di dati hanno contribuito ad esplorare le varie dimensioni.

Tabella 4.0 Sorgenti di dati e dimensioni.

DC: dimensione concettuale; DI: dimensione idiosincratca; DS: dimensione sociale; DE: dimensione epistemologica

	Prove	DC	DI	DS	DE
Collettivo	Compito in classe	X			
	Tema	X	X		
	Questionario Sociometrico			X	X
Individuale	Intervista	X	X	X	X

PARAGRAFO 4.1

In questo capitolo i risultati dell'analisi verranno presentati seguendo la seguente scaletta.

Nel paragrafo 4.1 si presentano i risultati sull'apprendimento dei concetti di base della *pars destruens* da parte degli studenti così come emerge dall'analisi dei compiti in classe (dimensione disciplinare).

Nel paragrafo 4.2 si presentano i risultati dell'analisi dei temi (triangolata con le note prese dalle osservazioni dei ricercatori coinvolti nel processo). L'analisi fornirà un ulteriore contributo alla costruzione dell'andamento complessivo della classe sia su come hanno messo in atto e rielaborato i concetti di fisica quantistica (dimensione disciplinare) sia sulla ricerca da parte dei singoli studenti del proprio approccio personale (dimensione idiosincratICA/personale).

Nel paragrafo 4.3 si presentano i risultati dell'analisi del questionario sociometrico, che permette di costruire un quadro complessivo della classe e delle relazioni fra i singoli studenti (dimensione sociale), nonché di conoscere l'approccio epistemologico di ciascuno studente.

Ottenuto un quadro complessivo si sono poi individuati i 5 studenti ritenuti interessanti ai fini dello studio dell'*appropriazione* (paragrafo 4.4). Per tali studenti si sono analizzate le interviste, che hanno anche permesso di fare nuova luce sui compiti, sui temi e sulle interrogazioni. Sulla base di ciò si sono costruiti i profili di questi studenti applicando gli indicatori dell'*appropriazione*. Questa analisi ha l'obiettivo ulteriore di verificare se si sono create le condizioni di classe (andamento collettivo) tali da permettere di sviluppare le dimensioni per favorire l'*appropriazione*.

Infine nell'ultimo paragrafo (4.5) si presenta come queste analisi permettano di rispondere alle domande di ricerca:

DR1: Nonostante il cambiamento di tema e di contesto è possibile osservare casi di appropriazioni in questo contesto?

DR2: Quali condizioni hanno favorito o ostacolato l'appropriazione?

DR3: Quale contributo questo studio empirico offre per rifinire il costrutto di appropriazione?

4.1 ANALISI DEI COMPITI IN CLASSE (DIMENSIONE DISCIPLINARE)

Il compito: argomenti e tipologia di problemi

Il compito in classe è stato affrontato dagli studenti una settimana dopo la conclusione definitiva della prima parte del percorso, denominata *pars destruens*, come mostrato in tabella

PARAGRAFO 4.1

4.1.1. In origine il compito era stato fissato per il 29/4, ma la docente ha scelto di concedere una ulteriore settimana di preparazione agli studenti, trattandosi di un compito relativo ad un argomento disciplinare complesso, la “vecchia teoria dei quanti”, e che veniva svolto nel secondo quadrimestre, dunque decisivo ai fini dell’ammissione all’esame di stato.

Tabella 4.1.1 Argomenti della pars destruens e relativi tempi e date di svolgimento.

Data	Argomento	Ore dedicate
6/3	Discussione aperta sul questionario iniziale	[1h]
2/4, 3/4 e 8/4	Corpo nero: lezioni, interrogazioni, esercizi	[3h]
9/4 e 10/4	Effetto fotoelettrico: lezioni, interrogazioni, esercizi	[2h]
16/4 e 17/4	Effetto Compton: lezioni, interrogazioni, esercizi	[2h]
22/4 e 23/4	Atomo di Bohr: lezioni, interrogazioni, esercizi	[2h]
29/4	Conclusione della pars destruens	[1h]
6/5	Compito sulla pars destruens	[1h]

Per preparare gli studenti a sostenere la prova, la docente ha svolto in classe almeno due o tre esercizi per ogni argomento studiato: corpo nero, effetto fotoelettrico, effetto Compton e modello atomico di Bohr. Tre di questi, tutti tranne l’effetto Compton, sono presenti nel compito, riportato in appendice B.

Come già anticipato nel capitolo 3, nel compito sono presenti due tipologie di problema: il “classico” esercizio, risolvibile attraverso l’uso di una o più formule e la più “inusuale” domanda aperta, in cui si richiede allo studente di argomentare i concetti chiave riportati di seguito. Nelle domande aperte è, in particolare, riposto il senso della discretizzazione e questo rende il compito una tappa del filo concettuale continuo-discreto iniziato con la discussione del questionario iniziale.

Il compito in classe è stato pensato con la seguente struttura:

Tabella 4.1.2 Struttura del compito sulla pars destruens

<i>Argomento</i>	<i>Punteggio</i>
Corpo Nero	Esercizio: 2 punti Domanda: 1,5 punti
Effetto Fotoelettrico	Esercizio: 3 punti Domanda: 1,5 punti
Atomo di Bohr	Esercizio: 1 punto Domanda: 2 punti

PARAGRAFO 4.1

Le griglie di valutazione

I 21 studenti presenti il giorno del compito hanno avuto un'ora di tempo per risolvere gli esercizi e rispondere alle domande aperte. A valutare le risposte è stata la docente Paola Fantini. I punteggi e i criteri utilizzati per assegnare i voti sono riportati nelle griglie in tabella 4.1.3, 4.1.4 e 4.1.5, che assegnano i punteggi rispettivamente per gli esercizi e le domande aperte.

In tabella 4.1.3 è mostrata la griglia di valutazione per gli esercizi del compito. Questa griglia si compone di 3 livelli.

Tabella 4.1.3 Griglia di valutazione per gli esercizi del compito.

Livello	Descrizione	Punteggio
Corretto	Lo studente ha risolto correttamente l'esercizio, fornendo, qualora richiesto, una giustificazione corretta della risposta	1
Parziale	Lo studente ha svolto l'esercizio correttamente ma ha commesso errori di calcolo oppure ha fornito la risposta giusta senza motivarla correttamente	0,5
Scorretto / Non affrontato	Lo studente ha svolto l'esercizio in maniera errata, non giungendo alla soluzione corretta / Nel compito tale esercizio non è stato affrontato	0

In appendice B1 sono riportati alcuni esempi, presi dalle risposte degli studenti, per ogni possibile livello e per ogni esercizio del compito.

In tabella 4.1.4 e 4.1.5 sono riportate le griglie di valutazione rispettivamente per le risposte delle prime due domande aperte e per le risposte della terza domanda aperta. La necessità di elaborare una griglia apposita per la terza domanda è dovuta alla maggiore complessità di quest'ultima rispetto alle altre due (richiede allo studente di rispondere riportando concetti disciplinari più impegnativi). Questo determina l'attribuzione di un punteggio massimo pari a 2 per questa domanda.

PARAGRAFO 4.1

Tabella 4.1.4 Griglia per la valutazione delle risposte alle domande aperte su corpo nero ed effetto fotoelettrico.

Livello	Descrizione	Punteggio
Corretto Completo	Le affermazioni sono corrette sul piano disciplinare. Gli argomenti disciplinari necessari per rispondere in maniera completa alla domanda sono tutti presenti. Al massimo ne manca uno.	1,5
Corretto Parziale	Le affermazioni sono generalmente accettabili sul piano disciplinare anche se sono presenti locali imprecisioni. Compare buona parte degli argomenti disciplinari necessari per rispondere in maniera completa.	1
Impreciso e/o generico	Molte affermazioni non sono precise sul piano disciplinare nel senso che, pur non essendo scorrette in sé, possono dare adito a interpretazioni non accettabili. Oppure le affermazioni non sono argomentate in maniera soddisfacente. Pochi argomenti disciplinari sono stati presi in considerazione per rispondere.	0,5
Scorretto e/o inconsistente Non affrontato	La maggior parte delle affermazioni è fortemente discutibile sul piano disciplinare. Le parole-chiave evidenziano forti incomprensioni del loro significato. Nell'elaborato dello studente tale domanda non è stata affrontata.	0

Le griglie sono state costruite attraverso successive rielaborazioni della K.I. Rubric (Knowledge Integration Rubric) (Linn, 2005; Liu, Lee, Hofstetter & Linn, 2008), eseguite tramite un processo *bottom-up*, che ha permesso di adattare le griglie al contesto analizzato in questa tesi: in questo modo i punteggi delle griglie sono “tarati” sulla risposta migliore tra quelle di tutti gli studenti per ciascuna domanda del compito. La rielaborazione delle griglie è avvenuta attraverso la triangolazione dei dati da parte di Levrini, della dottoressa in Didattica della Fisica Giulia Tasquier, che ha collaborato alle varie fasi della sperimentazione, e dell'autore di questa tesi.

PARAGRAFO 4.1

Tabella 4.1.5 Griglia per la valutazione delle risposte alla domanda aperta sul modello atomico di Bohr.

Livello	Descrizione	Punteggio
Corretto completo	Le affermazioni sono corrette sul piano disciplinare. Gli argomenti disciplinari necessari per rispondere in maniera completa alla domanda sono tutti presenti. Al massimo ne manca uno.	2
Corretto poco parziale	Le affermazioni sono accettabili sul piano disciplinare. Compare buona parte degli argomenti disciplinari necessari per rispondere in maniera completa.	1,5
Corretto molto parziale	Le affermazioni sono generalmente accettabili sul piano disciplinare anche se sono presenti locali imprecisioni. Compare solo una parte degli argomenti disciplinari necessari per rispondere in maniera completa.	1
Impreciso e/o generico	Molte affermazioni non sono precise sul piano disciplinare nel senso che, pur non essendo scorrette in sé, possono dare adito a interpretazioni non accettabili. Oppure le affermazioni non sono argomentate in maniera soddisfacente. Pochi argomenti disciplinari sono stati presi in considerazione per rispondere.	0,5
Scorretto e/o inconsistente Non affrontato	La maggior parte delle affermazioni è fortemente discutibile sul piano disciplinare. Le parole-chiave disciplinari evidenziano forti incomprensioni del loro significato. Nell'elaborato dello studente tale domanda non è stata affrontata.	0

Per fornire un esempio di risposta corretta e completa, e dunque far capire al lettore su quali studenti sono state “tarate” le griglie, così come il tono e il linguaggio con cui si discuteva di fisica in classe, verrà ora riportata la miglior risposta alla seconda domanda aperta. In appendice B1 è riportata la miglior risposta per ciascuna delle tre domande aperte.

Domanda su Effetto fotoelettrico (2.2)

L'effetto fotoelettrico viene spiegato da Einstein nell'articolo del 1905 “Un'ipotesi euristica sulla natura della radiazione”. Esponi, facendo riferimento all'effetto fotoelettrico, quale è stato il contributo di Einstein al dibattito su continuo-discreto in fisica. Nella tua argomentazione sottolinea l'evoluzione subita dal concetto di quanto di energia introdotto da Planck nell'interpretazione data da Einstein dell'effetto fotoelettrico e prendi in considerazione il contributo relativo sia al modello di oggetto sia a quello di interazione.

PARAGRAFO 4.1

Esempio di risposta corretta (S14, Federico): *“Einstein riprende l’effetto fotoelettrico, già trattato da Lenard prima di lui, ma dandogli una nuova ipotesi. Il problema dell’effetto fotoelettrico, non spiegabile con la fisica classica, è l’esistenza di una “frequenza di soglia” e quindi di un potenziale d’arresto sotto i quali, indifferentemente dall’irraggiamento, quindi dalla quantità di energia che colpisce il metallo, non si ha effetto fotoelettrico.*

La fisica classica non riesce a spiegare questo dato sperimentale che Einstein risolve discretizzando l’oggetto, ossia la radiazione elettromagnetica: l’energia viene trasportata in pacchetti discreti $h\nu$, detti quanti di energia, poi in seguito fotoni. Quindi soltanto un fotone con una certa energia $h\nu$, interagendo con un singolo elettrone, può far estrarre quest’ultimo dal metallo solamente se questa energia $h\nu$ è maggiore del lavoro di estrazione.

Non solo quindi lo scambio di energia avviene in maniera discreta, ma anche l’energia stessa è discretizzata nel suo oggetto di “quanto”. Altra intuizione di Einstein l’interazione di un singolo quanto con un singolo elettrone.”

Per dare un quadro complessivo della classe in tabella 4.1.7 sono riportati i voti presi da tutti gli studenti.

Per motivi di privacy e di riconoscibilità a ogni studente è stato assegnato un codice. Per facilitare al lettore l’individuazione degli studenti di cui è stato costruito il profilo, nelle tabelle il loro codice sarà accompagnato da un nome di fantasia. Per distinguere tra studenti e studentesse si riporta invece la seguente tabella:

Tabella 4.1.6 Corrispondenza fra genere e codice per ciascuno studente.

FEMMINE	MASCHI
S3, S4, S11, S12, S15, S17, S23	S1, S2, S5, S6, S7, S8, S9, S10, S13, S14, S15, S16, S17, S18, S19, S20, S21, S22

In figura 4.1.1 è riportato l’istogramma che mostra la distribuzione dei voti, mentre nelle figure 4.1.2 e 4.1.3 sono riportati sotto forma di istogramma i punteggi degli studenti per ogni singolo esercizio e domanda aperta.

PARAGRAFO 4.1

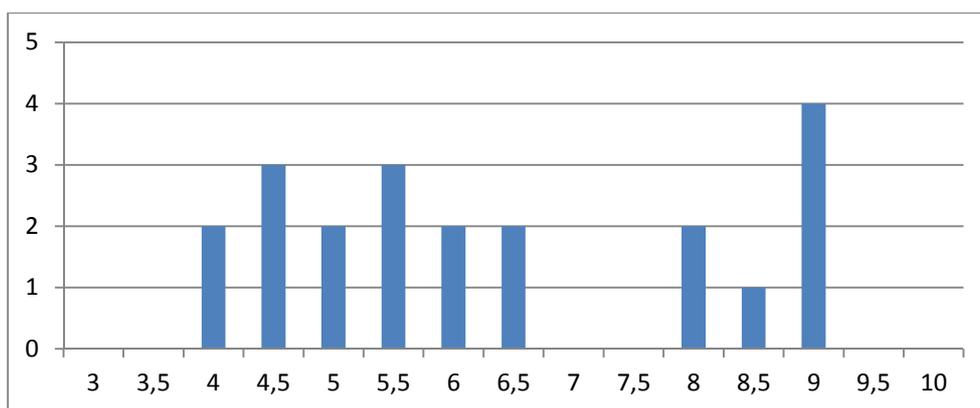


Figura 4.1.1 Numero di studenti in funzione del voto ottenuto nel compito.

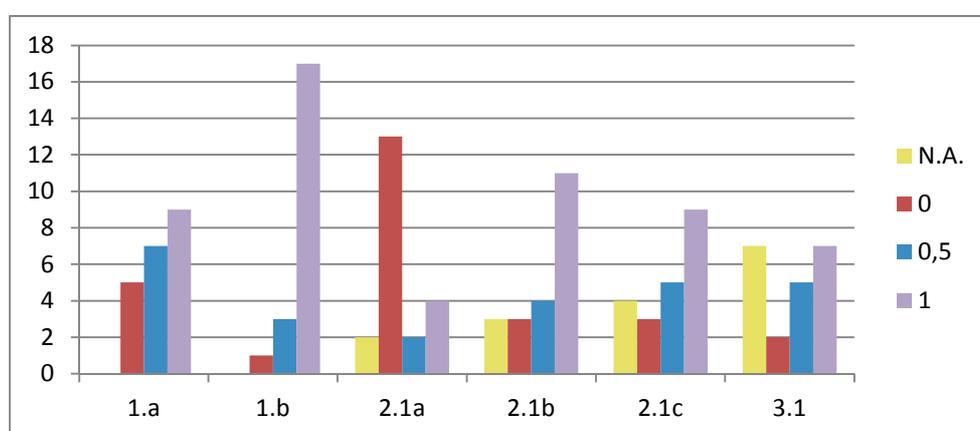


Figura 4.1.2 Distribuzione dei punteggi dei 21 studenti per i 6 esercizi del compito.

1. *Corpo nero*; 2. *Effetto fotoelettrico*; 3. *Atomo di Bohr*.

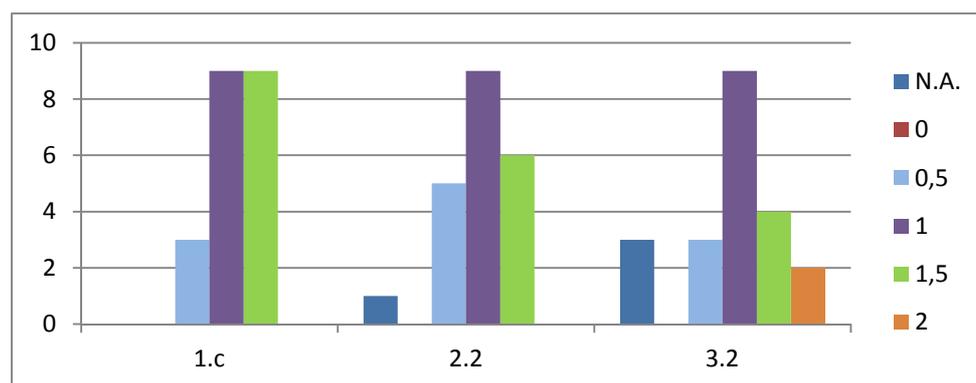


Figura 4.1.3 Distribuzioni dei punteggi per le 3 domande aperte.

1. *Corpo nero*; 2. *Effetto fotoelettrico*; 3. *Atomo di Bohr*.

PARAGRAFO 4.1

Tabella 4.1.7 Voti del compito e punteggi ottenuti per ogni singola domanda.

N.A. - Non Affrontato; nella riga azzurra è riportato il punteggio massimo per ogni esercizio o domanda.

STUDENTI	VOTO DEL COMPITO	Corpo nero			Effetto fotoelettrico				Atomo di Bohr	
		a	b	c	2.1a	2.1b	2.1c	2.2	3.1	3.2
		1	1	1,5	1	1	1	1,5	1	2
S1	6	0,5	1	1	0	1	N.A.	0,5	1	1
S2	5	1	1	1	0	0	0	0,5	0	1,5
S3	4	0	1	1	0	0,5	0,5	1	N.A.	N.A.
S4 Lucia	8	1	1	1	0	1	1	1	0,5	1,5
S5	6,5	1	1	0,5	N.A.	1	N.A.	1,5	1	0,5
S6	5	1	1	1	0,5	0	0,5	N.A.	N.A.	1
S7 Carlo	5,5	1	1	1	N.A.	N.A.	N.A.	0,5	1	1
S8	4,5	0	1	1-	0	1	0,5	1-	0,5	N.A.
S9	4,5	0,5	0,5	0,5	0	0,5	0,5	1	N.A.	1
S10	5,5	1	1	1,5	0	0,5	1	0,5	N.A.	N.A.
S11	8,5	0,5	0	1,5	1	1	1	1,5	0,5	1,5
S12	6,5	0,5	1	1,5	0	1	0	1	0,5	1
S13 Paolo	9-	1	1	1	1	1	1	1	N.A.	2-
S14 Federico	8-	0,5	1	1	0	1	1	1,5	0	2-
S15	Assente									
S16	9-	1	1	1,5-	0,5	1	1	1,5	1	1
S17	4	0	0,5	1	0	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
S18	9	1	1	1,5	0	1	1	1,5	1	1
S19	Assente									
S20 Marco	9	1	1	1,5	1	1	1	1,5	1+	0,5
S21	5,5	0	1	0,5	0	0	1	1	1	1
S22	6-	0,5	0,5	1,5	0	1	0	1-	N.A.	1,5
S23	4,5	0	1	1,5	N.A.	N.A.	N.A.	1	N.A.	1

PARAGRAFO 4.1

Considerazioni sull'analisi dei compiti in classe

L'istogramma riportante la distribuzione degli studenti in funzione del voto, figura 4.1.1, confrontato con l'istogramma in figura 4.1.4, in cui i voti si riferiscono alla media in fisica al termine del primo quadrimestre, rivela come la distribuzione dei voti del compito sulla *pars destruens* sia coerente con il profilo disciplinare della classe, in cui sono presenti studenti volenterosi e preparati, ma anche numerosi studenti con delle difficoltà e senza un particolare interesse per la fisica.

Il compito non ha dunque creato delle anomalie che richiedessero una particolare interpretazione. Ha però rivelato alcune specifiche difficoltà della classe nell'argomentare le risposte, nel rapportare una legge al corrispondente grafico, nonché la facilità degli studenti nel cadere in alcuni "tranelli" volutamente inseriti nel compito.

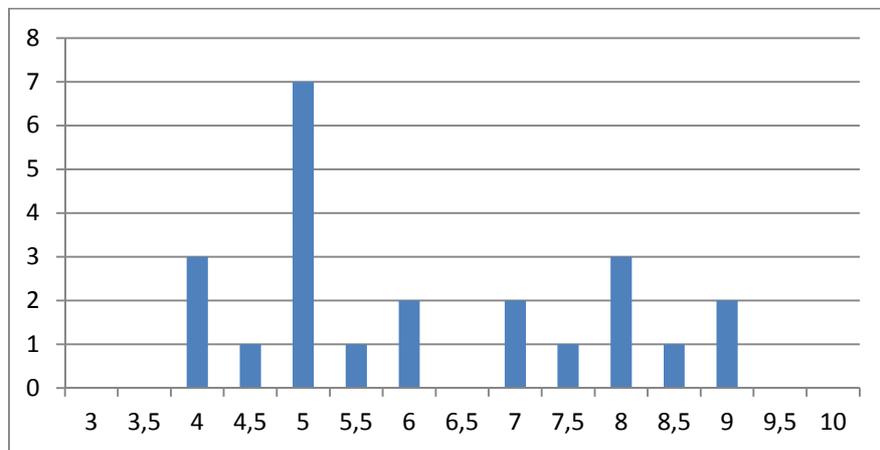


Figura 4.1.4 Distribuzione dei voti in fisica per il primo quadrimestre.

A mettere in difficoltà gli studenti sembra siano stati soprattutto:

- il primo esercizio sul corpo nero: molti, per giustificare le risposte, non si sono serviti delle formule ma di convinzioni personali rivelatesi in certi casi errate;
- l'esercizio sull'effetto fotoelettrico: in cui si chiedeva di collegare le variazioni dei parametri della formula $E = h\nu - W_0$ al rispettivo grafico;
- l'esercizio e la domanda sul modello atomico di Bohr: richiedevano una risoluzione più articolata e una conoscenza più ampia del fenomeno.

Frequenti sono stati anche gli errori di calcolo, di distrazione o di comprensione del testo degli esercizi.

4.2 ANALISI DEI TEMI (DIMENSIONE DISCIPLINARE E IDIOSINCRATICA)

Il tema: argomento, materiale fornito, autori

Il tema di italiano, di cui si riportano la consegna e il materiale fornito in appendice C, è stato affrontato dagli studenti quasi al termine della seconda parte del percorso, quella corrispondente al *raccordo*, in modo che avessero avuto il tempo necessario per confrontarsi con i concetti in esso contenuti.

I 23 studenti erano tutti presenti al momento della prova, che simulava la prima prova della maturità. Hanno avuto a disposizione tre ore per svolgere il tema in forma di saggio breve o articolo di giornale, forme corrispondenti alla tipologia B del tema della maturità.

Trattandosi di un tema, la costruzione della prova è stata convalidata dalla professoressa di italiano che ha anche valutato gli elaborati attraverso le griglie di valutazione per la tipologia B convenzionalmente adottate dai docenti di italiano della scuola in cui si è svolta la sperimentazione; le griglie sono riportate in tabella 4.2.1 e 4.2.2.

Agli studenti era stato detto che avrebbero ricevuto un voto positivo in fisica nel caso in cui avessero incluso nel loro discorso contenuti corretti dal punto di vista disciplinare, mentre un eventuale voto negativo in fisica non sarebbe stato assegnato. In questo modo si è cercato di incentivare ulteriormente gli studenti a produrre argomentazioni che fossero sostenute da contenuti disciplinari, nei limiti imposti dalla forma del saggio breve o dell'articolo di giornale (assenza di formule e grafici).

La prova è stata progettata in collaborazione con il dott. Malgieri e il gruppo di ricerca in didattica della fisica dell'Università di Pavia. Come riportato nel paragrafo 1.1, il gruppo di ricerca di Pavia ha elaborato un percorso di fisica quantistica per le scuole superiori che è stato sperimentato in una classe V° di un Liceo Scientifico di Genova da Malgieri, 2015. Il percorso pensato dal gruppo di Pavia, sebbene non sia basato sull'“esperimento più bello della fisica” ma sui cammini multipli di Feynman ricorre anch'esso al tema come attività chiave per rivelare il livello idiosincratico di ogni studente e dunque per individuare possibili casi di *appropriazione*.

PARAGRAFO 4.2

Tabella 4.2.1 Griglia di valutazione delle Conoscenze utilizzata dalla docente di italiano.

Livello di Conoscenze	Descrizione	Punteggio
A	Espone conoscenze corrette e complete. Utilizza in modo appropriato i dati forniti.	4
B	Espone informazioni essenziali o comunque utili per lo svolgimento, ma utilizza parzialmente i dati forniti.	3
C	Espone informazioni generiche/imprecise. Utilizza in modo poco efficace i dati forniti.	2-1
D	Espone informazioni scorrette. Non utilizza i dati forniti.	0

Tabella 4.2.2 Griglia di valutazione delle Competenze utilizzata dalla docente di italiano.

Livello di Competenze	Descrizione	Punteggio
A	Sa proporre una interpretazione adeguatamente esemplificata/argomentata/approfondita, con contributi personali.	5
B	Esprime giudizi, con eventuali contributi personali, ma non sempre debitamente motivati/chiaramente riconoscibili/approfonditi/esemplificati.	4-3
C	Interpreta in modo piuttosto semplicistico e/o superficiale le tematiche proposte.	2-1
D	Esprime valutazioni incongrue / Non esprime valutazioni.	0

Le griglie di valutazione

In Malgieri (2015) sono utilizzate per la valutazione dei temi degli studenti due griglie che riprendono la K.I. Rubric, adattandola al tema e ai suoi obiettivi: una valuta la dimensione disciplinare dell'*appropriazione*, l'altra valuta la dimensione idiosincratca.

La K.I. Rubric si caratterizza per il fatto di essere focalizzata non solo sulla qualità delle singole idee riportate in un tema ma anche sulla loro connessione. Proprio questo interesse per la qualità delle connessioni tra le idee, un fattore implicito nella definizione di *appropriazione*, ha fatto sì che venissero adottate e rielaborate tali griglie sia da parte di Malgieri e del gruppo di Pavia, sia da parte del gruppo di Bologna.

Le griglie di Pavia sono state utilizzate per una prima valutazione dei componimenti della classe oggetto di questa tesi. Per la validazione del corretto utilizzo da parte del gruppo di Bologna dei criteri del gruppo di Pavia, i ricercatori di Bologna e di Pavia hanno operato una triangolazione delle griglie stesse attraverso la discussione incrociata su elaborati degli

PARAGRAFO 4.2

studenti e il confronto dell'assegnazione dei punteggi. La triangolazione ha rivelato come i criteri contenuti nelle griglie di Pavia non fossero adatti alla classe analizzata in questa sperimentazione, il cui contesto presentava alcune differenze con quello della classe analizzata da Pavia. Una di queste è legata ai vincoli della scuola e alla collaborazione con le docenti di italiano: agli studenti infatti sono state date delle consegne di tipo diverso, come ad esempio la richiesta da parte della docente del liceo di Rimini di utilizzare tutti i brani a supporto del proprio filo argomentativo rispetto alla richiesta da parte del docente del liceo di Genova di utilizzare solo i brani ritenuti più importanti per la propria argomentazione.

La diversità dei vincoli scolastici relativi ai temi della sperimentazione di Pavia e ai temi della sperimentazione descritta in questa tesi ha portato a considerare le griglie della docente di italiano, tabelle 4.2.1 e 4.2.2, come il punto di partenza per la costruzione di K.I. Rubric che esplicitassero maggiormente i criteri di analisi dei temi

Attraverso la triangolazione della lettura e valutazione dei temi ad opera di Levrini, Tasquier e dell'autore di questa tesi è stato possibile ottenere un primo feedback della qualità delle griglie elaborate.

La triangolazione ha rivelato la necessità di esplicitare meglio le affermazioni di ciascuna griglia ricorrendo ad una maggiore sistematicità. Si è così scelto di ricostruire entrambe le griglie attorno a tre parole chiave: i) affermazioni, testi forniti, connessioni per la dimensione disciplinare; ii) parole chiave, commenti, tesi per la dimensione idiosincratice.

Le griglie così ottenute e riportate in tabella 4.2.3 e 4.2.4 sono le versioni definitive.

Tabella 4.2.3 Griglia di valutazione di Bologna per la dimensione idiosincratice.

Livello Idiosincratice	Descrizione	Punteggio
Espressioni pienamente esplicite	Sono presenti parole chiave <u>idiosincratice</u> che denotano un discorso molto personale e sono presenti commenti personali non casuali. E' presente una tesi generale molto personale e argomentata in modo approfondito e convincente.	5
Espressioni esplicite	Sono presenti parole chiave <u>idiosincratice</u> che denotano un discorso personale e sono presenti commenti personali non casuali. E' presente una tesi generale personale.	4
Espressioni parzialmente esplicite	Sono presenti parole chiave che possono denotare un discorso personale sottinteso e/o sono presenti alcuni commenti personali non casuali. E' presente una tesi generale anche se non risulta particolarmente originale o personale.	3

PARAGRAFO 4.2

Espressioni implicite	Sono presenti parole chiave che possono denotare un discorso personale sottinteso. E' presente al più un commento personale non casuale. Nessuna tesi generale esplicitamente espressa.	2
Tracce di espressione	Tracce di parole chiave e/o tracce di commenti personali. Tracce tesi globale riconoscibile.	1
Nessuna espressione	Assenza di parole chiave identificabili. Nessun commento personale o pareri incongrui. Nessuna tesi globale riconoscibile.	0

E' bene chiarire la differenza tra parole chiave e parole chiave idiosincratiche: entrambe sono parole attorno a cui ruota il discorso e che dunque non si trovano solo in una sola frase ma sono ripetute più volte durante il componimento e collocate in un preciso contesto. Affinché una parola chiave sia idiosincratica occorre che lo studente rielabori tale parola, arricchendola di una precisa e rintracciabile sfumatura personale (Levrini et al., 2014). E' il caso per esempio di S15 nel cui componimento ripete più volte la parola "nuovo", in particolare riferito al linguaggio, inteso in questo modo:

"[...] la natura quantistica e i suoi oggetti deve essere descritta con un linguaggio nuovo: che restituisca la complessità del mondo microscopico, dell'estraneità al modello classico spazio-tempo e alla complessità di nuove proprietà fenomenologiche."

Tabella 4.2.4 Griglia di valutazione di Bologna per la valutazione della dimensione disciplinare.

Livello Disciplinare	Descrizione	Punteggio
Complesso	Non solo corretto e completo ma anche ricco e articolato. Non si segue quindi un unico filo logico, ma l'argomentazione si sviluppa su più piani.	5
Corretto Completo	Le affermazioni sono corrette sul piano disciplinare. I testi sono utilizzati e connessi in modo chiaro e appropriato. L'argomentazione si sviluppa in maniera completa seguendo un filo logico esplicito e chiaro.	4
Corretto Parzialmente Completo oppure	Le affermazioni sono accettabili sul piano disciplinare. I testi utilizzati sono trattati in modo appropriato ma le connessioni fra le parti dell'argomentazione sono solo parzialmente elaborate oppure	3

PARAGRAFO 4.2

Completo Parzialmente Corretto	Le affermazioni sono generalmente accettabili sul piano disciplinare anche se sono presenti locali imprecisioni. Tutti i testi sono utilizzati e connessi in modo chiaro ma è possibile che le connessioni fra le parti dell'argomentazione non siano sempre corrette	3
Impreciso e/o generico	Molte affermazioni non sono precise sul piano disciplinare nel senso che, pur non essendo scorrette in sé, possono dare adito a interpretazioni non accettabili. Sono presenti affermazioni che mostrano che i testi sono mal interpretati. Le connessioni tra le affermazioni sono molto deboli.	2-1
Scorretto e/o inconsistente	La maggior parte delle affermazioni è fortemente discutibile sul piano disciplinare. Le connessioni tra le affermazioni sono inconsistenti e gli accostamenti tra parole-chiave evidenziano forti incomprensioni del loro significato.	0

La differenza tra i sei livelli disciplinari risiede nella correttezza e nella completezza con cui lo studente espone le proprie affermazioni, utilizza o rielabora i testi forniti e connette questi due elementi per costruire la propria argomentazione.

Allo scopo di rendere più chiaro al lettore le definizioni riportate nella griglia disciplinare, nonché il tono e il linguaggio con cui gli studenti si esprimevano, verranno ora riportati alcuni estratti dei temi. Esempi per ciascun livello in tabella 4.2.4 sono riportati in appendice C1.

Scorretto e/o inconsistente (S2) – Titolo: “I fisici parlano una nuova lingua”

“[...] Venne così inventato un nuovo modello matematico: la teoria quantistica. Questa teoria presenta due analogie incomplete: l'immagine ondulatoria e l'immagine corpuscolare. Si cercò in tutti i modi di collegare le due immagini ma non si trovarono leggi fisiche in grado di permetterlo. Dunque la quantistica presume un dualismo onda-corpuscolo.”

Completo parzialmente corretto (S4, Lucia) – Titolo: “La via dell'immagine intuitiva”

“Lévy-Leblond spiega con una semplicissima e chiarissima metafora il dilemma secolare sulla natura della radiazione elettromagnetica (onda o corpuscolo); affermando la duplice natura dell'ornitorinco, allo stesso tempo castoro e allo stesso tempo anatra, a seconda dei punti di vista, il fisico afferma la duplice natura della luce, allo stesso tempo onda e allo stesso tempo corpuscolo, creando un nuovo concetto specifico, che vale solamente per la radiazione elettromagnetica, come l'ornitorinco è una specie a sé, con un nome unico. Il nuovo concetto descritto da Lévy-Leblond suppone la presenza di oggetti quantistici né onde né particelle, alla base della radiazione: i quantoni.”

PARAGRAFO 4.2

Corretto completo (S18)

Titolo: “Le difficoltà del linguaggio scientifico nella teoria dei quanti”

“[...] Proprio a causa delle motivazioni per cui questi concetti [quantistici] sono stati formulati, la loro applicazione linguistica a fenomeni tanto diversi dall’ambito di provenienza risulta difficoltosa e inadeguata. Per poter riformulare un linguaggio più adatto a descrivere i soggetti della teoria quantistica bisogna prima capire cos’è un linguaggio. [...] Una prima soluzione al problema di esprimere linguisticamente la teoria dei quanti senza ambiguità e contraddizioni sarebbe quindi la costruzione di un nuovo sistema linguistico dotato delle caratteristiche concettuali adatte a descrivere la teoria. Oltre alla difficoltà intrinseca della formulazione di questa lingua è presente comunque la difficoltà di formulare un’immagine mentale della teoria. In altri termini, la visualizzabilità della teoria rimane immutata, quest’ultima mantiene comunque il suo carattere contro-intuitivo. [...] Nel caso di una teoria di così difficile comprensione la divulgazione scientifica acquista un enorme valore: essa ha il compito di spiegare nella maniera più chiara possibile la teoria.”

Come per le griglie di valutazione del compito sulla *pars destruens*, anche le due griglie definitive per la valutazione del tema sono state costruite tramite un processo *bottom-up*, che ha permesso di “tarare” i punteggi e le definizioni sugli elaborati di tutti gli studenti, conferendo credibilità ai dati. Anche in questo caso la rielaborazione delle griglie è avvenuta attraverso la triangolazione dei dati da parte di Levrini, di Tasquier e dell’autore di questa tesi.

In tabella 4.2.5 sono riportate le valutazioni assegnate ai temi degli studenti in base alle due griglie appena descritte, tabelle 4.2.3 e 4.2.4. Accanto ai punteggi assegnati tramite queste griglie sono riportati i punteggi assegnati dalla docente di italiano, attribuiti attraverso le griglie in tabella 4.2.1 e 4.2.2. Nelle ultime due colonne sono riportati il voto assegnato al componimento dalla docente di italiano in base all’analisi tramite le sue griglie (in quindicesimi, in coerenza coi criteri che saranno utilizzati nella prova d’esame) e il giudizio dato al contenuto disciplinare del tema dalla docente di fisica (in decimi, perché per la fisica si trattava di una prova curricolare). In figura 4.2.1 è riportato l’istogramma che esprime il punteggio per la dimensione disciplinare e per quella idiosincratica di ciascuno studente.

PARAGRAFO 4.2

Tabella 4.2.5 Confronto fra i punteggi date attraverso la griglia del gruppo di ricerca (DD e DI) e la griglia della docente di italiano (CON e COM). DD corrisponde a CON, DI a COM.

Legenda della tabella: DD – dimensione disciplinare; DI - dimensione idiosincratica; CON – conoscenze; COM – competenze. N.C. – nessun commento. VOTO ITA - voto assegnato dalla docente di italiano; VOTO FIS - voto assegnato dalla docente di fisica. Nella riga azzurra è riportato l'intervallo di punteggi o voti attribuibili.

STUD	Griglie di Bologna		Griglie di italiano		VOTO ITA	VOTO FIS
	DD	DI	CON	COM		
	0-5	0-5	0-4	0-5	0-15	0-10
S1	1	1	2-1	2-1	8	5-
S2	0	0	2-1	2-1	8	4
S3	0	0	2-1	0	7	4
S4 Lucia	3	4	4	4-3	14	6
S5	3	1	3	2-1	11	6/7
S6	2	1	2-1	2-1	9	5/6
S7	3	3	2-1	4-3	10	6
S8	0	1	2-1	0	7	4
S9	1	2	2-1	2-1	9	5
S10	2	3	3	2-1	10	6,5
S11	4	3	4	4-3	14	N.C.
S12	3	4	3	4-3	13	6
S13 Paolo	3	3	3	2-1	12	6/7
S14 Federico	3	3	3	5	14	6
S15	5	4	4	5	14	7,5
S16	4	3	3	4-3	13	6,5
S17	2	3	3	4-3	12	6,5
S18	4	5	4	5	15	N.C.
S19	3	1	2-1	4-3	10	6,5
S20 Marco	2	3	3	4-3	12	N.C.
S21	2	3	2-1	2-1	10	N.C.
S22	3	2	2-1	4-3	11	6,5
S23	0	0	2-1	2-1	9	5

PARAGRAFO 4.2

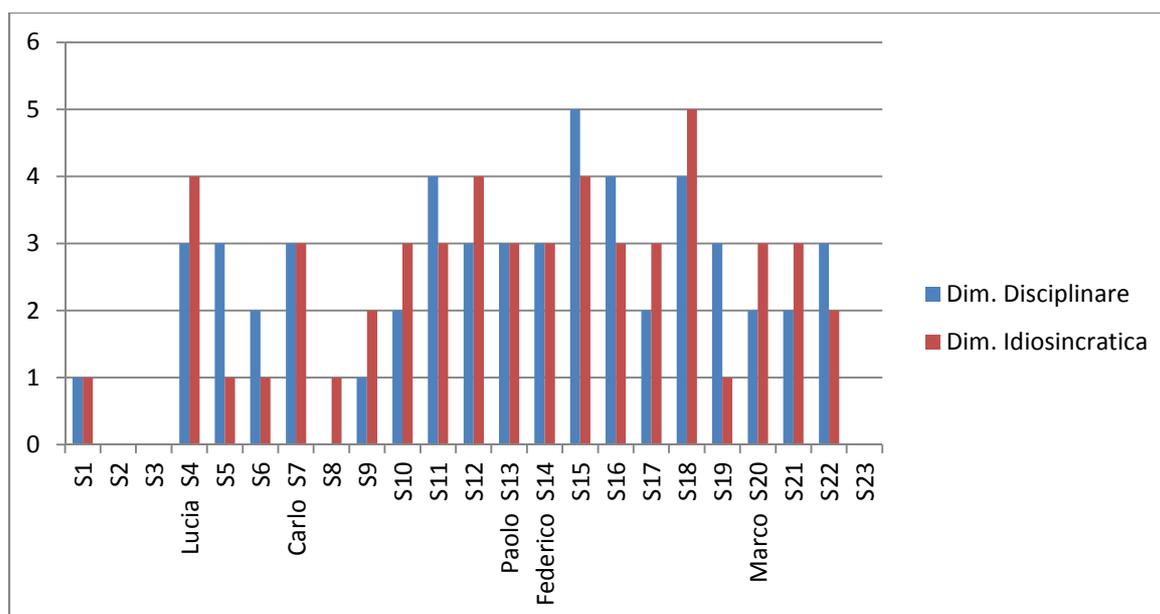


Figura 4.2.1 Punteggio per la dimensione disciplinare e per quella personale di ciascuno studente, ottenuto applicando le griglie di Bologna. Intervallo dei punteggi: 0-5.

Considerazioni sull'analisi dei temi

Il confronto riportato in tabella 4.2.6 rivela come le griglie costruite in questa sperimentazione permettano di assegnare punteggi sia per la dimensione disciplinare, sia per la dimensione idiosincratca degli studenti, che sono coerenti con i punteggi assegnati dalle docenti di italiano e di fisica di tali studenti.

Questo offre una prima convalida alle griglie elaborate in questa sperimentazione; il loro utilizzo in altre sperimentazioni rivelerà la loro eventuale trasferibilità e dunque la possibilità di utilizzarle come strumento di analisi in ricerche di didattica della fisica.

L'istogramma di figura 4.2.1 rivela un risultato molto interessante: nella maggior parte degli studenti le due dimensioni, quella disciplinare e quella idiosincratca, sono accoppiate. Sembra dunque che le citazioni e la traccia del tema, così come i dibattiti e gli argomenti affrontati nel *raccordo*, abbiano attivato la dimensione idiosincratca degli studenti, manifestatasi attraverso gli elaborati.

Mentre il compito aveva rivelato come la classe avesse mantenuto il profilo espresso nel primo quadrimestre durante lo studio della *pars destruens*, questa seconda attività ha invece rivelato una maggiore partecipazione: quasi tutti gli studenti parlano di fisica e ne parlano in modo personale. Dall'analisi dei temi sembra dunque emergere l'accensione collettiva di un interesse, l'attivazione in quasi tutti gli studenti della dimensione idiosincratca. Si può quindi ritenere che il tema sia stato per la classe un punto di rottura, di fronte al quale la classe ha

PARAGRAFO 4.2

accettato di porsi in modo attivo nei confronti del percorso di fisica quantistica. Una prima conferma esterna al gruppo di ricerca arriva dall'intervista di Paolo (S13):

“Affiancare il lavoro con tutti gli articoli, con anche quel progetto che la professoressa Fantini ha fatto con la Tomasetti [docente di italiano] – di quel tema - per quanto poi dopo quello sia un progetto alternativo, però già il fatto che ci fossero 7 o 8 documenti riferiti a quest'argomento, secondo me è stato uno spunto, insieme agli articoli, molto importante per arrivare poi alla comprensione di tutto il percorso. Quindi credo che è stato proprio l'approccio scelto e il metodo applicato per arrivare a tutti che abbia permesso di arrivare a tutti [...] che a tutta la classe qualcosa di meccanica quantistica sia rimasto.”

La docente di italiano ha in effetti osservato come, rispetto ai temi precedenti, il rendimento collettivo della classe sia stato migliore.

4.3 ANALISI SOCIOMETRICA (DIMENSIONE SOCIALE ED EPISTEMOLOGICA)

Finora sono state studiate due dimensioni dell'*appropriazione*, quella idiosincratica e quella disciplinare. In questo paragrafo si cercherà di ottenere informazioni sulla dimensione epistemologica e sulla dimensione sociale. In particolare si cercherà di costruire un quadro che restituisca, studente per studente, l'approccio con cui ciascun alunno affronta la fisica e l'autorevolezza che nel tempo ha acquisito agli occhi dei compagni di classe in merito ai vari aspetti disciplinari (risoluzione di esercizi, abilità in laboratorio, ecc.). In questo modo sarà possibile individuare studenti che nelle dinamiche di classe hanno un ruolo sociale particolare. Per ottenere queste informazioni è stato elaborato il questionario sociometrico, descritto nel paragrafo 3.3 e riportato in appendice D. Il questionario è diviso in due parti: la prima è dedicata agli approcci, la seconda all'autorevolezza. Il questionario è stato consegnato agli studenti il 28 Maggio in modo che le risposte degli studenti tenessero conto di quanto avvenuto durante il percorso di fisica quantistica.

Prima parte del questionario sociometrico

Nella prima parte del questionario, dopo una breve descrizione dei possibili approcci alla disciplina, riportati in tabella 4.3.1, viene chiesto a ciascuno studente di attribuire a se stesso al massimo due dei cinque approcci proposti, quelli che lo studente riconosce di avere nei

PARAGRAFO 4.3

confronti della fisica. I cinque approcci e le loro definizioni rappresentano la gamma di approcci che si ritiene sia possibile avere nei confronti della fisica.

E' inoltre chiesto di riportare per ciascun approccio il nome di, al massimo, tre compagni di classe che nelle ore scolastiche ed extrascolastiche hanno manifestato tale approccio alla disciplina. Le risposte ottenute dai questionari dei 23 studenti hanno permesso di costruire il grafico a barre riportato in figura 4.3.1.

Tabella 4.3.1 Griglia con i cinque approcci proposti agli studenti.

Approccio immaginativo-creativo: approccio guidato da un interesse verso le rappresentazioni, le immagini e le metafore utilizzate nella fisica e caratterizzato da un desiderio di forte rielaborazione personale dei contenuti.

Approccio critico riflessivo: approccio guidato da un interesse verso l'analisi profonda dei problemi e caratterizzato da un desiderio di approfondire ed entrare nei dettagli del pensiero.

Approccio storico-filosofico: approccio guidato da un interesse verso la storia e l'epistemologia della scienza e caratterizzato da un desiderio di approfondire l'evoluzione dei concetti o il contesto culturale in cui si sono sviluppati.

Approccio sperimentale e applicativo: approccio guidato da un interesse verso gli aspetti sperimentali e applicativi della scienza e caratterizzato da un desiderio di ritrovare nella realtà le basi e le implicazioni della conoscenza scientifica.

Approccio formale-matematico: approccio guidato da un interesse verso gli aspetti formali e rigorosi della scienza e caratterizzato da un desiderio di ancorare il ragionamento al linguaggio matematico.

Analisi degli approcci

Le risposte degli studenti alla prima parte del questionario sociometrico sono riportate attraverso il grafico a barre in figura 4.3.1.

Un primo dato interessante emerge incrociando il numero di nomine di ciascuno studente con il voto ottenuto da tale studente nel compito in classe sulla *pars destruens*, tabella 4.3.2. Si osserva infatti che gli studenti più nominati sono quelli che nel compito in classe hanno ottenuto il voto maggiore.

PARAGRAFO 4.3

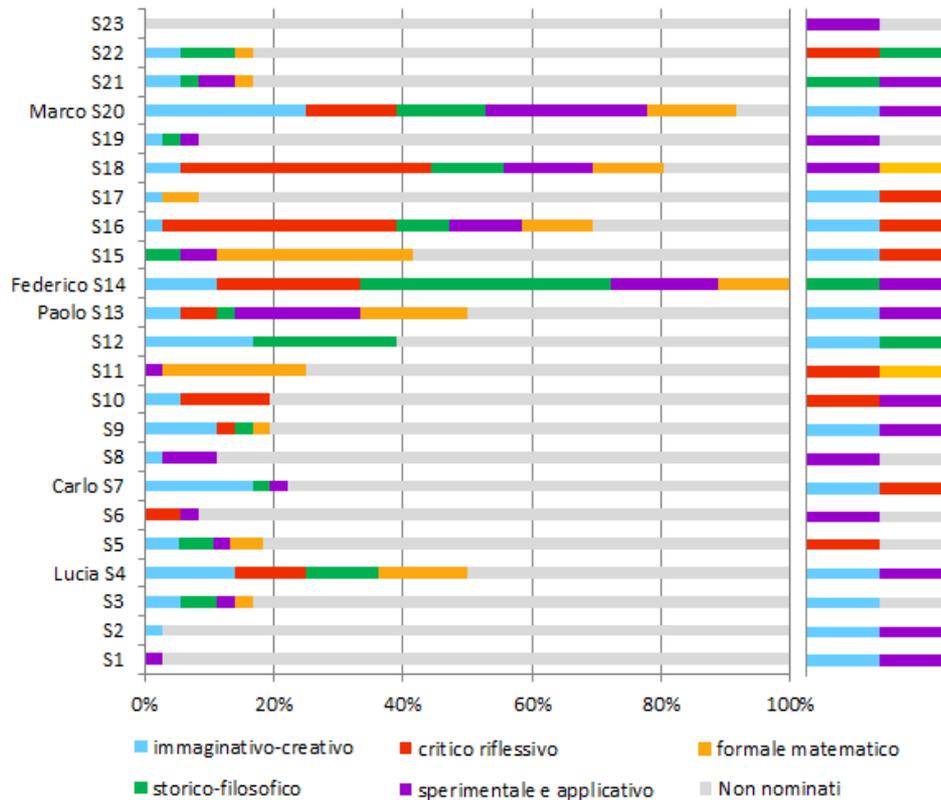


Figura 4.3.1 A sinistra, grafico a barre percentuale riguardante gli approcci attribuiti a ciascuno studente dai compagni di classe. Ciascuna riga è normalizzata a 38 voti, numero massimo di voti per l'approccio ottenuti da uno studente, S14.

A destra, grafico che mostra gli approcci che ogni studente ha attribuito a se stesso.

Un secondo dato molto interessante emerge dall'analisi del grafico a barre: a quasi tutti gli studenti sono attribuiti più di due approcci. La discussione di questo dato è rimandata al termine del paragrafo.

Infine, la possibilità di conoscere gli approcci di ciascuno studente ha permesso di individuare facilmente e dare coerenza alle affermazioni dell'intervista dello studente sul significato personale attribuito all'apprendimento della fisica e sull'immagine di fisica che ha senso per tale studente.

PARAGRAFO 4.3

Tabella 4.3.2 Tabella in cui sono riportati in ordine decrescente il numero di nomine ottenute da ciascuno studente nel questionario sugli approcci. Nella colonna a destra è riportato il voto ottenuto dallo studente nel compito sulla pars destruens.

STUDENTE	NOMINE PER GLI APPROCCI	VOTO DEL COMPITO
S14 Federico	36	8-
S20 Marco	33	9
S18	29	9
S16	25	9-
S13 Paolo	18	9-
S4 Lucia	18	8
S15	15	Assente
S12	14	6,5
S11	9	8,5
S7 Carlo	8	5,5
S5	7	6,5
S10	7	5,5
S9	7	4,5
S22	6	6-
S21	6	5,5
S3	6	4
S8	4	4,5
S19	3	Assente
S6	3	5
S17	3	4
S1	1	6
S2	1	5
S23	0	4,5

In tabella 4.3.3 sono riportati i tre studenti più votati dai compagni di classe per ciascun approccio. Quello che ci si potrebbe aspettare è che ad approcci diversi corrispondano studenti diversi, ma questo risulta essere vero solo in parte: i 15 posti disponibili in tabella sono occupati da 9 studenti diversi. Addirittura due studenti, Federico (S14) e Marco (S20), sono tra i tre studenti più nominati in ben tre categorie su cinque.

PARAGRAFO 4.3

Tabella 4.3.3 Griglia con i 3 studenti più votati dai compagni di classe per ciascun approccio.

	Più votato	Secondo	Terzo
Approccio immaginativo-creativo	Marco S20	S12	Carlo S7
Approccio critico riflessivo	S18	S16	Federico S14
Approccio storico-filosofico	Federico S14	S12	Marco S20
Approccio sperimentale e applicativo	Marco S20	Paolo S13	Federico S14
Approccio formale-matematico	S15	S11	Paolo S13

Il questionario sociometrico: origine, obiettivi, descrizione

La seconda parte del questionario sociometrico ha lo scopo di ottenere informazioni circa il livello e il tipo di autorevolezza degli studenti. Agli studenti sono rivolte 7 domande: a ciascuno studente è chiesto infatti di nominare al massimo 3 studenti a cui attribuisce una particolare bravura nello studio della fisica o nella risoluzione degli esercizi, una notevole abilità nell'affrontare le esperienze di laboratorio di fisica, un'affinità o lontananza di pensiero rispetto alla comprensione della fisica. Le ultime due domande del test riguardano aspetti extra disciplinari: la prima è sulle competenze musicali. Trattandosi di una quinta liceo scientifico - indirizzo musicale si è voluto indagare anche questo aspetto di autorevolezza per ricercare un possibile collegamento con le autorevolezze disciplinari e per verificare se una competenza musicale possa legarsi all'idea idiosincratICA di fisica di alcuni studenti. La seconda domanda extra disciplinare misura quanto uno studente sia integrato con i compagni di classe e dunque quanto sia "popolare" anche per ragioni affettive oltre che per le sue effettive competenze disciplinari.

Analisi delle autorevolezze

Le risposte alla seconda parte del questionario sociometrico sono riportate in figura 4.3.2. Come nella prima parte del questionario sociometrico, anche in questo caso si osserva come a ciascuno studente siano attribuite quasi tutte le categorie riportate nel questionario. E' interessante notare come Federico (S14), Marco (S20) e S18, tre studenti molto autorevoli per quanto riguarda la fisica, siano invece poco nominati per quanto concerne la categoria "compagni di svago"; questo indica che tali studenti, sebbene molto autorevoli, sono poco inseriti nella classe.

PARAGRAFO 4.3

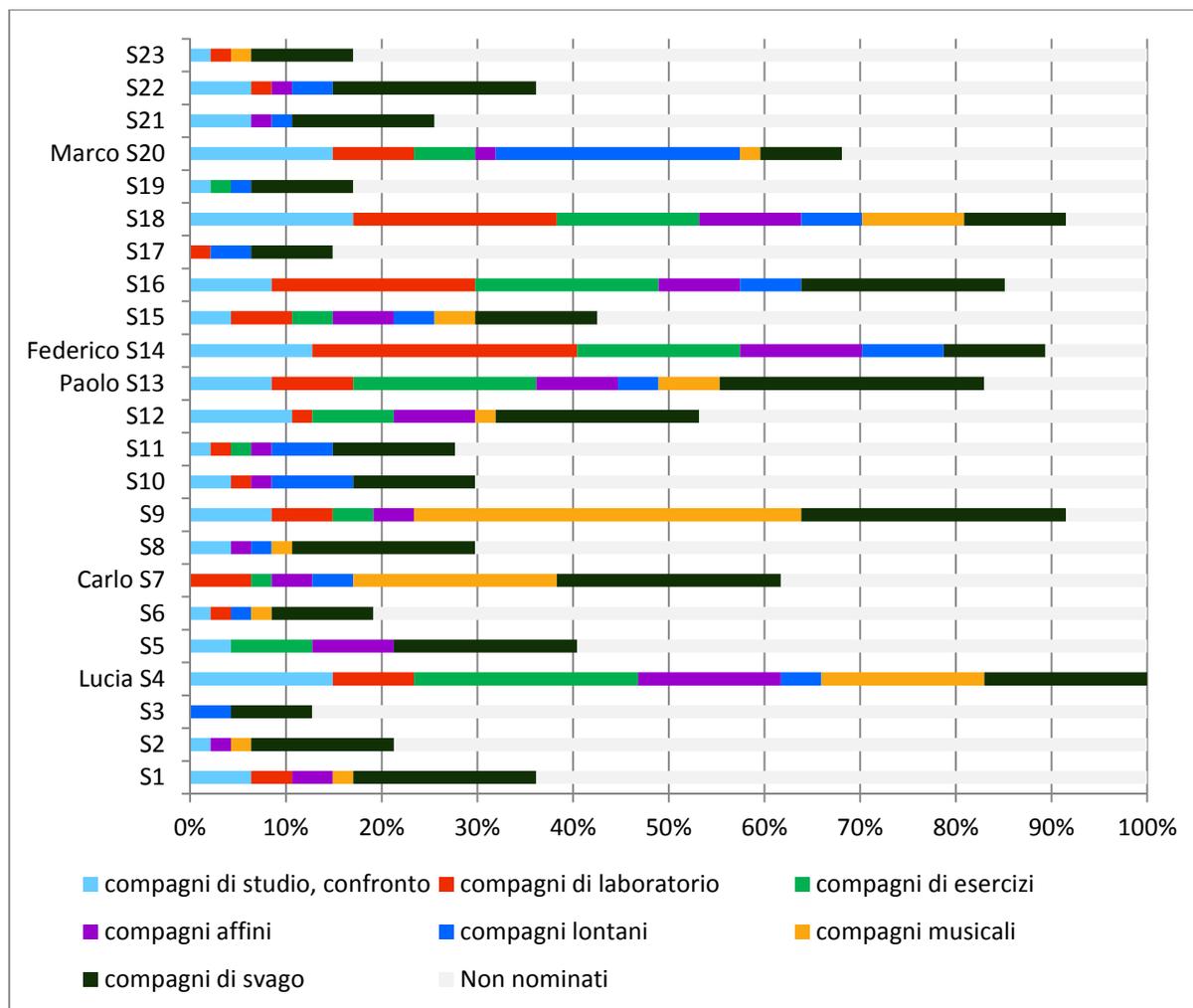


Figura 4.3.2 Grafico a barre percentuale riguardante l'autorevolezza attribuita a ciascuno studente dai compagni di classe per ciascuno dei campi analizzati. Ciascuna riga è normalizzata a 47 voti, numero massimo di voti ottenuti da uno studente, S4.

In tabella 4.3.4 sono invece riportati i 3 studenti più votati per ciascuna domanda e dunque i più autorevoli in uno degli aspetti presi in considerazione: comprensione teorica (compagni di studio), risoluzione degli esercizi (compagni di esercizi), svolgimento delle prove di laboratorio (compagni di laboratorio), competenze musicali (compagni musicali). Si è anche voluto indagare sulla capacità degli studenti di essere compresi o meno dai compagni nell'espone questioni di fisica (compagni affini, compagni lontani), così come sul loro livello di popolarità (compagni di svago).

PARAGRAFO 4.3

Tabella 4.3.4 Tabella con i 3 studenti più votati per ciascuna categoria.

	Studente più votato	Secondo	Terzo
Compagni di studio	S18	Marco S20	Lucia S4
Compagni di laboratorio	Federico S14	S18	S16
Compagni di esercizi	Lucia S4	Paolo S13	S16
Compagni affini nel modo di pensare	Lucia S4	Federico S14	S18
Compagni lontani nel modo di pensare	Marco S20	Federico S14	S10
Compagni musicali	S9	Carlo S7	Lucia S4
Compagni di svago	S9	Paolo S13	Carlo S7

Discussione finale sul questionario sociometrico

Dall'analisi dei due grafici a barre percentuali si osserva che a quasi tutti gli studenti sono stati assegnati tutti gli approcci e tutte le forme di autorevolezza riportate nelle due parti del questionario sociometrico. Inoltre, soprattutto per la prima parte del questionario, si ritrova un buon accordo tra il numero di nomine ricevute da uno studente e il corrispondente voto nel compito sulla *pars destruens*.

Questi due elementi suggeriscono una particolare forma di distribuzione dell'autorevolezza nella classe: una distribuzione più per *leadership* che per quella che viene chiamata col termine inglese *accountability*, ovvero quella forma di riconoscimento che non passa necessariamente attraverso un carisma personale, ma all'essere portatore di un particolare interesse intellettuale (*intellectual stakeholder*). Si può avere *accountability* perché si è riconosciuti, per esempio, come portatori di un'esigenza di coerenza formale o argomentativa, portatori di un'esigenza di concretezza o di ancoraggio alla realtà oppure, ancora, perché espressione di un pensiero originale e creativo. L'*accountability* è uno dei quattro principi che favoriscono quello che in letteratura di ricerca è noto come *productive disciplinary engagement* (Engle & Conant, 2002) e che si reputa necessario affinché si realizzi un ambiente particolarmente fecondo per l'*appropriazione*. Nel loro articolo, Engle e Conant definiscono così l'*accountability*;

“To be accountable in our sense of the term, students are expected to consult others in constructing their understandings in a domain; they cannot purposely ignore the relevant work of others without justification (Resnick & Hall, 2001). Thus, such accountability does not require acceptance of others' views, but instead responsiveness to them. In

PARAGRAFO 4.3

addition, students are held responsible for either respecting classroom disciplinary norms or explaining why they are doing otherwise. We wish to emphasize that the accountability we refer to here is not an external accountability, in which outsiders decide whether students have met standards. Instead we refer to an internal accountability, in which students' influence within their learning environment is affected by how well they account for how what they are doing is responsive to what others have done and to community norms for good practice (Lerner & Tetlock, 1999). The principle is an expression of the value that each member of a learning community is not an authority unto himself or herself, but one intellectual stakeholder among many in the classroom and beyond.” (Engle & Conant, 2002)

Per poter avere l'*accountability* sono dunque fondamentali dinamiche di classe che favoriscano il confronto tra studenti, permettendo il riconoscimento delle loro istanze intellettuali. E' inoltre fondamentale che gli studenti stessi siano disposti a confrontarsi tra loro e a riconoscere ai propri compagni di classe tali esigenze intellettuali.

Il profilo dei due grafici a barre percentuali e la corrispondenza nomine-voti del compito sembra invece dimostrare che gli studenti non sono riconosciuti dai compagni di classe per le loro esigenze intellettuali, quanto piuttosto per la loro leadership o carisma, strettamente legati, peraltro, al livello di competenza disciplinare. Riconoscere ad uno studente una leadership e non un'esigenza intellettuale significa non riconoscergli una specificità; si ipotizza che sia tale mancanza di riconoscimento di specificità che determina le barre multicolori dei grafici.

La distinzione dei compagni di classe in base al carisma e non in base all'*accountability* rappresenterebbe una grossa differenza con la sperimentazione di termodinamica, dalla quale è nato il costrutto di *appropriazione*. A detta dall'insegnante di classe e dai ricercatori che osservavano, nella classe studiata in quella sperimentazione non vi erano leadership spiccate; diversi studenti e diverse studentesse avevano ruoli riconosciuti diversificati e questi permettevano il confronto, nelle attività scolastiche, di approcci idiosincratici differenti (si veda l'esempio del "filosofo" Matteo, paragrafo 1.3).

Se fosse stato possibile utilizzare il questionario sociometrico in quella sperimentazione si sarebbero probabilmente osservati grafici a barre percentuali più uniformi nelle nomine per ciascuno studente e a ciascuno studente sarebbero stati assegnati meno approcci e autorevolezze. Future sperimentazioni permetteranno di utilizzare in altre classi il questionario sociometrico progettato dall'autore di questa tesi per questa sperimentazione, permettendo di confermare o meno la validità dell'ipotesi sull'interpretazione dei grafici a barre percentuali e sulla situazione collettiva della classe.

PARAGRAFO 4.3

La mancanza di *accountability* sarebbe coerente con le sensazioni emerse dall'osservazione in classe e con il profilo della classe fornito dall'insegnante nel paragrafo 3.1: si è infatti osservato che la comprensione del percorso di fisica quantistica è stata portata avanti da pochi studenti della classe (tendenzialmente i cinque più votati nella prima parte del questionario). E' mancata una discussione collettiva, un confronto collettivo, basato sulle diverse esigenze degli studenti e teso a comprendere collettivamente i concetti relativi alle varie dimensioni del percorso: multi-prospettiva, multi-dimensionalità, longitudinalità.

La seconda parte del questionario sociometrico rivela un dettaglio che può fare ulteriore luce sul contesto di classe: in figura 4.3.2 si osserva infatti come i riferimenti maggiori per la fisica, Federico (S14) Marco (S20) e S18, siano ai margini della classe.

Le autorevolezze disciplinari sono dunque isolate, non sono parte del gruppo, confermando come non ci sia un contesto di confronto collettivo e manchi l'interesse nella maggior parte degli studenti di portare avanti e approfondire il discorso disciplinare.

Addirittura, come riportano le interviste di Carlo (S7) e Marco (S20), la classe sembra esser stata addirittura ostile a tali confronti:

“[Se il percorso] è stato stimolante: sì. [Se ci siamo] confrontati tra di noi no, sennò dopo ci scanniamo. Però secondo me sì è stato stimolante. Adesso non lo so se per tutti o no, però secondo me sì.” (Carlo, S7)

“Con alcune persone sì [mi sono confrontato], altre purtroppo non erano particolarmente interessate [...] non tutte le persone sono stimolate dal dover riprendere concetti così complessi da soli. Io almeno credo che io l'avrei fatto, S18 l'avrebbe fatto, altre due o tre persone l'avrebbero fatto, ma basta. Non è un vanto, ma semplicemente una constatazione.” (Marco, S20)

L'analisi del questionario sociometrico sembra dunque confermare le impressioni avute in classe e riportate nel capitolo 3: il contesto di questa sperimentazione è tale per cui la dinamica sociale non è una dinamica che permette di riconoscere responsabilità e ruoli all'interno della fisica e viceversa lo studio della fisica non “getta ponti”, non veicola relazioni interpersonali tra i compagni di classe che vadano oltre la fisica stessa.

Il questionario iniziale

L'analisi del questionario sociometrico e la mancanza di *accountability* che ne è emersa hanno portato a considerare l'unico momento collettivo del percorso, la discussione sul

PARAGRAFO 4.3

questionario iniziale, per validare le ipotesi sulle dinamiche collettive riportate sopra. In tabella 4.3.5 si riporta la sequenza temporale degli interventi (riportando quale studente è intervenuto e se interveniva in merito a interventi precedenti) e se sono stati spontanei o richiesti dalla docente.

La dinamica della discussione si caratterizza per l'elevata spontaneità degli interventi e per l'elevata partecipazione di alcuni tra gli studenti più autorevoli della classe: S14 (Federico), S16 e S20 (Marco). Sia gli studenti meno autorevoli sia le studentesse, seppur esprimendo osservazioni interessanti, hanno fatto fatica ad inserirsi nel discorso portato avanti con forza dagli studenti più autorevoli, come si osserva analizzando la parte centrale della tabella. Tutti gli interventi sono sempre stati rivolti a Levrini e Fantini, che hanno condotto la discussione del questionario iniziale.

Utilizzando la "lente" dell'*accountability* per analizzare la discussione di classe si osserva che la frequenza degli interventi sembra confermare lo sbilanciamento emerso dai grafici a barre tra studenti autorevoli e studenti non autorevoli. Questi ultimi hanno esposto interventi interessanti, ma sembra che abbiano affidato ai compagni più autorevoli (S14, S16 e S20) il compito di portare avanti la discussione. Sembra dunque confermata la mancanza di *responsiveness* (capacità di risposta) tra gli studenti non autorevoli della classe, caratteristica fondamentale per avere l'*accountability*.

Si osserva invece una dinamica di rafforzamento, di riaccoppiamento tra gli studenti più autorevoli nel tentativo di arrivare ad una conclusione del dibattito. Tra di loro sembra dunque esserci un confronto, una *responsiveness*, sebbene gli interventi fossero rivolti alla docente.

PARAGRAFO 4.3

Tabella 4.3.5 Tabella in cui si riporta la sequenza degli interventi, indicando quale studente è intervenuto e in che modo.

Argomento	Intervento	Spontaneo
Discussione sulla prima parte del questionario. Tema: continuità e discontinuità delle proprietà di oggetto e processo	S19	Si
	S2	Si
	S20 (Marco)	Si
	S14 (Federico) riprende S19	Si
	S20 (Marco)	Si
	S21	Si
	S12	No
	S8	Si
	S2 si oppone a S8	Si
	S20 (Marco)	Si
	S14 (Federico) prosegue S20 (Marco)	Si
	S20 (Marco) prosegue S14 (Federico)	Si
	S5 riprende S14 (Federico)	Si
	S16	Si
	S20 (Marco) riflette sull'osservazione di S16	Si
	S15	No
	S14 (Federico) completa S15	Si
	S15 conferma S14 (Federico)	Si
	S14 (Federico) recupera S15	Si
	S16 si aggancia a S14 (Federico)	Si
	S14 (Federico)	Si
	S16	Si
	S20 (Marco) si oppone a S16	Si
	S18	Si
	S14 (Federico) si riallaccia a S18	Si
	S16 prosegue S14 (Federico)	Si
	S19 si oppone a S18	Si
	S14	Si
	S19	Si
	S2	Si
S13 (Paolo) riprende S14 (Federico)	Si	
Discussione sulla seconda parte del questionario. Tema: metodi utilizzati in fisica per descrivere e comprendere un fenomeno.	S9	No
	S1	Si
	S16	Si
	S7 (Carlo) si ricollega a S16	Si
	S6 si oppone a S7 (Carlo)	Si
	S18	Si
S17	No	

4.4 ANALISI DELLE INTERVISTE

Alla luce dei dati ottenuti dall'analisi del questionario, dei compiti in classe e dei temi sono stati scelti per le interviste, in base ai criteri riportati nel paragrafo 3.3, i seguenti studenti: S1 e S7 (Carlo) per la dimensione idiosincratca mostrata nel tema; S4 (Lucia) e S13 (Paolo) per l'autorevolezza nel risolvere esercizi e la loro centralità nei rapporti tra compagni di classe; S14 (Federico), S20 (Marco) e S18 perché sono tra gli studenti più votati nel questionario sociometrico; S9 per le competenze musicali; S15 e S21 per affermazioni e domande espresse durante le ore scolastiche.

Tra questi 10 studenti, sono stati scelti per la costruzione dei profili solo i 5 di cui è riportato il nome. Questi 5 studenti rappresentano buona parte degli atteggiamenti mostrati dagli studenti nei confronti della fisica quantistica e del percorso.

La costruzione dei profili è stata condotta facendosi guidare dal costruito dell'*appropriazione*. In particolare, ispirandosi dall'analisi delle interviste condotte alla fine della sperimentazione di termodinamica, si è analizzato il discorso di ciascuno studente applicando i vari indicatori per valutare se e come si può evincere che lo studente si sia appropriato dei concetti di base della fisica quantistica (cfr, Paragrafo 1.3, pp. 27-28).

Operativamente, dopo aver trascritto le interviste, si è proceduto secondo i seguenti passaggi:

1. si è ricercato se c'era un'idea idiosincratca dello studente nella trascrizione dell'intervista, andando a cercare le parole e le espressioni maggiormente ripetute (applicazione Indicatore A);
2. si è analizzato se e come l'idea idiosincratca abbia portato lo studente a selezionare come particolarmente importante alcuni aspetti disciplinari (applicazione Indicatore B);
3. si è analizzato se e come gli approcci epistemologici dello studente abbiano favorito la comprensione degli aspetti disciplinari del percorso e come tali approcci si ricollegano all'idea idiosincratca (applicazione indicatore C);
4. si ricerca se e come l'idea idiosincratca era stata espressa dallo studente in altri contesti: compito sulla *pars destruens*, tema, ore di lezione (applicazione indicatore D).
5. recuperando la seconda parte del questionario sociometrico si è determinato se e come l'idea idiosincratca avesse posizionato lo studente nella classe (applicazione indicatore E).

Le bozze dei profili così ottenute sono state raffinate attraverso triangolazione, coinvolgendo Levriani, Tasquier, Fantini e l'autore di questa tesi.

S14 Federico: Coraggio, curiosità e costanza: come entrare nel nuovo ragionamento

Federico è lo studente che ha ottenuto il maggior numero di voti nel questionario sociometrico, rappresentando lo studente più autorevole e di riferimento per la classe. In effetti Federico è uno studente culturalmente ricco, serio e affidabile, che interviene spesso durante le lezioni con osservazioni e domande. L'impegno nel complesso costante gli ha permesso di ottenere buone valutazioni in tutte le materie.

Idea idiosincratica. Dall'intervista emerge come Federico si concentri sul ragionamento, sui metodi utilizzati in fisica quantistica per mettere in discussione vecchie concezioni, costruire, dimostrare o esporre nuovi concetti.

L'intervista è ricchissima di termini e parole che designano tipologie o aspetti del ragionamento: "sintetizzare", "confutare", "distruggere", "costruire", "entrare nell'idea", "discorso organizzativo", "ragionare", "metodo di ragionamento", "criterio", "dimostrazioni", "processo matematico", "impostazione data al percorso".

Tuttavia, tutta l'intervista sembra articolarsi attorno ad un'idea ben precisa sul tipo di atteggiamento verso la fisica e sui processi di ragionamento che hanno attirato l'attenzione di Federico: "[...] Io penso che servano come *atteggiamenti fisici*: prima confutare quello che tu credi, che ti mette un attimo di scombussolamento. Dopo di che, dopo aver diciamo distrutto le tue certezze costruirne delle altre e poi dopo ci vuole costanza per riuscire a entrare in quel metodo di ragionamento."

Del modo in cui Federico descrive le tre fasi del processo di comprensione sono particolarmente interessanti gli atteggiamenti che descrive o che lascia intendere: la *disponibilità* e il coraggio a mettere in discussione e ad accettare uno "scombussolamento" iniziale, la *volontà* e la curiosità a voler costruire nuove idee e la *costanza*, ovvero l'attenzione e la pazienza, per entrare in un nuovo ragionamento.

Uso dell'idea idiosincratica durante l'intervista (applicazione degli indicatori B e C).

Nell'intervista emerge come e quando Federico abbia maturato questo interesse verso il processo di comprensione ma emerge anche, viceversa, come questa attenzione esplicita ai processi di costruzione della conoscenza lo abbia guidato non solo a capire gli elementi portanti del percorso ma anche a cogliere le sfumature dei concetti più complessi.

I contesti fondamentali per la formazione della sua idea idiosincratica sono stati l'esperimento di Stern e Gerlach, il dibattito continuo-discreto e l'approfondimento sull'"esperimento più bello della fisica" culminato con le letture di Lévy-Leblond. Federico li descrive così:

PROFILO DI FEDERICO

“I risultati degli esperimenti Stern e Gerlach ti lasciano un po’ esterrefatto perché ti aspetteresti una cosa diversa. Però chiaramente dopo questo tuo estraniamento si chiarisce. [...] Io mi aspettavo un comportamento classico, un “mezzo e mezzo”. Però alla fine non si sarebbero spiegati appunto quei risultati lì che abbiamo presi per veri, perché chiaramente sono dati sperimentali.”

Intervistatore: “Quali sono stati gli strumenti che ti hanno permesso di comprendere meglio gli aspetti della fisica quantistica?”

F: “sicuramente il primo concetto – il distinguo discreto-continuo – che personalmente se non avessimo fatto tutto quel percorso prima, preliminare, non avrei compreso. Cioè se uno mi avesse detto ‘discretizzo il processo, discretizzo l’oggetto’ senza aver fatto tutto quell’aspetto preliminare delle onde del mare, quelle schede su quei dibattiti secolari, sicuramente non l’avrei compreso, questo discorso della discretizzazione. Poi un’altra cosa che potrei dire... mi ha aiutato anche l’approfondimento dell’esperimento più bello che mi ha distrutto, cioè mi ha fatto ragionare su questa doppia interpretazione: se la guardo come un’onda, se la guardo come un corpuscolo e quindi dopo di questo anche sicuramente quel brano di Leblond su il quantone, l’ornitorinco. Anche quello mi ha aiutato molto. [...] Io rifiuto un po’ l’idea della sintesi. Sia onda sia corpuscolo si fa una sintesi, invece, da quello che ho capito, questo quantone non è né onda, né corpuscolo, quindi secondo me sto cercando di entrare nell’idea che non è onda né corpuscolo, ma un terzo oggetto. [...] Quello che ho capito è che sono tre cose diverse, che però tra le prime due e il quantone c’è un’uguaglianza su certi aspetti fenomenologici. Il comportamento a onda, il comportamento a corpuscolo, che però non si possono sintetizzare. Non puoi dire: è un’onda ed è un corpuscolo, il quantone. E’ una terza cosa.”

Federico, non solo ha colto perfettamente il significato della metafora dei calzini di Erwin, ma ha anche colto il valore della metafora per costruire un nuovo “discorso organizzativo”, dopo che il concetto classico di probabilità aveva mostrato la sua inefficacia:

“[Le metafore] mi hanno aiutato moltissimo. [...] Quella dei calzini di Erwin l’ho capita, il discorso organizzativo, quello che deve venir fuori dalla metafora. Siamo noi quando facciamo la misura, alla fine, che andiamo a fargli scegliere uno stato. In realtà loro vivono in una sovrapposizione di stati e alla fine lo Stern e Gerlach non fa altro che essere, secondo la metafora, come vogliamo organizzare i calzini. [...] [Occorre] pensare ad uno Stern e Gerlach come fosse un criterio di organizzazione dei calzini. [...] Ragionando in fisica classica avremmo sempre usato una probabilità classica, $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{2}$, cioè uno spin $\frac{1}{2}$.

PROFILO DI FEDERICO

Invece quello che ho capito abbastanza [...] è il discorso della probabilità come ampiezza di probabilità.”

Grazie a questo suo atteggiamento e alla maturazione di strumenti metacognitivi, Federico è in grado di discutere con l'intervistatore (l'autore di questa tesi) in modo piuttosto raffinato sul concetto che risulta tra i più delicati e complessi: l'indeterminazione.

F: “Heisenberg ha messo in chiaro che c'è questo problema sia di misura ma in realtà è un problema intrinseco della particella quantistica che è impossibile dargli una posizione e una velocità, quindi una quantità di moto. In quanto, se se ne dà una, l'altra non è più determinata, cioè l'altra risulta più indeterminata.” [...]

I: “Se noi avessimo degli strumenti precisi, fossimo il demone di Maxwell, allora verrebbe meno la probabilità in meccanica quantistica?”

F: “No, secondo me no. Non verrebbe meno perché comunque noi guardiamo uno degli stati in cui collassa l'elettrone, ma in realtà l'elettrone ha una sovrapposizione di stati e questo fa sì che se noi misuriamo, misuriamo uno degli stati e lo facciamo collassare lì. [...] e quindi secondo me non è possibile anche se avessimo un demone dare un più o un meno deciso ad un elettrone. [...] Prima della misura lui si trova nella sovrapposizione. Collassa solamente quando effettuiamo una misura fisica.”

Federico parla di indeterminazione anche in quest'altro passaggio interessante con l'intervistatore, a riprova del lavoro di *appropriazione* dei concetti fisici da lui stesso operato:

F: “La metafisica mi ha fatto pensare a un quadro di De Chirico dove dietro ci sono nello sfondo quelli che a me sembravano degli edifici in muratura con dei camini accesi. La prof fa: “ In realtà questa è una locomotiva.” Dopo l'ho guardata con gli occhi della locomotiva e in effetti sembrava una locomotiva che passava dietro un muro invece dei camini accesi. Quindi ho detto: “Vedi alla fine anche questa è indeterminazione, ma volutamente, perché per De Chirico quella è una locomotiva e anche dei camini oppure anche dei camini con le nuvole sopra invece che il fumo. E anche questo alla fine è un processo di indeterminazione che sta alla base di quel quadro come è alla base della realtà.”

I: “Più stati contemporaneamente.”

F: “Chiaro. Dipende da come lo facciamo collassare noi? Cioè te Luca magari l'avresti fatto collassare in un treno. Io l'ho fatto collassare in degli edifici col camino acceso.”

PROFILO DI FEDERICO

Dall'intervista è emerso con chiarezza che l'idea idiosincratica è coerente con una rinnovata visione della fisica in cui hanno un ruolo particolare gli aspetti concettuali e filosofici della fisica:

“Sicuramente l'approccio più epistemologico, più filosofico, più concettuale l'ho notato bene e mi è anche piaciuto perché è un altro modo di vedere la fisica a cui nei primi tre anni non ero stato abituato.[...] E' servito per darmi questa idea qua di una fisica che non è solamente formule, matematica, esercizi ma è anche filosofia e ragionamento.[...] La mia idea di fisica è cambiata da quella scienza che deve determinare tutto, deve calcolare, dirti tutto con certezza alla fine la fisica è diventata come una ricerca di verità che non ha fine, di verità che poi vengono smentite o vengono rese ancora più vere da una teoria dopo.”

Il suo interesse per il ragionamento lo porta, sempre coerentemente, a ritenere che l'approccio filosofico-concettuale non possa prescindere da una solida base di argomentazione logico-matematica:

“Forse il fatto di farle solamente con un approccio, diciamo, più filosofico, più concettuale, manca magari un approccio matematico che noi chiaramente non siamo in grado di gestire. [...] Forse nella comprensione totale dell'argomento mi manca l'aspetto matematico, l'aspetto più dei passaggi logici delle dimostrazioni, che molto spesso vengono date, è così perché è così. Si perdono dei passaggi logici, da una formula iniziale, da un concetto iniziale espresso matematicamente arrivi a un concetto finale.”

L'idea idiosincratica nell'intero percorso di Federico (applicazione degli indicatori “D e E”).

L'attenzione per le questioni, anche filosofiche, di metodo e per i processi di costruzione della conoscenza si ritrova anche nel tema, con l'attenzione di Federico per gli approcci utilizzati dagli scienziati studiati durante il percorso:

“All'interno del problema concettuale del modello fisico [di oggetto quantistico], vi è anche un aspetto ancor più profondo che è l'approccio alla ricerca: se per Bohr e Heisenberg l'approccio operazionista, quindi sperimentale, tipico della scienza moderna – “tieniti la formula e calcola” – è prevalente, in altre personalità come Schrödinger e Einstein vi è un approccio più problematizzante, al limite con la filosofia. Ontologicamente, a dire di Schrödinger, se cade il concetto di determinazione spaziale e

PROFILO DI FEDERICO

temporale cade anche l'esistenza propria di una cosa che sembra "non essere" per la logica fisica e filosofica. E allora qual è l'immagine che può dare la fisica di se stessa?"

Federico, come emerge dal questionario sociometrico, è lo studente a cui è attribuita maggiore autorevolezza in fisica ma non solo. Il suo spiccare in tante categorie lo rendono autorevole da un punto di vista culturale più generale. Probabilmente è anche questa sua capacità di muoversi con disinvoltura tra le diverse dimensioni della fisica (formale, sperimentale ma anche logico-argomentativa e metodologica) che gli conferiscono tanta autorevolezza.

Riassumendo, l'analisi porta a ritenere che Federico sia un vero caso di *appropriazione*. L'idea idiosincratca di Federico riguardante i metodi utilizzati dalla fisica quantistica (Indicatore A) è stata infatti una chiave consapevole (Indicatore C) e non occasionale (Indicatore D) per accedere ai contenuti e a rielaborarli in modo molto personale (Indicatore B). Un aspetto particolarmente interessante è che l'idea di Federico è il risultato di una *appropriazione* dell'approccio e della macro-struttura che si è voluto dare al percorso e che Federico ha trasformato in uno strumento metacognitivo per posizionarsi rispetto ai singoli nodi concettuali e appropriarsi dei concetti di base. Questa sua capacità di muoversi tra aspetti locali e globali della conoscenza e tra le sue varie dimensioni lo rende un punto di riferimento culturale molto autorevole all'interno della classe (Indicatore E).

S7 Carlo: Anticonformismo e provocazione

Carlo è uno studente riconosciuto dalla classe, e da se stesso, come particolarmente creativo con un forte interesse in campo musicale. Non ha mostrato un particolare coinvolgimento nello studio della fisica anche se è stuzzicato da quegli aspetti che ritiene stimolanti per la sua creatività. Nonostante le sue potenziali capacità, proprio perché i suoi interessi ricoprono ambiti diversi da quelli strettamente disciplinari, non si è impegnato, nell'arco dell'anno, con costanza e i risultati sono stati, nel complesso, appena sufficienti.

Idea idiosincratca: Dall'intervista emerge come per Carlo l'aspetto interessante della fisica quantistica sia la sua capacità di modificare, cambiare, trasformare le idee che uno ha sul mondo e fare entrare in un'altra realtà, in un'altra visione del mondo.

Le parole che caratterizzano l'intervista sono: "altra realtà", "altra lente di ingrandimento", "altra strada", "altro linguaggio".

PROFILO DI CARLO

Uso dell'idea idiosincratica durante l'intervista: applicazione degli indicatori "B e C".

Questa sua idea è sviluppata nel corso dell'intervista e, coerentemente ad essa, quando Carlo parla del percorso concettuale, si concentra su quei nodi disciplinari che hanno contribuito a delineare una visione nuova, diversa, "altra", se non addirittura paradossale, rispetto alla visione comune: "una realtà dentro un'altra realtà". Quasi sempre questa diversa visione è ottenuta dall'unione inaspettata e inusuale di due concetti o due aspetti della fisica apparentemente molto lontani. Questi nodi sono i concetti di sovrapposizione, ampiezza di probabilità, indeterminazione e complementarità. Si riportano di seguito le parole di Carlo in cui emerge, da una parte, il modo personale in cui ne parla e, dall'altra, diverse debolezze che sottolineano quanto le intuizioni non siano state sviluppate con particolare attenzione. Inoltre, le frasi che seguono mostrano due elementi in comune: a) la novità presentata come unificazione; b) l'attenzione ad aspetti sottili dei concetti, ovvero aspetti che, anche se rimangono a livello di intuizioni, potrebbero essere la base per un apprendimento raffinato e profondo. Questi aspetti sono: i) la sovrapposizione come contesto in cui la definizione di una "cosa" cambia perché ora non si può tener solo conto di "cosa sia" ma anche di cosa faccia"; ii) il riconoscimento della profonda novità che ha in sé il costrutto "ampiezza di probabilità" e della necessità di fare un salto immaginativo per coglierne l'essenza; iii) la scoperta che, a volte, l'interpretazione di un concetto fisico possa emergere dalla combinazione di aspetti matematici e aspetti "umani". Per quello che riguarda il concetto di complementarità, come si argomenterà anche in seguito, il fascino per "unificazione" e la mancanza di uno sviluppo delle idee hanno portato Carlo a non fare il salto interpretativo che si richiedeva, ovvero a pensare che l'oggetto quantistico non sia né onda né corpuscolo. Le frasi/espressioni sottolineate sono quelle mostrano quanto si è appena discusso.

"L'esperimento di Stern e Gerlach e tutto quel discorso della sovrapposizione degli atomi è stato un argomento che mi è piaciuto perché dà ragione del fatto che non può esistere una sola, come posso dire, definizione che tu puoi dare alle cose. Nel senso, [in fisica classica] io le cose le posso vedere sia per come sono oppure le posso vedere per quello che fanno. Secondo me la fisica quantistica ha unito questi due aspetti, quello che sono e quello che fanno [...]"

"Secondo me è interessante vedere come una cosa come l'ampiezza che uno magari si immagina un angolo, insomma uno spazio, abbia a che fare con una cosa così astratta tra virgolette come la probabilità. E' bello, nel senso è come se io unisco, non so, l'acqua con l'elettricità [...] è come se io metto un filo elettrico nell'acqua [...] io mi immagino che il filo elettrico, cioè se tocco il filo muoio, però se lo tocco realmente non muoio. Io ho

PROFILO DI CARLO

interpretato così l'ampiezza di probabilità. A me è piaciuto proprio questa unione di termini che porta poi ad una cosa totalmente diversa da quella che io mi immaginavo."

"la discussione tra Bohr e Heisenberg mi ha aiutato a capire quello che Heisenberg voleva dire attraverso la matematica. Nel senso questo, chiamiamolo, rapporto umano e rapporto matematico nella mia testa si è unito per andare a interpretare il principio di indeterminazione."

"[...] L'ornitorinco o il menù cinese rende l'idea di questa, chiamiamola, fusione delle proprietà corpuscolari e ondulatorie [...] Secondo me è sia onda che corpuscolo. Cioè per quello che riguarda la mia visione. E' chiaro che magari come ci aveva fatto vedere la prof ci sono stati esperimenti che sono riusciti a spiegare gli effetti attraverso una visione ondulatoria piuttosto che una visione corpuscolare, però se io dovessi definire il quantone lo definirei un insieme di proprietà corpuscolari e ondulatorie che fanno sì che la quantistica abbia ragione di essere stata fondata."

Sia l'idea idiosincratica, sia l'atteggiamento mostrato nei confronti dei contenuti disciplinari sono coerenti con l'idea di apprendimento che Carlo esprime sempre nell'intervista: "Ho sempre studiato per capirli [gli argomenti] e per interiorizzarli [...] guardarli da solo, guardarli anche sotto un mio punto di vista personale e dopo confrontarli con quello che ha detto la prof in classe."

Del resto, un approccio immaginativo-creativo alla conoscenza è per Carlo la strada più semplice ed efficace per interiorizzare i concetti ed entrare in una nuova realtà. Alla domanda su quale sia stato lo strumento per lui più utile per comprendere la fisica quantistica tra immagini, esperimenti, formule, analogie, eccetera, afferma infatti:

"Io cerco di usarne tante di lenti di ingrandimento, però quella che mi ha fatto entrare dentro il linguaggio e comunque la mentalità della quantistica è stato quello di immagini, perché secondo me la fisica principalmente va capita attraverso le immagini e poi attraverso la teoria. [...] L'immagine dell'esperimento, proprio il disegno dell'esperimento e anche delle singole parti, per esempio quando l'onda si va a scontrare con l'elettrone e così. Io mi baso molto su questo tipo di approccio perché mi rimane proprio."

Anche parlando delle immagini-chiave del percorso, quali l'ornitorinco e il cilindro Carlo afferma:

PROFILO DI CARLO

“[...] quelli [mi sono serviti] proprio per farmi entrare mentalmente dentro la trasformazione che è avvenuta nell’ambito fisico.”

E’ interessante notare come nell’intervista Carlo non usi il termine metafora, ma lente di ingrandimento, un termine connesso alle immagini, al guardare. Sempre sulle immagini, dice:

C: “Quel film lì [“Il mio amico Einstein”] fa vedere bene come quando lui [Eddington] prende la tovaglia e fa vedere l’effetto della relatività su proprio cose materiali e quelli che pranzavano con lui rimangono basiti, è proprio questa cosa qua secondo me la lente di ingrandimento. Nel senso loro non si sarebbero mai immaginati che una teoria così complicata come la relatività poteva essere capita con un gesto così semplice. [...] la lente di ingrandimento è proprio usato come un paragone”

I: “Una metafora?”

C: “Esatto. [...] Io me ne faccio tante di metafore per interpretare quello che mi circonda. [...] quando tu riesci a spiegare un concetto attraverso una metafora parlando di fisica allora hai già l’80% di quello che l’argomento spiega.”

Anche se qui Carlo sembra sovrapporre la sua espressione di “lente di ingrandimento” con “metafora”, è indicativo il fatto che lui, spontaneamente non usi il termine metafora. La distinzione tra metafora e lente di ingrandimento è infatti interessante, perché delle immagini ha infatti usato soprattutto il loro potere evocativo e di focalizzazione di un aspetto, invece di coglierne quello che Federico chiamava il “discorso organizzativo”.

Non è un caso che, in riferimento alle altre due metafore, quella del menù cinese e quella dei calzini, Carlo affermi:

“Pensando alle cose che ho capito meno, penso comunque [...] al menù cinese oppure all’esperimento dei calzini. Non perché non li abbia capiti o così, ma proprio per un discorso personale, nel senso che io magari vedevo delle cose che non erano rispecchiate nel discorso che faceva la prof. [...] io interpretavo una frase della prof in una chiave diversa da quella in cui lei magari voleva trasmettercela. Per esempio il discorso che abbiamo fatto sul menù cinese: questa diciamo doppia scelta in cui tu puoi sceglierne uno solo e non potresti prendere dei piatti dell’altro menù. Secondo me questa, diciamo, privazione è un po’ troppo esagerata, nel senso è qualcosa che sì tu puoi scegliere uno dei due menù e non scegliere un piatto dell’altro menù però, già così vieni incanalato verso un unico binario. Secondo me è una cosa sbagliata.”

PROFILO DI CARLO

Queste “immagini” non avevano il potere evocativo del cilindro e dell’ornitorinco. Senza una lettura genuinamente metaforica, ovvero una costruzione di esplicite relazioni tra il sistema target (l’oggetto e il fenomeno quantistico) e il sistema sorgente (il menù cinese o i calzini), il sistema sorgente in sé non aveva alcun significato.

In questo estratto dell’intervista sembra anche comparire l’atteggiamento anticonformista di Carlo, che dice di non aver accettato la visione proposta dell’insegnante. Questo atteggiamento potrebbe avere due interpretazioni: può essere un alibi usato per mascherare una forma di insicurezza davanti alla sensazione di non aver colto il significato dei contenuti, oppure può essere il fattore stesso che ha ostacolato di nuovo un confronto con altri e, quindi, ostacolato lo sviluppo delle sue idee e il processo di comprensione delle metafore.

L’idea idiosincratica nell’intero percorso di Carlo (applicazione degli indicatori “D e E”).

La ricerca di trasformazioni, di concetti che permettano di vedere il mondo con occhi nuovi è qualcosa da sempre presente in Carlo e nella sua visione di studio, come lui stesso dice nell’intervista:

“A me piace quando un professore o una materia ti sconvolge il mondo in cui stai vivendo. [...] Come la filosofia mi ha aperto la mente in terza, la stessa cosa ha fatto la fisica quantistica in quinta. [...] Io l’ho interpretata molto come viaggio la fisica quantistica [...] con questa carica di cambiare le cose.”

La concezione di fisica di Carlo riportata in precedenza, in cui la priorità è data alle immagini rispetto alla teoria, si ritrova anche nella discussione in classe sul questionario iniziale:

“La fisica vive di concetti, di immaginazione, perché io ho sempre pensato che i fisici in realtà prima di andare a scrivere una formula matematica o comunque di formulare qualsiasi altro ragionamento razionale andassero prima a riscontrarlo nella natura e andassero prima a guardare la natura e a meravigliarsi di essa. [...] secondo me la fisica vive di immaginazione, non vive di matematica. [...] è quello il punto che secondo me connette la fisica alla natura.”

Quanto emerso dall’intervista è coerente anche con la personalità di Carlo, da lui stesso suggerita attraverso il titolo della sua tesina per l’esame di stato: “Anticonformismo e provocazione” e attraverso la scelta di collegare a questo tema la figura di Wolfgang Pauli, “un personaggio un po’ particolare” che ha elaborato “delle teorie nuove della fisica quantistica.”

PROFILO DI CARLO

Anche il rapporto coi compagni di classe sembra essere coerente con questo suo atteggiamento anticonformista. Carlo infatti afferma di non essersi confrontato coi compagni “perché sennò dopo ci scanniamo.” La mancanza di questo confronto può averlo mantenuto nella sua visione, ostacolando anche il processo di sviluppo delle sue intuizioni e idee.

Riassumendo, l'analisi condotta mostra come Carlo si sia posto nei confronti dell'apprendimento della fisica quantistica con un atteggiamento molto personale e come il percorso gli abbia dato la possibilità di trovare una posizione che lo mettesse a suo agio (Indicatore A). L'idea idiosincratica ha guidato Carlo a scegliere e interpretare i contenuti disciplinari (indicatore B) ed è coerente con una visione di conoscenza e di apprendimento più generale (indicatore C). L'interesse per le trasformazioni e l'attenzione alle immagini e alle metafore non è inoltre occasionale (indicatore D) e lo porta a svolgere un ruolo ben definito e riconosciuto – il creativo – in classe (indicatore E). Il caso di Carlo è particolarmente interessante perché, la forza della sua idea idiosincratica e del suo atteggiamento fortemente orientato all'*appropriazione* della conoscenza lo ha ostacolato nella comprensione profonda dei concetti, di cui sembra essersi appropriato, alcune volte, *indebitamente*, ovvero ha loro attribuito significati troppo personali e non accettabili fisicamente.

S20 Marco: l'empirista scettico, sostenitore di Einstein

Marco è uno studente con un forte interesse in campo informatico. In generale Marco se sostenuto da una buona motivazione, sia culturale sia relazionale, riesce ad impegnarsi in modo costruttivo raggiungendo buoni livelli di autonomia nello studio e capacità di approfondimento. Proprio per questo, come risulta anche dal questionario sociometrico, è uno studente di riferimento per gran parte della classe. I risultati disciplinari raggiunti sono stati tuttavia solo discreti proprio per la sua selettività nello scegliere quando partecipare e impegnarsi in modo costruttivo.

Idea idiosincratica. Per Marco “la scienza va utilizzata in campo tecnico [...] per creare, tra virgolette, le grandi invenzioni.” Marco è dunque molto concentrato sugli scopi pratici della scienza e sulle sue nuove applicazioni. Si vedrà come, nonostante non riesca ad accettare la fisica quantistica, in particolare l'indeterminazione, lo studente arrivi comunque ad attribuire grande valore alla teoria proprio in virtù della sua capacità di portare a nuove invenzioni, come quella del computer quantistico.

PROFILO DI MARCO

Nell'intervista, Marco ripete termini e concetti quali: "utilizzare in campo tecnico", "utilizzare in maniera proficua", "utilizzare per creare le grandi invenzioni", "idea di come funziona", "proficuo", "funzionale", "capire come questi fenomeni possono essere sfruttati", "applicare la fisica".

Uso dell'idea idiosincratica durante l'intervista: applicazione degli indicatori "B e C". Il desiderio di Marco di studiare la scienza per creare nuove invenzioni lo ha portato, dal punto di vista disciplinare, a focalizzarsi sui due concetti che più di tutti ancorano la fisica quantistica alle sue applicazioni: la sovrapposizione e l'entanglement (concetto non presente nel percorso didattico, ma approfondito individualmente).

"[Il quantone] non è sia onda, sia corpuscolo, diciamo che l'onda e il corpuscolo sono parti delle sue caratteristiche, ma non sono onda e corpuscolo, è un'altra cosa, a parte: onda più corpuscolo, più altre caratteristiche uniche del quantone. [...] Una è il principio di sovrapposizione e l'altra è l'entanglement."

Marco, durante il lavoro di fisica quantistica, ha infatti maturato l'interesse di approfondire per la tesina d'esame il tema del computer quantistico:

"[Porto il] computer quantistico. Quindi principalmente mi concentro su alcune proprietà del quantone che sono funzionali a creare un determinato sistema [...] il principio di sovrapposizione e l'entanglement, perché sono funzionali al sistema."

Marco è molto consapevole che le sue scelte sono coerenti con un suo particolare interesse per un approccio sperimentale-applicativo alla scienza:

"[Il mio approccio è] sperimentale, cioè più pratico, mi piace applicare la fisica. [...] [Nel percorso] speravo di mettere le mani in pasta, di vedere qualcosa di più pratico. [...] Sostanzialmente sono un po' un empirista, mi piace mettere le mani in pasta. Ho bisogno di mettere in pratica."

Il fatto che le proprietà come sovrapposizione e entanglement abbiano applicazioni pratiche lo porta ad avere un certo rispetto per la matematica. Infatti l'aspetto matematico è visto come

PROFILO DI MARCO

una strada verso le applicazioni che, in questo caso, permette di “cortocircuitare” la difficoltà di intuire come è fatto il mondo e soprattutto l’immagine del “mondo quantistico” e delle sue proprietà:

“A me della sovrapposizione interessava particolarmente la questione del ... io l’ho presa con un approccio un po’ più matematico che intuitivo. Il principio di sovrapposizione è difficile da spiegare intuitivamente. Per come l’ho vista io bisogna prendere in considerazione più che altro la parte matematica per riuscire ad avere delle misure che abbiano un senso, in questo caso, e per dare ragione a questa cosa.”

Marco, nell’intervista, sembra cogliere il significato concettuale della sovrapposizione e la centralità del concetto di ampiezza di probabilità ma non riesce ad attribuire realtà allo stato di sovrapposizione: esso è da lui definito uno “stato di possibilità”.

M: “Lo stato di possibilità nella mia mente è quello stato in cui un corpo non si trova né in uno stato spin $|+\rangle$ né in uno stato spin $|-\rangle$, ma in un certo senso è la combinazione lineare di entrambi. Per me quello è lo stato di possibilità.”

I: “Quindi una sovrapposizione.”

M: “Sì uno stato di sovrapposizione. L’ho chiamato stato di possibilità perché è possibile che possa essere sia in un modo che in un altro fino a quando poi non viene effettuata la misura.”

Questo punto è argomentato e discusso a lungo nell’intervista e a più riprese esprime il suo scetticismo verso i concetti chiave del tema del rapporto conoscenza-realtà: la sovrapposizione, l’indeterminazione e il concetto di probabilità non epistemica.

“Quello che dice Heisenberg mi sembra che sia una sorta di indeterminazione intrinseca dell’oggetto, come se in realtà non avesse caratteristiche ben definite di suo. [...] Io invece l’ho sempre visto in un’altra maniera, come se fosse un nostro errore. [...] non sono dell’idea che questa indeterminazione sia intrinseca [...] [Per me] è una limitazione fisica intrinseca perché dovremmo trovare un ipotetico strumento di misura che misura le cose senza alterarle. [...] Introducendo appunto concetti nuovi che permettano di effettuare la misura in maniera differente, senza inviare dei raggi, delle cose particolari di questo tipo, e

PROFILO DI MARCO

riuscire appunto a prendere le loro caratteristiche senza alterare, allora sì, allora potremmo determinarle. [...] Se io ipoteticamente potessi misurarlo con uno strumento abbastanza sofisticato da farlo, quell'oggetto avrebbe una proprietà ben definita. L'oggetto di per sé ha una proprietà ben definita, io credo questo.”

“[L'esperimento a raggi gamma, il dibattito Bohr-Heisenberg, le due metafore, la formula matematica] tutti hanno contribuito in parte, però nessuno mi ha dato una spiegazione esaustiva [della relazione di indeterminazione]. Cioè quello che io cercavo come spiegazione non lo ho trovato in nessuna di queste. [...] Il punto è che non riesco a capire come un corpo in realtà potesse non avere proprietà proprie, proprietà ben definite.”

“La parola probabilità secondo me è un escamotage che noi attualmente abbiamo per poter, diciamo, determinare con certezza il fenomeno [...]. La probabilità secondo me è proprio un modo per risolvere la questione. Però questi sono appunto gli errori a cui induce questo modo di rappresentare questa cosa qui a monte, cioè proprietà non definita [del quantone].”

Nonostante questo scetticismo, Marco è disponibile ad accettare la sovrapposizione e l'indeterminazione perché comunque hanno portato a una conoscenza che è matematicamente accettabile e che, oggi, “funziona”:

“L'ipotesi di Heisenberg e Bohr dell'indeterminazione è necessaria, in questo momento. Il fatto di considerare il quantone come una particella non definita. Nonostante che io non sia d'accordo, noto che comunque per ora è proficuo considerarlo in questa maniera. [...] Per me quella è la strada da percorrere in parallelo all'altra, cioè di cercare epistemologicamente un significato più accurato. Dato però che è abbastanza funzionale, per ora [la accettiamo]. E quindi è quello che, diciamo, mi ha impedito di lanciarmi del tutto contro le loro ipotesi. [...] Diciamo che vorrei unire gli aspetti buoni, diciamo l'aspetto matematico di Bohr ed Heisenberg però con l'aspetto epistemologico concettuale di Einstein”.

La difficoltà di accettare certi aspetti da un punto di vista epistemologico ed ontologico è mediata dal fine applicativo, la ragione che gli permette di tollerare ad esempio l'esistenza dell'indeterminazione seppur non accettandola:

PROFILO DI MARCO

“Alla fine, la scienza io credo vada poi utilizzata in campo tecnico. Quindi noi, per poter utilizzare il quantone in una qualche maniera, dobbiamo comunque delinearne delle proprietà e renderle calcolabili, e misurabili eccetera eccetera. Per fare questo noi abbiamo bisogno, diciamo, del concetto di indeterminazione, di come funziona più o meno questa cosa, di abbandonare la fisica classica eccetera eccetera, però dire che un corpo non ha proprietà ben definite, è differente da dire che un corpo non ha proprietà ben definite per quanto riguarda, diciamo, la misura. Perché, io sono dell’idea che una particella abbia una posizione ben definita, una quantità di moto ben definita in ogni istante t , se vogliamo metterla anche sul piano su cui la metteva Einstein, però noi comunque non possiamo misurarla. Dire che non ce le ha, vuol dire che questa particella si muove a caso, in più punti contemporaneamente, e cose del genere. E’ un approccio sbagliato epistemologicamente, secondo me. Che poi alla fine bisogna usare queste cose qua è certo, che però l’approccio debba essere questo non ne sono tanto sicuro.”

Anche le immagini e le metafore citate da Matteo nell’intervista confermano, da una parte, la sua visione epistemologica, diciamo, realista ma anche la disponibilità a riconoscere l’efficacia pratica della fisica quantistica. Per parlare dell’oggetto quantistico ed esplicitare la sua visione di oggetto propone la metafora del “mattone”, mentre critica la metafora dei calzini, proprio perché evidenzia un aspetto per lui problematico: il dover rinunciare all’idea che si possano attribuire proprietà bene determinate ad un oggetto.

[parlando del quantone] “Noi possiamo vedere le facce del mattone quella frontale e quella sotto o sopra: sono diverse le facce, hanno cose che le possono accomunare, come lo spigolo in comune, però sostanzialmente non sono la stessa cosa, geometricamente. Ed è difficile cercare di relazionarle e dire che sono la stessa faccia, perché non sono la stessa faccia! Però se noi consideriamo il mattone, capiamo che sono facce dello stesso mattone, cioè è come se fossero sue proprietà!”

“[Le metafore] sono fuorvianti perché [per esempio] quella del calzino ti fa capire in realtà che non ci sono proprietà ben definite, ma non ti dà idea di come funziona l’ampiezza di probabilità, non ti dà idea di come poi andare a calcolarlo. Diciamo che quello che ti fa capire è che devi abbandonare la fisica classica per poterlo determinare e basta.”

PROFILO DI MARCO

L'idea idiosincratica nell'intero percorso di Marco (applicazione degli indicatori "D e E").

L'idea che Marco esprime nell'intervista era già emersa nel tema, in cui parla dell'indeterminazione come euristicamente corretta, ma epistemologicamente inammissibile. E' "l'elevazione a principio di quello che può essere ritenuto un errore o quanto meno una semplice alterazione di sistema."

Nel tema cita anche Dirac quando afferma che: "il principale scopo della fisica è di formulare delle leggi che governino i fenomeni, cosa che le precedenti teorie sono in grado di fare in maniera accettabile, e la cui applicazione porti alla scoperta di nuovi fenomeni, cosa che le precedenti teorie non sono in grado di fare." Anche qui si ritrova dunque l'attenzione alle applicazioni.

Come emerge dal questionario sociometrico, Marco è ritenuto uno studente bravo e studioso da parte dei suoi compagni, ma da un punto sociale è piuttosto ai margini della classe. Non è fra le persone prese particolarmente a riferimento e anche lui stesso non si sente tale, quanto piuttosto si trova con un piccolo gruppo di compagni con cui riesce anche a parlare e a confrontarsi sulla fisica.

Riassumendo, l'analisi porta a ritenere che Marco sia entrato nel gioco e, incrociando l'intervista coi risultati ottenuti nei compiti e nelle interrogazioni, abbia colto i concetti principali su cui è stata costruita la proposta di fisica quantistica. Marco ha anche vissuto l'intero percorso cercando e sviluppando una propria visione di fisica. Nonostante l'idea idiosincratica (Indicatore A) non sia particolarmente originale, lo ha guidato a focalizzare l'attenzione su aspetti concettuali precisi (Indicatore B) e a vivere il suo percorso di apprendimento con consapevolezza e determinazione (Indicatore C, D). Pur avendo compreso i vari concetti del percorso, il rifiuto del significato profondo della sovrapposizione quantistica non ha permesso a Marco di accettare l'interpretazione della fisica quantistica, rimanendo ancora legato e affezionato ad una concezione classica e alla convinzione che sarà possibile ricondurre la fisica quantistica alla fisica classica attraverso l'introduzione di nuovi concetti che permettano nuove misure non perturbative.

Non ci sono state in classe molte occasioni specifiche in cui l'approccio di Marco potesse essere socialmente discusso e difeso, nonostante Marco fosse lo studente più partecipe. Quando però esprimeva la sua visione, non era riconosciuta dalla classe nella sua specificità.

PROFILO DI MARCO

Tuttavia la sicurezza disciplinare e la consapevolezza di Marco sembra poter derivare dal confronto anche extra-scolastico con alcuni altri compagni coi quali condivideva anche l'interesse per la fisica e la scienza in generale (Indicatore E).

In relazione al costrutto dell'*appropriazione*, il caso di Marco è un caso interessante perché pone, alla ricerca, un problema molto preciso: può esserci *appropriazione* senza l'accettazione della visione quantistica? Questa posizione è interessante perché risuona con risultati di altre sperimentazioni (cfr. Baily & Finkelstein, 2010; Levrini & Fantini, 2013; Malgieri, 2015). Il legame tra *appropriazione* e accettazione è dunque un aspetto che vale la pena studiare in maggior dettaglio ed è al momento oggetto della tesi di laurea di Giovanni Ravaioli.

S13 Paolo: impegno, curiosità e tensione intelligente

Paolo è uno studente curioso e interessato che interviene spontaneamente in classe con domande e osservazioni. Tuttavia il suo interesse è maggiormente rivolto alle applicazioni e a risolvere esercizi e problemi piuttosto che sviscerare, da un punto di vista concettuale, gli argomenti trattati. Questa sua capacità applicativa gli permette di raggiungere buoni risultati soprattutto nelle valutazioni scritte.

Idea idiosincratica. Dall'intervista emerge come per Paolo la fisica sia quella disciplina che “cerca di darti spiegazione di qualcosa che puoi riscontrare, che cerca di spiegare quello che effettivamente è.”

Il suo interesse per la spiegazione dei fenomeni lo porta a utilizzare spesso nell'intervista parole chiave come: “spiegare”, “capire”, “afferrare”, “interpretare”, “definire”, “concetto”, “ente” “discorso”, “percorso”, “metodo”, “approccio” ed espressioni come: “dare ragione di certi eventi”.

Uso dell'idea idiosincratica durante l'intervista (applicazione degli indicatori B e C).

In tutti gli estratti disciplinari dell'intervista di Paolo si ritrova come l'attenzione rivolta ai concetti sia legata al desiderio di Paolo di arrivare a spiegare l'esito di un determinato esperimento. Per esempio Paolo non si limita a descrivere il quantone, ma ne avvalorava l'importanza mostrando la sua capacità di giustificare l'esito dell'esperimento più bello:

PROFILO DI PAOLO

“Il quantone sicuramente non potrei definirlo né come il corpuscolo, né come l’onda, nel senso: [...] il fatto che viene definito come un’onda è giustificato da certi fenomeni, il fatto che viene definito come un corpuscolo da altri, quindi il quantone deve essere un ente sostitutivo che possa dare ragione di certi eventi e di altri. Quindi un ente che può comportarsi da uno, comportarsi dall’altro, ma che di fatto non è né uno né l’altro. [Nell’”esperimento più bello della fisica”] se osservo l’elettrone da vicino, scompare l’interferenza, se lo guardiamo da fuori c’è l’interferenza. L’onda non ha questo dualismo, né tanto meno poi il corpuscolo.”

Anche la comprensione del principio di sovrapposizione è mirata a dare spiegazione del collasso dello spin del quantone con la misura e della necessità di introdurre l’ampiezza di probabilità nell’esperimento di Stern e Gerlach:

“Nel caso del quantone il principio di sovrapposizione l’ho interpretato come un elemento di indeterminazione. Nel senso, non so cos’è l’ente che ho sotto, che sto studiando, prima di poterlo misurare. Quindi questa è la differenziazione dal concetto classico, perché il principio di sovrapposizione è il principio che mi rende dubbio, e quindi poi dopo spiegabile con l’ampiezza di probabilità, quello che è lo stato del mio elettrone prima che io possa fare una misura di questo. Quindi prima di averlo proiettato su uno spot, come spin su, spin giù, quelli che abbiamo visto Stern e Gerlach, non posso sapere in che stato è, perché è una sovrapposizione dei due stati. Non è né spin su, né spin giù, né uno e l’altro, né nessuno dei due perché non può essere né entrambi, né nessuno, però col discorso della probabilità arriviamo a definire che cos’è, una volta arrivati a delle misure.”

L’attenzione per la spiegazione dei fenomeni, a cui Paolo si riferisce anche con l’espressione: “il lato più concreto della fisica”, rivela l’approccio sperimentale-applicativo di Paolo. Infatti, in tutti i brani riportati, la comprensione dei concetti è sempre legata alla volontà di ottenere la spiegazione dell’esito di un esperimento.

Il secondo approccio dichiarato da Paolo nella prima parte del questionario sociometrico è quello immaginativo-creativo: le immagini e le metafore sono infatti per Paolo la strada attraverso cui la spiegazione dei fenomeni è più facilmente compresa:

PROFILO DI PAOLO

“[Nel questionario sociometrico mi sono definito] immaginativo e creativo perché tendo sempre, nei percorsi che facciamo, a cogliere di più le metafore e le idee un po’ più immaginative, creative che vengono fuori dai discorsi, un po’ perché credo che arricchiscano abbastanza il discorso e lo rendono ancora più ampio, in più credo siano, questi metodi, forse anche un po’ più comprensibili, credo siano un buon punto di partenza e un buon modo di spiegare qualcosa a qualcuno che magari non ne sa proprio niente.”

Sebbene le metafore di Lévy-Leblond dell’ornitorinco e del cilindro non siano citate da Paolo, a proposito della metafora dei calzini di Erwin (che spiega il funzionamento di una delle configurazioni sperimentali di Stern e Gerlach) Paolo afferma:

“[La metafora] dei calzini era appunto sulle schede di Stern e Gerlach quindi ho avuto modo di leggerla più volte. E quella forse è stato un buon punto di partenza, perché nonostante a prima vista possa sembrare un qualcosa di assurdo, il fatto che i calzini, se li divido per lunghezza, io poi dal cassetto dei calzini corti ho la stessa probabilità di tirarne fuori uno lungo. Cioè all’inizio poteva sembrare qualcosa di assurdo, però all’interno del contesto, poi dopo, successivo, dell’esperimento di Stern e Gerlach ma di tutto il percorso prende, insomma, una sua forma, perché chiaramente è una metafora. Non è che si possa spiegare tutto quello che c’è dietro tramite l’esperimento dei calzini, però come punto di partenza, come metafora, direi che è stato forse il punto di partenza più solido che ho avuto, da questo punto di vista. [...] ho avuto modo insomma di introdurre l’argomento in un modo figurativo, in un modo più semplice, diciamo.”

L’idea idiosincratica nell’intero percorso di Paolo (applicazione degli indicatori “D e E”).

La volontà di arrivare alla spiegazione del fenomeno ha fatto sì che per Paolo la docente di fisica abbia avuto un ruolo fondamentale: ci si è confrontato spesso e dall’intervista emerge quanto le sia grato per l’approccio, la passione e l’intensità che è riuscita a trasmettere agli studenti.

“Noi ci siamo gasati di brutto nel senso: il fatto che lei ci mettesse tutta questa intensità e il fatto di avere la possibilità di un confronto importante, di comprendere a fondo questo argomento, non dico a tutti, ma ad una buona parte della classe ha dato una spinta notevole. [...] I primi tre anni - per quanto mi è sempre piaciuta come materia - non ho

PROFILO DI PAOLO

mai avuto una partecipazione come mi è stata data l'opportunità poi con la professoressa Fantini, probabilmente perché venivamo da questi tre anni un po' così, con un approccio totalmente distaccato, uno studio fine probabilmente a sé stesso mentre la Fantini credo abbia messo tanta passione e abbia dimostrato tutto quello che lei probabilmente prova per questa materia, e quindi ci ha trasmesso proprio una voglia e un interesse diverso.”

Anche il rapporto con alcuni compagni di classe è stato molto importante per lo studio e la comprensione di Paolo:

“L'ultimo periodo con Federico (S14), con Marco (S20), con S18 spesso, prima delle lezioni di fisica, magari non si era capita una cosa, oppure magari volevamo fare anche forse delle ipotesi su degli argomenti e questo approccio ci ha dato la possibilità di prendere la cosa forse sul personale e di arrivare a fondo un po' tutti insieme.”

Da questi interventi si osserva come per Paolo i rapporti, sia con l'insegnante sia con i compagni, siano molto importanti per il suo studio e non solo. Questo sembra confermare quanto emerso dal questionario sociometrico, che ha visto Paolo come il secondo studente più votato come “compagno di svago”. Dal questionario è emerso anche come, sebbene Paolo sia interessato al lato concreto della fisica, la classe non lo ha riconosciuto come uno studente autorevole per le attività di laboratorio. Gli è stata però riconosciuta l'autorevolezza nella risoluzione degli esercizi.

L'approccio stesso del percorso ha permesso di sostenere e alimentare l'impegno di Paolo a studiare e comprendere:

“[Questo percorso] ha creato un po' di scalpore, un po' soprattutto di interesse maggiore e c'è stato un approccio diverso e anche una tensione intelligente da parte della classe molto maggiore rispetto agli altri argomenti, secondo me. Poi dopo l'approccio è andato sempre evolvendosi, arrivando sempre a una partecipazione da parte nostra sempre maggiore, a un interesse sempre maggiore che poi dopo è arrivato a questo nuovo metodo che abbiamo applicato nell'ultimo periodo e a quest'interesse che secondo me ha travolto un po' tutta la classe rispetto a questi ultimi argomenti. Nonostante chiaramente c'è chi probabilmente

PROFILO DI PAOLO

non ne voleva sapere, di fisica, però secondo me è stato un evolversi per arrivare a un metodo davvero utile e intelligente.”

L'attenzione idiosincratica di Paolo per il lato “concreto” della fisica si è osservato anche in classe e si ritrova anche al termine del tema quando afferma:

“Ridurre la fisica a leggi, come emerge da Bohr e Heisenberg, di fronte ad un dibattito così articolato porterebbe ad una complicazione concettuale ulteriore perché si ignorerebbe quello che in realtà succede, abbandonandosi ad un calcolo coincidente ai dati sperimentali. Studiando i fenomeni attraverso immagini e creazioni dell'intelletto, invece, si ha una conferma diretta di quello che le leggi descrivono.”

Riassumendo, l'analisi condotta mostra come Paolo abbiamo compreso i concetti di fisica quantistica (Indicatore B), grazie al suo atteggiamento di grande curiosità e impegno, volto a trovare una spiegazione che possa dare concretezza ai concetti studiati (Indicatore A). La comprensione disciplinare è avvenuta attraverso un approccio coerente con il suo desiderio di concretezza (indicatore C). L'interesse per la spiegazione degli esiti degli esperimenti e l'attenzione alle immagini e alle metafore non è inoltre occasionale (indicatore D) e lo porta a svolgere un ruolo ben definito e riconosciuto – il risolutore di esercizi – in classe (indicatore E).

L'intervista di Paolo è interessante perché, leggendo gli estratti di intervista riportati, si ha la sensazione che Paolo non abbia avvertito la problematicità di dover rinunciare ai concetti classici e che abbia accettato con semplicità la nuova fisica quantistica, forse proprio grazie alla capacità di quest'ultima di spiegare gli esperimenti discussi nel percorso. Inoltre, sebbene Paolo abbia compreso i concetti della fisica quantistica, non è stato in grado di esprimerli attraverso parole ed espressioni autentiche. Confrontato con le altre interviste sembra sentirne un tono scolastico delle sue affermazioni. Questo elemento non ci permette di concludere con sicurezza se Paolo sia un caso di *appropriazione* o meno.

S4 Lucia: la possibilità di interpretare la fisica sotto più punti di vista.

Lucia è una studentessa seria e responsabile e per questo considerata all'interno della classe una persona autorevole in campo disciplinare. Anche Lucia tuttavia mostra un maggiore

PROFILO DI LUCIA

interesse per l'aspetto applicativo piuttosto che per quello teorico. Il rendimento, proprio per la sua serietà e costanza nel lavoro, è stato nel complesso buono.

Idea idiosincratica. Dall'intervista sembra emergere come per Lucia la fisica sia una materia in cui "le cose appaiono diverse, un po' a interpretazione", in cui è possibile vedere le cose da più punti di vista e in cui c'è spazio per interpretazioni differenti. Per confermare l'ipotesi che l'idea idiosincratica di Lucia sia sorta grazie al modo in cui è stato problematizzato il percorso di fisica quantistica, Lucia è stata contattata via e-mail 8 mesi dopo l'intervista. La sua risposta ha confermato questa ipotesi:

"Il mio pensiero l'ho sviluppato studiando fisica quantistica, prima la fisica era solo un insieme di formule matematiche e problemi da risolvere oggettivamente. Con il percorso che abbiamo svolto l'anno scorso sicuramente il punto di vista è totalmente variato, permettendo di svelare anche sfumature soggettive nel mondo della fisica che prima non era possibile intravedere."

Questa idea idiosincratica fa sì che nell'intervista Lucia ricorra a parole chiave ed espressioni quali: "soggettivo", "punti di vista diversi", "nuova logica", "nuovo linguaggio", "interpretazione", "altra fisica".

Uso dell'idea idiosincratica durante l'intervista (applicazione degli indicatori B e C). L'idea idiosincratica ha guidato Lucia nella comprensione dell'oggetto quantistico:

"[Per descrivere l'oggetto quantistico utilizzerei] la metafora dell'ornitorinco, [il quantone] può essere da due punti di vista diversi, la stessa cosa può essere due cose diverse."

Anche nella comprensione dell'indeterminazione, per lei avvenuta tramite la metafora dei calzini, si ritrova l'idea idiosincratica della soggettività:

L: "[Il modo più utile per comprendere l'indeterminazione è attraverso]I calzini, perché dal nostro punto di vista della realtà un calzino non può essere blu e rosso contemporaneamente, però se noi cambiamo tutto il nostro punto di vista, cioè tutto un nuovo linguaggio, una nuova logica insomma, un calzino può essere sia rosso che blu. Stessa cosa qua [nell'esperimento di Stern e Gerlach], che gli elettroni non possono avere uno spin su e uno spin giù contemporaneamente, però secondo la fisica quantistica sì."

I: "Per cui che interpretazione dai all'indeterminazione quantistica?"

PROFILO DI LUCIA

L: “Accade così.”

I: “Ontologica?”

L: “Sì.”

Da questi due estratti di intervista emerge l’approccio immaginativo-creativo di Lucia. E’ infatti attraverso le metafore che Lucia ha cercato di comprendere i due concetti riportati, riconoscendo la possibilità di ricorrere a punti di vista, interpretazioni differenti. Anche il secondo approccio di Lucia, quello sperimentale-applicativo sembra aver avuto un ruolo nell’apprendimento di Lucia, sebbene non emerga chiaramente. Molto spesso infatti Lucia non ha saputo rispondere o ha risposto in maniera superficiale alle domande rivoltegli dall’intervistatore:

“[L’argomento che ho capito] peggio è l’apparato di Stern e Gerlach. [...] non capisco proprio il senso della cosa. Cioè non abbiamo mai fatto una cosa del genere. Prima si parlava un po’ più di esperimenti vicini a noi. Cioè ‘sta cosa col forno, magneti strani [...] poi i calcoli, nell’ampiezza di probabilità ci son dei calcoli che non ho capito proprio. Per fortuna la Fantini comunque non chiede i calcoli.”

Anche sul principio di sovrapposizione Lucia rivela di aver avuto difficoltà a comprenderlo:

“Io ho capito che il principio di sovrapposizione c’è in Stern e Gerlach, tipo che un atomo non può avere due spin opposti nello stesso momento, giusto? Nel senso non può andare su o giù, non si può dividere, una particella, quindi non può averne due contemporaneamente ... forse ... non lo so ... non l’ho capito il principio di sovrapposizione”

Le difficoltà avute nell’affrontare il percorso hanno portato Lucia ad affermare:

“E’ un po’ difficile secondo me farle in quinta, ‘ste cose. E’ un po’ esagerato pretendere ... alcune sì, alcune si capiscono, però anche l’ultima cosa di Stern e Gerlach, secondo me, è un po’ ... avranno capito in due o tre bene bene. Dopo, a grandi linee l’abbiam capito un po’ tutti, però è inutile far queste cose in quinta ... E’ più da università di fisica, alla fine non è che ci serviranno a qualcosa. La pensano più o meno tutti così.”

L’idea idiosincratica nell’intero percorso di Lucia (applicazione degli indicatori “D e E”).

L’idea idiosincratica di Lucia e il suo interesse per le immagini si ritrovano anche nel tema, dove compaiono spesso i termini riportati sopra:

PROFILO DI LUCIA

“Il concetto di unire più verità, frutto di punti di vista diversi è universale e vale persino per la ricerca atomica. Forse è proprio nella variabile del punto di vista la risposta che tanto il dualismo cercava. Dopo aver modificato il linguaggio e il pensiero, il passo successivo è modificare il punto di vista, non fissandoci su un determinato modello o una determinata idea. [...] Così il secolare dualismo si risolve, secondo Lévy-Leblond, in una nuova definizione, in un nuovo concetto che permetterà ai fisica di costruirsi delle “immagini intuitive”, dei modelli visivi in relazione al mondo della fisica quantistica.”

Dal questionario sociometrico è emerso che Lucia è lo studente più autorevole per la risoluzione degli esercizi. E' possibile che questo riconoscimento sia legato alle abilità mostrate da Lucia nello studio della fisica classica, come lei stessa suggerisce nell'intervista:

“Rispetto a prima sicuramente mi manca la fisica meccanica, classica, perché mi piacciono i calcoli. Cioè a me piace la matematica, risolvere esercizi. Di solito nei problemi di fisica meccanica dovevi fare il disegno. Quindi era tutto molto più facile da immaginare.”

Riassumendo, Lucia ha dimostrato di aver sviluppato la sua idea idiosincratica autentica (Indicatore A) grazie all'uso del filo concettuale sull'intuibilità. Tale idea non è occasionale (Indicatore D) ed è coerente con il suo bisogno di visualizzare i fenomeni e i concetti (Indicatore C). La comprensione disciplinare è però lacunosa e superficiale, e questo fa sì che Lucia sia un caso di non *appropriazione*.

L'intervista di Lucia mostra come anche uno studente con buoni voti abbia potuto rifiutare la scelta fatta in fase di progettazione di ampliare il programma scolastico con una parte esclusivamente quantistica (*pars construens*), avvertendola come una richiesta troppo impegnativa. Sebbene anche Lucia abbia sviluppato proprio grazie alla fisica quantistica una idea idiosincratica, il percorso di fisica quantistica ha prodotto in lei sconforto, avversione e insicurezza.

4.5 RISPOSTA ALLE DOMANDE DI RICERCA

Le analisi a livello collettivo e individuale hanno fatto emergere aspetti molto interessanti che verranno discussi rispondendo alle tre domande di ricerca.

DR1: Nonostante il cambiamento di tema e di contesto è possibile osservare casi di appropriazioni in questo contesto?

Dall'analisi dei profili è emerso come solo Federico (S14) possa ritenersi, senza grandi insicurezze, un caso di *appropriazione*. Paolo (S13), seppur capace di comprendere concetti come la sovrapposizione quantistica e la natura del quantone, non ha mostrato una rielaborazione autentica o profonda di tali concetti ed è dunque stato classificato come caso di *appropriazione* difficile da riconoscere, mentre Lucia (S4) ha esplicitamente rifiutato di entrare nel gioco. Interessanti sono i casi di Carlo (S7) e di Marco (S20): il primo è un caso di *appropriazione* parziale (o "indebita"), in cui un'idea idiosincratrice molto marcata ha portato Carlo ad attribuire significati troppo personali e non accettabili fisicamente, mentre il secondo, come già riportato al termine del profilo, pone una domanda molto interessante per future ricerche sul tema dell'*appropriazione* in quanto Marco, mosso da una forte idea idiosincratrice, ha compreso i concetti trattati ma non li ha accettati, rimanendo convinto di un possibile ritorno alla fisica classica.

Va comunque sottolineato che tutti gli studenti analizzati sono stati in grado di trovare una propria idea idiosincratrice, più o meno originale, e un proprio filo personale con cui selezionare determinati aspetti del percorso. Questo ha permesso agli studenti di ottenere nel tema scientifico di italiano un voto migliore rispetto alla valutazione che solitamente ricevevano. Inoltre, all'esame di maturità, il commissario esterno di matematica e fisica ha apprezzato e valutato positivamente il modo in cui hanno risposto gli studenti a cui sono state rivolte domande di fisica quantistica. Come riporta Federico (S14):

“devo dire che il commissario esterno di matematica e fisica (tra l'altro era laureata in fisica, quindi molto attenta alla parte di fisica) è stata molto contenta della nuova parte di fisica quantistica e di come l'abbiamo trattata, e in particolare, dopo aver parlato in tesina dell'indeterminazione di Heisenberg e del rapporto di Heisenberg con Bohr, Einstein e Schrödinger, a me ha chiesto il principio di complementarità di Bohr e il criterio di Rayleigh [...] Ha apprezzato particolarmente ciò [...] era molto contenta, in quanto questa professoressa ha lavorato nel PNI e quindi sapeva di cosa parlavamo”.

PARAGRAFO 4.5

Tuttavia, il confronto tra quanto emerso dai profili degli studenti intervistati in questa sperimentazione e quanto riportato nei profili degli studenti della sperimentazione di termodinamica (Levrini et al., 2014) mostra come il cambiamento di tema e di contesto non abbia permesso di raggiungere gli stessi risultati, rispetto all'*appropriazione*. Oltre al numero di casi di *appropriazione*, anche il tono del discorso e la dimensione sociale degli studenti intervistati al termine del percorso di termodinamica rivelano importanti differenze. La sensazione è che quanto avvenuto nel percorso di termodinamica non si sia ripetuto con la stessa evidenza in questa sperimentazione.

DR2: Quali condizioni hanno favorito o ostacolato l'appropriazione?

Dalle analisi collettive e individuali si ritiene che a ostacolare l'*appropriazione* siano stati tre fattori:

1. Gli argomenti e la scelta di problematizzare il percorso;
2. Il periodo scolastico;
3. Il contesto e le dinamiche di classe.

Gli estratti di intervista riportati mostrano come i concetti del percorso, in particolar modo l'indeterminazione, il principio di sovrapposizione, l'ampiezza di probabilità, le proprietà del quantone e il ruolo della misura, siano stati argomenti di studio molto impegnativi anche per gli studenti autorevoli (Federico (S14), Marco (S20) e Paolo (S13)). L'intervista di Lucia (S4) esprime bene il senso di frustrazione, insicurezza e disagio sperimentati da lei e da buona parte della classe nell'affrontare argomenti così complessi (ritenuti più adatti al contesto universitario) e in un periodo così particolare dell'anno.

Oltre alla difficoltà degli argomenti va aggiunta la possibilità che concetti come indeterminazione e complementarità venissero interpretati in maniera semi-classica, impedendo agli studenti di comprendere o accettare la fisica quantistica; tali episodi si osservano nei profili di Carlo, rimasto intrappolato in un'interpretazione del quantone come sia onda sia corpuscolo, e di Marco, che non ha accettato la fisica quantistica, probabilmente per via dell'interpretazione a disturbo dell'indeterminazione.

Quanto esposto indica che alcuni aspetti del percorso devono essere ripensati, in modo da ridurre la complessità e la problematicità ed evitare che gli studenti rimangano bloccati in interpretazioni semi-classiche.

PARAGRAFO 4.5

La problematizzazione del percorso in questa classe ha però avuto anche effetti positivi: se da una parte la scelta di problematizzare il percorso, andando oltre gli argomenti previsti dalle Indicazioni Ministeriali con l'aggiunta di una parte genuinamente quantistica, ha messo in difficoltà diversi studenti, dall'altra la scelta di dare una struttura al percorso che rispondesse ai criteri di multi-prospettiva, multi-dimensionalità e longitudinalità ha permesso a una buona parte degli studenti di trovare una propria posizione all'interno della disciplina, come ha rivelato l'analisi dei temi e delle interviste. Problematizzare ha effettivamente permesso di raggiungere studenti con interessi diversi: Marco (S20) e Paolo (S13) per esempio hanno apprezzato gli esperimenti di interferenza da singolo elettrone e di Stern e Gerlach, mentre Carlo (S7) e Lucia (S4) hanno trovato molto interessanti i dibattiti e le metafore del percorso. Il caso di Federico (S14) dimostra inoltre come siano stati proprio il questionario iniziale, l'"esperimento più bello della fisica", la metafora dell'ornitorinco e il modo in cui è stato strutturato il percorso (*pars destruens, raccordo, pars costruens*) ad avergli permesso di appropriarsi dei concetti studiati.

Un secondo fattore che si ritiene abbia influito sulla non *appropriazione* e abbia ostacolato la comprensione dei concetti del percorso è il delicato periodo dell'anno scolastico in cui si è svolta la sperimentazione: il secondo quadrimestre del quinto anno. Tale fattore ha ostacolato in due modi la possibilità di intervenire sulle difficoltà degli studenti: innanzitutto ha fatto sì che gli studenti arrivassero stanchi e con la mente ormai rivolta alla tesina e alla prova di maturità alla *pars costruens*, in cui è chiesto allo studente di affrontare concetti impegnativi e anti-intuitivi. Inoltre la vicinanza con la prova di maturità ha fatto sì che l'insegnante abbia potuto dedicare pochissime ore di lezione alla *pars costruens* in una classe che aveva invece bisogno di più tempo per comprendere i concetti.

Il particolare contesto in cui si è svolta la sperimentazione è il terzo fattore che si ritiene abbia ostacolato l'*appropriazione*. Come riportato nel paragrafo 3.1, la classe analizzata in questa tesi è una classe di liceo scientifico – indirizzo musicale, definita dalla docente di fisica come "atipica per un liceo scientifico, in cui l'impegno nello studio non è costante e, buona parte degli studenti non mette in atto quella profondità di pensiero e disciplina intellettuale richiesta per portare avanti un percorso di fisica. Pochi di loro vivono l'apprendimento della fisica in modo non trasmissivo, intervenendo spontaneamente durante la lezione con osservazioni o domande".

L'analisi del questionario sociometrico ha rivelato come gli studenti fossero riconosciuti dai compagni di classe più per le loro competenze disciplinari che non come portatori di esigenze intellettuali. L'analisi delle interviste e della discussione del questionario iniziale hanno

PARAGRAFO 4.5

confermato come in classe sia mancata l'*accountability*, un fattore ritenuto decisivo per creare il cosiddetto *productive disciplinary engagement* (Engle & Conant, 2002) e per lo sviluppo dell'*appropriazione*.

La mancanza di una dinamica collettiva di scambio ha fatto sì che studenti come Marco (S20) non abbiano potuto confrontare in classe le proprie idee e provare a ottenere risposta alle proprie domande.

In effetti è stata rivolta molta attenzione in fase di progettazione ai tre criteri: multi-prospettiva, multi-dimensionalità, longitudinalità, ma non sono stati pensati sufficienti momenti di confronto collettivo. La mancanza di momenti collettivi ha fatto sì che l'entusiasmo generato negli studenti con la seconda parte del percorso e osservato nei temi, sia poi rapidamente scemato con lo studio dei concetti quantistici contenuti nella *pars construens*.

L'esito di questa sperimentazione suggerisce dunque quanto possa essere importante progettare attività in grado di favorire una dinamica sociale in grado di sostenere la complessità del processo di apprendimento.

DR3: Quale contributo questo studio empirico offre per rifinire il costrutto di appropriazione?

Dal lavoro di tesi sono emersi tre importanti contributi sul costrutto di *appropriazione*.

Il primo contributo riguarda il legame tra *appropriazione* e accettazione: il caso della non accettazione della fisica quantistica da parte di Marco (S20) pone alla ricerca una questione molto interessante: *può esserci appropriazione senza l'accettazione della visione quantistica?* Come riferito al termine del profilo di Marco, il tema dell'accettazione della fisica quantistica è un tema noto in letteratura e al momento è oggetto della tesi di laurea di Giovanni Ravaioli.

Un secondo contributo riguarda gli strumenti operativi utilizzati per valutare se e come sono applicabili e funzionano i vari indicatori dell'*appropriazione* nei discorsi (scritti e orali) degli studenti. Questo lavoro di tesi conferma l'utilità della griglia per i *focal student* e del diario di bordo, riportati in appendice H e I. Tali strumenti hanno permesso all'osservatore in classe (l'autore di questa tesi) di avere a disposizione le "lenti" necessarie per individuare gli elementi che potessero suggerire l'avvenuta *appropriazione* di un concetto da parte di uno studente.

PARAGRAFO 4.5

L'analisi dei compiti e dei temi ha portato a costruire griglie di valutazione per la dimensione disciplinare e per quella idiosincratica che potranno essere utilizzate in future sperimentazioni, conferendo maggiore attendibilità a tali strumenti e all'analisi svolta in questa sperimentazione.

Infine, la volontà di ottenere uno strumento che permettesse di valutare la dimensione sociale dell'*appropriazione* ha portato alla costruzione del questionario sociometrico. Tale strumento sembra effettivamente in grado di mostrare la presenza o meno di *accountability* tra gli studenti. Future sperimentazioni permetteranno di utilizzare in altre classi il questionario sociometrico riportato in appendice D, permettendo di confermare o meno la capacità di tale strumento di rivelare le dinamiche sociali della classe e la distribuzione o meno di *accountability* tra gli studenti.

Se l'interpretazione dei grafici a barre esposta nel paragrafo 4.3 dovesse rivelarsi corretta, sarebbe possibile utilizzare il questionario sociometrico come uno strumento di diagnosi: se prima di fare un percorso si osservano infatti grafici a barre come quelli di figura 4.3.1 e 4.3.2 si cercherà di proporre agli studenti attività che favoriscano l'*accountability*, ovvero attività collettive in cui gli studenti impersonano ruoli diversi (il "filosofo", il "matematico"). In questo modo sarà possibile mostrare agli studenti come la conoscenza ammetta tanti ruoli e non sia legata solo alle competenze disciplinari, alla leadership.

Infine, questo lavoro ha permesso di ottenere maggiore consapevolezza circa l'impegno richiesto al ricercatore: osservare in classe le dimensioni dell'*appropriazione* significa richiedere al ricercatore non solo di possedere buone competenze disciplinari, ma anche di sviluppare competenze e strumenti per riconoscere indizi molto discreti che suggeriscono l'avvenuta *appropriazione* di un concetto da parte di uno studente, elementi che nel vivace e affollato contesto di classe non sono così riconoscibili ed evidenti come si potrebbe pensare.

CONCLUSIONI

La consapevolezza di affrontare una materia, la fisica quantistica, molto delicata dal punto di vista didattico, ha portato il gruppo di ricerca in Didattica della Fisica del DIFA di Bologna a progettare un percorso di fisica quantistica che fosse in grado di coinvolgere le diverse sensibilità presenti in una classe di liceo scientifico e fosse in grado di favorire l'*appropriazione* dei concetti di fisica quantistica da parte degli studenti.

Nel capitolo 1 sono stati descritti gli approcci noti in letteratura con cui è possibile costruire un percorso di fisica quantistica. E' stato così possibile collocare nel contesto di ricerca la sperimentazione descritta in questa tesi. Nel capitolo 1 sono anche state descritte le tre precedenti sperimentazioni del gruppo di Bologna che hanno determinato i criteri per la progettazione del percorso sperimentato. Sempre nel capitolo 1 sono stati descritti l'origine e il costrutto dell'*appropriazione*, con i suoi cinque Indicatori.

Nel capitolo 2 sono stati riportati i vincoli di cui si è dovuto tener conto in fase di progettazione e i due fili concettuali introdotti per scongiurare il rischio che ci fosse una accettazione passiva di tutto il percorso da parte degli studenti. Uno dei due fili riguarda il cambiamento delle proprietà dei modelli di oggetto e processo (a cui si unisce il tema matematico del dibattito continuo-discreto) mentre l'altro riguarda il tema della visualizzabilità o intuibilità della fisica quantistica.

Nel capitolo 3 è stato descritto come il contesto di classe in cui è avvenuta la sperimentazione fosse atipico per un liceo scientifico e come sia stato necessario concludere anticipatamente il percorso (arrivato comunque alla parte genuinamente quantistica). Nel capitolo 3 sono anche stati descritti la metodologia di analisi dati, che si ricollega alla *Grounded Theory*, e gli

CONCLUSIONI

strumenti utilizzati per ottenere i dati necessari per rispondere alle domande di ricerca. Tra questi è stato descritto il questionario sociometrico, lo strumento di ricerca più originale e appositamente progettato dall'autore di questa tesi per ottenere informazioni circa la dimensione sociale dell'*appropriazione*.

Infine, nel capitolo 4 sono state riportate le analisi dei dati raccolti tramite i diversi strumenti previsti dalla sperimentazione e le risposte alle domande di ricerca.

L'analisi dei temi ha permesso di comprendere come la seconda parte del percorso, il *raccordo*, sia stata particolarmente interessante e stimolante per gli studenti; molti hanno trovato una corrispondenza con interessi e punti di vista personali, riportati poi nel tema.

L'analisi del questionario sociometrico ha rivelato come tale strumento sembri mettere in luce la presenza o meno di quella che viene chiamata, nella ricerca in didattica, *accountability* tra gli studenti. I dati ottenuti dal questionario sociometrico portano a ritenere che nella classe analizzata in questa sperimentazione gli studenti non siano stati riconosciuti dai compagni di classe come portatori di istanze intellettuali (*intellectual stakeholder*), quanto piuttosto per la loro leadership o carisma (il livello di competenza disciplinare), rivelando un ambiente di apprendimento non favorevole all'*appropriazione*.

L'analisi dei profili ha mostrato come tra gli studenti analizzati sia in effetti presente un unico caso di *appropriazione* completa. I profili hanno anche messo in evidenza una grande diversità di reazioni possibili al percorso: per esempio c'è chi ha saputo portare avanti il percorso arrivando a comprenderlo sia nei concetti sia nella struttura; c'è chi ha compreso i concetti quantistici, ma non li ha accettati e c'è chi invece ha compreso i concetti quantistici e li ha accettati senza problemi. C'è chi ha cercato di comprendere i concetti ma ha mostrato un senso di insicurezza nel descriverli e c'è chi invece ha avvertito come troppo difficili gli argomenti trattati.

I risultati confermano come la sperimentazione sia stata fatta in un contesto piuttosto delicato, una classe quinta di liceo scientifico - indirizzo musicale, e in un momento non facile, la seconda parte del secondo semestre del quinto anno. Gli esiti della sperimentazione sono interessanti perché si è osservato quello che si temeva in fase di progettazione: la problematizzazione ha aiutato gli studenti più autorevoli e sicuri a comprendere i concetti del percorso, ma allo stesso tempo ha portato diversi studenti a rifiutare gli argomenti conclusivi del percorso ritenuti troppo complessi. Usando gli strumenti di osservazione progettati per valutare le dimensioni dell'*appropriazione* si è visto come gli studenti hanno emotivamente e culturalmente reagito e si è individuato quali sono i punti critici del percorso.

Le risposte alle domande di ricerca hanno infatti mostrato:

CONCLUSIONI

- la necessità di ripensare il percorso, forse riducendone la complessità e la problematicità o forse sistemando alcuni punti risultati particolarmente ostici (l'indeterminazione e il principio di sovrapposizione);
- la necessità di approfondire le cause che portano uno studente a non accettare la teoria quantistica e in che modo la non accettazione sia legata all'*appropriazione*;
- la necessità di progettare momenti di discussione collettiva che possano favorire l'*accountability*;

Sebbene il confronto tra quanto emerso dai profili degli studenti intervistati in questa sperimentazione e quanto riportato nei profili degli studenti della sperimentazione di termodinamica mostri come non siano stati raggiunti gli stessi risultati, quanto riferito dalla docente di fisica, dalla docente di italiano e dal commissario esterno di matematica e fisica dimostrano come il percorso di fisica quantistica progettato abbia coinvolto gli studenti, abbia migliorato il loro rendimento scolastico e abbia permesso a ciascuno di loro di trovare lo spazio per i propri interessi e di costruire il proprio punto di vista.

CONCLUSIONI

BIBLIOGRAFIA

Amaldi, U. (2015, seconda edizione) *L'Amaldi per i licei scientifici*, Zanichelli Ed.

Anfara, V. A., Brown, K. M., Mangione, T. L. (2002). Qualitative Analysis on Stage: Making the Research Process More Public. *Educational Researcher*. 31(7). 28-38 DOI: 10.3102/0013189X031007028.

Art. 2 comma 2 del regolamento recante “*Revisione dell’assetto ordinamentale, organizzativo e didattico dei licei ai sensi dell’articolo 64, comma 4, del decreto legge 25 giugno 2008, n. 112, convertito dalla legge 6 agosto 2008, n. 133*”. Allegato A, p. 1

Baily, C., Finkelstein, N. D. (2010). Teaching and understanding of quantum interpretations in modern physics courses. In *Physical review special topics – Physics education research* 6, 010101 2010, DOI: 10.1103/PhysRevSTPER.6.010101, p. 405

Bakhtin, M. (1981). Discourse in the novel (M. Holquist & C. Emerson, Trans.). In M. Holquist (Ed.). *The dialogic imagination*. Austin. University of Texas Press. 259-422.

Besson, U., De Ambrosis, A., Mascheretti, P. (2010). Studying the physical basis of global warming: thermal effects of the interaction between radiation and matter and greenhouse effect. *European Journal of Physics*, 31, 375-388.

Bohr, N. (1949). Discussione con Einstein sui problemi epistemologici della fisica atomica. In Einstein, A. (1979), *Autobiografia scientifica*, Bollati Boringhieri Ed., pp. 113-114.

Denzin, N. K., Lincoln, Y. S. (1994). (2000 2nd ed.). *Handbook of qualitative research*. Thousand Oaks. CA. Sage.

Dirac, P.A.M. (1959). *I Principi della Meccanica Quantistica*. Bollati Boringhieri Ed.

Einstein, A., Infeld, L. (1938). *L’evoluzione della fisica*. Bollati Boringhieri Ed., pp. 236-241.

BIBLIOGRAFIA

- Engle, R. A., Conant, F. R. (2002). Guiding Principles for Fostering Productive Disciplinary Engagement: Explaining an Emergent Argument in a Community of Learners Classroom. *Cognition and Instruction*, 20:4, 399 - 483
- Fantini, P. (2014). *Verso una teoria locale dell'appropriazione dell'insegnamento/apprendimento della fisica*. Tesi di Dottorato di ricerca in Antropologia ed Epistemologia della Complessità, Università di Bergamo, Relatore: Giannetto, E., co-relatore Levrini, O. pp. 57-115.
- Frayn, M. (2009). *Copenaghen*. Sironi Ed.
- Giliberti, M., Marioni, C. (1997). Introduzione di alcuni elementi di Fisica dei quanti nella scuola secondaria superiore. *La Fisica Nella Scuola*, XXX, 3 supplemento. Q, 7, pp. 23–45.
- Glaser, B. G., Strauss, A. L. (1967). *The Discovery of Grounded Theory: Strategies for Qualitative Research*. Chicago: Aldine Publishing Company. (trad. it. *La scoperta della Gounded Theory. Strategie per la ricerca qualitativa*. A cura di Strati A., Armando Editore. 2009).
- Greene, B. (2004). *La trama del cosmo*. Einaudi Ed., p. 114-115.
- Hertz, H. (1956). *The principles of mechanics presented in a new form*, Dover. Traduzione inglese (1899) dell'edizione originale tedesca del 1894. Dell'opera di Hertz è ora disponibile una traduzione italiana a cura di Giovanni Gottardi, Pavia, La Goliardica Pavese, 1996. (Collana di storia della scienza diretta da Fabio Bevilacqua.)
- Haber-Schaim, U. (1975). On the Teaching of Quantum Physics in the Senior High School. In *Seminar on the teaching of physics in schools 2*. A. Loria, P. Thomsen, Ed., Gylendal: GIREP, p. 273.
- Halliday, D., Resnick, R., Walker, J. (2001). *Fondamenti di Fisica*, Zanichelli Ed.
- Heisenberg, W. (1958). *Fisica e Filosofia*. il Saggiatore Ed.

BIBLIOGRAFIA

- Indicazioni Nazionali per i Licei, D.M. 7 ottobre 2010, n. 211 - *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* - Liceo Scientifico, p. 350.
- Ireson, G. (1999). On the quantum thinking of physics undergraduates. *Proceedings of the 2nd international conference of the ESERA*, Kiel, Germany, pp. 77–79.
- Kalkanis, G., Hadzidaki, P., Stavrou, D. (2003). An instructional model for a radical conceptual change towards quantum mechanics concepts. *Science Education*, 87, pp. 257–280.
- Lawrence, I. (1996). Quantum Physics in School. *Physics Education*, 31, 5, pp. 278-286.
- Lerner, J. S., Tetlock, P. E. (1999). Accounting for the effects of accountability. *Psychological Bulletin*, 125(2), 255–275.
- Levrini, O., Fantini, P. (2013). Encountering Productive Forms of Complexity in Learning Modern Physics. *Sci & Educ* (2013) 22:1895–1910.
- Levrini, O. (2014). How Can the Learning of Physics Support the Construction of Students' Personal Identities?, *Proceedings of the GIREP – MPTL 2014 International conference*, pp. 21-27.
- Levrini, O., Fantini, P., Tasquier, G., Pecori, B., Levin, M. (2014). Defining and Operationalizing Appropriation for Science Learning, *Journal of the Learning Science*, DOI: 10.1080/10508406.2014.928215
- Levrini, O., Lulli, G., Bertozzi, E., Ercolessi, E., Matteucci, G., Monzoni, V., & Pecori, B. (2014a). Laboratorio PLS: “L’esperienza più bello della fisica”. In Anzelotti, G., Catena, L. M., Catti, M., Cosentino, U., Immè, J. & Vittorio, N. (2014) *L’insegnamento della Matematica e delle Scienze nella società della conoscenza. Il Piano Lauree Scientifiche (PLS) dopo 10 anni di attività*. Mondadori Università Ed., pp.197-201

BIBLIOGRAFIA

- Levrini, O., Fantini, P., Levin, M., Tasquier, G., (2014b). Pulling the rope and letting it go: analyzing classroom dynamics that foster appropriation. *E-Book Proceedings of the ESERA 2013 Conference*. Nicosia. Cyprus. 2-7 September. 2013.
- Levrini, O., Branchetti, L., Ercolessi, E., Fantini, P., Garagnani, E., Lulli, G., Monzoni, V. & G. Tasquier, G. (2015). *Fisica quantistica a scuola tra innovazione curricolare, vincoli scolastici e obiettivi di ricerca: l'esperienza di Bologna*. SIF, Roma, 22.9.2015
- Lévy-Leblond, J.M. , Balibar, F. (1990). *Quantique: rudiments of quantum physics*. North Holland Ed., p. 68.
- Lévy-Leblond, J.M. (2003). On the Nature of Quantons. *Science & Education* 12: 495–502
- Linn, M.C. (2005). The Knowledge Integration perspective on learning and instruction. In *The Cambridge handbook of the learning science*, pp. 243-264.
- Liu, O. L., Lee H., Hofstetter, C., Linn, M. C. (2008). Assessing Knowledge Integration in Science: Construct, Measures, and Evidence, *Educational Assessment*, 13:1, 33-55.
- Longo, G., Fabbrichesi, R. (2006). *Il "mito del continuo" tra filosofia e scienza*. Introduzione al convegno, Gargnano, ottobre 2006.
- Lulli, G. (2013). *L' esperimento più bello. L'interferenza di elettroni singoli e il mistero della meccanica quantistica*, Apogeo Education Ed.
- Malgieri, M. (2015). *Teaching quantum physics at introductory level: a sum over paths approach*. Tesi di Dottorato di ricerca in Fisica, Università di Pavia, Eelatore: De Ambrosis, A.
- Mashaldi, R. (1996). Students conceptions of quantum physics. In G. Welford, J. Osborn, & P. Scott (Ed.), *Science education in Europe: Current issues and themes*. London: Falmer Press. pp. 254–266
- Maxwell, J. C. (1861). Sulle linee di forza di Faraday. *Transactions of the Cambridge Philosophical Society*, 10, 27.

BIBLIOGRAFIA

- McIntyre, D.H., Manogue, C.A., Tate, J. (2013). *Paradigms in Physics: Quantum Mechanics*. Pearson Ed.
- Merli, P.G., Missiroli, G.F., Pozzi, G. (1976). On the statistical aspect of electron interference phenomena. *American Journal of Physics*, 44(3), 306-307.
- Michelini, M., Ragazzon, R., Santi, L., Stefanel, A. (2000). A Proposal for quantum physics in secondary school, *Phys. Educ.* 35, 6, pp. 406-410.
- Pennella, A. (2009). *La sociometria: una tecnica educativa per l'osservazione e la programmazione educativa*. Dal sito <http://www.slideshare.net/alfcom/la-sociometria>
- Pospiech, G. (1999). Teaching EPR paradox at high school?. *Phys. Educ.* 34 311-6.
- Pospiech, G. (2010). Insegnare la Fisica Quantistica dal punto di vista filosofico. In Michelini M. (a cura di), *Fisica moderna per la scuola*, LithoStampa, Udine, pp. 31-42.
- Resnick, L. B., Hall, M. W. (2001). *The principles of learning: Study tools for educators* (version 2.0) [CD-ROM]. Pittsburgh, PA: Institute for Learning, LRDC, University of Pittsburgh.
- Rogoff, B. (1995). Observing sociocultural activity on three planes: Participatory appropriation, guided participation and apprenticeship. In J. V. Wertsch, P. del Rio, & A. Alvarez (Ed.), *Sociocultural studies of mind* (pp. 139–164). Cambridge, England: Cambridge University Press.
- Schrödinger, E. (1931). *L'immagine del mondo*. Bollati Boringhieri Ed.
- Schrödinger, E. (1959). *Discussione sulla fisica moderna*. Bollati Boringhieri Ed.
- Seifert, S., Fischler, H. (1999). A multi-dimensional approach for analyzing and constructing teaching and learning processes about particle models. *Proceedings of the 2nd international conference of the ESERA*, Kiel, Germany, pp. 393–395.

BIBLIOGRAFIA

- Sfard, A. (2007). When the rules of discourse change, but nobody tells you: Making sense of mathematics learning from a commognitive standpoint. *Journal of the Learning Sciences*, 16, 567–615.
- Sjøberg, S. (2001). Why don't they love us anymore? Science and Technology Education: A European high priority political concern!. *Proceedings Third International E.S.E.R.A. Conference. Thessaloniki. Greece. 19-20.*
- Stefanel, A. (2007). La meccanica quantistica nella scuola secondaria per formare al pensiero teoretico, in *Il mondo dei quanti*, Enciclopedia Italiana Treccani, accessibile in rete all'indirizzo: [www.treccani.it/site/Scuola/nella scuola/area_fisica/index.htm](http://www.treccani.it/site/Scuola/nella_scuola/area_fisica/index.htm)
- Stefanini, L. (2013). *Corso-laboratorio PLS "l'esperimento più bello": analisi di un'esperienza di insegnamento/apprendimento della fisica quantistica*. Tesi di laurea triennale in Fisica, Università di Bologna, Relatore: Levrini, O.; Co-relatori: Bertozzi, E., Ercolessi, E.
- Tarozzi, F. (2005). *Un progetto di insegnamento della meccanica quantistica a livello di scuola secondaria superiore: alla ricerca di un formalismo possibile*. Tesi di laurea specialistica in Fisica, Relatore: Levrini, O.; Co-relatori: Grimellini Tomasini, N., Fantini, P. (ottobre 2005). pp. 22-29.
- Tarsitani G. (1983). *Il dilemma onda corpuscolo*. Loescher Ed.
- Tasquier, G. (2015). *Leading secondary school students to face the disciplinary, epistemological and societal challenges of climate change: design and analysis of multi-dimensional teaching/learning experiences*. Phd Thesis.
- Von Neumann, J. (1961). Il metodo nelle scienze fisiche, in: *Collected Works* Vol. VI, Theory of Games, Astrophysics, Hydrodynamics and Meteorology, A. H. Taub, Ed., Pergamon Press.
- Vygotsky, L. (1978). Interaction between learning and development. In Gauvain, M. & Cole, M. (1997) *Readings of the development of Children*, W.H. Freeman and Company.

BIBLIOGRAFIA

Weiss, M. (1992). *Anschaulichkeit, Abscheulichkeit*,
<http://math.ucr.edu/home/baez/photon/anschaulichkeit.htm>

BIBLIOGRAFIA

APPENDICE A

QUESTIONARIO INIZIALE

I parte

Nei brani che seguono sono riportate riflessioni di fisici o storici della fisica su alcuni presupposti legati alla modellizzazione della fisica classica. In particolare si discutono le ipotesi di continuità e discontinuità su cui si basano i modelli classici di ‘oggetto’ e di ‘processo’. Leggi attentamente i brani, sottolineando parole o frasi non chiare; esempi paradigmatici che chiariscano cosa s’intende per: modello discreto/continuo di oggetto; modello discreto/continuo di processo.

Alla fine del questionario rispondi alle domande.

1. C. Tarsitani (da “*Il dilemma onda-corpuscolo*”)

Già nella famosa polemica tra newtoniani e leibniziani, agli esordi della rivoluzione scientifica, Johann Bernoulli rimproverava all'ipotesi newtoniana dell'esistenza degli atomi come pezzi di materia indivisibili e perfettamente solidi, il fatto che essa era in netta contraddizione con la «Legge di Continuità», ossia con il principio universale in base al quale *natura non operatur per saltum*, «tutto ciò che avviene lo fa per gradi infinitesimi» e «nulla passa da un estremo all'altro senza percorrere tutti i gradi intermedi». Infatti qualsiasi processo di urto tra atomi «duri» e indeformabili (un atomo per definizione non ha parti e quindi non può subire deformazioni) implica una brusca variazione di direzione e di velocità, o addirittura un arresto istantaneo del moto. E perché, secondo i leibniziani, la Legge di Continuità non poteva essere violata? Perché un processo discontinuo renderebbe del tutto inconcepibile la connessione *causale* tra lo stato iniziale e lo stato finale: «non essendoci un legame necessario tra i due stati [...] nessuna ragione potrebbe determinare la produzione di una cosa anziché di un'altra».

2. E. Schrödinger (da “*L'immagine del mondo*”, 1931)

Io prendo come punto di partenza la tesi seguente: ogni osservazione quantitativa eseguita a scopo di misurazione è, per sua natura, discontinua.

Vediamo di chiarire ciò col più semplice degli esempi, la misurazione delle lunghezze. Ammettiamo di misurare una distanza con un regolo suddiviso in millimetri. Troviamo 23 mm o 24 o 25. Il nostro apparato non ci consente un risultato intermedio. Ma forse possiamo valutare i decimi di millimetro. O, meglio ancora, usiamo un nonio. Allora troveremo 23,6 o 23,7 o 23,8 mm. Fra mezzo non c'è niente. Con una certa pratica si possono valutare le mezze

APPENDICE A

suddivisioni del nonio. Ma anche allora è possibile ottenere solo la serie discreta di misure: 23,6, 23,65, 23,7, 23,75 eccetera. E così possiamo spingere la precisione tanto lontano quanto vogliamo: però è possibile sempre solo una serie discreta di risultati, serie fissata fin da principio dalla qualità dello strumento di misura [...] La materia prima della nostra conoscenza quantitativa della natura ha dunque sempre questo carattere decisamente primitivo, discontinuo.

Noi non ne siamo soddisfatti. Lo completiamo ricorrendo essenzialmente all'interpolazione, [...] interpoliamo i punti intermedi e arriviamo così al concetto della traiettoria percorsa con continuità. Quest'ultima non è il risultato di un'osservazione quantitativa immediata.

Con che diritto interpoliamo? [...] L'interpolazione ha un senso ed è legittima sempre quando, e solo quando, le misurazioni in un certo numero di punti intermedi possono essere ritenute eseguibili, in linea di massima.

3. A. Einstein (da "L'evoluzione della fisica", 1938)

Come la parola «fluido» sta a denotare, l'elettricità venne da prima ritenuta una quantità continua. Secondo gli antichi criteri il valore della carica elettrica doveva potersi modificare in misura arbitrariamente piccola. Non pareva necessario di dover ricorrere alla supposizione di quanti elementari di elettricità. Ma le conquiste della teoria cinetica della materia condussero a un nuovo quesito e cioè: esistono quanti elementari dei fluidi elettrici?

[...] Numerosi esperimenti fra loro indipendenti dimostrano che non può sussistere dubbio alcuno circa l'esistenza di un quanto elementare di questa elettricità negativa. Il fluido elettrico negativo si compone di granuli [...] Questo risultato venne enunciato con tutta chiarezza da J. J. Thomson, circa quarant'anni fa. I quanti elementari di elettricità negativa furono denominati elettroni. La carica negativa può [dunque] variare soltanto in modo discontinuo, tal quale come la massa.

4. C. Tarsitani (da "Il dilemma onda-corpuscolo")

Per ciò che concerne gli oggetti elementari si è data storicamente a più riprese la possibilità di attribuire a tali oggetti ora proprietà corpuscolari, ora proprietà ondulatorie. È ben noto come le indagini sulla natura della radiazione luminosa abbiano, sin dall'epoca della rivoluzione scientifica, posto in evidenza l'alternativa tra ipotesi di natura «particellare» e ipotesi facenti riferimento a una propagazione di tipo ondulatorio.

[...] All'incirca a partire dal 1860, dopo che, grazie all'opera di Faraday, W. Thomson (Lord Kelvin) e soprattutto di Maxwell, si afferma in Gran Bretagna la teoria del campo elettromagnetico, la problematica teorica - e 'metateorica' - della fisica europea è contraddistinta dalla tensione esistente tra una concezione atomistica, o «molecolare», della materia ordinaria, ancora in gran parte ancorata allo schema newtoniano basato sull'idea di atomo come centro di forze a distanza, e una concezione continua, o «di campo», delle azioni elettromagnetiche e dei processi di propagazione luminosa, che vede nell'etere - concepito e descritto come mezzo onnipervasivo, omogeneo, uniforme, continuo e privo di struttura interna - una sostanza primordiale, di cui è imbevuta la stessa materia ordinaria e che si estende senza dislocazioni o fratture in ogni zona dello spazio. [...]

APPENDICE A

La cosiddetta «concezione elettromagnetica della natura» [...] prova a considerare l'etere continuo, definito in termini puramente elettromagnetici, come la realtà fisica primaria e a ricondurre ad esso tutti gli enti fisici, elementari e complessi, compresi gli atomi e gli elettroni. Questi sarebbero zone microscopiche d'intensità particolarmente elevata del campo, o punti di singolarità nell'etere, e non avrebbero quindi una realtà sostanziale autonoma. Le leggi della meccanica classica, inoltre, risulterebbero una conseguenza secondaria delle leggi elettromagnetiche applicate al moto di aggregati macroscopici di questi punti singolari. Il programma teorico della concezione elettromagnetica della natura segna dunque l'apoteosi dell'etere e dell'immagine della realtà fisica fondata sull'idea di continuità. Con esso i fisici producono l'ennesimo tentativo di arrivare a una rappresentazione unitaria, senza dualismi e asimmetrie, di tutte le azioni osservabili.

5. A. Einstein (da "L'evoluzione della fisica", 1938)

Osserviamo una parete costruita sul mare. Le onde marine ne percuotono continuamente la superficie e si ritraggono una dopo l'altra per lasciare il passo alle sopravvenienti. La parete si logora, vale a dire la sua massa si riduce e possiamo chiederci quale sia la quantità asportata entro un certo periodo di tempo, mettiamo un anno. Immaginiamo ora un processo diverso, con cui ridurre la massa della parete nella stessa misura. Spariamo contro la parete, scheggiandola nei punti colpiti dalle pallottole. La massa della parete diminuirà anche con questo metodo e nulla ci vieta di immaginare che nei due casi la riduzione possa risultare uguale. Tuttavia dall'apparenza della parete potremo sempre giudicare quale causa abbia agito, se l'azione continua delle onde o la raffica discontinua delle pallottole. Per la comprensione dei fenomeni che stiamo per descrivere sarà bene tener presente la diversità fra onde marine e raffiche di pallottole.

APPENDICE A

DOMANDE I PARTE

1.1. Nella tabella che segue sono riportati oggetti e processi citati nei brani. Completa la tabella indicando, per ogni modello di oggetto e per ogni tipo di processo, quali qualità/proprietà lo definiscono come continuo e/o come discreto. Metti una barra nel caso tu non ci veda nessuna proprietà. Eventuali commenti possono essere riportati anche nello spazio sotto la tabella.

		Qualità/proprietà che lo definiscono continuo	Qualità/proprietà che lo definiscono discreto
Oggetto	Fluido elettrico		
	Etere		
	Atomo		
	Campo elettromagnetico		
	Radiazione luminosa (luce)		
	Elettrone		
Processo	Propagazione della luce		
	Processo di misura		
	Seguire/percorrere una traiettoria		
	Processi di urto (tra oggetti o di un oggetto contro una parete)		

Commenti:

APPENDICE A

- 1.2 Facendo una sintesi di quanto emerso dalla tabella, cosa si può intendere per continuità/discontinuità riferita a un oggetto fisico? E riferita a un processo?
- 1.3 Anche estrapolando dai brani, quale immagine del mondo e della materia è attribuita a Newton? Che differenza c'è con la cosiddetta “concezione elettromagnetica della materia”?
- 1.4 Vedi dei collegamenti tra le idee di continuo e discreto discusse in questi brani in riferimento alla fisica e le idee di continuo e discreto usate in matematica? Motiva la risposta.

II parte

Nei brani che seguono sono riportate riflessioni di fisici sulle caratteristiche fondamentali della conoscenza fisica e del suo processo di costruzione. Leggi attentamente i brani, sottolineando

1. parole o frasi non chiare;
2. parole chiave o frasi che chiariscano il punto di vista dell'autore.

1. Heinrich Hertz: (da “I principi della meccanica presentati in una nuova forma”, 1899)

Il problema più diretto e, in un certo senso, il più importante, che la conoscenza consapevole della natura ci permette di risolvere, è quello di poter prevedere gli eventi futuri, in modo tale da poter predisporre le nostre azioni in accordo con queste previsioni. Come base per la soluzione di questo problema, facciamo sempre uso della conoscenza di eventi che sono già accaduti, ottenuta mediante un'osservazione casuale o un esperimento preordinato. Nel cercare di trarre delle inferenze sul futuro dal passato, procediamo sempre in questo modo. Costruiamo delle immagini o simboli degli oggetti esterni; e diamo loro una forma tale che le necessarie conseguenze delle immagini nel pensiero siano sempre le necessarie conseguenze nella natura delle cose descritte. Affinché questa condizione sia soddisfatta, ci deve essere una certa conformità tra la natura ed il nostro pensiero. L'esperienza ci insegna che questa condizione può essere soddisfatta, e quindi che questa conformità in effetti esiste. Quando riusciamo a dedurre immagini del tipo desiderato dall'esperienza precedentemente accumulata, possiamo, usandole od usando modelli, dedurre le conseguenze che, nel mondo esterno, emergono solo in tempi relativamente lunghi oppure solo come risultato del nostro intervento. Siamo così in grado di anticipare i fatti, e quindi di prendere delle decisioni nella situazione presente in accordo con la previsione così acquisita. Le immagini di cui stiamo parlando sono le nostre concezioni delle cose. Esse sono in conformità con le cose stesse sotto un aspetto importante: perché soddisfano la condizione esposta in precedenza. Non è necessario, per i nostri fini, che esse siano in conformità con le cose sotto ogni altro aspetto

APPENDICE A

qualsivoglia. Infatti, noi non sappiamo, né possiamo sapere in alcun modo, se le nostre concezioni delle cose sono in conformità con esse sotto ogni altro che non sia questo unico fondamentale aspetto. (...)

Domanda 2.1: Quali parole chiave o frasi caratterizzano il punto di vista dell'autore? Motiva la tua scelta

2. **J. C. Maxwell** da “Sulle linee di forza di Faraday”, 1861

Il primo processo nello studio effettivo delle scienze deve essere un processo di semplificazione e riduzione delle investigazioni [sperimentali] precedenti per portarle in una forma in cui la mente le possa comprendere. Il risultato di questa semplificazione può avere l'aspetto di una formula matematica, o di un'ipotesi fisica. Nel primo caso, si perde interamente di vista il fenomeno che deve essere spiegato; e anche se riusciamo a ricavare le conseguenze dei teoremi, non riusciamo mai ad ottenere una vista più ampia delle connessioni presenti nell'oggetto studiato. Se, d'altra parte, adottiamo un'ipotesi fisica specifica, vedremo il fenomeno solo attraverso un filtro, e correremo il rischio di fare assunzioni miopi o avventate, che sono incoraggiate da una spiegazione parziale. Dobbiamo quindi scoprire un metodo di investigazione che permetta alla mente, ad ogni passo, di ancorarsi ad una chiara concezione fisica, senza aderire completamente ad alcuna teoria fisica da cui quella concezione è presa in prestito, cosicché la mente non sia né distratta dall'oggetto di studio inseguendo sottigliezze analitiche, né trascinata oltre la verità dalla propria ipotesi preferita.

Allo scopo di mantenere idee fisiche senza adottare completamente una teoria fisica, dobbiamo diventare familiari con l'esistenza di analogie fisiche. Con “analogie fisiche” io intendo una somiglianza parziale tra le leggi di una disciplina e le leggi di un'altra che permette ad una di esse di illustrare l'altra”.

Domanda 2.2: Quali parole chiave o frasi caratterizzano il punto di vista dell'autore? Motiva la tua scelta.

3. **J. Von Neumann**, da “Il metodo nelle scienze fisiche”, 1961

Per cominciare, dobbiamo porre enfasi su un'affermazione che sono sicuro avete sentito in precedenza, ma che occorre ripetere e tener sempre presente. Ed essa è che le scienze non cercano di spiegare, quasi mai cercano di interpretare, principalmente costruiscono modelli. Con "modello" intendiamo una struttura matematica che, con l'aggiunta di alcune interpretazioni verbali, descriva i fenomeni osservati. La giustificazione di tale costruzione matematica risiede soltanto e precisamente nel fatto che ci si aspetta che funzioni - ossia, che descriva correttamente i fenomeni in un campo ragionevolmente vasto di casi.

Domanda 2.3: Quali parole chiave o frasi caratterizzano il punto di vista dell'autore? Motiva la tua scelta.

ALTRE DOMANDE II PARTE:

- 2.4** Come avrai notato nella lettura dei brani, gli autori pongono l'accento sul diverso ruolo che immagini, analogie fisiche e modelli matematici svolgono nella costruzione della fisica. Quali ruoli sono evidenziati nei brani?
- 2.5** Facendo riferimento a quanto hai già studiato in fisica, puoi riportare esempi specifici che illustrino il significato e altri possibili ruoli che questi strumenti di pensiero possono svolgere?
- 2.6** Pensando al tuo percorso personale di studio della fisica, quale di questi strumenti (immagini, analogie fisiche e modelli matematici) ha svolto un ruolo particolare per la tua comprensione del mondo fisico?

APPENDICE A

APPENDICE B

COMPITO IN CLASSE

Verifica di Fisica V A

6 maggio 2015

Quesito 1 – CORPO NERO

Albireo è un bellissimo sistema a due stelle nella costellazione del Cigno. La prima stella (A) ha una temperatura di superficie $T_A = 4700$ K; la sua compagna (B) ha una temperatura di superficie $T_B = 13000$ K. Quando vengono osservate attraverso un telescopio, una stella appare blu e l'altra appare gialla.

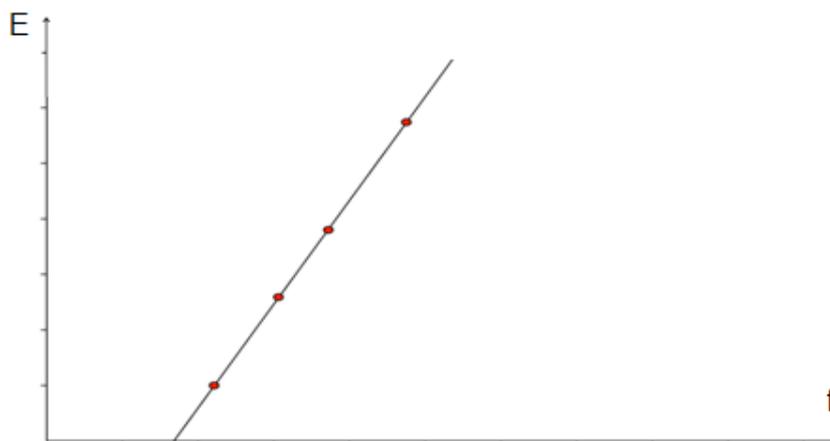
- Quale delle stelle appare blu? Giustifica la risposta.
- Calcola il rapporto fra le frequenze di picco ν_A e ν_B della radiazione emessa dalle due stelle.
- Collega il fenomeno alle ricerche riguardanti la curva di emissione della radiazione elettromagnetica di corpo nero che portarono Planck, nel 1900, a formulare l'ipotesi del quanto di energia. Descrivi il problema affrontato da Planck e la sua ipotesi finale.

Quesito 2 – EFFETTO FOTOELETTRICO

2.1. Il grafico in figura rappresenta il risultato di un esperimento sull'effetto fotoelettrico. Si rappresenta l'energia cinetica massima degli elettroni emessi in funzione della frequenza f della luce. Si suggeriscono tre possibili modifiche delle condizioni sperimentali:

- Usare una luce incidente con lunghezza d'onda minore di quelle usate nell'esperimento;
- Usare luce della stessa lunghezza d'onda ma di maggiore intensità;
- Usare un metallo con diverso potenziale di estrazione.

Per quali delle modifiche suggerite, i risultati dell'esperimento giacciono sulla stessa retta o su un suo prolungamento? Giustifica la risposta



APPENDICE B

2.2. L'effetto fotoelettrico viene spiegato da Einstein nell'articolo del 1905 "Un'ipotesi euristica sulla natura della radiazione".

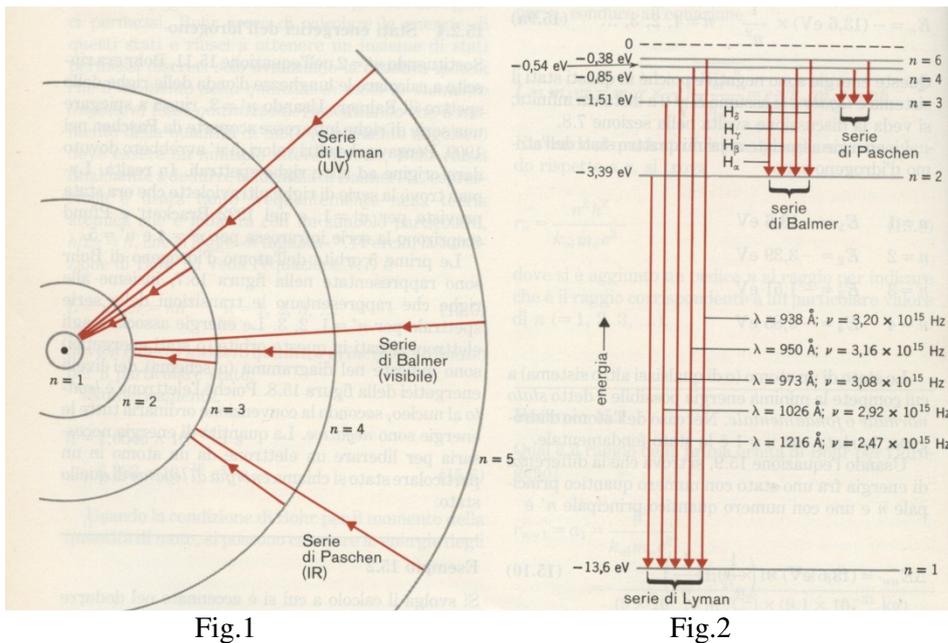
Esponi, facendo riferimento all'effetto fotoelettrico, quale è stato il contributo di Einstein al dibattito su continuo-discreto in fisica. Nella tua argomentazione sottolinea l'evoluzione subita dal concetto di quanto di energia introdotto da Planck nell'interpretazione data da Einstein dell'effetto fotoelettrico e prendi in considerazione il contributo relativo sia al modello di oggetto sia a quello di interazione.

Quesito 3 – Energia e atomo di Bohr

3.1. Si consideri la luce monocromatica che colpisce una pellicola fotografica. L'energia minima necessaria per dissociare una molecola di AgBr contenuta nell'emulsione e lasciare in tal modo una traccia è di circa 0,60 eV. Per quale massima lunghezza d'onda la luce riesce a impressionare la pellicola? [2,1 μm]

In quale regione dello spettro si trova?

3.2. Si considerino le due figure seguenti, riferite entrambe all'atomo di Bohr.



Quali proprietà dell'atomo queste immagini sono in grado di rappresentare?

A quali possibili equivoci potrebbe dar luogo la rappresentazione di figura 1?

In che senso le proprietà che le figure intendono rappresentare sono "rivoluzionarie", se confrontate coi modelli di atomo precedenti, come il modello planetario di Rutherford e il modello di atomo utilizzato nella teoria cinetica dei gas?

APPENDICE B1

RISPOSTE DAL COMPITO IN CLASSE RELATIVO ALLA PARS DESTRUENS

Problema 1

Albireo è un bellissimo sistema a due stelle nella costellazione del Cigno. La prima stella (A) ha una temperatura di superficie $T_A = 4700$ K; la sua compagna (B) ha una temperatura di superficie $T_B = 13000$ K. Quando vengono osservate attraverso un telescopio, una stella appare blu e l'altra appare gialla.

Domanda 1.a

Quale delle stelle appare blu? Giustifica la risposta.

Livello Corretto: “La stella che apparirà blu è la stella B poiché ha la lunghezza d'onda minore” (S10). Oltre all'affermazione sono anche riportati la formula di Wien e i calcoli.

L. Parziale: “La stella blu è la più calda ovvero la stella B” (S1). L'affermazione è corretta, ma non sono riportati né la formula di Wien, né il ragionamento che ha portato alla risposta.

L. Scorretto: “La stella blu è la A” (S21). “La stella che appare blu è la stella A perché se aumenta la temperatura ci avviciniamo a colori più chiari” (S23).

Domanda 1.b

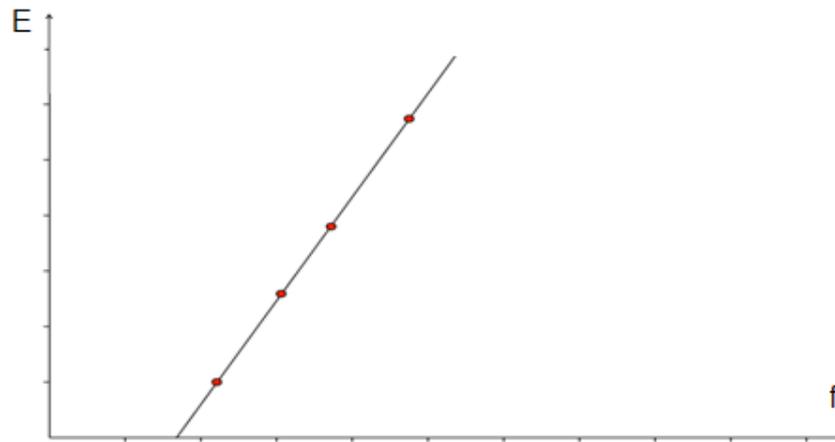
*Calcola il rapporto fra le frequenze di picco ν_A e ν_B della radiazione emessa dalle due stelle.
[$\nu_A/\nu_B = 0,36$]*

Per questa domanda è stata fornita la soluzione del problema agli studenti. Non era necessario giustificare la risposta, ma solo applicare la formula di Wien e svolgere correttamente i calcoli.

Problema 2

Il grafico in figura rappresenta il risultato di un esperimento sull'effetto fotoelettrico. Si rappresenta l'energia cinetica massima degli elettroni emessi in funzione della frequenza f della luce. Si suggeriscono tre possibili modifiche delle condizioni sperimentali:

APPENDICE B1



Domanda 2.a

Usando una luce incidente con lunghezza d'onda minore di quelle usate nell'esperimento, i risultati dell'esperimento giacciono sulla stessa retta o su un suo prolungamento? Giustifica la risposta.

L. Corretto: “ v aumenta se λ è minore, quindi è sulla stessa retta e K_{max} aumenta” (S11).

L. Parziale: Due soli i casi di risposta parziale: nel compito di S6 e S16. S6 fornisce la risposta giusta ma la motivazione è ambigua, mentre S16 fornisce la risposta errata a causa di un errore nell'ultimo passaggio del procedimento matematico.

L. Scorretto: Esistono varie tipologie di risposte errate. C'è chi come S1 e S12 ha confuso lunghezza d'onda e frequenza, affermando che “Sotto una λ minore non abbiamo effetto fotoelettrico quindi non c'è la retta”.

S4 afferma che la retta varia perché una variazione di frequenza implica una variazione del potenziale d'arresto. Altre risposte errate sono legate ad una interpretazione sbagliata della domanda.

Domanda 2.b

Usando luce della stessa lunghezza d'onda ma di maggiore intensità, i risultati dell'esperimento giacciono sulla stessa retta o su un suo prolungamento? Giustifica la risposta.

L. Corretto: S20 fornisce la risposta corretta e, seppur in maniera sintetica, la motiva affermando giustamente che: “variare l'intensità senza modificare la frequenza non modifica nessuno degli elementi della formula dell'effetto fotoelettrico e dunque i risultati giacciono sulla stessa retta.”

APPENDICE B1

L. Parziale: Un esempio di risposta parziale è quella di S17. Dà la risposta corretta ma poi la giustifica così: “Usando una luce incidente con lunghezza d’onda uguale a quelle usate nell’esperimento significherebbe ammettere valori minori sotto la frequenza di soglia”.

L. Scorretto: Esempio di risposta errata: S21 “Usando una radiazione più intensa (ma con la stessa lunghezza d’onda) gli elettroni riceveranno più energia, si avrà perciò lo stesso risultato con un prolungamento della retta”. Nonostante la parte conclusiva della frase sia la risposta corretta, la premessa è totalmente errata.

Domanda 2.c

Usando un metallo con diverso potenziale di estrazione. i risultati dell’esperimento giacciono sulla stessa retta o su un suo prolungamento? Giustifica la risposta.

L. Corretto: Un esempio di risposta corretta viene dal compito di S14: “Con un materiale con diverso potenziale di estrazione, cambia la frequenza di soglia; la retta si sposta a destra per un potenziale di estrazione maggiore o a sinistra per un potenziale di estrazione minore”.

L. Parziale: Un esempio di risposta parziale viene dal compito di S8: “Varia perché aumenta il lavoro di estrazione”. La risposta è corretta ma manca l’argomentazione di come tale risposta si ricollega a formula e grafico.

L. Scorretto: Un esempio di risposta scorretta è quello di S12: “Usare un metallo con diverso potenziale d’estrusione $K_{max} = eV_0$ varierà la K_{max} ma avviene comunque l’effetto fotoelettrico e presenterà un prolungamento della retta”. L’uso della formula errata ha portato lo studente ad una conclusione errata.

Domanda 3.a

Si consideri la luce monocromatica che colpisce una pellicola fotografica. L’energia minima necessaria per dissociare una molecola di AgBr contenuta nell’emulsione e lasciare in tal modo una traccia è di circa 0,60 eV. Per quale massima lunghezza d’onda la luce riesce a impressionare la pellicola? [2,1 μm]

L. Corretto: Un esempio di risposta corretta è quella di S16. Per risolvere l’esercizio occorre fornire il valore corretto, mostrato nella soluzione sopra e riportata anche nel compito degli studenti. Per ottenerlo occorre combinare, come fatto da S16, le formule $E = h\nu$ e $c = \lambda \nu$.

L. Parziale: Risposte parziali sono dovute, come nel caso di S4, ad un procedimento matematico corretto in cui però sono presenti errori di calcolo.

APPENDICE B1

L. Scorretto: Le uniche due risposte scorrette appartengono a S2 e a S14: S2 ha riconosciuto le formule giuste da usare ma non ha saputo svolgere i calcoli. S14 ha invece usato una formula errata, relativa alle serie dello spettro dell'atomo di idrogeno.

DOMANDE APERTE:

Domanda aperta su Corpo Nero (1.c)

Collega il fenomeno alle ricerche riguardanti la curva di emissione della radiazione elettromagnetica di corpo nero che portarono Planck, nel 1900, a formulare l'ipotesi del quanto di energia. Descrivi il problema affrontato da Planck e la sua ipotesi finale.

Esempio di risposta ritenuta corretta e completa (Federico, S14): “Il problema cruciale che Planck si trova ad affrontare all'inizio del '900 riguarda la curva di emissione di un corpo nero: i dati sperimentali, che vedono una rapida decrescita per λ minori di λ_{\max} (valore descritto dalla legge di Wien), non sono in accordo con la previsione teorica dell'elettromagnetismo di Maxwell, che vede per λ tendente a 0, una tendenza ad infinito. Planck ipotizzò che lo scambio di energia tra le pareti della cavità radiante e l'etere avvenisse in maniera “discreta”, per mezzo di oscillatori microscopici emettenti pacchetti di energia $h\nu$, discreti. Planck non soddisfatto comunque della sua ipotesi, ha discretizzato (coerentemente) il processo.”

Domanda su Effetto fotoelettrico (2.2)

L'effetto fotoelettrico viene spiegato da Einstein nell'articolo del 1905 “Un'ipotesi euristica sulla natura della radiazione”. Esponi, facendo riferimento all'effetto fotoelettrico, quale è stato il contributo di Einstein al dibattito su continuo-discreto in fisica. Nella tua argomentazione sottolinea l'evoluzione subita dal concetto di quanto di energia introdotto da Planck nell'interpretazione data da Einstein dell'effetto fotoelettrico e prendi in considerazione il contributo relativo sia al modello di oggetto sia a quello di interazione.

Esempio di risposta ritenuta corretta e completa (Federico, S14): “Einstein riprende l'effetto fotoelettrico, già trattato da Lenard prima di lui, ma dandogli una nuova ipotesi. Il problema dell'effetto fotoelettrico, non spiegabile con la fisica classica, è l'esistenza di una “frequenza di soglia” e quindi di un potenziale d'arresto sotto i quali, indifferentemente dall'irraggiamento, quindi dalla quantità di energia che colpisce il metallo, non si ha effetto fotoelettrico.

La fisica classica non riesce a spiegare questo dato sperimentale che Einstein risolve discretizzando l'oggetto, ossia la radiazione elettromagnetica: l'energia viene trasportata in pacchetti discreti $h\nu$, detti quanti di energia, poi in seguito fotoni. Quindi soltanto un fotone con una certa energia $h\nu$, interagendo con un singolo elettrone, può far estrarre quest'ultimo dal metallo solamente se questa energia $h\nu$ è maggiore del lavoro di estrazione.

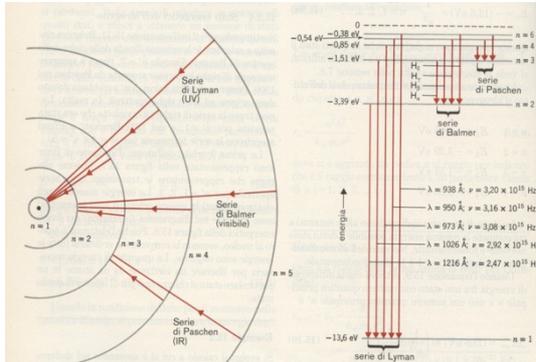
Non solo quindi lo scambio di energia avviene in maniera discreta, ma anche l'energia stessa è discretizzata nel suo oggetto di “quanto”. Altra intuizione di Einstein l'interazione di un singolo quanto con un singolo elettrone.”

Domanda su Atomo di Bohr (3.2)

Si considerino le due figure seguenti, riferite entrambe all'atomo di Bohr.

Fig.1

Fig.2



Quali proprietà dell'atomo queste immagini sono in grado di rappresentare?

A quali possibili equivoci potrebbe dar luogo la rappresentazione di figura 1?

In che senso le proprietà che le figure intendono rappresentare sono "rivoluzionarie", se confrontate coi modelli di atomo precedenti, come il modello planetario di Rutherford e il modello di atomo utilizzato nella teoria cinetica dei gas?

Esempio di risposta ritenuta corretta e completa (Paolo, S13): "Dopo il modello a "panettone" di Thomson sfatato dall'esperimento di Rutherford e dopo il modello planetario dello stesso Rutherford, Bohr propone una nuova struttura e un nuovo modello di atomo.

La sua teoria si basa su tre ipotesi:

- 1 - Le orbite devono essere stazionarie
- 2 - C'è emissione di radiazione solo quando un elettrone passa da un'orbita all'altra con $\Delta E = h\nu$
- 3 - Il momento angolare è quantizzato $L = n \frac{h}{2\pi}$

Le due figure riportate ci mostrano le prime due caratteristiche perché mostrano i livelli energetici e la lunghezza d'onda λ e la frequenza della radiazione emessa al variare del livello energetico.

L'equivoco che può produrre la fig.1 è che con tale rappresentazione si pensi che quella sia la struttura dell'atomo e dei suoi orbitali ma in realtà è equivalente alla fig. 2.

Un altro aspetto rivoluzionario, espresso dalla seconda ipotesi, è che non c'è perdita di energia nella rotazione dell'elettrone intorno al nucleo.

Rispetto al modello di Thomson viene aggiunto il vuoto fra nucleo ed elettroni mentre il modello precedente (di Thomson) raffigurava l'atomo come una particella sferica di carica positiva al cui interno erano inseriti gli elettroni."

APPENDICE C

TIPOLOGIA B - REDAZIONE DI UN “SAGGIO BREVE” O DI UN “ARTICOLO DI GIORNALE”

CONSEGNA

Sviluppa l'argomento scelto o in forma di «saggio breve» o di «articolo di giornale», utilizzando, in tutto o in parte, e nei modi che ritieni opportuni, i documenti e i dati forniti.

Se scegli la forma del «saggio breve» argomenta la tua trattazione, anche con opportuni riferimenti alle tue conoscenze ed esperienze di studio.

Premetti al saggio un titolo coerente e, se vuoi, suddividilo in paragrafi.

Se scegli la forma dell'«articolo di giornale», indica il titolo dell'articolo e il tipo di giornale sul quale pensi che l'articolo debba essere pubblicato.

Per entrambe le forme di scrittura non superare cinque colonne di metà di foglio protocollo.

A.S. 2014-2015 ARGOMENTO:

"Fisica quantistica e rappresentazione della realtà: possibili strade per l'immaginazione e l'intuibilità"

1. *N. Bohr, Discussione con Einstein sui problemi epistemologici della fisica atomica, 1949, in A. Einstein, Autobiografia scientifica, pp. 113- 114*

I dati ottenuti in condizioni sperimentali diverse non si possono racchiudere in una singola immagine, ma debbono essere considerati complementari. Stando così le cose, l'attribuzione di qualità fisiche tradizionali agli oggetti atomici implica un elemento essenziale di ambiguità, come si vede immediatamente nella contraddizione relativa alle proprietà corpuscolari e ondulatorie degli elettroni e dei fotoni, in cui ci troviamo di fronte a immagini contrastanti, ognuna delle quali si riferisce a un aspetto essenziale dei dati sperimentali.

2. *E. Schrödinger, da “Discussione sulla fisica moderna”, Bollati Boringhieri, 1959*

“L'immagine della realtà materiale è oggi vacillante e malsicura, come non lo è stata da molto tempo. Conosciamo una folla di particolari assai interessanti, ne apprendiamo dei nuovi ogni settimana [...]. Ma l'immagine della materia, che devo costruire davanti ai vostri occhi, non esiste affatto, per il momento, ma ne esistono appena dei frammenti, con un valore di verità più o meno parziale. [...] Tanto nell'immagine corpuscolare quanto in quella ondulatoria c'è un contenuto di verità, al quale non possiamo rinunciare. Ma non sappiamo come fondere insieme queste due verità”.

APPENDICE C

3. W. Heisenberg, da *“Fisica e Filosofia”*, il Saggiatore, 1958

“Non sorprende che il nostro linguaggio sia incapace di descrivere i processi che avvengono all’interno degli atomi, poiché, come ho già spiegato, è stato inventato per descrivere le esperienze di tutti i giorni, e queste consistono solo in processi che coinvolgono un enorme numero di atomi. Inoltre, è molto difficile modificare il nostro linguaggio in modo che sia possibile descrivere questi processi atomici, poiché le parole possono descrivere solo le cose di cui ci siamo formati immagini mentali, e questa abilità è anch’essa risultato delle esperienze di tutti i giorni. Fortunatamente, la matematica non è soggetta a questa limitazione, ed è stato possibile inventare un modello matematico – la teoria quantistica – che sembra completamente adeguata per la discussione dei processi atomici; per la visualizzazione, comunque, dobbiamo accontentarci di due analogie incomplete – l’immagine ondulatoria e l’immagine corpuscolare”.

4. A. Einstein, da *“L’evoluzione della fisica”*, Bollati Boringhieri, 1938

“[...] nessuno scienziato pensa con formule: quindi le idee fondamentali della fisica si possono esprimere con parole. [...] I concetti fisici sono creazioni libere dell’intelletto umano e non vengono, come potrebbe credersi, determinati esclusivamente dal mondo esterno. Nello sforzo che facciamo per intendere il mondo rassomigliamo molto all’individuo che cerca di capire il meccanismo di un orologio chiuso. Egli vede il quadrante e le sfere in moto, ode il tic-tac, ma non ha modo di aprire la cassa. Se è ingegnoso, egli potrà farsi una qualche immagine del meccanismo che considera responsabile di tutto quanto osserva, ma non sarà mai certo che tale immagine sia la sola suscettibile di spiegare le sue osservazioni. Egli non sarà mai in grado di confrontare la sua immagine con il meccanismo reale e non potrà neanche rappresentarsi la possibilità e il significato di simile confronto. Tuttavia egli crede certamente che con il moltiplicarsi delle sue cognizioni la sua immagine della realtà diverrà sempre più semplice e sempre più adatta a spiegare domini via via più estesi delle sue impressioni sensibili. Egli potrà anche credere all’esistenza di un limite ideale della conoscenza, a cui l’intelletto umano può avvicinarsi indefinitamente, e potrà chiamare verità obiettiva tale limite”.

5. M. Weiss, da *“Anschaulichkeit, Abscheulichkeit”* (*“Visualizzabilità, Scelleratezza”*), 1992

“[...] nell’infanzia della teoria quantistica, la questione della visualizzabilità incombeva minacciosa. Nel suo secondo articolo sulla meccanica ondulatoria, Schrödinger scrisse:

‘... si è persino dubitato se quello che avviene nell’atomo possa essere descritto all’interno di un modello spazio-temporale. Da un punto di vista filosofico, dovrei considerare una decisione conclusiva in questo senso come equivalente a una resa totale. Perché non possiamo evitare di pensare in termini di spazio e tempo, e quello che non possiamo comprendere in questo modo, non lo possiamo comprendere affatto. Esistono cose del genere ma non credo che la struttura atomica sia una di queste.’

Schrödinger scrisse a Willy Wien:

‘Il punto di vista di Bohr, che una descrizione spazio-temporale sia impossibile, lo rifiuto *a limine* ... Se [la ricerca atomica] non può essere inserita nello spazio e nel tempo, allora fallisce nel suo intero compito e uno non sa più a cosa serve.’

Bohr e Heisenberg ovviamente avevano un’opinione diversa [da Schrödinger]. Gli articoli iniziali sulla meccanica delle matrici esprimevano la loro filosofia operativa: “Hai le tue equazioni, hai le tue

APPENDICE C

osservazioni, e combaciano. Cos'altro vuoi? Stai zitto e calcola!" Ovviamente, lo dicevano in maniera più educata, almeno sugli articoli.

Per esempio, ecco l'introduzione completa del famoso articolo di Heisenberg: 'Il presente articolo cerca di stabilire una base per la meccanica quantistica teorica basata esclusivamente sulle relazioni tra grandezze che sono in principio osservabili'".

6. *J.M. Lévy-Leblond, da "On the nature of Quantons", Springer, 2003*

"Che la vera natura degli oggetti quantistici sia stata a lungo incompresa è dimostrato dalla comune descrizione che ancora oggi se ne fa in termini di un presunto "dualismo onda-corpuscolo".

Occorre evidenziare innanzitutto che questa formulazione è quanto meno ambigua. Perché la si può intendere sia come se dicesse che un oggetto quantistico è allo stesso tempo un'onda e una particella, o che è a volte un'onda e a volte una particella. Nessuna di queste due interpretazioni in effetti ha senso. "Onda" e "particella" non sono oggetti ma concetti, e tra loro incompatibili; dunque, non possono assolutamente descrivere la stessa entità. Mentre è vero che gli oggetti quantistici possono in alcuni casi somigliare alle onde, e in altri casi alle particelle, è sicuramente più vero che nella maggior parte delle situazioni, in particolare quelle affrontate dagli elaborati esperimenti moderni, loro somigliano né alle une né alle altre. La situazione appena descritta ricorda quella incontrata dai primi esploratori dell'Australia, quando hanno scoperto strani animali che vivevano nei torrenti. Visti da davanti, questi animali mostravano un becco d'anatra e le zampe palmate, mentre, visti da dietro, mostravano un corpo peloso e una coda. Furono allora soprannominati "anatra-castoro". Si scoprì poi che questo dualismo castoro-anatra aveva una validità limitata e che la specificità zoologica di questo animale meritava un nome proprio, che divenne "ornitorinco". Più o meno allo stesso modo noi possiamo (e dobbiamo) allora affermare con sicurezza che gli oggetti quantistici sono né onde, né particelle, e devono essere descritti da un nuovo e specifico concetto, che merita certamente un nome tutto suo. La proposta di Bunge è di chiamarli "quantoni".

7. *P.A.M. Dirac, da "I Principi della Meccanica Quantistica", Bollati Boringhieri, 1959*

In risposta alla prima critica si può osservare che il principale scopo della fisica non è di fornire delle immagini intuitive [*"pictures" nell'originale inglese, trad. "modelli" nella versione italiana*] bensì di formulare delle leggi che governino i fenomeni e la cui applicazione porti alla scoperta di nuovi fenomeni. Se poi esiste un'immagine intuitiva, tanto meglio; ma l'esistenza o meno di essa è questione di secondaria importanza. Nel caso dei fenomeni atomici, infatti, non ci si deve aspettare che esista alcuna "immagine intuitiva" nel senso abituale della parola, cioè di un modello [*qui "model" nell'originale*] che funzioni essenzialmente su linee classiche. Si può tuttavia estendere il significato delle parole "immagine intuitiva" per includervi *qualsiasi maniera di raffigurarsi le leggi fondamentali in modo da rendere ovvia la loro autoconsistenza*. Con questa estensione, si può gradualmente formare un'immagine intuitiva dei fenomeni atomici, familiarizzandoci con le leggi della fisica quantistica.

APPENDICE C

APPENDICE C1

ESEMPI DISCIPLINARI DEI TEMI

Scorretto e/o inconsistente (S2): *“[...] Venne così inventato un nuovo modello matematico: la teoria quantistica. Questa teoria presenta due analogie incomplete: l’immagine ondulatoria e l’immagine corpuscolare. Si cercò in tutti i modi di collegare le due immagini ma non si trovarono leggi fisiche in grado di permetterlo. Dunque la quantistica presume un dualismo onda-corpuscolo.”*

Nel tema di questo studente l’accostamento di termini disciplinari, termini epistemologici e termini del linguaggio comune denota una forte incomprensione del loro significato.

Impreciso e/o generico (S21): *“Il nuovo mondo quantistico ci porta in una dimensione completamente differente in cui, secondo il principio di indeterminazione, grandezze classiche come velocità e quantità di moto non sono più applicabili.*

Secondo Heisenberg possiamo descrivere solo le cose di cui ci siamo formati immagini mentali, questo limite viene meno con la matematica.

Bohr intraprende un dibattito con Heisenberg, infatti il fisico danese crede che il principio di indeterminazione sia dovuto all’impossibilità di adottare contemporaneamente il modello corpuscolare con quello ondulatorio mentre Heisenberg sostiene che esso sia causato dalla natura discreta della materia.

Lévy-Leblond sottolinea che la formulazione del modello onda-corpuscolo sia ambigua poiché non dà una descrizione chiara del fenomeno, cioè esso è un modello simultaneo o se si verifica una mutazione, quindi una forma prima dell’altra.”

Il tema di S21 è un esempio di tema con affermazioni non precise o non chiare. Parlando della relazione di indeterminazione S21 afferma che “grandezze classiche come velocità e quantità di moto non sono più applicabili”. Questa è un’affermazione che sembra “presa a prestito” da qualcuno ma non si capisce che cosa stia intendendo. Nel testo riportato si può osservare anche come le connessioni tra le affermazioni siano molto deboli.

Dalla lettura di questo tema e dal confronto con altri temi inseriti a cui è stato assegnato lo stesso livello disciplinare, si è deciso di assegnare un punteggio disciplinare pari a 2 al tema di S21, ritenendo ridotte sia la quantità di imprecisioni sia il grado di genericità.

Corretto parzialmente completo (S14, Federico): Si riporta la struttura del tema per aiutare, in quanto non è possibile far capire al lettore la valutazione attraverso estratti del tema. Nel tema

APPENDICE C1

vengono discussi tre diversi problemi disciplinari: l'uso del linguaggio e delle immagini, il dualismo onda-corpuscolo e l'approccio dei fisici a tale problema. Per ciascuno vengono brevemente descritte, anche attraverso l'uso di tutte le citazioni, le diverse posizioni emerse e i tre problemi sono debolmente legati tra loro nonché debolmente ripresi nella conclusione.

Gli argomenti sono esposti in maniera corretta, ma i collegamenti non sono esaurientemente discussi.

Completo parzialmente corretto (S4, Lucia): *“Lévy-Leblond spiega con una semplicissima e chiarissima metafora il dilemma secolare sulla natura della radiazione elettromagnetica (onda o corpuscolo); affermando la duplice natura dell'ornitorinco, allo stesso tempo talpa e allo stesso tempo anatra, a seconda dei punti di vista, il fisico afferma la duplice natura della luce, allo stesso tempo onda e allo stesso tempo corpuscolo, creando un nuovo concetto specifico, che vale solamente per la radiazione elettromagnetica, come l'ornitorinco è una specie a sé, con un nome unico. Il nuovo concetto descritto da Lévy-Leblond suppone la presenza di oggetti quantistici né onde né particelle, alla base della radiazione: i quantoni.”*

Sebbene il finale sia l'interpretazione a cui si voleva portare gli studenti (né-né), l'iniziale imprecisione (sia-sia) non viene chiarita nel momento in cui è riportata la citazione finale. Questo lascia intendere che al di là della conclusione corretta la citazione di Lévy-Leblond non sia stata completamente compresa.

Complesso (S15): *“A livello concettuale la fisica quantistica restituisce un nuovo modo di vedere il mondo e quindi una nuova immagine della realtà. Il problema principale è restituire una immagine modello alle nuove scoperte in linea con fenomenologie e teorie. [...] La questione della visualizzabilità riporta diverse problematiche. In primo luogo i fisici ritrovano difficoltà nel lavorare a livello microscopico. [...] In secondo luogo la complessità di fornire una immagine modello coerente è data dal principio di indeterminazione. [...] Le nuove immagini non possono essere analogie della fisica precedente: devono essere assolutamente nuove. [...] Una terza difficoltà è data dal fatto che i dati sperimentali sono contraddittori. Come restituire una immagine unitaria dell'oggetto?”*

Il livello complesso si caratterizza per la struttura articolata: il problema principale si sviluppa in sottoproblemi. Il livello corretto e completo invece ha una struttura dell'argomentazione lineare: i problemi sono discussi uno di seguito all'altro.

APPENDICE D

QUESTIONARIO SOCIOMETRICO

PRIMA PARTE

Nel riquadro che segue riportiamo diversi approcci allo studio della fisica.

Approccio immaginativo-creativo: approccio guidato da un interesse verso le rappresentazioni, le immagini e le metafore utilizzate nella fisica e caratterizzato da un desiderio di forte rielaborazione personale dei contenuti.

Approccio critico riflessivo: approccio guidato da un interesse verso l'analisi profonda dei problemi e caratterizzato da un desiderio di approfondire ed entrare nei dettagli del pensiero.

Approccio storico-filosofico: approccio guidato da un interesse verso la storia e l'epistemologia della scienza e caratterizzato da un desiderio di approfondire l'evoluzione dei concetti o il contesto culturale in cui si sono sviluppati.

Approccio sperimentale e applicativo: approccio guidato da un interesse verso gli aspetti sperimentali e applicativi della scienza e caratterizzato da un desiderio di ritrovare nella realtà le basi e le implicazioni della conoscenza scientifica.

Approccio formale-matematico: approccio guidato da un interesse verso gli aspetti formali e rigorosi della scienza e caratterizzato da un desiderio di ancorare il ragionamento al linguaggio matematico.

1. Ti chiediamo di compilare la tabella, indicando al massimo tre compagni/e di classe che tu riconosci essere più affini a ciascun approccio.

Approccio immaginativo-creativo			
Approccio critico riflessivo			
Approccio storico-filosofico			
Approccio sperimentale e applicativo			
Approccio formale-matematico			

APPENDICE D

2. A quale approccio o approcci ti senti più vicino? (indicane al massimo 2)

SECONDA PARTE

3. Altre domande

a) Ci sono stati compagni/e di classe con cui ti sei confrontato per questioni legate alla fisica quantistica (studio, esercizi, argomenti non compresi, approfondimenti, ...)? Se sì, quali compagni/e?

b) In una attività di laboratorio di fisica quali compagni/e di classe vorresti in gruppo con te? (Indicane al massimo 3)

c) Con quali compagni/e di classe vorresti esercitarti nel risolvere esercizi/problemi? (Indicane al massimo 3)

d) In una discussione di fisica, quali compagni/e senti di solito più affini a te e chi invece senti più lontani? (Indicane al massimo 3 affini e 3 lontani)

Affini _____

Lontani _____

e) Nell'ipotesi di lanciarti in un'avventura musicale, con quali compagni/e di classe lo faresti? (Indicane al massimo 3)

f) Ci sono compagni/e di classe con cui passi o passeresti volentieri il tuo tempo libero? Se sì, quali?

APPENDICE E

COMPITO SU STERN E GERLACH

QUESITO – Gli esperimenti di Stern e Gerlach

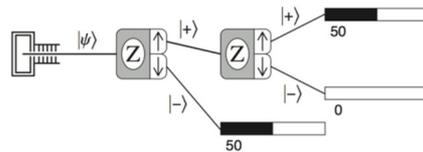


Fig. 1

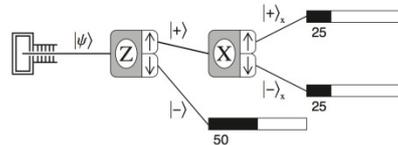


Fig. 2

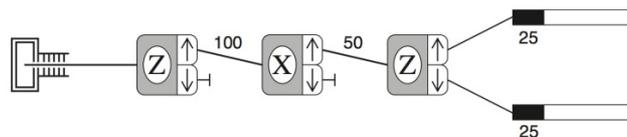


Fig.3

Dopo aver illustrato in modo conciso il significato degli esperimenti di Stern e Gerlach di figura 1 e 2, descrivi (anche formalmente) gli esiti dell'esperimento di figura 3.

Rispondi, sempre facendo riferimento alla figura 4, alle seguenti domande:

- Quali proprietà delle grandezze fisiche della fisica quantistica sono evidenziate dagli esperimenti di Stern e Gerlach?
- Come convinceresti una persona che non conosce la fisica quantistica che tali aspetti sono *sorprendenti* ma *comprensibili* alla luce di una nuova logica quantistica? In particolare, come utilizzeresti le metafore dei “Calzini di Erwin” e del “menù cinese” per illustrare il loro carattere sorprendente ma comprensibile?
- Facendo riferimento alla figura 4 mostra come la probabilità classica fallisca nel prevedere gli esiti dell'esperimento e come il concetto di ampiezza di probabilità risolva il problema.

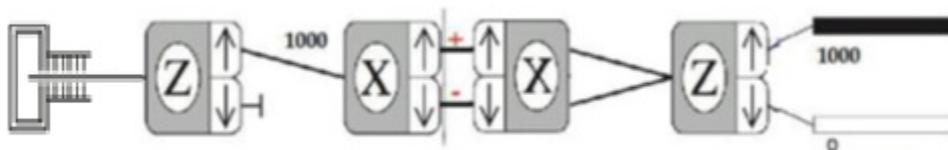


Fig. 4

APPENDICE E

APPENDICE F

ATTIVITA' FINALE

QUESITO 1 – L'indeterminazione quantistica

Nel libro di testo di U. Amaldi (ed. 2003) il principio di indeterminazione è presentato nel modo seguente:

Per “vedere” una particella dobbiamo fare in modo che essa diffonda la “luce” che incide su di essa in maniera che una parte della “luce” diffusa giunga ai nostri occhi o agli strumenti di rivelazione. Per fare ciò è necessario che la lunghezza d’onda della luce utilizzata sia al più delle dimensioni dell’oggetto che si vuole “vedere”.

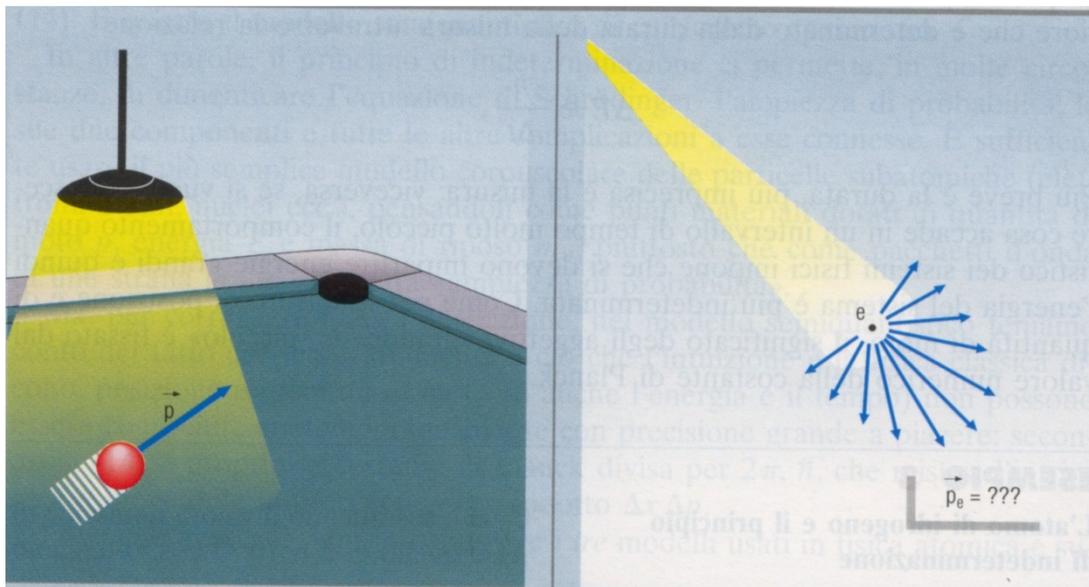


Fig 1 – L'indeterminazione

[...] ma i fotoni che compongono un fascio di luce di piccola lunghezza d’onda [...] sono molto energetici e interagiscono con le particelle materiali producendo l’effetto Compton.

In definitiva la particella che noi riusciamo a vedere, perché urtata da un fotone che poi è giunto fino al nostro rivelatore, ha subito un urto che l’ha accelerata in modo casuale. Dopo la misura possiamo quindi sapere qual è la sua posizione, ma nello stesso tempo abbiamo perduto ogni possibilità di determinare con precisione la quantità di moto.

E’ interessante notare che se si vuole diminuire l’indeterminazione Δx sulla posizione, utilizzando luce di lunghezza d’onda minore, aumenta l’energia dei fotoni incidenti e, di conseguenza, aumenta l’indeterminazione sulla quantità di moto della particella.

APPENDICE F

Commenta tale presentazione, rispondendo alle seguenti domande: *Quali punti oggi non sono più accettabili come scientificamente corretti quando si parla di indeterminazione quantistica? Quali critiche possono essere mosse a questa trattazione dell'indeterminazione? Quali esempi possono essere fatti per mostrare che la trattazione del testo non è adeguata?*

QUESITO 2 – L'esperimento Mach-Zehnder

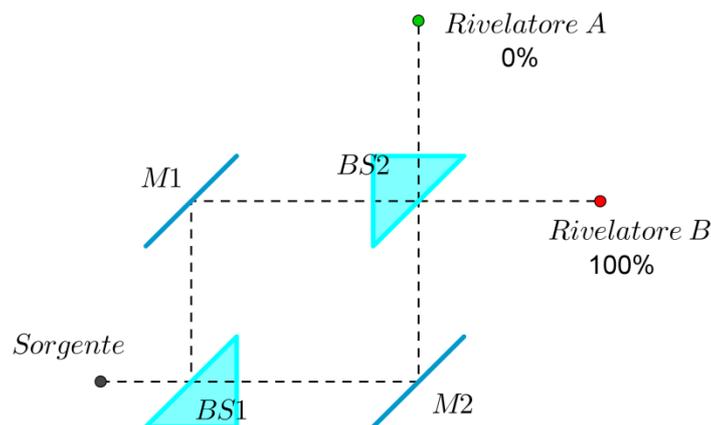


Fig. 2 L'esperimento Mach-Zehnder ordinario e i suoi risultati (i due bracci hanno uguale lunghezza)

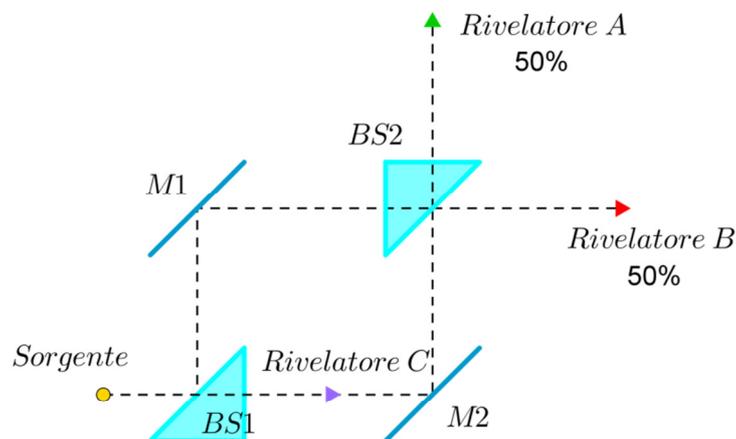


Fig. 3 Risultato dell' esperimento Mach-Zehnder con un rivelatore intermedio C (non distruttivo) che rivela il passaggio del fotone senza distruggerlo

Nelle figure 2 e 3 sono mostrati i risultati di due possibili esperimenti con un interferometro Mach-Zehnder. Il primo caso è quello ordinario, e si ha il 100% di probabilità di rivelare il fotone al rivelatore B. Nel secondo caso, con un rivelatore intermedio che segnala il passaggio del fotone (senza distruggerlo, e idealmente senza disturbarlo) si ha il 50% di probabilità di rivelare il fotone a ciascuno dei due rivelatori.

APPENDICE F

Dopo aver descritto e analizzato (anche formalmente) in modo conciso gli esperimenti Mach-Zehnder delle figure 2 e 3, rispondi alle seguenti domande:

- Quali proprietà dell'oggetto quantistico e del processo di misura su di esso sono evidenziate da tali esperimenti?
- Come convinceresti una persona che non conosce la fisica quantistica che tali aspetti sono *sorprendenti* ma *non incomprensibili*?

QUESITO 3 – Interferenza di elettroni da due fenditure con un elettrone alla volta

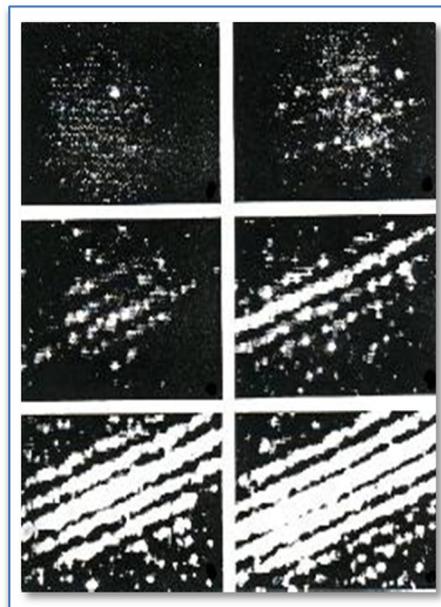


Fig.4 – Dall'esperimento di Merli, Missiroli, Pozzi, 1974-76

Facendo riferimento alla figura 4, si discutano i seguenti punti:

- Se modellizziamo l'oggetto quantistico come un'onda classica, che cosa ci aspetteremmo di vedere sullo schermo abbassando via via l'intensità del fascio di elettroni? Perché dunque tale modello non consente di spiegare la figura 4, ottenuta sperimentalmente?
- Se modellizziamo l'oggetto quantistico come una particella classica, il risultato appare in contraddizione con i principi della probabilità. Perché? Come si può risolvere il paradosso con il modello di Feynman? Che significato ha quindi, per un oggetto quantistico, la "somma (delle ampiezze) sui cammini"? Come si calcola la probabilità di rivelare un oggetto quantistico?
- Quali strumenti concettuali possono essere presi dall'esperimento Mach-Zehnder del quesito 2 per interpretare anche l'esperimento più bello della fisica?

APPENDICE F

APPENDICE G

PROTOCOLLO DI INTERVISTA

INTRODUZIONE:

In classe avete seguito un percorso articolato di fisica quantistica, in cui avete progressivamente osservato la discretizzazione di oggetti come l'atomo e la luce e di processi inerenti l'interazione radiazione-materia. Avete anche discusso la necessità di superare i concetti di onda e corpuscolo per passare al nuovo concetto quantistico di quantone. Per fare questo avete cercato immagini e metafore nuove per entrare nel merito di tale concetto e descriverne le proprietà emerse dagli esperimenti, reali o mentali, che avete studiato. Avete anche introdotto un formalismo minimale che ha permesso di interpretare i risultati di alcuni esperimenti. Vorrei che questa chiacchierata si concentrasse su alcuni di questi concetti e fenomeni (quantone, relazione di indeterminazione, principio di sovrapposizione, ...) e vorremmo che tu ricostruissi il modo in cui progressivamente ti sei costruita/o questi concetti e le loro proprietà.

A) DOMANDE SU CONCETTI DISCIPLINARI:

1. Pensando al percorso fatto quali sono i concetti che ti sembra di aver capito meglio e quali peggio? Che difficoltà hai avuto?
2. Sempre pensando al percorso fatto che parole utilizzeresti per descrivere l'oggetto quantistico ovvero il "Quantone"? Cosa lo differenzia maggiormente dall'oggetto classico?
3. Durante il percorso avete incontrato il principio di sovrapposizione in diversi esperimenti (ad esempio nell'esperimento più bello della fisica, nell'esperimento di Stern e Gerlach). Ci potresti dire, in ognuno di questi casi, che cosa si può dire del principio di sovrapposizione? In che cosa è analogo e in che cosa si differenzia dalla sovrapposizione classica delle onde?
4. La relazione di indeterminazione vi è stata proposta in vari modi: attraverso il microscopio a raggi gamma e il dibattito tra Heisenberg e Bohr, la relazione matematica tra posizione e velocità, il menù cinese e i calzini di Erwin. Quale è stato quello più utile per te per

APPENDICE G

comprendere il significato dell'indeterminazione quantistica? Perché? Cosa ti ha fatto capire sull'indeterminazione?

B) DOMANDE DI CARATTERE PIÙ GENERALE SUL PERCORSO:

5. Quali tra immagini, analogie, modelli, esperimenti, esercizi, formalizzazione matematica sono stato gli strumenti che ti hanno permesso di comprendere meglio gli aspetti della fisica quantistica?

6. Secondo te il percorso è stato stimolante per la classe e/o per innescare un confronto tra di voi? Perché?

7. Hai osservato delle differenze tra il modo in cui vi è stato proposto il percorso di fisica quantistica rispetto al modo in cui avete affrontato altri temi?

8. Avevi aspettative diverse sul percorso, per come vi era stato presentato all'inizio?

9. Rispetto all'interesse che solitamente hai per la fisica, il percorso che ti è stato proposto ha destato un interesse maggiore? Come mai?

C) DOMANDE SPECIFICHE SULLO STUDENTE:

10. Che tesina fai? Hai provato a inserire qualche fenomeno o concetto incontrato nel percorso di meccanica quantistica? Come si collega al tema della tesina?

11. Durante questi due mesi ti è capitato di collegare qualche concetto o fenomeno studiato in fisica quantistica con pensieri, immagini di un particolare filosofo, scrittore o artista? Altrimenti sapresti fare un collegamento ora?

12. Hai avuto delle motivazioni particolari nello studiare la fisica quantistica?

13. A che corso di laurea vorresti iscriverti? Cosa ti spinge a fare questa scelta? Rispetto a questa scelta il percorso di fisica quantistica ti ha permesso di approfondire qualche aspetto di quella materia, indirizzo?

APPENDICE H

GRIGLIA DI OSSERVAZIONE PER FOCAL STUDENTS

STUDENTE: _____ DATA: _____

ARGOMENTO DELLA LEZIONE:

ORA	Idea idiosincratica (parole chiave utilizzate)	Topic (concetto disciplinare specifico)	Tipo di interazione che ha stimolato l'intervento (l'insegnante, altri studenti, intervento spontaneo)	Livello di consapevolezza (uso di parole come "io penso ...", "secondo me", "questa è la mia visione")	Note

GRIGLIA DI OSSERVAZIONE DELLE DINAMICHE DI ORCHESTRAZIONE

Interazione insegnante-studenti-disciplina

- Ci sono studenti o gruppi di studenti a cui l'insegnante si rivolge con particolare attenzione? Che tipo di studenti sono (studenti "bravi", in difficoltà, creativi, "lavativi"...) ? Come si rivolge a loro e sulla base di quali indicatori si sostiene che ci sia un'attenzione particolare da parte dell'insegnante? (es. li guarda, li cita, pone loro più domande che a altri, usa un linguaggio "modellato" su di loro...).
- E' osservabile una diversificazione nei toni e nel linguaggio dell'insegnante quando si rivolge a studenti diversi? Se sì, quali indicatori possono essere individuati? [es. tipologia e contenuto delle domande; diverso codice linguistico (formale, epistemologico, sperimentale, concettuale,...); diverso tono (es. disponibilità, sfida, incoraggiamento, conferma, rimprovero, ironico...)].
- Esistono dinamiche e relazioni tra gli studenti che mettono in evidenza ruoli espliciti di alcuni studenti nelle specifiche lezioni di fisica? [ad esempio, "il/la bravo/a in fisica", il/la provocatore/provocatrice, l'accomodante, gli antagonisti, l'esperto di qualche cosa" (es. nel risolvere problemi, nel condurre esperimenti, nel trovare soluzioni creative, nell'usare le nuove tecnologie...)].
- L'insegnante svolge un ruolo attivo nell'attribuzione, riconoscimento e/o gestione dei ruoli degli studenti? Se sì, quali indicatori possono essere individuati per descrivere dinamiche di attribuzione, riconoscimento e/o gestione dei ruoli? (es.:
 - l'insegnante sostiene gli studenti per garantire che il loro lavoro sia svolto nel rispetto delle "norme" tipiche della disciplina e che diventi parte del lavoro collettivo;
 - l'insegnante stimola/aiuta gli studenti a rendere conto del loro lavoro rispetto al lavoro degli altri;
 - l'insegnante stimola/aiuta gli studenti a sostenere il loro punto di vista prendendo in considerazione quello degli altri.
 - ...)

APPENDICE I

DIARIO DI BORDO

CLASSE _____ DATA _____

AUTORE DELLA COMPILAZIONE DELLA SCHEDA _____

Argomento	
Tipo di attività (lezione, interrogazione, discussione, esercitazione, compito in classe...)	
Livello di interesse suscitato [da 1 (basso) a 5 (alto)] indicando, se possibile, gli aspetti che hanno suscitato maggior interesse e quelli che hanno suscitato minor interesse...	
Livello di difficoltà [da 1 (basso) a 5 (alto)] indicando, se possibile, gli aspetti che hanno creato maggiori difficoltà e, eventualmente, quelli apparsi più semplici...	
Tipo di partecipazione della classe (chi è intervenuto, chi si è mostrato perplesso...)	
Eventuali note (episodi inaspettati, aspetti curiosi,...)	