

Alma Mater Studiorum · Università di Bologna

Scuola di Scienze
Dipartimento di Fisica e Astronomia
Corso di Laurea Magistrale in Fisica

LE METAFORE
NELL'INSEGNAMENTO/APPRENDIMENTO DELLA
FISICA QUANTISTICA:
UNA SPERIMENTAZIONE CON DOCENTI DI LICEO

Relatore:
Prof.ssa Olivia Levrini

Presentata da:
Francesco Fabbri

Correlatore:
Prof.ssa Laura Branchetti

Anno Accademico 2016/2017

ABSTRACT

Oggetto di questa tesi è studiare come la metafora possa essere uno strumento didattico da utilizzare in classi di scuola secondaria di II grado, al fine di favorire l'appropriazione di concetti nuovi e astratti quali quelli che stanno alla base della fisica quantistica.

Per fare questo sono state scelte alcune metafore note nella letteratura divulgativa e didattica della fisica quantistica e sono state progettate e validate attività didattiche che le valorizzassero come strumento conoscitivo.

Il lavoro è stato articolato in tre fasi: una prima fase di validazione, da parte di un gruppo di esperti, delle metafore selezionate al fine di capire quali fossero le loro potenzialità concettuali e i loro limiti; una seconda fase di validazione delle attività con gli studenti del corso di Storia della Fisica della Laurea Magistrale in Fisica; infine, la sperimentazione delle attività con un gruppo di insegnanti di Liceo iscritti ad un corso di formazione PLS sulla fisica quantistica.

I dati raccolti e analizzati nella tesi riguardano: audio-registrazioni di interviste individuali semi-strutturate a 6 esperti; risposte a questionari e compilazione di griglie di analisi da parte degli studenti del corso di Storia della Fisica e dei docenti del corso PLS; audio-registrazioni di lavori di gruppi.

Lo studio mostra che l'utilizzo di metafore per illustrare fenomeni fisici non solo favorisce un consolidamento delle conoscenze e del formalismo, ma innesca anche una dinamica di gruppo molto vivace e creativa, soprattutto quando questa si orienta a discutere i limiti della metafora e la non corrispondenza tra i due sistemi confrontati attraverso la metafora.

INDICE

INTRODUZIONE.....	7
CAPITOLO 1 LA METAFORA IN FISICA, NELLA SUA COMUNICAZIONE E NEL SUO INSEGNAMENTO.....	9
1.1 LA METAFORA NELLA STORIA DELLA SCIENZA.....	12
1.1.1 RETORICA ED ARTE.....	12
1.1.2 LA METAFORA E LA FISICA.....	13
1.2 LA METAFORA NELLA COMUNICAZIONE E NELLA DIDATTICA DELLA FISICA. .	27
CAPITOLO 2: LA SPERIMENTAZIONE: CONTESTO, OBIETTIVI E METODOLOGIA DI LAVORO.....	33
2.1 LE INDICAZIONI NAZIONALI E LE PROPOSTE PER LA DIDATTICA.....	35
2.1.1 LA PROPOSTA DI BOLOGNA.....	38
2.2 PROGETTO DI TESI E PIANO DI LAVORO.....	42
2.3 STRUMENTI.....	43
2.3.1 LE METAFORE.....	43
2.3.2 I PROTOCOLLI DI INTERVISTA.....	44
2.3.3 ATTIVITA' PROPOSTA AGLI INSEGNANTI.....	45
2.4 I CONTESTI DELLE SPERIMENTAZIONI DELLE ATTIVITA' E I GRUPPI DI INSEGNANTI.....	46
2.4.1 IL PIANO LAUREE SCIENTIFICHE E IL CORSO DI FORMAZIONE DEGLI INSEGNANTI.....	46
2.4.2 DOMANDE DI RICERCA E DATI RACCOLTI.....	50
CAPITOLO 3: ANALISI DEI DATI RACCOLTI E RISULTATI DELLA SPERIMENTAZIONE	53
3.1 VALIDAZIONE DELLE METAFORE DA PARTE DI ESPERTI.....	55
3.2 VALIDAZIONE DELL'ATTIVITA' DA PARTE DI STUDENTI DI LAUREA MAGISTRALE.....	69
3.2.1 ANALISI METAFORA SULL'EFFETTO FOTO ELETTRICO.....	70
3.2.2 ANALISI METAFORA SULLA FUNZIONE D'ONDA.....	72
3.3 ANALISI DELL'ATTIVITA' DEGLI INSEGNANTI.....	73
3.3.1 RISULTATI DELLE ATTIVITA' 1 E 2: APPROPRIAZIONE DELLO STRUMENTO	

METAFORA ATTRAVERSO L'ANALISI DI METAFORE "SEMPLICI"	74
3.3.2 ATTIVITA' 3: COMPRENDERE E CONOSCERE IL FORMALISMO.....	81
3.3.3 ATTIVITA' 4: IL TRASFERIMENTO DI CONOSCENZE.....	85
CONCLUSIONI.....	91
BIBLIOGRAFIA.....	93
APPENDICE A.....	99
APPENDICE B.....	105
APPENDICE C.....	107
APPENDICE D.....	109
APPENDICE E.....	115

INTRODUZIONE

Nella spy-story 'Il sipario strappato' di A. Hitchcock, si assiste a una scena interessante: la discussione tra due scienziati. Non è una vera e propria discussione: infatti i due scienziati 'parlano' tra di loro solamente scrivendo uno alla volta equazioni su una lavagna e correggendosi a vicenda. Senza dire una parola. L'idea che la fisica sia una conoscenza afasica contenuta interamente in simboli matematici, come spiega Lévy-Lebond, è un'idea sbagliata. La fisica, come tutta la conoscenza scientifica, si fonda anche sulle parole, non può fare a meno di esse, in ogni ambito della sua esistenza: dalla sua costruzione alla comunicazione tra scienziati, alla divulgazione fino nell'ambito dell'insegnamento. Proprio in questo ultimo contesto, trovare nuovi linguaggi che accompagnino e sostengano l'assimilazione del pensiero logico-formale nello studente è uno dei tanti target obiettivi discusso ora nella ricerca didattica.

Con l'introduzione voluta dalla riforma Gelmini della fisica quantistica nei curricula delle classi V liceo sono sorte due principali necessità: aggiornare e formare il corpo insegnante riguardo i nuovi contenuti e creare nuovi materiali didattici, intelligenti e creativi, che possano permettere agli studenti di apprendere i concetti base di questa nuova fisica senza rimanere sopraffatti dal complesso formalismo di questa teoria.

In questo contesto nasce a Bologna un gruppo di lavoro in Didattica della Fisica formato da ricercatori del DIFA, docenti di scuola secondaria, dottorandi e laureandi, che da anni propone attività, corsi di formazione, seminari e nuovi approcci per far fronte a questa importante sfida didattica. Al giorno d'oggi sono già state effettuate numerose sperimentazioni sia su docenti in formazione iniziale, sia su studenti della laurea magistrale in fisica, sia in classi di V liceo.

La presente tesi nasce da alcuni interrogativi rimasti irrisolti nel corso di una precedente sperimentazione di un percorso per una V liceo: quali registri linguistici sono più appropriati per insegnare concetti di fisica quantistica? In particolare, uno strumento come la metafora può essere utilizzato in un contesto didattico? Con la presente, si cerca di esplorare le potenzialità didattiche di questo strumento.

La tesi si articola in tre capitoli.

Nel capitolo 1 viene illustrato il tema della metafora all'interno del discorso scientifico. Per fare questo si è voluto iniziare il capitolo con una ricostruzione storica, che fa riferimento ai momenti salienti della storia della scienza e sottolinea come la metafora abbia rivestito diversi ruoli all'interno del discorso scientifico, dai greci antichi ai giorni nostri: da mero strumento retorico a indovinello esoterico per celare la conoscenza ai non adepti, da agente inquinante del linguaggio scientifico ad importante strumento di ricerca nello scoprire e formulare nuove idee. Dopo la panoramica storica si riportano, attraverso le numerose ricerche di filosofi, linguisti e ricercatori, le principali caratteristiche che rendono questa figura retorica così interessante nel campo linguistico cognitivo e dell'apprendimento: le azioni di sostituzione ed interazione che permettono il passaggio di costrutti logici tra due differenti sistemi, la capacità di visualizzare e dare immagini al pensiero astratto, la carica comunicativa. Infine si riportano i principali risultati della ricerca didattica nell'utilizzo della metafora, in tutti gli ambiti del sapere, nell'insegnamento.

Il capitolo 2 si apre con una panoramica sulle Indicazioni Nazionali e su quali siano i cambiamenti a livello curricolare dovuti all'introduzione della fisica del '900 nelle scuole superiori. Viene illustrato sinteticamente il lavoro che viene svolto dal gruppo di lavoro di Bologna e quali idee e percorsi si sono sviluppati per venire incontro alle nuove esigenze didattiche. Seguono l'introduzione al presente lavoro di tesi, le domande di ricerca, la descrizione del contesto delle sperimentazioni effettuate e la presentazione degli strumenti con i quali si sono raccolti i dati.

Nel capitolo 3 infine vengono analizzate le attività svolte durante la sperimentazione: l'analisi e la validazione delle metafore da parte di esperti; l'attività svolta dagli studenti del corso di Storia della Fisica, atta a validare il materiale didattico preparato; l'attività svolta durante un incontro del PLS dai docenti partecipanti, vero e proprio nucleo della sperimentazione.

CAPITOLO 1

La metafora in fisica, nella sua comunicazione e
nel suo insegnamento

La metafora [dal lat. *metaphōra*, gr. *μεταφορά*, propr. «trasferimento», der. Di *μεταφέρω* «trasferire»] è tecnicamente definita come *tropo* basato su una similitudine sottintesa, ossia su un rapporto analogico, per cui un vocabolo o una locuzione sono usati per esprimere un concetto diverso da quello che normalmente esprimono (Treccani).

In linguistica, con il termine *tropo* si intende “figura semantica o di significato per cui una espressione del suo contenuto originario viene ‘diretta’ o ‘deviata’ a rivestire un altro contenuto.”(Treccani).

La metafora, anche all’interno del discorso scientifico, ha diversi modi d’uso a seconda dell’obiettivo comunicativo e può essere caratterizzata, a seconda del contesto, dal riferimento a immagini, dal ricorso a termini che hanno un significato noto in un certo contesto, dalla costruzione di un’analogia strutturale tra mondi semantici apparentemente molto diversi.

Secondo Polidoro, ad esempio, “La metafora mette in evidenza determinati aspetti del concetto metaforizzato (quelli che manifestano una somiglianza con l’altro concetto), mentre trascura o nasconde gli altri”; secondo Lakoff (1998), è il modo in cui concettualizziamo un dominio mentale nei termini di un altro: è una “mappatura” da un dominio di partenza a un dominio di arrivo.

Nella storia della cultura in generale la metafora ha rivestito inoltre una molteplicità di scopi: collegare due concetti appartenenti a differenti realtà; introdurre un concetto nuovo per cui non esiste già un termine linguistico; dilettere e creare nessi inusuali e restituire, attraverso la lingua, sensazioni estetiche.

Nelle culture di tutto il mondo e in scritti ed opere artistiche di epoche differenti, dall’Iliade e da I Ching passando per la Commedia di Dante e nelle Note del Guanciale, la metafora è stato uno strumento cruciale nella comunicazione e nello sviluppo artistico, rivestendo a volte un ruolo indispensabile come nel capolavoro della letteratura nordica medievale, l’Edda, fino ai più recenti Haiku giapponesi.

Anche il linguaggio comune è permeato dall’utilizzo di metafore, a volte inconsapevolmente, come mostrato dall’esistenza di un numero elevato di immagini e vocaboli figurati presenti in tutte le lingue del mondo. Questa capacità di "esprimersi per immagini" – come Platone osservava già nel Fedro – è una caratteristica propria dell’uomo, tanto da indurre R. Dawkins ad ipotizzare che proprio tale capacità sia alla base dello sviluppo intellettuale del genere umano (Dawkins, 2001).

1.1 LA METAFORA NELLA STORIA DELLA SCIENZA

In questo paragrafo verranno riassunti alcuni importanti eventi storici riguardanti la metafora nella storia della scienza. Partendo dalla Grecia classica e arrivando al XX secolo, attraverso le parole dei filosofi e degli scienziati stessi, si cerca di ricostruire possibili ruoli che sono stati attribuiti a questa figura retorica, da strumento del 'parlare bene' ed ornamento artistico, da linguaggio criptico e ermetico a strumento di conoscenza, anche scientifica. Il conoscere come si è evoluta ed il perché è stata il centro di un grande dibattito all'interno della comunità scientifica fino ai giorni nostri è necessario per comprendere il lavoro che questa tesi si propone di fare

1.1.1 RETORICA ED ARTE

La metafora ha da sempre attirato l'interesse di filosofi, epistemologi, letterati e scienziati. Una delle ragioni risiede senz'altro nella sua duplice natura. Da un lato, pensata come struttura retorica atta a confondere e a dare una conoscenza approssimata, è stata considerata come il "male" del linguaggio ma da un'altra prospettiva – citando Aristotele – è stata apprezzata e usata come “segno di ingegno, perché fare delle buone metafore significa vedere ciò che è simile”.

Nell'antichità greca la metafora compare ad esempio come strumento indispensabile all'interno della *retorica* classica, definita come l'arte del parlare e dello scrivere in modo efficace: la parola, strumento per eccellenza di comunicazione, era utilizzata per portare l'ascoltatore a condividere scelte politiche, decisioni con ricadute sociali o religiose.

Come sottolinea Joli, è in questo contesto che si sviluppa il pensiero di Aristotele, il primo a cercare di definire tecnicamente la metafora nelle sue opere, *Poetica* e *Retorica*, elevandola da figura di puro ornamento a forma di conoscenza. Il verbo usato dal filosofo è *theorein*, che vale per scorgere, investigare, paragonare, giudicare.

Il filosofo greco continua sottolineando la genialità propria di chi fa un uso corretto di questo strumento dichiarando "la cosa più grande è essere inclini alle metafore" (Aristotele, *Poet.* 1495A5-6).

Il punto fondamentale per Aristotele, sul quale lui stesso insiste con convinzione, è che le metafore mettono la cosa sotto gli occhi (*tō poieîn tò prāgma prò ommátôn*), "la metafora non è solo un trasferimento, ma è un trasferimento che è una evidenza immediata - non consueta, inattesa - grazie alla quale si vedono le cose mentre agiscono, le cose in atto".

A differenza di altri insegnamenti aristotelici però, nel corso dei secoli a venire, filosofia e retorica presero due strade differenti e di conseguenza il rapporto della retorica con la verità e con la logica diventerà problematico.

Oltre ad Aristotele possono essere citati altri grandi filosofi greci quali Empedocle e Platone, per i quali la metafora non è un procedimento logico ma uno scatto intuitivo che rivela la natura delle cose attraverso immagini. Platone infatti collega le idee di immagine e metafora al concetto più strutturato di 'modello' (*paradeigmata*) nell'identificazione di somiglianze o differenze fra due soggetti. Per Platone metafora e modelli hanno puramente valore euristico.

Oltre al ruolo "pratico" che la metafora svolgeva nel mondo greco-latino, nell'evoluzione della cultura, a questa figura retorica è spesso attribuito un valore artistico, nel senso che le è attribuito il compito di abbellire ed arricchire il discorso in cui è calata, di evocare con potenza figure, pensieri o sensazioni nel lettore.

1.1.2 LA METAFORA E LA FISICA

L'accostamento tra metafora e fisica può apparire dissonante, una contraddizione di termini, perché, tenendo conto della premessa, pare voler trattare la fisica in modo analogo alla retorica, alla letteratura o alla produzione artistica. Una proprietà che nella concezione comune demarca il confine tra la scienza e altre forme di conoscenza è proprio il ruolo che il linguaggio gioca nei differenti contesti: mentre, ad esempio, la letteratura si fonda inestricabilmente sul terreno linguistico della lingua naturale, per la scienza, costruita sulla matematica e le sue strutture logiche, il linguaggio naturale è spesso considerato solo un veicolo, un codice per comunicare e trasmettere in modo intelligibile le sue scoperte sulla natura.

Vedremo nel seguito del capitolo, come è evoluta nel tempo la considerazione della metafora (o dell'analogia) all'interno del pensiero scientifico occidentale attraverso le idee e le critiche ad essa rivolte.

LE CORRENTI ESOTERICHE

L'accezione di metafora come strumento per confondere e dare una conoscenza approssimata è stata centrale in alcune opere antiche: metafore e simboli inespliciti sono stati, ad esempio, alla base dei sistemi esoterici greco-egizi nati dall'intreccio culturale tipico dell'ellenismo, all'interno dei quali, a un occhio moderno, si inseriva la produzione scientifica del tempo. Ne sono esempi gli scritti di carattere religioso, filosofico e scientifico di Ermete Trismegisto (personaggio leggendario di età pre-classica), caratterizzati da una difficile comprensione per i non iniziati.

La riscoperta di questo testo, e la sua successiva traduzione, sarà principale fonte di ispirazione per la formulazione del pensiero neo-platonico del '500 e contribuirà allo sviluppo scientifico di quell'epoca.

La corrente che però avrà più influenza sullo sviluppo del pensiero prescientifico occidentale e che ci permette di verificare come è cambiato l'atteggiamento dello scienziato nei confronti della metafora è l'Alchimia (Ortony, 1993, p. 447).

Questa corrente esoterica, che nasce dalla fusione tra la chimica egizia e la filosofia greca (dalla scuola di Aristotele e Platone) attorno al 300 a.C. , si estende fino alla Persia nel 500 d.C. e che arriva in contatto con la cultura europea al termine della prima crociata (1100 d.C.), era interessata alla trasmutazione dei metalli (specialmente nella trasmutazione di metalli comuni in oro), processo che veniva indagato parallelamente alla ricerca della pietra filosofale, ipotetico elemento catalizzante per questo tipo di trasformazioni.

Per tale ragione erano esperti nel creare nuove e complesse analogie e metafore da insiemi di corrispondenze definite (Cavendish,1967, p. 26): processi chimici e affinità tra materiali venivano comparati alla sfera matrimoniale tra uomo e donna; altre metafore venivano prese dal regno animale o dai pianeti, dai sette giorni della creazione o dalle piante, tenendo sempre come piano comune la metafora (o analogia) microcosmo-macrocosmo nella quale l'uomo (micro) era legato al mondo naturale (macro) (Eco, 1990).

Vickers (1984) sottolinea come gli alchimisti facessero uso di similitudini tra i simboli e i loro riferimenti, influenzati dalle tradizioni occulta per le quali le parole (o i simboli) non si riferiscono semplicemente agli oggetti, ma sono l'essenza stessa dell'oggetto preso in questione.

In questo variopinto contesto emerge quanto la metafora per secoli sia stata alla base dell'indagine della natura fino al '600, ma in questi casi essa svolgeva più un ruolo di occultare che non di diffondere la conoscenza prodotta (Ortony, 1993, p. 462).

IL '600 ED IL DOPO RIVOLUZIONE

Con l'avvento della rivoluzione scientifica e i cambiamenti che subirono sia gli aspetti pratici che teorici delle ricerche scientifiche, l'organizzazione della conoscenza della natura subì un profondo rinnovamento. In questo processo di rinnovamento, l'alchimia fu oggetto di critica e rifiuto da parte della comunità scientifica, che portarono ad un lento declino della corrente stessa.

Ciò che più conta però è osservare che questo periodo, che va dal 1570 al 1640, è importantissimo per la discussione riguardo al ruolo delle analogie e delle similitudini nella produzione di sapere

scientifico: con l'avvento della rivoluzione scientifica infatti c'è una crisi di fiducia verso strumenti quali metafore e analogie e si sente la necessità di determinare una netta distinzione tra ciò che è scienza e ciò che è magia, tra la retorica e il dimostrabile.

A reazioni di esplicita denuncia e rifiuto, si alternano però tentativi interessanti di caratterizzare l'analogia come meccanismo importante per l'indagine scientifica. Vediamo alcuni esempi del primo e del secondo tipo.

Bacone e Van Helmont, famoso chimico e medico fiammingo, criticano il sistema analogico alchemico trovando inconsistenti le metafore micro-macro cosmo come la mappatura delle stelle nei corpi animali o vegetali quanto le analogie sulla composizione dei corpi stessi. Van Helmont stesso dichiarò perfino: "Io ho odiato discorsi metaforici all'interno di questioni importanti" (Van Helmont, 1698).

Andreas Libavius, medico e chimico tedesco, invece critica la tendenza degli alchimisti a "mettere analogie dentro ad analogie", allontanandosi così dalla verità:

"[l'alchimia e la cabala]... presentano le cose non per come sono, ma per come sono confrontate con altre cose in maniera (indeterminatamente) superficiale. Perciò non possiamo sapere di cosa è fatto un oggetto." (citato in *Occult and scientific mentalities in the Renaissance*, Vicker, 1984)

Bacone, Hobbes e Locke accusavano la metafora di introdurre nella scienza significati non letterali e quindi inappropriati, con il rischio di inquinare i valori precisi e stabili che la scienza ricercava nel profondo dei fenomeni. Come illustra Bacon nel *De Augmentis*, si rafforzò l'idea che si dovesse proseguire cercando e costruendo simboli diversi da quelli alfabetici per descrivere la natura, per mettere in evidenza il significato ed il contenuto dei concetti scientifici senza la mediazione della parola.

Interessante è il tentativo di Wilkins e Dalgarno che, ispirati a Bacon cercarono di creare una lingua "naturale" di simboli, che contenessero la definizione e la natura delle cose; il lavoro fatto fu enorme, ma non portò alla lingua universale cercata, anche se il metodo di classificazione utilizzato venne ripreso in diversi ambiti della scienza (zoologia, cristallografia) per nominare o indicare nuove strutture o modelli.

Altri invece combatterono questa battaglia cercando di definire cosa significasse costruire un'analogia. Keplero e Galileo ad esempio non disprezzavano il valore euristico della metafora, né la interrelazione o principio di causalità che l'analogia poteva proporre in una argomentazione scientifica.

Galileo propose, tra le altre, un' analogia tra un corpo che cade da una torre e uno che cade da dall'albero di una nave in movimento per smontare l'argomento che il movimento della Terra si sarebbe dovuto rivelare attraverso la deviazione dalla verticale nella caduta di grave; Keplero indagò l'azione a distanza con un'analogia tra la luce e una forza che ipotizza essere emessa da sole: come la luce, questa forza sembra attraversare nascosta lo spazio e produrre un effetto su un oggetto *target* e, sempre come la luce, la sua forza diminuisce con la distanza dalla sorgente (Vikers, 1984). Keplero non sostenne mai di evitare l'uso delle analogie, anzi egli stesso ne creava frequentemente, come si evince dalle numerose corrispondenza con i colleghi:

"Amo moltissimo le analogie, mie maestre fedelissime, a conoscenza di tutti gli arcani della natura...e se ne dovrebbe fare un buon uso nella geometria...dove queste presentano agli occhi l'intera essenza della domanda" (Keplero, citato in Vikers, 1984).

Criticava però il modo che gli alchimisti avevano di creare ed utilizzare le analogie: le metafore dovevano basarsi su quantità fisiche reali e misurabili e non su simboli o segni che le rappresentano, come astri e metalli o pianeti per descrivere gli esseri viventi e dovevano essere una strada per arrivare ad una verità, non la verità stessa (Ortony, 1993, p. 474). Questo nuovo modo di vedere la metafora crea una netta distinzione tra l'analogia dell'alchimia e quella di Keplero o di Galileo.

Si genera così un taglio netto riguardo il modo di utilizzare l'analogia: da identità a strumento di ricerca.

Per vedere come si è articolato il ruolo della metafora nella scienza, e quali tipologie di problemi e di soluzioni ha storicamente offerto, prendiamo ad esempio altri due grandi scienziati europei: R. Boyle (1627-1691) e S. Carnot (1796-1832).

Boyle, nel suo lavoro *Sceptical Chymist* critica la divisione aristotelica della materia e ci dona uno dei primi libri in cui la logica scientifica viene applicata allo studio della chimica. È anche un capace creatore di analogie.

Nel suo libro *On the great effects of even languid and unheeded local motion*, studiando il moto di tante piccolissime particelle e le conseguenze macroscopiche di tali, ci fornisce una chiara visione dell'uso dell'analogia e della metafora nell'argomentazione scientifica dell'epoca.

Secondo Ortony (1993, p. 456), gli esempi che Boyle fa hanno come principale funzione quella di dare un esempio di un principio che può essere applicato a differenti contesti. In questo testo, lo scienziato fa un'analogia tra il moto di particelle piccolissime e il moto delle particelle di polvere nell'aria o il moto delle formiche che spostano delle uova: non enfatizza che le particelle *sono come* polvere (leggera, grigia...) o uova (ovali, bianche...), ma una rapida successione di esempi e

metafore per dimostrare il principio centrale. Se tutti questi fenomeni (le analogie che Boyle usa) avvengono effettivamente, allora anche il modello che le racchiude deve essere plausibile.

Le metafore di Boyle quindi creano una corrispondenza tra diversi sistemi fisici e mostrano somiglianze, ma non entrano nello specifico del fenomeno indagato.

Un passo in più sull'utilizzo dell'analogia ci è presentato da Carnot nell'ambito della termodinamica. Nel suo lavoro sulle macchine termiche e l'equivalenza tra calore e lavoro, lo scienziato francese presenta l'analogia tra calore (o meglio, calorico) e acqua, che già fin dall'antichità era il modello dominante per i fenomeni riguardanti calore, in un modo del tutto nuovo per l'epoca. La novità consiste nell'indagare l'analogia con nuove domande, trasportando ed applicando strutture causali dal dominio del fluido/acqua a quello del calore e viceversa. Carnot riveste questa analogia di una nuova importanza: ha generato nuove ipotesi e ha permesso il trasferimento dal dominio del liquido a quello del calore di vere e proprie strutture logiche.

Nel suo lavoro del 1824 (*Reflexions sur la puissance motrice du feu*) ad esempio, esplicita l'analogia tra quelle grandezze che lui stesso chiama "potere" o "energia motiva" del calore e quello dell'acqua, vedendo che, essendo questo potere limitato per l'acqua che cade da una determinata altezza, è limitato anche per processi di trasferimento del calore. Di seguito crea una corrispondenza tra differenza di temperatura di due sorgenti e il dislivello di una cascata, trovando che l'energia prodotta da un sistema è legata al salto della sostanza (acqua o calorico) ed è proporzionale al salto stesso (ad una differenza di altezza per una cascata come alla differenza di temperatura per il calore).

Nonostante evidenti successi delle metafore, ci furono ulteriori tentativi di liberare la scienza dall'uso delle metafore da parte degli empirocriticisti e da esponenti del positivismo dell'800. Tuttavia, la metafora ha continuato a svolgere un ruolo fondamentale, come mostra il lavoro di Maxwell.

MAXWELL E L'ANALOGIA

Quando si parla di metafore e di analogie, non si può non citare l'opera di Maxwell, per il continuo rimando ad esse come strumento di lavoro e di costruzione di nuova fisica.

Come ricostruisce Turner, Maxwell si interessò di questioni prettamente filosofiche e di metodo, pensieri e riflessioni nate dai nuovi modelli che egli stesso aveva ipotizzato. Uno degli argomenti più interessanti e importanti per lo stesso fisico inglese riguarda quelle che lui definisce *analogie fisiche* (Turner, 1955, pp. 226-238).

All'inizio dell'800 la meccanica era il campo più sviluppato e completo della fisica e tutta la ricerca e lo studio degli altri settori quali ottica, termodinamica e il nuovo elettromagnetismo traevano dalla meccanica esempi e riferimenti formali ed epistemologici.

Quindi, secondo Turner, un sistematico confronto con la meccanica rendeva l'introduzione di nuove idee e concetti più semplice perché non ci si doveva relazionare con l'ignoto.

L'analogia meccanica era così esplicitamente elevata a metodo di indagine teorico e veicolo di informazioni dal campo della meccanica a tutti gli altri settori.

Maxwell, nel suo lavoro e nei suoi scritti, quando fa riferimento all'analogia fisica o all'analogia formale, giustifica spesso il loro utilizzo come *strumento temporaneo di ricerca*, mostrando un atteggiamento prudente e consapevole delle possibili critiche che possono essere rivolte all'utilizzo di questo strumento ritenuto da molti "retorico".

In una lettera indirizzata alla *British Association*, Maxwell descrive l'analogia fisica (che chiama anche illustrazione scientifica o metafora scientifica) come una somiglianza matematica tra due fenomeni fisici appartenenti a diversi rami della fisica:

"...è un metodo che aiuta la mente ad afferrare alcuni concetti o leggi in un ambito della scienza attraverso un concetto o una legge di un differente ramo della scienza, e che guida la mente ad estrapolare quello schema matematico che è comune alla stessa idea nelle due scienze".

Secondo Maxwell quindi, l'analogia fisica è il mezzo che sta tra la pura formula matematica e l'ipotesi fisica. Questo viene specificato fin dal suo primo lavoro, *On Faraday's Lines of Force*, del 1855. In questo caso, l'utilizzo dell'analogia è necessario in quanto lo stesso scienziato si accorge che la matematica utilizzata per indagare i fenomeni elettrici è estremamente complessa ed ostacola il progresso:

"dobbiamo scoprire nuovi modi di indagare che permettano alla mente di creare un chiaro disegno fisico ad ogni passo, senza essere legati alla teoria dalla quale prendiamo a prestito questo disegno...".

Vediamo alcuni esempi significativi di uso dell'analogia da parte di Maxwell.

Per indagare i fenomeni luminosi, il fisico propone un' analogia tra la luce e il moto ondulatorio in un solido elastico. Questa prima intuizione gli permette di individuare alcune equazioni matematiche, ma non è ancora sufficiente a orientare la costruzione di un formalismo adeguato per spiegare i fenomeni elettromagnetici nella loro totalità.

Lo studio verrà ripreso nel secondo lavoro, *On Physical Line of Force* (1861), dove verrà giustificata l'idea delle linee di forza ipotizzata da Faraday attraverso un'analogia tra un campo

elettrico stazionario e un fluido incompressibile che si muove attraverso un materiale poroso che genera un attrito proporzionale alla velocità del fluido stesso.

Questa analogia nel lavoro di Maxwell ha una grande importanza storica in quanto indica chiaramente che l'elettrostatica può essere formalizzata matematicamente non solo in termini di leggi di Coulomb, ma anche in termini di campo di Faraday: descrivendo le linee del campo elettrico come tubi di fluido in movimento, arriva a notare che entrambi gli oggetti (tubi di fluido e linee di forza) soddisfano le stesse equazioni differenziali. L'analogia riveste quindi un ruolo fondamentale sia nella scoperta sia nella fase di giustificazione e spiegazione.

Un altro aspetto innovativo e rilevante nell'uso delle analogie da parte di Maxwell consiste nella possibilità che esse forniscono di generare un nuovo linguaggio. Quando Maxwell scrisse *On Faraday lines of Force* il linguaggio utilizzato era ancora troppo vago e impreciso per le idee che lo scienziato voleva descrivere, situazione di incapacità che lui stesso definisce *tyranny of words*. L'analogia con il fluido era avvincente ma, essendo incompleta, era anche pericolosa e ingannevole. Bisognava allora trovare un nuovo linguaggio, nuove terminologie che soddisfacessero appieno il passaggio di concetti da un dominio all'altro dell'analogia, lacuna che venne colmata grazie allo sviluppo (contemporaneo alla teoria elettromagnetica) della matematica dei campi vettoriali.

Oltre agli esempi pratici sull'utilizzo dell'analogia presenti all'interno dei lavori sopra citati, Maxwell, sempre nella lettera alla *British Association*, dichiara che:

" [l'analogia] non è solamente un prodotto della scienza, ma è anche capace di generare scienza a sua volta."

Egli evidenzia quindi due vie attraverso la quale l'analogia può creare scienza.

In primo luogo, l'analogia genera nuova scienza quando guida il trasferimento di soluzioni di un problema matematico da un ramo ad un altro della fisica ed è questo, secondo Turner, che sta alla base di molte scoperte in elettromagnetismo.

Ad esempio, l'analogia di Kelvin tra la conduzione del calore e l'elettricità ha permesso di indagare i fenomeni elettrici con l'analisi di Fourier; l'analogia tra il moto di un fluido ed il campo elettrico ha permesso di riformulare un problema di distribuzione sorgenti e pozzi per il fluido in un problema di distribuzione di cariche; l'intuizione di Maxwell, in *'A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field'*, ha permesso l'applicazione delle equazioni del moto di Lagrange ai circuiti elettrici.

In secondo luogo, quando l'analogia è incompleta, il tentativo di renderla più esauriente può indicare nuove strade, teoriche e sperimentali, di ricerca. Questa caratteristica è più profonda, e lo stesso Maxwell si appella ad essa chiamandola 'science-forming'. Di più, l'analogia poteva diventare a volte una vera e propria ipotesi fisica come nel caso dello studio che porterà alla teoria

cinetica dei gas, iniziato con un'analogia di base tra il comportamento di un gas e un insieme di palline sferiche.

IL '900 E LA MECCANICA QUANTISTICA

Il 900 è stato un secolo decisamente rilevante e al tempo stesso anomalo per la scienza in generale, e per la fisica in particolare. Teatro di sorprendenti rivoluzioni e di brillanti intuizioni che hanno dato vita a teorie e scenari del tutto inimmaginabili, è stato anche caratterizzato da profonde innovazioni a livello metodologico e dall'emergere di questioni epistemiche che sono diventate oggetti di dibattiti sia all'interno che all'esterno della comunità scientifica.

Il clima della ricerca scientifica nei primi decenni del ventesimo secolo era caratterizzato da una sempre più solida consapevolezza del crollo dei pilastri concettuali della fisica classica, rappresentata dalla meccanica di Newton e dall'elettrodinamica di Maxwell.

La teoria della relatività di Einstein e le prime ipotesi quantistiche stavano demolendo dalle fondamenta l'insieme delle conoscenze scientifiche dell'epoca tanto da spingere gli scienziati a riorganizzare e rifondare la conoscenza.

Il tema del linguaggio nella fisica del secolo scorso è un tema molto profondo. Come scrive Lévy-Leblond infatti, nessuna nuova idea nasce già 'adulta', ma la sua prima formulazione è intrinsecamente legata al linguaggio e ai modi di vedere del tempo in cui è nata. Anche le teorie scientifiche infatti devono subire un processo di rinnovamento dei termini e la Meccanica Quantistica ne è un esempio recente (Levy-Leblond, 2003).

Anche se Lévy-Leblond sottolinea come Bohr, e la prima generazione di fisici quantistici, abbia subito intuito la necessità di avere a disposizione nuovi termini e nuove parole per esprimere i concetti quantistici, nota però una netta spaccatura tra loro e la 'nuova' generazione (rappresentata da Heisenberg..): il continuo rifarsi al Principio di Corrispondenza e al concetto di complementarità portava sì ad indagare il mondo quantistico ma non permetteva di svincolarsi, anche a livello di linguaggio, da quello che era il sistema classico. Lo stesso Lévy-Leblond utilizza una metafora per rendere concreto questo pensiero: i nuovi oggetti possiedono caratteristiche classiche a volte anche contemporaneamente e inconciliabili tra loro e lo scienziato non potrà più descrivere l'oggetto a volte con una parola o a volte con un'altra, riportando alla mente modelli classici già consolidati nella sua mente, ma dovrà coniare un nuovo termine, che contenga in se stesso l'essenza dell'oggetto che vuole descrivere.

La metafora nell'900, soprattutto per quel che riguarda la fisica quantistica, ha assunto due ruoli peculiari, che non emergevano in modo così evidente in altri momenti storici: aiuta il fisico a

decifrare piano piano il rebus quantistico con strumenti classici facendo appunto vedere quanto i due mondi siano distanti tra loro e, allo stesso tempo, apre importanti discussioni sui limiti del linguaggio naturale e sulla necessità di coniare nuovi termini che devono rinunciare ad avere un analogo classico. Le due storie di metafore presentate di seguito esemplificano questi aspetti.

In questo scenario si tornò a parlare in modo insistente del ruolo delle metafore e analogie nel discorso scientifico.

La scuola neopositivista infatti, come riporta Piazza, considerava l'utilizzo di un linguaggio logico-matematico l'unica strategia possibile per eliminare le ambiguità dal discorso, dando all'intuizione il solo ruolo di scoprire nuove ipotesi e teorie nel "contesto della scoperta", mentre nella fase della "giustificazione" (e, quindi, della dimostrazione) essa non doveva avere nessun ruolo. In questa prospettiva non stupisce quindi che la metafora fosse tenuta fuori dalla logica della scienza in quanto 'non è univoca [...]: introduce incertezza e imprecisione nel linguaggio' (Piazza, 1986).

Come ricostruisce Petruccioli, alcuni settori della filosofia di metà '900 hanno, al contrario, rivalutato il ruolo della metafora nella scienza, in opposizione alle correnti anti- metafisiche e neopositiviste, sostenendo che le espressioni metaforiche siano delle componenti essenziali per i meccanismi linguistici delle teorie scientifiche e che forniscano strumenti di indagine più o meno profonda nelle trasformazioni di schemi teorici e concettuali (1994).

Dai lavori di M.Black e M.Hesse nei primi anni '60 e dai successivi studi di R. Boyd e T. Kuhn, emerge che la scienza non può esprimersi senza metafore in quanto ha bisogno di introdurre termini anche senza definirli.

Posizioni apparentemente contrapposte e inconciliabili che si possono però collocare all'interno del *frame* emerso dall'analisi storica condotta: da un lato la metafora e l'analogia sono temute in quanto foriere di possibili giochi linguistici non rigorosi; dall'altro la metafora come mezzo irrinunciabile per una disciplina che vuole rinnovarsi ed evolvere attraverso un continuo confronto con quanto è stato elaborato e consolidato nel passato ma anche attingendo da altri domini per intuire sviluppi futuri.

In questi anni, grazie appunto al lavoro di filosofi della scienza come Black, Hesse, Boyd, Kuhn e Ortony, si inizia a definire esplicitamente cosa si intende per metafora in scienza e quale linguaggio può essere utilizzato per analizzarla nella storia del pensiero scientifico.,

Come riportato da Davide Neri in un seminario tenuto nel corso di Storia della Fisica nel 2015, la metafora (o analogia) viene ad essere definita come una relazione che connette due domini: il dominio principale o target (ad es. l'atomo d'idrogeno) e il dominio secondario o sorgente (ad es. il

sistema planetario). La metafora o analogia crea relazioni tra questi due domini nella forma di una proporzione “debole”:

$$A : B \approx C : D$$

I termini A,B,C,D possono rappresentare grandezze fisiche (ad esempio: carica dell’elettrone come la carica/massa gravitazionale), oppure anche relazioni tra grandezze ($F=k/r^2$)

Il connettivo \approx si colloca tra la perfetta equivalenza e la completa differenza tra le relazioni A/B e C/D, e la vaghezza e l’ambiguità della relazione \approx sono quelle che rendono l’analogia uno strumento non logico, utile per costruire conoscenza (inclusa quella scientifica), ma non per dimostrarla.

L’analogia tra le coppie mostra quindi una parte positiva e una negativa; cogliere il senso dell’analogia vuol dire comprendere fino a che punto può estendersi la parte positiva senza spingersi oltre.

Come sostiene Boyd, "la metafora applica al soggetto principale (letterale) un sistema di 'implicazioni associate' caratteristiche del soggetto metaforico secondario", ovvero guardare il soggetto primario in termini metaforici è equivalente a proiettarlo nello spazio dei significati e delle implicazioni proprie del soggetto secondario. Boyd sviluppò ulteriormente questo concetto riguardo al discorso scientifico negando però che la funzione della metafora sia rilegata alla sola fase pre-teorica dello sviluppo di una disciplina. Boyd sostiene infatti che "esiste un' importante classe di metafore che gioca un ruolo fondamentale nello sviluppo e nell'articolazione di una teoria[...]. La loro funzione è quella di introdurre termini teorici dove prima non ne esistevano".

Grazie a queste elaborazioni è possibile analizzare, retrospettivamente, come la metafora sia stato uno strumento utile nello sviluppo della formazione della teoria quantistica (Piazza, 1986, p. 87).

Ripercorriamo alcune delle fasi salienti di questo sviluppo mettendo in evidenza il ruolo giocato dalle metafore e dalle analogie.

Come riassume Petruccioli, dopo anni di continui successi, agli inizi degli anni '20, la teoria atomica di Bohr e la "vecchia" teoria dei quanti iniziarono ad entrare in crisi.

Uno dei modi privilegiati per sviluppare e valutare la plausibilità dei modelli atomici era stata fino a quel momento il principio di corrispondenza.

Questa procedura, che funzionava con le prime grandezze quantizzate, non riusciva più a spiegare determinati fenomeni sperimentali osservati tra i quali spiccavano strani effetti dei campi magnetici sugli spettri atomici (effetto Zeeman) e strani risultati che emergevano da esperimenti con fasci di atomi d’argento (esperimento di Stern e Gerlach): si tratta infatti di fenomeni che avrebbero introdotto una nuova grandezza, lo spin, di cui era problematico trovare un analogo classico. Fenomeni come questi, uniti alla scoperta dell’indeterminazione e della complementarità, hanno

aperto un dibattito molto forte sulla necessità o meno di abbandonare il lessico, l'epistemologia e il modo di vedere le cose della fisica classica e quali nuovi strumenti rappresentativi e immaginativi era importante costruirsi.

“La difficoltà con la teoria dei quanti risiede nei concetti, o meglio nelle parole che sono utilizzate nell'abituale descrizione della natura, che hanno tutte origine nella teoria classica.”
(Bohr, 1927).

Queste parole furono scritte da Bohr nell'aprile del 1927 in una lettera indirizzata ad Einstein, nella quale il fisico danese commentava il lavoro sull'indeterminazione del suo allievo Heisenberg. Nell'ottobre dello stesso anno, prendendo parola al congresso Solvay su "Elettroni e fotoni", Bohr esprimeva così la sua posizione sulla nuova fisica:

"Non vi è un mondo quantistico. Vi è solo una descrizione astratta in termini di fisica quantistica. [...] la fisica si occupa di ciò che possiamo dire della natura. Da cosa dipendiamo noi umani? Dalle nostre parole. [...] siamo sospesi nel linguaggio.“

Fin dai suoi primi lavori del 1913 sulla teoria atomica, Bohr tenne sempre in considerazione la necessità di creare una nuova forma di linguaggio, che si portava dietro fin dagli incontri al circolo *Eliptika* nella sua gioventù, dove aveva avuto l'occasione di riflettere anche sulla natura e sull'ambiguità del linguaggio con filosofi ed etimologi.

La nuova fisica, che proprio in quel periodo si stava mostrando in tutta la sua complessità e stranezza, richiedeva uno sforzo continuo, da parte degli scienziati, per cercare parole o concetti che spiegassero, auspicabilmente senza ambiguità, i fenomeni insoliti che essi stanno osservando. La costruzione di una nuova teoria scientifica presupponeva una revisione più o meno radicale del linguaggio scientifico: infatti, se da una parte, veniva sostenuta e costruita con una "nuova" e rigorosa matematica, dall'altra l'utilizzo di termini classici come traiettoria, particella o onda non erano più adatti a descrivere la natura dei fenomeni quantistici. Lo stesso Heisenberg dichiarò:

"non è affatto sorprendente che il nostro linguaggio sia incapace di descrivere i processi che avvengono negli atomi, visto che ce lo siamo inventati per descrivere le esperienze della vita quotidiana[...]. per fortuna la matematica non ha di queste limitazioni.” (Heisenberg, *The Physical Principles of the Quantum Theory*, 1930)

L'analisi condotta a posteriori sul linguaggio di Bohr del 1913 porta a ritenere che i termini utilizzati da Bohr quali elettroni e orbita ellittica avessero svolto una funzione essenzialmente metaforica, volta cioè a rendere esplicito il contenuto che lo stesso fisico è arrivato ad associare ad un nuovo concetto di stato stazionario. Questa metafora, come si discuterà e si mostrerà anche di

seguito, porta con sé una precisa funzione euristica nel creare un nuovo programma di ricerca che utilizza tutti gli aspetti della teoria classica per la costruzione sistematica del modello quantistico, ovvero esplorare il modello classico alla luce di un nuovo sistema concettuale (Petruccioli, 1994).

Questo esempio mostra, citando Richard Boyd, che:

“l’uso della metafora è uno dei molti mezzi disponibili alla comunità scientifica per assolvere il compito *dell’accomodamento del linguaggio* alla struttura causale del mondo. Con questa espressione intendo il compito *di introdurre* una terminologia nuova e di *modificare* l’uso della terminologia esistente così che diventino disponibili categorie linguistiche che descrivano i caratteri del mondo che sono significativi a livello causale ed esplicativo” (Boyd,, 1979)

Mentre le espressioni poetiche proiettano il noto verso l’ignoto, la metafora scientifica si sforza di riportare l’ignoto verso il noto: davanti ad un oggetto o ad un fenomeno ancora sconosciuto, tenta di dare una spiegazione ricorrendo all’analogia con un oggetto o fenomeno conosciuto.

Per esempio T. Kuhn scriverà riguardo all’atomo di Bohr riprendendo il pensiero di Boyd:

“Il modello atomico di Bohr non è da prendere in senso letterale; elettroni e nuclei non sono pensati esattamente come piccole palle da biliardo o da Ping-Pong; solo alcune delle leggi della meccanica o della teoria elettromagnetica possono essere applicate a questi oggetti; trovare quali di queste leggi si possono applicare e dove sono le somiglianze con le palle da biliardo fu una delle sfide principali nello sviluppo della teoria quantistica.” (Kuhn, 1979)

ESEMPI DI METAFORE 'QUANTISTICHE' DI IMPORTANZA STORICA

In questo paragrafo si vuole proporre brevemente la storia di due interessanti metafore della fisica del ‘900: la costruzione di un modello atomico che ricalcasse il sistema solare copernicano e lo spin come trottola che gira su sé stessa. Vedremo come sono nate, come sono state create e che scopo avevano in quel particolare momento della ricerca scientifica; come la storia ci insegna, vedremo come poi si siano trasformate, tramite rielaborazioni e conferme teoriche e sperimentali, in modelli accettati dalla comunità scientifica.

Quando Bohr iniziò a lavorare sul modello atomico, c’erano precisi gradini che doveva seguire per costruire la sua teoria quantistica dell’atomo, ognuno dei quali includeva una serie di difficoltà e novità: l’accettazione del modello atomico di Rutherford, che prevedeva un nucleo di cariche positive ed un numero di elettroni orbitanti su orbite determinate; la consapevolezza della limitazione della elettrodinamica classica riguardo l’emissione e la stabilità degli elettroni orbitanti; l’applicazione delle ipotesi di Planck al modello atomico.

All'interno di questo panorama, Bohr esplora – e distrugge – una delle prime metafore interessanti allo sviluppo della meccanica quantistica: la costruzione di un modello atomico che ricalcasse il sistema solare copernicano.

Questa metafora è interessante perché è a partire dalle relazioni errate tra i due sistemi che si arriverà ad abbandonare il modello classico per abbracciare una formulazione quantistica.

Il principale sistema relazionale è il sistema causale dato dalla forza centrale; inoltre possiamo elencare tutta una serie di relazioni più o meno significative che sono state fondamentali per il superamento dell'analogia e la costruzione di un nuovo modello.

In primo luogo, possiamo notare che i due modelli (atomo e sistema solare) sono in relazione positiva per quanto riguarda:

- gli elementi: sole e pianeti \ nucleo ed elettroni
- forza: attrazione tra sole e pianeti \ attrazione tra nucleo ed elettroni
- massa: sole >> pianeti \ nucleo >> elettroni
- moto: pianeti attorno al sole \ elettroni attorno al nucleo.

Allo stesso modo, essi differiscono per altre caratteristiche:

- differenze tra i pianeti (in termini di temperatura, geologia, forma e grandezza) \ nessuna differenza tra gli elettroni;
- differente interazione: sempre attrattiva tra i pianeti stessi \ sempre repulsiva per gli elettroni.

In quel periodo quindi un fenomeno scientifico sconosciuto ma oggetto di indagini e ricerche veniva associato ad un'immagine diffusamente accettata e messo in connessione con esperienze già consolidate di un determinato e diverso ambito scientifico. Il divario tra le caratteristiche che abbiamo elencato e i fenomeni che Bohr stava indagando porteranno il fisico stesso ad affermare che “[...] la cruciale differenza impone per la descrizione degli atomi il superamento della fisica classica e il ricorso alla teoria dei quanti”.

La seconda storia ha come protagonista una grandezza fondamentale che arriverà ad affermarsi e diventare protagonista nella descrizione di un sistema quantistico: lo spin.

In inglese il termine *to spin* è tipico del linguaggio comune e indicava, all'origine, il processo di creazione di un filo tramite la torsione di una fibra. Attualmente il primo rimando si ha a una trottola che gira su se stessa.

Come già accennato, il principio di corrispondenza utilizzato dai padri della meccanica quantistica, (i gradi di libertà classici venivano associati a grandezze quantistiche che assumevano valori multipli interi di un quanto fondamentale) iniziava ad incontrare all'inizio degli anni '20 diversi ostacoli: l'orbita di un elettrone era così descritta da una terna di numeri quantici interi, ma questa crollava di fronte ad evidenze sperimentali quali gli split degli spettri dovuti all'effetto Zeeman e la divisione dei fasci con apparati Stern e Gerlach. C'era bisogno di svincolarsi dalla logica classica perché non portava a nessuna conclusione soddisfacente, come ricorda Pauli:

“...ci si scontrava contemporaneamente contro due difficoltà differenti dal punto di vista logico. Una era la mancanza di una chiave generale per tradurre un dato modello meccanico nella teoria dei quanti...la seconda difficoltà era la nostra ignoranza di quale fosse il corretto modello classico da impiegare.” (Pauli, 1964)

Nel 1920 Sommerfeld introdusse, al solo scopo di descrivere i dati, un numero quantico ulteriore, definito “interno” che a differenza di quelli canonici poteva assumere anche valori seminteri.

Pauli suggerì nel '23 che questi potessero prendere solo valori $\pm \frac{1}{2}$ e notò che questo numero quantico non corrispondeva a nessun grado di libertà classico, ma fosse un effetto puramente quantistico.

Solo nel '25, Goudsmit e Uhlenbeck, proposero, in una breve lettura, un'interpretazione fisica del nuovo numero quantico, dando all'elettrone una rotazione attorno ad un asse intrinseco, come la terra ruota sul suo asse di rotazione; in questo modo potevano essere spiegati sia la struttura fine degli spettri sia i momenti magnetici atomici.

Il grado di libertà rotazionale, che impone una struttura interna dell'elettrone, cozzava però con il modello di punti materiale utilizzato per l'elettrone. Bohr inoltre non riteneva possibile che il momento magnetico intrinseco degli elettroni potesse influenzare un atomo, dove appunto esiste solo un campo elettrico; questo dubbio fu poi risolto da Einstein che dimostrò che l'elettrone vede un campo elettrico rotante, che secondo la relatività comporta un campo magnetico, cui la rotazione dell'elettrone può accoppiarsi.

Sul problema dello spin intervennero anche Fermi e Rasetti, che dimostrarono che un'interpretazione semiclassica dell'elettrone rotante portava ad incongruenze in quanto le sue dimensioni sarebbero diventate enormi. Concludono però dicendo:

“L'ipotesi dell'elettrone rotante non debba per questo venir abbandonata. Naturalmente noi non riteniamo che essa debba venir presa troppo alla lettera, nel senso che ci si debba veramente figurare l'elettrone come un corpo macroscopico carico di elettricità e rotante attorno a se stesso, poichè quello che è essenziale per le applicazioni è che l'elettrone posseda un momento

meccanico magnetico, indipendentemente da rappresentazioni modellistiche troppo particolari sopra l'origine di questi.”

Per i due fisici quindi la rotazione si trasforma da proprietà fisica a pura metafora con funzione di catacresi, in mancanza di una definizione migliore di questa proprietà. Il senso metaforico diviene quello prevalente come si evince anche dall'uso linguistico: i vari autori infatti esprimono ognuno nella loro lingua il concetto “rotante” parlando di “momento meccanico”, “elektronens impuls”, “Kreiselmoment”, “angular momentum”...

Lo “spin” diventerà finalmente un termine teorico, sganciato dalla sua connotazione metaforica (in inglese) a partire dal '27, dove verrà utilizzato in un testo tedesco da Wigner e von Neumann nella loro descrizione degli spettri sulla base della teoria matematica dei gruppi.

1.2 LA METAFORA NELLA COMUNICAZIONE E NELLA DIDATTICA DELLA FISICA

In questo paragrafo si cerca di esplorare come le molteplici proprietà della metafora possano creare differenti dinamiche per la divulgazione di concetti scientifici ad un pubblico di non addetti ai lavori o nel campo dell'insegnamento. Nel fare questo, prenderemo a riferimento una frase di Piero Angela, “Sono un traduttore dall'italiano all'italiano”, con la quale sottolinea in modo conciso come viene visto dalla comunità un esperto che parla di scienza e getta una luce sul significato della divulgazione scientifica. Nel suo articolo “Le vie della divulgazione scientifica” suggerisce che due sono i punti cruciali nel parlare di scienza: afferma che divulgare non significa soltanto tradurre ma anche adattare il linguaggio, senza impoverire la sua carica concettuale; inoltre l'atto della divulgazione (che nel nome stesso contiene la parola *vulgus*, volgo, popolo) non deve essere pensato come rivolto solo ad un pubblico poco istruito, ma anche a interlocutori coltissimi in campi del sapere differenti. Si comprende quindi il bisogno di nuove tecniche o espedienti per far avvicinare alla scienza (al metodo, al pensiero scientifico) un pubblico vasto e poliedrico e vedremo, attraverso la storia, le parole dei filosofi e le ultime ricerche nel campo della didattica, come questi problemi sono stati affrontati. La metafora, nella comunicazione della scienza, può dunque svolgere questo ruolo di adattare il discorso alle “esigenze” culturali del pubblico a cui l'espositore si rivolge. Essa cerca appigli con l'esperienza di tutti i giorni con oggetti, caratteristiche e proprietà presenti nel senso comune e nei registri linguistici quotidiani per spiegare ciò che invece risiede in un universo di discorso lontano dalla nostra esperienza.

Più specificamente, nel seguito si discuteranno tre principali funzioni che la metafora può svolgere nella divulgazione scientifica e nell'insegnamento: sviluppare nuova conoscenza, sviluppare il pensiero astratto e rendere la strategia comunicativa o didattica più efficace.

LA METAFORA COME STRUMENTO COGNITIVO PER SVILUPPARE NUOVA CONOSCENZA

Per capire come una metafora possa svolgere il ruolo di strumento cognitivo nella comunicazione/didattica della fisica, consideriamo la differenza tra ruolo sostitutivo/comparativo e ruolo interattivo (Boyd, 1979; Black, 1979).

La metafora gioca un ruolo "sostitutivo o comparativo" quando non è altro che un confronto tra due termini, che è espresso in maniera sintetica nella frase "A è B", oppure "A è come B in quanto...". Boyd riporta due esempi di metafore utilizzate in questo modo: il termine *wormhole* nella relatività generale e il termine per definire elettroni in stato legato come *nube elettronica*. In entrambi i casi, si sostituisce una parola o un termine con uno più pittoresco e che colpisce più l'attenzione, arricchendo solo la descrizione del fenomeno.

Ci sono poi casi in cui l'azione effettuata tramite metafora può essere pensata in termini di "interazione" (Black; Lakoff, Johnson 1980). Questo accade quando due oggetti o proprietà sono confrontate e, per via del confronto, avviene un'interazione tra di loro all'interno della mente dell'ascoltatore/lettore. Per svolgere questo ruolo i due sistemi in interazione devono essere articolati, possedere una struttura che permetta l'interazione ed essere entrambi sufficientemente aperti o malleabili affinché, nell'interazione, anche il sistema sorgente possa uscirne modificato o visto in un modo nuovo. Sono esempi di questo tipo le metafore discusse nella prima parte di questo capitolo, come le metafore usate da Carnot e Maxwell oppure il modello planetario per l'atomo, in cui il sistema sorgente era costituito dalla meccanica newtoniana – un sistema noto – e i sistemi target nuovi ambiti da esplorare e capire (i fenomeni termici, elettromagnetici o atomici). L'interazione tra i due sistemi non ha solo permesso di produrre nuova conoscenza ma anche di vedere sotto una luce diversa il sistema sorgente. L'interazione infatti permette di selezionare ed enfatizzare (ma anche sopprimere e scartare nel caso di metafore negative) alcune caratteristiche comuni ad entrambi gli oggetti i quali possono essere visti uno alla luce dell'altro, generando una nuova organizzazione dei concetti. In questo senso, poiché un oggetto è guardato sotto la "lente" di un altro, la metafora esprime qualcosa che non poteva essere spiegato letteralmente. Nell'insegnamento questo tipo di metafora può svolgere un ruolo fondamentale sia per capire meglio sia per costruire competenze epistemologiche sul ruolo dei modelli in scienza. Inoltre ricerche empiriche hanno mostrato che una didattica basata su metafore facilita il passaggio di conoscenze anche tra ambiti del sapere differenti (Evans & Evans, 1988, pp. 5-20).

LA METAFORA COME STRUMENTO COGNITIVO PER SVILUPPARE IL PENSIERO ASTRATTO

La metafora ha la capacità intrinseca di facilitare la concezione dell'astratto, ovvero far percepire all'osservatore nozioni astratte tramite il linguaggio comune (o tramite colori o simboli). Secondo Lakoff e Johnson (1998) la metafora non è una figura linguistica ma una vera e propria forma di pensiero e tutto il nostro modo di pensare è metaforico. Lakoff e Johnson hanno fondato il loro lavoro sulle cosiddette *metafore concettuali* e, sulla base di questo costrutto, dividono i concetti in due famiglie: ci sono i concetti non metaforici rappresentati dai concetti cognitivi di base, quali quelli di orientamento spaziale come “su giù”, “destra-sinistra”, “alto-basso”, concetti ontologici estratti dell'esperienza con il mondo materiale quali *persona, sostanza* etc, e concetti che illustrano attività come *mangiare, camminare* etc.; poi ci sono i concetti metaforici, rappresentati di fatto da tutti gli altri concetti che, loro sostengono, sono progressivamente costruiti sui concetti non metaforici. Nella loro tesi, peraltro presa a riferimento anche da Hofstaedter, l'uomo non fa altro che utilizzare in modo metaforico i concetti non metaforici per capire, illustrare e comunicare nozioni astratte. In questi termini la metafora è uno strumento necessario e utile per la comunicazione scientifica dove espressioni astratte vengono usate per comunicare concetti o principi.

Un esempio concreto di questa capacità è riportato nel lavoro del gruppo di ricerca dell'Università di Linköping nel quale si indaga come la comprensione di concetti astratti in termodinamica, specialmente riguardo il concetto di *entropia*, possa essere favorita con l'utilizzo di metafore cognitive. Dal lavoro infatti emerge, come riporta Fantini, che “le metafore cognitive permettono, se ben utilizzate, di formulare costrutti esperienziali di concetti scientifici astratti e di “mettere a terra” ragionamenti astratti in un discorso “narrativo” che contiene concetti legati a cammini, agenti e movimenti; permettono, se ben coordinate tra loro o con altre risorse, l'allineamento tra il ragionamento qualitativo e quello quantitativo.” (Fantini,2014)

Infine la metafora è un ottimo strumento per gli scienziati per espandere al loro conoscenza dell'universo, o toccare – con l'intelletto - quello che ancora sfugge ai nostri cinque sensi. Gli psicologi cognitivi vedono la metafora come un mezzo di catalisi per *l'assimilazione* (incorporazione di un evento o di un oggetto in uno schema comportamentale o cognitivo già acquisito) e *accomodamento* (modifica della struttura cognitiva o dello schema comportamentale per accogliere oggetti ignoti) di concetti nei processi d'apprendimento (Piaget, 1971).

LA METAFORA COME STRUMENTO RETORICO PER RENDERE LA STRATEGIA COMUNICATIVA O DIDATTICA PIU' EFFICACE

Oltre alle funzioni conoscitive già illustrate, la metafora può avere una forte carica comunicativa.

La forza comunicativa di una buona metafora risiede sostanzialmente in tre punti (Gibbs, 1994):

- *Compattezza*: permette di condensare, e quindi trasmettere un elevato numero di informazioni per mezzo di un'unica espressione, grazie alla complessa interazione che crea tra i due domini;
- *Espressività*: permette di comunicare concetti di difficile spiegazione;
- *Vividezza*: tramite la creazione di un'immagine concreta, la metafora si imprime nella mente e favorisce sia la comprensione che il ricordo.

Altri linguisti evidenziano nell'utilizzo della metafora quella che J.L. Austin chiama "funzione illocutoria" ovvero la costruzione della frase presa come ordine di parole, accenti, punteggiature e tutte le azioni che si fanno per proferire queste parole. Infine un ruolo immaginativo con il quale si estende, si amplia e si modifica la realtà per scopi estetici e creativi.

Quest'ultimo aspetto relativo all'immaginazione apre la relazione importante che lega metafora e creatività. In recenti studi sulla teoria della creatività in ambito didattico si fa leva sui concetti di manipolazione delle idee e dei concetti, sulle manovre cognitive impegnate nella elaborazione delle informazioni e sulla capacità di creare nuovi significati sulla base di termini vecchi. Così come la creatività, anche la metafora nasce da un'intuizione improvvisa e "reca l'impronta del genio" (Aristotele) e, come abbiamo visto nelle pagine precedenti, può produrre nuova conoscenza (Martari, 2010, pp. 245-275).

RISULTATI DI RICERCA SULL'USO DELLE METAFORE NELL'INSEGNAMENTO DELLA FISICA

Come visto la metafora può rivelarsi un valido mezzo per la costruzione di una conoscenza dinamica che sappia scambiare nozioni tra i diversi ambiti del sapere. Tuttavia, se è utilizzata in modo poco consapevole, ci possono essere diverse controindicazioni e rischi. Questo avviene quando la metafora non è buona, nel senso che semplifica troppo il fenomeno, oppure non è trasparente, nel senso che i suoi termini non sono comprensibili agli studenti, che di conseguenza non riescono a identificare le giuste corrispondenze.

Un'altra fonte di errore potrebbe essere lo stesso *mapping* (la struttura e le stesse corrispondenze tra i due domini) che potrebbe risultare troppo difficile per gli studenti. Riprendendo la distinzione di Black del paragrafo precedente riguardante le diverse tipologie di metafore, possiamo ricordare che esistono metafore comparative e metafore interattive. Nella comunicazione didattica, può succedere che una metafora (ad esempio il gas modellizzato nella teoria cinetica dei gas) sia proposta dall'insegnante come metafora comparativa (per la quale si assume che il sistema sorgente – es. la

meccanica nel caso della teoria cinetica dei gas – sia noto e invariante per chi legge la metafora) ma diventa una metafora interattiva per lo studente, che deve invece sviluppare anche nuova conoscenza in relazione al sistema sorgente. Questo disequilibrio può essere vantaggioso e trasformare la metafora in uno strumento di consolidamento o approfondimento della conoscenza del sistema sorgente, ma può anche lasciare spazio a molti errori e incomprensioni: nel caso sfavorevole infatti la metafora perderebbe la funzione esplicativa (Petrie &, Oshlag, 1979, pp.579-609).

Ulteriori studi sulla didattica hanno dimostrato che l'apprendimento basato sulla metafora favorisce, oltre allo sviluppo del pensiero creativo, una migliore comprensione concettuale dei contenuti scientifici; lo studio di fenomeni tramite metafora non solo promuove la ricerca delle similitudini o delle proprietà in comune proposte dalla relazione strutturale della metafora stessa, che mappa un oggetto in funzione di un altro, ma allena lo studente a cercare e capire anche le differenze che i due oggetti possono avere, a ragionare sulle proprietà più o meno rilevanti ed a smascherare quelle che solo in apparenza possono sembrare similitudini (Tomlinson, Hansen, Richland, 2011).

Infine, l'uso di metafore banali o eccessivamente cristallizzate mostra il pericolo di allontanarsi troppo dal concetto che si vuole insegnare legandolo a conoscenze approssimative e imprecise. Questo tipo di metafore nell'insegnamento sono utili per l'apprendimento ma possono essere fonte di misconcezioni (Zook & DiVesta, 1991)

Per concludere si può dire che la metafora, in ambito didattico, costituisce un potente ed efficace strumento solo se utilizzata in maniera corretta; non è possibile ignorare il suo ruolo sia nel processo conoscitivo sia nella organizzazione della conoscenza. Tuttavia, non può essere usata in modo semplice e facendo leva soltanto su aspetti intuitivi; al contrario, l'insegnante deve avere una piena consapevolezza delle implicazioni cognitive derivanti da un certo tipo di comunicazione metaforica nell'ottenere un risultato significativo senza cadere nella banalizzazione o nella spettacolarizzazione.

Tutte queste considerazioni fatte non sono solo utili nell'insegnamento o nell'apprendimento della fisica classica, ma diventano necessarie fin dalle prime volte in cui si affrontano in una classe di scuola superiore concetti di fisica moderna. Attraverso l'analisi di alcuni libri di testo, G. Lai sottolinea come si faccia largo uso di termini metaforici e similitudini per introdurre i primi concetti della teoria quantistica, dal fotone al dualismo onda-corpuscolo fino al più complesso corpo nero: l'utilizzo di questa forma di linguaggio infatti richiama all'attenzione dello studente modelli fisici già incontrati e risulta essere necessaria per la presentazione di questi nuovi oggetti o fenomeni.

Dallo studio risulta che il linguaggio che viene utilizzato in questi testi permea tutti i livelli dell'azione apprendimento-insegnamento: a partire dal linguaggio dei libri di testo, passando per l'azione dell'insegnante per arrivare alla lettura dello studente (Lai, 2015).

Consapevoli di tutti i risultati riportati nei precedenti capitoli, la presente tesi cerca di capire se si possano costruire attività che utilizzino la metafora per indagare un fenomeno fisico nuovo, che stimolino l'interesse e una discussione critica sull'argomento che si sta esaminando e che collaborino con il linguaggio logico matematico nella comprensione del formalismo.

I brani che verranno usati per le sperimentazioni in questa tesi sono esempi delle metafore descritte all'inizio di questo paragrafo. Le metafore scelte infatti possono essere viste sotto entrambi i punti di vista: da una parte la sostituzione di un oggetto con un altro aiuta a dare una idea, un'immagine immediata della situazione che si sta esplorando mentre dall'altra il processo di interazione fa sì che, una volta associato il sistema sorgente con il sistema target, si promuova una revisione dei concetti fondamentali, evidenziando le proprietà comuni dei due sistemi e promuovendo un'analisi critica delle discrepanze e dei limiti delle corrispondenze in entrambi i sistemi.

CAPITOLO 2:

La sperimentazione: contesto, obiettivi e metodologia di lavoro

In questo capitolo si presenta il quadro generale sull'insegnamento ed apprendimento della fisica quantistica nella scuola superiore all'interno del quale nasce il presente progetto di tesi.

Prendendo in considerazione le Indicazioni Nazionali per i licei scientifici si mostreranno quali siano le principali difficoltà incontrate nell'insegnamento della fisica del XX secolo e quali possano essere le proposte e gli approcci didattici che negli anni sono stati elaborati per gli insegnanti.

E' in questo ambito che lavora il gruppo di ricerca di Bologna, per sviluppare materiali e percorsi didattici che facciano fronte alle richieste delle Indicazioni.

Nascono inoltre, in questo contesto, anche le domande e le idee che hanno portato allo sviluppo di questo lavoro di tesi.

2.1 LE INDICAZIONI NAZIONALI E LE PROPOSTE PER LA DIDATTICA

La Riforma Gelmini del Riordino dei Licei, attiva delle classi prime dell'anno scolastico 2010/2011, ha introdotto diversi cambiamenti, non solo a livello strutturale e organizzativo ma anche a livello di curriculum. Uno di questi è la scelta di enfatizzare le conoscenze scientifiche sviluppatesi agli inizi del secolo scorso, in particolare per i Licei Scientifici dove si vuole fornire agli studenti un'introduzione di alcuni concetti base di fisica quantistica al fine di dotare gli alunni di strumenti concettuali e metodologici per affrontare i temi scientifici e tecnologici di importanza sociale al giorno d'oggi.

Riguardo all'insegnamento della fisica quantistica, le Indicazioni nazionali per I Licei Scientifici riportano:

"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 suggerito dalle Indicazioni è molto noto e suona familiare a molti docenti di scuola secondaria, perché è quello che si ritrova nella maggior parte dei libri di testo di scuole superiori. L'approccio proposto dalle Indicazioni si basa su una trattazione pseudo-storica e semi-quantitativa riguardante la 'vecchia teoria dei quanti'. Il filo conduttore è di fatto di tipo cronologico: dall'introduzione della costante di Planck del 1900 arriva all'anno 1927 in cui vengono poste le basi della fisica quantistica.

Tuttavia, il tono usato nelle indicazioni sembra lasciare all'insegnante spazi di libertà per scegliere l'approccio didattico e per integrare la trattazione come desidera.

Questa libertà è particolarmente importante perché l'approccio suggerito dalle Indicazioni è stato molto criticato dalla comunità dei fisici e dei ricercatori in didattica della fisica che si occupano di fisica quantistica, che hanno elaborato nel corso degli anni diverse possibili alternative all'approccio pseudo-storico delineato dalle Indicazioni.

La letteratura di ricerca riporta che, anche se l'approccio *storico* sembra efficace a mettere in discussione alcune convinzioni che gli studenti si sono costruiti con la fisica classica, esso non è in grado di fornire nuovi strumenti per la comprensione della nuova fisica, né riesce a porre le basi di una interpretazione "genuinamente quantistica" dei fenomeni via via emersi. L'approccio suggerisce connessioni semplici con idee familiari e lo studente, nel tentativo di colmare le lacune tra i frammenti di informazione, finisce con l'attribuire proprietà classiche ad oggetti quantistici, ottenendo così risultati non soddisfacenti e con il rischio di percepire la fisica quantistica come una collezione di fatti sorprendenti che non ha ancora trovato una interpretazione coerente e convincente (Lodovico, 2016; Scocca, 2016).

Un approccio alternativo elaborato nella ricerca in Didattica è quello *logico-filosofico*, proposto ad esempio da Geshe Pospiech, che si poggia sulla convinzione che "è impossibile capire la meccanica quantistica senza possederne le strutture matematiche.!" Nel suo lavoro del 2010 la ricercatrice sostiene che sia possibile arrivare con successo alla comprensione delle idee principali della fisica quantistica a partire dallo spin e dalle sue strutture matematiche, le matrici di Pauli (matrici 2x2 di facile trattazione per studenti di licei scientifici), senza passare attraverso rappresentazioni semi-classiche in cui gli studenti si potrebbero bloccare. Prosegue argomentando quanto questo metodo sia adatto ad evidenziare aspetti fondamentali della fisica quantistica legati a temi come *principio di sovrapposizione*, *complementarietà-indeterminismo*, *indistinguibilità*, *processo di misura* (Pospiech, 2010).

Un altro approccio, di tipo *fenomenologico*, costruisce e illustra i concetti della meccanica quantistica attraverso l'analisi fenomenologica di situazioni sperimentali. Si ricorda in questo caso il

percorso didattico dell'Università di Udine (Michellini, Ragazzon, Santi, Stefanel, 2000), che, riprendendo la proposta delineata da Ghirardi, parte con l'analisi della fenomenologia della polarizzazione della luce attraverso esperimenti con filtri polaroid per ricavare progressivamente i concetti base della fisica quantistica. Particolare enfasi è posta al principio di sovrapposizione e al significato della misura in fisica quantistica. Un'altra proposta interessante è quella elaborata dal gruppo di Pavia e descritta, ad esempio, nell'articolo "*Teaching quantum physics by the sum over paths approach and GeoGebra simulation*" (Malgieri, Onorato, De Ambrosis, 2014). Nell'articolo, i ricercatori dimostrano che un approccio di questo tipo può portare gli studenti a comprendere concetti chiave della meccanica quantistica e ad appropriarsi di un linguaggio tecnico in breve tempo. La strategia è molto chiara: attraverso diversi esperimenti simulati con software dedicati (GeoGebra), vengono estrapolati i vari nodi concettuali e viene offerta allo studente una visione via via più ampia del divario tra la trattazione quantistica e il paradigma classico. Il percorso permette progressivamente di giustificare la necessità di introdurre un nuovo formalismo e nuovi concetti per spiegare gli esperimenti stessi. Partendo con la descrizione classica dell'esperimento di interferenza da doppia fenditura (prendendo in considerazione la natura ondulatoria della luce) e costruendo via via il concetto di fotone (donando quindi una proprietà corpuscolare alla luce stessa), i ricercatori propongono l'introduzione di concetti quali sovrapposizione o indeterminazione attraverso l'utilizzo dei cammini di Feynman come modo per conciliare le due differenti nature della luce. La parte formale e teorica è accompagnata da una parte pratica, dove gli studenti simulano al computer esperimenti diversi: l'interferenza e diffrazione delle onde classiche, l'esperimento di Young con elettroni o fotoni, gli esperimenti di Mach-Zehnder e Zhou–Wang–Mandel, nonché ad esperimenti con particelle quantistiche confinate. I risultati vengono quindi utilizzati per giustificare le strutture teoriche apprese. Come descritto nell'articolo, l'utilizzo della simulazione ha favorito l'apprendimento dei concetti base e dei modelli che risiedono negli esperimenti citati sopra nell'ottica della somma sui cammini di Feynman.

Come abbiamo potuto vedere, le scelte didattiche sono diverse, ognuna espressione di un approccio, con il proprio schema o struttura interno. Tuttavia sono tutte concordi nel sostenere, anche sulla base di risultati di sperimentazioni, che è possibile, anche a livello di scuola secondaria di II grado, costruire i concetti base di fisica quantistica: concetto di stato, sovrapposizione quantistica, ampiezza di probabilità, indeterminazione, misura.

Oltre al tema riguardante la creazione di materiali e percorsi che vadano ad arricchire e a superare i limiti intrinseci dei libri di testo, sempre nel rispetto di tutti i punti delle Indicazioni Nazionali, un altro problema affrontato dalla ricerca riguarda la formazione degli insegnanti. La maggior parte dei

docenti infatti è laureata in matematica e non ha mai avuto la possibilità di studiare argomenti di fisica quantistica, se non in modo superficiale o poco approfondito nel corso della loro carriera, molte volte solo per interesse personale. Per questo non solo sorge la necessità di organizzare corsi di formazione in servizio sotto direttiva del MIUR, ma anche l'esigenza di formare gli insegnanti fin dalla "prima formazione" attraverso corsi universitari di Didattica della Fisica e Tirocinio Formativo Attivo

2.1.1 LA PROPOSTA DI BOLOGNA

Per far fronte alle necessità esposte nel paragrafo precedente, nasce a Bologna un gruppo di lavoro che vede la collaborazione tra ricercatori in Didattica della Fisica, in Fisica Teorica, ricercatori del CNR, Matematici e docenti di Liceo¹. Il gruppo lavora da anni per la messa a punto di un percorso didattico, corredato di materiale didattico e attività per docenti. Il lavoro che viene presentato con questa tesi è solo una delle più recenti sperimentazioni all'interno di questo percorso. Nel corso della sua storia, il percorso ha subito diversi cambiamenti, adattandosi sia alle Indicazioni Nazionali sia ai più recenti risultati nel campo della ricerca.

Il percorso fu inizialmente pensato per rendere l'ambiente dell'apprendimento all'interno della classe ricco e complesso.

Una prima versione è stata sperimentata in due classi quinte ad indirizzo PNI di un Liceo Scientifico nel riminese della professoressa Paola Fantini. Le classi di questa tipologia di indirizzo infatti rappresentavano un terreno fecondo per la sperimentazione di questo percorso, dal momento che in questo indirizzo si selezionavano, nei fatti, studenti con un particolare interesse per le discipline scientifiche. L'approccio aveva come linee guida tre criteri (Levrini, Fantini, 2013):

- *Multi-prospettiva*: i contenuti fisici erano analizzati da diverse prospettive in modo tale da promuovere lo sviluppo di connessioni multiple tra contenuti e mappe concettuali.
- *Multi-dimensionalità*: il confronto delle differenti prospettive era condotto su diversi piani (concettuale, sperimentale, storico), ma anche attraverso l'analisi delle loro specificità filosofiche ed epistemologiche.

¹Il gruppo ha visto la partecipazione di: Docenti UNIBO: Alessia Cattabriga (Matematica), Eugenio Bertozzi, Elisa Ercolessi (Fisica e Astronomia), Marta Gagliardi (Fisica e Astronomia), Olivia Levrini (Fisica e Astronomia); Ricercatori del CNR-IMM, Area di Bologna: Giorgio Lulli; Docenti dell'Università di Ferrara: Vittorio Monzoni; Docenti di Liceo Scientifico: Stefano Accorsi, Laura Branchetti, Silvano Baggio, Michele Canducci, Michela Clementi, Paola Fantini, Fabio Filippi, Elisa Garagnani. Assegnisti di ricerca, dottorandi e laureandi o neo-laureati: Giulia Tasquier; Giovanni Ravaioli; Niccolò Vernazza; Eleonora Barelli, Luca Lodovico, Filippo Scocca, Gabriele Tronconi.

- *Longitudinalità*: la modellizzazione dei fenomeni quantistici era analizzata e confrontata con la modellizzazione classica.

Parallelamente è stato creato un percorso basato sull' 'Esperimento più bello della fisica' (<http://l-esperimento-più-bello-dellafisica.bo.imm.cnr.it/>), realizzato in collaborazione con Giorgio Lulli, del CNR-IMM di Bologna e con Elisa Ercolessi e Vittorio Monzoni, docenti di fisica teorica. Tale percorso è stato utilizzato sia con docenti di scuola secondaria di II grado per i corsi PLS che in attività pomeridiane per studenti volontari (Levrini, Lulli, Bertozzi, Ercolessi, Matteucci, Monzoni, & Pecori, 2014).

Come già accennato, con l'entrata in vigore della riforma Gelmini, il gruppo di Bologna ha rielaborato entrambi i percorsi citati e ha formulato una proposta che tenesse conto dei vincoli istituzionali e che potesse essere utilizzata non solo in contesti 'speciali' come incontri pomeridiani o i corsi ad indirizzo PNI, ma in tutte le classi quinte.

Nella revisione del corso, il gruppo di Bologna ha comunque mantenuto come criteri progettuali di base la *multi-dimensionalità*, la *multi-prospettiva* e la *longitudinalità* perché sperimentazioni effettuate anche su un altro tema, la termodinamica, hanno mostrato che tali criteri favoriscono un vero e proprio processo di *appropriazione* dei contenuti disciplinari (Levrini et al, 2015).

Il concetto di *appropriazione* è stato introdotto da Bakhtin negli anni '80 ed è stato più recentemente sviluppato in ambito socio-cognitivo ed educativo ed infine calato nel discorso scientifico da Delgatto (2011). Il termine è diventato caro al gruppo di Bologna, in quanto ha permesso di descrivere e interpretare perché i tre criteri illustrati precedentemente possano favorire una forma autentica e profonda di apprendimento, per cui uno studente non solo capisce i concetti di base, ma li rielabora, proiettando su di essi significati personali (Levrini et al, 2015).

Le sperimentazioni effettuate dal gruppo anche sulla fisica quantistica sembrano confermare che i tre criteri originari scelti per formulare il percorso, *multi-dimensionalità*, *multi-prospettiva* e *longitudinalità* favoriscano l'*appropriazione* (Lodovico, 2016).

Ad oggi, il percorso didattico sviluppato dal gruppo di Bologna è suddiviso in tre parti:

- *Pars destruens*: in questa prima parte del percorso vengono illustrati gli argomenti della cosiddetta 'vecchia teoria dei quanti' proposti dalle Indicazioni. La vecchia teoria dei quanti è trattata accendendo diverse dimensioni (formale, epistemologica, fenomenologica e applicativa) tramite la scelta di sviluppare una molteplicità di fili conduttori che dal corpo nero conducono all'atomo di Bohr e al dualismo: le fenomenologie che impongono una messa in crisi dei modelli classici per l'interazione radiazione-materia, i processi di modellizzazione e l'interdisciplinarietà tra fisica e matematica, il dibattito storico-

epistemologico tra continuo e discreto, la complessità delle ricostruzioni storiche. La multi-prospettiva è accesa, invece, attraverso l'utilizzo di una molteplicità di testi (memorie originali, brani di critica storica e epistemologica, testi divulgativi) che fanno riferimento a tanti linguaggi e aprano diverse "vie al capire" (modelli matematici, immagini, metafore, analogie, argomenti epistemologici);

- *Raccordo*: in questa parte si introducono i concetti di indeterminazione e complementarità, discutendo alcuni dibattiti storici che ne hanno accompagnato la formulazione. Obiettivo principale è arrivare ad introdurre il concetto di *quantone*, utilizzata da Lévy-Leblond per superare il dualismo onda-particella e per guidare gli studenti ad accettare l'idea che il mondo quantistico richieda una modellizzazione diversa da quelle classiche. Per introdurre il quantone è utilizzata la famosa metafora dell'ornitorinco, introdotta da Lévy-Loblond (2003), mentre per introdurre il concetto di variabili coniugate e, quindi, l'indeterminazione si fa riferimento alla metafora del menù cinese inventata da Greene (2004). Entrambe queste metafore sono prese in considerazione e analizzate nel dettaglio in questo studio. Nel raccordo, è attraverso il già citato corso-laboratorio 'Esperimento più bello della fisica' che si cerca di rendere necessaria la nascita di un nuovo modo di pensare, di una nuova logica che possa andare oltre le interpretazioni classiche e interpretare i risultati.
- *Pars construens*: in questa ultima parte viene introdotta la nuova logica quantistica e vengono forniti gli strumenti matematici e i nuovi concetti (*stato, sovrapposizione, ampiezza di probabilità, preparazione-evoluzione-misura, entanglement*) attraverso l'analisi di importanti esperienze, come l'esperimento di Stern e Gerlach e l'interferometro di Mach-Zehnder. Per confrontare la logica quantistica con quella classica, viene discussa la metafora dei "calzini di Erwin", inventata da McIntyre (2012). Anche questa metafora è analizzata in questa tesi.

Il percorso è stato sperimentato in differenti contesti in classi di quinta liceo e i risultati sono stati analizzati nelle tesi di Giovanni Ravaioli (2016) e Luca Lodovico (2016).

La tesi del primo, *Learning and accepting quantum physics. Re-analysis of a teaching proposal*, mirava all'analisi di una reazione che si è riscontrata in alcuni studenti, ovvero la comprensione dei concetti ma una sorta di rifiuto della teoria, reazione denominata di *non accettazione*. Lo studio ha mostrato che, negli studenti che non accettano la fisica quantistica, appaiono non soddisfatte esigenze cognitive ed epistemologiche riconoscibili come:

- esigenze di visualizzazione, ovvero la necessità di fare riferimento a immagini mentali sintetiche che orientino nell'analisi dei fenomeni e nella costruzione di strumenti matematici;
- esigenze di confrontabilità, ovvero la necessità di avere criteri per confrontare il mondo classico e quello quantistico;
- esigenze di realtà, ovvero il bisogno di fondare la una conoscenza sul piano ontologico.

Questi risultati hanno portato il gruppo a valutare come il percorso possa essere ancora rivisto per soddisfare tali esigenze e quali nuove attività possano essere progettate per andare in questa direzione. Lo studio sulle metafore progettato e realizzato in questa tesi è una delle strade esplorate.

La tesi di Luca Lodovico, *“Processi di appropriazione nello studio della fisica quantistica: analisi di una sperimentazione didattica in una quinta liceo scientifico”* mirava ad analizzare le sperimentazioni per valutare se il percorso progettato riusciva, in effetti, a favorire processi di appropriazione. Ciò che è emerso è che, come si auspicava, il percorso è stato in grado di coinvolgere studenti con interessi molto diversi e ha raggiunto anche chi non ha di sé un'immagine di studente “portato per la fisica”.

L'analisi di Lodovico ha inoltre messo in evidenza una particolare relazione tra appropriazione e comprensione delle metafore utilizzate nel percorso didattico.

In particolare, è emerso che gli studenti che si sono appropriati dei contenuti del percorso hanno ritenuto molto utili le metafore utilizzate:

"[Le metafore] mi hanno aiutato tantissimo... Quella dei calzini di Erwin l'ho capita, il discorso organizzativo, quello che deve venir fuori dalla metafora...[Occorre] pensare ad uno Stern e Gerlach come se fosse un criterio di organizzare i calzini..." (Federico, pseudonimo).

Federico non solo ha capito la metafora e come viene utilizzata nel percorso, cogliendo il sistema sorgente e il sistema target e la relazione che li lega, 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 (Lodovico, 2016, p. 98).

Dall'altra parte troviamo Carlo (pseudonimo), uno *studente particolarmente creativo e con uno spiccato interesse in campo musicale*. Carlo ha apprezzato molto le immagini utilizzate nel percorso ma non è riuscito ad entrare nella logica quantistica, rimanendo ancorato a immagini classiche. A differenza di Federico ha trovato le metafore utilizzate per l'indeterminazione e per Stern e Gerlach difficili e, per questo, di nessun aiuto.

Come riporta Lodovico, nell'intervista con Carlo, si nota che lo studente non utilizza mai esplicitamente la parola metafora, mentre fa spesso riferimento a immagini, di cui ha apprezzato il potere evocativo. Ciò che Carlo non è stato in grado di cogliere è quello che Federico chiamava il *discorso organizzativo* (Lodovico, 2016, p. 104). Come sostiene Lodovico, i calzini o il menù cinese erano immagini che non avevano lo stesso potere evocativo del cilindro o dell'ornitorinco: senza una lettura genuinamente metaforica, ovvero senza evidenziare le relazioni tra il sistema target e quello sorgente, la metafora in sé non aveva significato.

Questo risultato ha fatto sorgere le domande di fondo che hanno ispirato il presente lavoro di tesi: le difficoltà di Carlo risiedevano nella comprensione della logica quantistica o nel funzionamento del meccanismo metaforico? L'utilizzo di metafore può essere di per sé una ulteriore complicazione per studenti di scuola secondaria? E' possibile inventare attività didattiche finalizzate a far riconoscere la metafora come strumento costitutivo del pensiero scientifico e farla diventare uno strumento conoscitivo, in accordo a quanto argomentato nel capitolo 1?

Per affrontare queste domande è stato predisposto un progetto che sarà descritto nel paragrafo che segue. Come si vedrà, il progetto ha previsto la selezione di alcune metafore in fisica quantistica e la progettazione e sperimentazione di attività didattiche che le valorizzassero come strumento cognitivo atto a favorire un processo di appropriazione dei contenuti fisici. La sperimentazione delle attività è stata svolta in contesti di formazione degli insegnanti. Pertanto, dopo aver illustrato il progetto di tesi e gli strumenti utilizzati, si descrivono i contesti specifici di sperimentazione per cui il progetto è stato formulato.

2.2 PROGETTO DI TESI E PIANO DI LAVORO

Al fine di determinare se la metafora sia uno strumento consono all'insegnamento-apprendimento di concetti scientifici, in particolare di fisica quantistica, si è previsto un piano di lavoro articolato in più fasi:

1. Scelta delle metafore e loro validazione da parte di un team di esperti in fisica quantistica o fisica teorica. In particolare, sono state condotte interviste individuali (nell'appendice B è riportato il protocollo) con 6 esperti al fine di valutare la qualità della metafora: quali conoscenze o concetti base intende veicolare; quali sono le limitazioni, le ambiguità che il linguaggio metaforico potrebbe presentare. Oltre a questo gli esperti sono stati intervistati circa la loro esperienza sull'utilizzo di questo strumento nel loro lavoro di fisici e nelle loro esperienze di insegnamento e/o divulgazione della fisica. Le osservazioni fornite dagli

esperti sono pensate per essere la base di partenza per la progettazione di attività didattiche da realizzare con insegnanti e in classi di Liceo.

2. Progettazione dell'attività didattica e studio pilota per la validazione dell'attività. Oltre alla scelta delle metafore e una loro validazione, è stato importante progettare una possibile attività in cui le metafore diventassero uno strumento didattico e cognitivo per i) favorire l'approfondimento di concetti di fisica, ii) innescare un coinvolgimento attivo e fecondo tra i partecipanti dell'attività. L'attività progettata (si veda l'allegato C) è stata validata nell'insegnamento di Storia della Fisica, tenuto dalla professoressa O. Levrini, nel corso di Laurea Magistrale in Fisica. L'attività consiste in una analisi di gruppo, guidata da una griglia di analisi, sviluppata in collaborazione con il prof. M. Viali, del dipartimento di Filologia Classica e Italianistica dell'Università di Bologna. Questo è pensato per valutare sia la difficoltà della metafora sia l'efficacia didattica.
3. Sperimentazione della attività in un contesto di formazione in servizio. Si tratta della fase di sperimentazione vera e propria, condotta nell'incontro del 20 dicembre nell'ambito del Corso di Formazione in servizio PLS descritto nei paragrafi precedenti.

Di seguito si descrivono più in dettaglio gli strumenti utilizzati (le metafore scelte, i protocolli di intervista e le attività progettate) nonché il gruppo di insegnanti con i quali è stata condotta la sperimentazione.

2.3 STRUMENTI

In questo paragrafo saranno illustrati e motivati brevemente gli strumenti utilizzati per condurre la sperimentazione. I testi delle metafore, le domande dell'intervista e le attività svolte saranno riportati integralmente in appendice.

2.3.1 LE METAFORE

I brani sono stati scelti da diversi libri divulgativi di autori noti (prevalentemente scienziati americani) i quali si propongono, con esempi pittoreschi e avvincenti, di spiegare ad un vasto pubblico concetti di base della meccanica quantistica come indeterminazione o quantizzazione dell'energia. Un ultimo esempio è stato preso invece da un libro di testo universitario di introduzione alla Meccanica Quantistica.

La scelta di ricercare i brani in libri di divulgazione, quindi accessibili ad un vasto pubblico con un diverso tipo di conoscenza nella materia specifica, e non in riviste specializzate o testi universitari, è giustificata dal fatto che si vuole cercare di analizzare metafore semplici e dirette che possano essere sottoposte in un futuro progetto a ragazzi di una classe quinta liceo.

Le metafore scelte possono essere divise nel seguente modo (i testi completi sono riportati in appendice A):

Metafore riguardanti la discretizzazione dell'energia

- Brian Greene (1999), L'universo elegante, Einaudi, p. 41. *Quantizzazione dell'energia e corpo nero*
- Brian Greene (1999), L'universo elegante, Einaudi, p. 44. *Effetto fotoelettrico*

Metafora sul dualismo onda-corpuscolo

- Lévy-Leblond (2003), On the nature of quanta. *Science & Education, Metafora dell'ornitorinco*

Metafora sulla funzione d'onda

- Jim al-Khalili (2014), La fisica dei perplessi, Nuovi saggi bollati Boringhieri *Metafora del ladro*

Metafore riguardanti concetti di base di fisica quantistica

- Brian Greene (2004), La trama del cosmo, Einaudi p. 95. *Metafora del menù cinese*
- David H. McIntyre 2012, Quantum mechanics – A paradigms approach, p. XXI. *Metafora dei calzini di Erwin.*

2.3.2 I PROTOCOLLI DI INTERVISTA

Il modello utilizzato per le interviste è quello dell'intervista semi-strutturata, con un elenco di domande che, fungendo da bussola, servono ad orientare il conduttore affinché il colloquio rimanga centrato sull'argomento. Tuttavia, le interviste prevedono che l'intervistato abbia tutto lo spazio e il tempo che desidera per esprimere il suo parere. Anche queste domande sono state definite insieme al prof. Viali. Gli intervistati sono stati scelti per le loro conoscenze e competenze sui temi delle metafore. In particolare, il gruppo include:

- Cristian degli Esposti Boschi, ricercatore presso il CNR-IMM

- Elisa Ercolessi, professoressa presso il Dipartimento di Fisica e Astronomia
- Giorgio Lulli, ricercatore del CNR-IMM (l'istituto per la microelettronica e microsistemi)
- Bruno Marano, professore presso il Dipartimento di Astronomia e Astrofisica
- Francesco Ravanini, professore presso il Dipartimento di Fisica e Astronomia
- Niccolò Vernazza, dottorando presso il Dipartimento di Fisica e Astronomia

Il protocollo prevede un'articolazione in due fasi. La prima parte, composta da due domande, è focalizzata sull'analisi delle metafore sottoposte: quali sono i concetti che la metafora illustra in modo efficace e accettabile e quali invece sono gli aspetti assenti o presentati in modo discutibile; quali corrispondenze sono rappresentate tra gli elementi della metafora e quelli del fenomeno fisico. Con le successive tre domande invece si chiedono pareri personali riguardo l'utilizzo di metafore nell'insegnamento o divulgazione della fisica, o nel proprio lavoro ricerca; più nello specifico si chiede se la metafora è, per loro, uno strumento comunicativo efficace e se è stata anche uno strumento scientifico, in grado di generare nuove idee.

2.3.3 ATTIVITA' PROPOSTA AGLI INSEGNANTI

La prima attività progettata consiste in una analisi di gruppo delle metafore, da condurre sulla base di una griglia, strumento concepito e sviluppato in collaborazione del prof. M. Viali. La griglia consiste in una semplice tabella a due colonne: in una andranno indicati i personaggi, gli oggetti e le azioni presenti all'interno della metafora che si pensa abbiano una controparte nel fenomeno fisico, nell'altra si chiede di associare ad ognuno degli elementi individuati il corrispettivo fisico. Benché molto semplice, la griglia è ritenuta efficace per mostrare come funziona lo strumento metafora: l'individuazione dei termini metaforici e la costruzione delle corrispondenze permette di proiettare il sistema fisico all'interno della metafora e guidare una sua rielaborazione ed esplorazione.

I testi integrali dell'attività e le griglie di analisi sono riportate in nell'appendice D e E.

L'attività è stata vagliata con gli studenti del corso di Storia della Fisica della Laurea Magistrale in Fisica e, sulla base di questa validazione, si è ritenuto utile completare l'analisi con una seconda attività (attività 2) nella quale si chiede di confrontare la tabella costruita dal gruppo con una tabella costruita sulla base delle interviste degli esperti per evidenziare le differenze.

L'attività 3 è stata progettata soltanto per il gruppo di insegnanti del corso PLS con lo scopo di offrire ai partecipanti di ricostruire, tramite discussione di gruppo, gli aspetti salienti e la logica che sta alla base dell'esperimento di Stern e Gerlach, introdotta nella lezione della prof.ssa Ercolessi. Vengono riportate tre differenti configurazioni dell'apparato sperimentale e si chiede di illustrare il

significato dei vari esperimenti e di ricostruirne il ragionamento che permette di interpretare i risultati sperimentali. Si invita inoltre gli insegnanti anche ad utilizzare la notazione di Dirac per denotare gli stati e di calcolare la probabilità di un risultato, familiarizzando con i concetti *stato di sovrapposizione, ampiezza di probabilità, preparazione-processo-misura*.

Con l'ultima attività, la numero 4, si vuole studiare la forza cognitiva della metafora, la capacità di trasferire concetti, proprietà e costrutti logici da un sistema all'altro. Per fare questo, si chiede ai gruppi di discutere e di compilare la griglia di analisi per la metafora dei *Calzini di Erwin* (al fine di trovare le corrispondenze come nell'attività 1) e di illustrare gli stati di sovrapposizione in cui si trovano i calzini nella metafora con il formalismo imparato per l'analisi degli esperimenti di Stern e Gerlach.

2.4 I CONTESTI DELLE SPERIMENTAZIONI DELLE ATTIVITA' E I GRUPPI DI INSEGNANTI

Il gruppo per la validazione dell'attività 1 è formato da 18 studenti (13 maschi e 5 femmine) provenienti da diversi corsi di laurea e diversi curricula. In particolare ci sono 3 studenti di Matematica e 15 studenti di Fisica, questi ultimi suddivisi tra i corsi di specialistica in Fisica della Materia, Fisica Applicata e Teorica.

La sperimentazione vera e propria è stata svolta in un corso di formazione realizzato nell'ambito del Piano Lauree Scientifiche di cui si riportano, qui di seguito, le principali caratteristiche.

2.4.1 IL PIANO LAUREE SCIENTIFICHE E IL CORSO DI FORMAZIONE DEGLI INSEGNANTI

Il Progetto Lauree Scientifiche (PLS), frutto della collaborazione del Ministero dell'Università e dell'Istruzione, della Conferenza Nazionale dei Presidi di Scienze e Tecnologie e di Confindustria è nato nel 2004 con la motivazione iniziale di incrementare il numero di iscritti ai corsi di laurea in Chimica, Fisica, Matematica e Scienza dei materiali ed ha svolto il suo lavoro dal 2005 al 2009.

Gli obiettivi principali del PLS erano, all'inizio, tre: migliorare le conoscenze e la percezione delle materie scientifiche nella Scuola di secondo grado tramite attività di laboratorio curricolari ed extra curricolari stimolanti e coinvolgenti per gli alunni; avviare un processo di crescita personale dei docenti di materie scientifiche in servizio nella scuola secondaria promuovendo il lavoro congiunto tra Scuola e Università per progettazione, realizzazione e valutazione dei laboratori per studenti; potenziare ed ottimizzare i percorsi formativi dalla Scuola all'Università e successivamente al mondo del lavoro, incentivando *stages* e tirocini presso Università, enti di ricerca, imprese dedicate.

Questa azione di orientamento formativo degli studenti, integrata con la formazione degli insegnanti si è realizzata attraverso più di 100 sotto-progetti, sotto la responsabilità di referenti locali presso atenei distribuiti su tutto il territorio nazionale, organizzati in quattro progetti nazionali di area: Chimica, Matematica, Fisica, Scienza dei Materiali. Al termine del quinquennio, il PLS aveva realizzato svariate attività, generalmente molto apprezzate, e aveva proposto sperimentazioni e diffusioni di modelli efficaci di orientamento, di formazione di docenti e di relazioni tra Scuola e Università che hanno mostrato di poter avere significative ricadute sul tema più ampio e delicato dell'insegnamento-apprendimento delle materie scientifiche nella Scuola; ha inoltre contribuito in maniera positiva all'incremento di immatricolazioni ai corsi di laurea interessati.

I risultati raggiunti e la positività riscontrata in termini di collegamento tra i diversi soggetti istituzionali inducono il Ministero dell'Istruzione dell'Università e della Ricerca a rilanciare il Progetto Lauree Scientifiche (Ottobre 2009) con l'obiettivo di mettere a sistema e di migliorare le pratiche e le sperimentazioni già proposte nei cinque anni successivi. Indicativo è il cambio del nome: da *Progetto Lauree Scientifiche* a *Piano nazionale Lauree Scientifiche*, proprio a voler sottolineare la necessità di passare dalla sperimentazione alla realizzazione di un sistema, una metodologia su scala nazionale.

Anche in questo periodo la precedenza è data al rapporto studente-disciplina scientifica. Il piano infatti si propone di offrire a studenti degli ultimi anni delle scuole superiori opportunità di conoscere temi, problemi e procedimenti caratteristici del sapere scientifico, anche in relazione a settori lavorativi e professionali, al fine di accrescere o evidenziare interessi per un proprio progetto personale. Questa azione è compito primario dell'istituto scolastico a cui l'alunno appartiene e degli insegnanti stessi, sempre in collaborazione con l'università.

Dal 2015, il PN-PLS ha cambiato ancora i suoi obiettivi, mettendo come priorità il miglioramento della didattica universitaria per far fronte al problema degli abbandoni nei corsi di laurea scientifici e la formazione in servizio degli insegnanti, per accompagnarli nell'applicazione delle Indicazioni Nazionali. Le finalità della formazione degli insegnanti sono infatti quelle di aggiornare le loro conoscenze disciplinari e interdisciplinari e le loro capacità di interessare e motivare gli allievi nell'apprendimento delle materie scientifiche, nonché di sostenere lo studente nel processo di orientamento pre-universitario.

Alla luce del quadro esposto finora, è possibile affermare che in Italia si sta cercando su diversi fronti di intervenire in modo consistente e significativo sull'insegnamento della fisica, sia per quello che riguarda i contenuti, sia per quello che riguarda le metodologie dell'insegnamento-apprendimento. Per la ricerca in didattica della fisica, si sta dunque ponendo il grosso problema di

produrre materiali e creare contesti di formazione che, al contempo, rafforzino le conoscenze disciplinari e veicolino innovazioni didattiche dal punto di vista metodologico.

Anche il Dipartimento di Fisica e Astronomia di Bologna partecipa attivamente al PLS, organizzando ogni anno diverse attività (<http://www.pls.unibo.it>). Per l'anno corrente, sono stati organizzati laboratori per studenti degli ultimi anni di scuola secondaria di II grado, una scuola estiva intensiva per 50 studenti di IV superiore di Euro-progettazione sul tema dei cambiamenti climatici e un corso di formazione per docenti in servizio sull'insegnamento-apprendimento della fisica quantistica.

Il corso di formazione di quest'anno è stato studiato per dare una risposta concreta in termini di metodi, materiali e approcci alla crescente preoccupazione dovuta all'inserimento della disciplina Fisica del '900 come seconda prova di esame di maturità nei licei scientifici. Obiettivo principale del corso era dunque analizzare criticamente i contenuti delle Indicazioni Nazionali relativi alla fisica quantistica alla luce dei principali risultati in didattica della fisica quantistica circa le difficoltà degli studenti e lo sviluppo di possibili strategie didattiche, sulla base di sperimentazioni condotte in classi di V liceo dell'Emilia Romagna.

Nello specifico, il corso è finalizzato a riflettere sulle conoscenze di base della fisica quantistica in prospettiva didattica e a sviluppare competenze nell'insegnante volte ad analizzare in modo critico i libri di testo, condurre scelte consapevoli nella trattazione dei nodi concettuali e scegliere e utilizzare risorse e materiali didattici di sostegno alla propria attività in classe. Il corso, iniziato il 4 novembre, si è svolto presso il Dipartimento di Fisica e Astronomia, viale Berti Pichat 6/2 e ha previsto 7 incontri di tre ore ciascuno. Il workshop viene presentato e portato avanti dal gruppo di lavoro UNIBO sull'insegnamento della fisica quantistica, che vede coinvolti docenti del DIFA, docenti del Dipartimento di Matematica, docenti di Liceo Scientifico, assegnisti di ricerca e dottorandi.

Di seguito, si riportano in elenco gli interventi effettuati nell'inverno 2016-2017:

- Venerdì 4 novembre: Indicazioni Nazionali e risultati di ricerca in Didattica della Fisica: panoramica sui principali risultati e riflessioni su possibili linee guida per la progettazione di un percorso didattico (O. Levrini, DIFA).
- Venerdì 18 novembre: Workshop di *cooperative learning* sul tema del corpo nero (gruppo di lavoro UNIBO).
- Venerdì 2 dicembre: Workshop di approfondimento sui concetti-chiave previsti nelle Indicazioni (lavori di gruppo effetto fotoelettrico, effetto Compton, atomo di Bohr) (gruppo di lavoro UNIBO).

- Venerdì 16 dicembre: La struttura interpretativa della fisica quantistica e sue applicazioni (Elisa Ercolessi, DIFA).
- Martedì 20 dicembre: Le metafore in fisica quantistica (gruppo di lavoro UNIBO).
- Venerdì 27 Gennaio: Seminario sui problemi e sugli esercizi in fisica quantistica (dott. M. Malgieri, Dipartimento di Fisica, Università di Pavia).
- Venerdì 3 Marzo: Condivisione dei lavori di gruppo su effetto fotoelettrico, effetto Compton e atomo di Bohr. Conclusioni sul concetto di appropriazione e riflessione a posteriori sui criteri scelti per la progettazione del corso (gruppo di lavoro UNIBO)

Ai 48 insegnanti iscritti al corso di formazione PLS 2016/2017 è stato sottoposto un questionario iniziale per sondare le conoscenze, le caratteristiche e le incertezze o dubbi che li avevano spinti a frequentare un corso di aggiornamento sulla fisica quantistica.



Figura 2.1: Panoramica degli insegnanti del corso PLS.

Come mostra la figura 2.1, il gruppo dei partecipanti, tutti insegnanti di liceo, prevalentemente liceo scientifico, si divide nettamente in laureati in matematica o in fisica. I dati riguardanti lo studio della meccanica quantistica e sull'utilizzo dei libri fanno notare come solo una metà dei partecipanti abbia effettivamente studiato la materia in ambito universitario e con testi e strumenti avanzati mentre l'altra metà ha studiato sui manuali di scuola secondaria o su libri di divulgazione.

I dati raccolti mostrano quanto gli insegnanti confidino, in generale, nelle loro conoscenze concettuali e formali nel campo della fisica in generale (fig.2.2), ma che, per quello che riguarda le loro esigenze sulla fisica quantistica (fig.2.3), sentono l'esigenza di approfondire i concetti e di discutere metodi e strategie didattiche adeguate all'insegnamento di questo ambito disciplinare.

Su quali dimensioni/aspetti della Fisica ti senti più a tuo agio? (48 risposte)

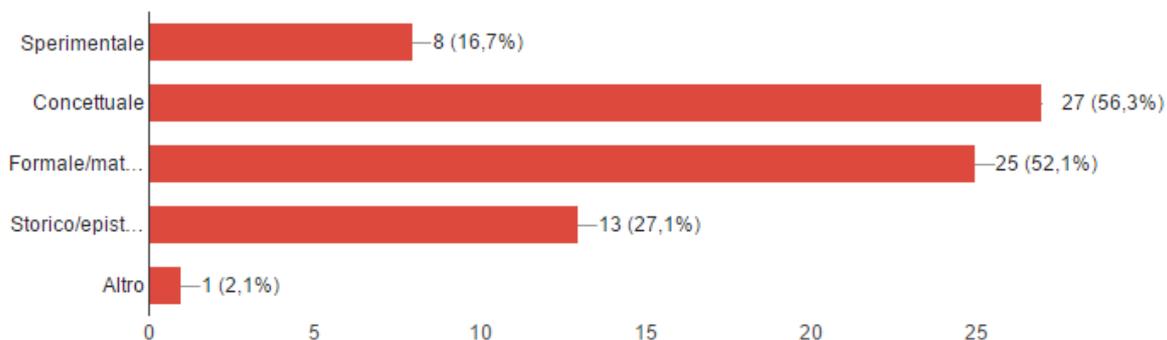


Figura 2.2: Campi in cui i docenti hanno fiducia delle loro conoscenze.

Su quali aspetti della Fisica Quantistica desidereresti un approfondimento in questo o in altri corsi futuri?

(48 risposte)

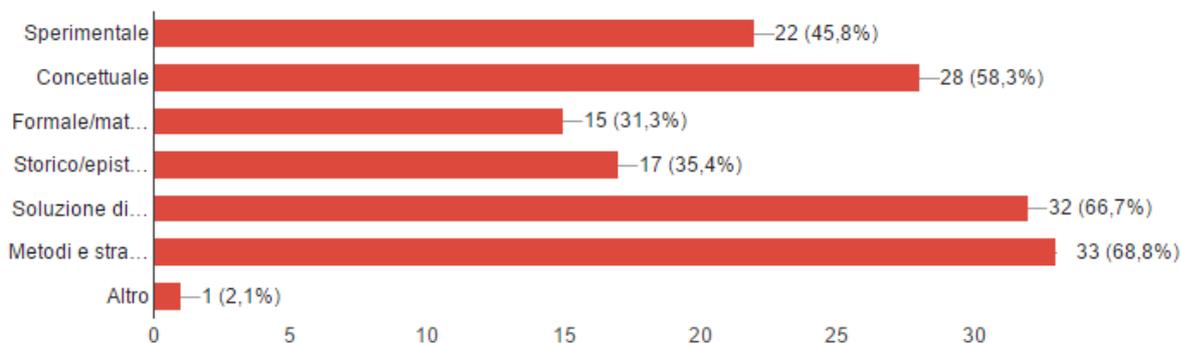


Figura 2.3: Risposte raccolte dai docenti del corso PLS

2.4.2 DOMANDE DI RICERCA E RACCOLTA DATI

Alla luce di quanto detto sulle difficoltà e sull'utilizzo della metafora in contesti didattici nel capitolo 1 e dei risultati di sperimentazioni su classi di liceo all'interno delle attività del gruppo di Bologna, le domande a cui questa tesi vuole dare risposta possono essere sintetizzate in questo modo:

1. Le attività didattiche progettate sono efficaci per guidare l'analisi delle metafore scelte sulla fisica quantistica e far riconoscere da questi gli argomenti fisici che esse illustrano?

2. Le attività stimolano la discussione critica, riguardo all'argomento che la metafora espone, promuovono un'analisi dei limiti della metafora e, dunque, una dinamica creativa finalizzata a migliorare le corrispondenze tra i due sistemi?
3. In generale, la metafora può essere utilizzata come strumento conoscitivo finalizzato a consolidare la comprensione di fenomeni quantistici e della logica che sta alla base degli stessi? Può aiutare nella comprensione e nell'appropriazione del formalismo matematico?

Per rispondere a queste domande sono stati analizzati diversi dati raccolti durante le varie attività:

(a) Registrazione e trascrizione delle interviste individuali condotte con gli esperti.

Le interviste condotte per la validazione delle metafore sono state audio-registrate e trascritte. Sulla base di questi transcript, è stata riempita dal sottoscritto la griglia con le corrispondenze riconosciute dagli esperti. Agli esperti è stato quindi chiesto di controllare la significatività della griglia. Il risultato sarà riportato e discusso nel prossimo capitolo.

(b) Risposte per iscritto al questionario e griglie compilate.

Per rispondere alle domande di ricerca sono stati presi in considerazione i fogli delle risposte e le griglie compilate sia da parte degli studenti del corso di storia sia da parte dei docenti del corso PLS: nel capitolo 3 si riporteranno le griglie delle corrispondenze così come sono state costruite dai partecipanti alle attività e si discuteranno in confronto con le griglie degli esperti costruite da me alla luce delle interviste.

Il confronto tra le griglie permetterà di vedere se l'attività è risultata efficace a fare emergere le corrispondenze e quale è il grado di difficoltà incontrato da studenti e docenti.

La sperimentazione delle attività è inoltre stata analizzata al fine di rispondere alla seconda domanda e valutare se l'attività stessa innesca dinamiche interessanti e creative di discussione innesca all'interno del gruppo stesso. Per rispondere all'ultima domanda, l'analisi si è concentrata sulle risposte alle attività 3 e 4 con i docenti e i fogli di risposta sono stati analizzati per valutare se la metafora ampliava in modo significativo l'ambito di applicazione del formalismo e poteva rappresentare un contesto efficace per mettere alla prova la trasferibilità delle conoscenze acquisite nel contesto di Stern e Gerlach.

CAPITOLO 3:

Analisi dei dati raccolti e risultati della sperimentazione

3.1 VALIDAZIONE DELLE METAFORE DA PARTE DI ESPERTI

Le metafore scelte sono state sottoposte al parere di esperti al fine di verificarne i contenuti, estrapolarne le informazioni interessanti e sondare i limiti dei racconti. Questo è servito per capire quale fossero le metafore migliori, coerenti con il sistema fisico e didatticamente interessanti da usare in classe e proporre agli insegnanti del corso PLS.

Si riporta in seguito l'analisi fatta, metafora per metafora, dagli esperti e i loro principali commenti: sono evidenziate le opinioni e le principali corrispondenze trovate, i limiti del brano e la griglia d'analisi riassuntiva. I testi delle metafore sono presenti in appendice.

METAFORA SULL'EFFETTO FOTOELETTRICO

Valutazione generale:

La metafora dell'effetto fotoelettrico è ritenuta un brano molto semplice e lineare che nelle sue corrispondenze presenta "[...]tutto quello che c'è da sapere sull'effetto fotoelettrico."

"Il 'qualcosa di giusto' è il tentativo di descrivere una condizione reale attraverso lo scambio, in questo caso di una moneta, e abbiamo capito in questo caso che è l'energia che si scambia", e che, come gli elettroni "[i bambini] possono uscire da lì solo se ricevono una certa quantità di denaro". Gli esperti sono inoltre d'accordo che, essendo "l'effetto fotoelettrico, tra tutti gli effetti, il più banale che si possa pensare una volta appropriatosi del concetto di quantizzazione", quando e come utilizzare questa metafora nel campo dell'insegnamento deve essere scelto con molta cura. Non è infatti scontato che non introduca complicazioni inutili.

Limiti:

Il racconto presenta anche alcuni limiti concettuali, elementi in cui la metafora non rappresenta in modo preciso il fenomeno descritto.

Il primo punto sottolineato è che, le monete, la differenza dell'energia, hanno valori discreti, mentre la radiazione che arriva sulla lamina di metallo ha frequenze che possono assumere tutti i valori (lo spettro della radiazione incidente è continuo):

"Si evince che la radiazione incidente possa avere solo valori discreti, perché in questo caso la radiazione incidente è rappresentata dai soldi che i genitori lanciano ai bambini e questi soldi sono discreti...sono 50 lire o 100! Mentre una radiazione che incide su una lamina di metallo può avere valori continui".

Un secondo punto di confusione sottolineato, piuttosto sottile, riguarda l'interazione, rappresentata dalla raccolta delle monete stesse, e la probabilità che un elettrone possa assorbire un fotone quando si trova in uno stato eccitato. Il punto è espresso da un esperto in questo modo :

"Uno può pensare, e secondo me non sbaglia, che dato che i bambini sono infiniti ma sono infiniti anche i genitori, prima o poi si può immaginare che un bambino riesca ad accattare due banconote da 500, e questo nell'effetto fotoelettrico...non lo so! Mi sembra abbastanza raro che un elettrone riesca a ricevere due fotoni, uno e poi un altro mentre è nello stato eccitato, non so quali siano le probabilità "

Infine il brano non indica che ci possa essere un valore di energia per la radiazione superiore di quella minima che permetta di colmare il gap e rimanere con un minimo di energia cinetica:

"[...] la radiazione incidente può essere 'potente' quanto vuole... una volta superato il gap... l'elettrone avrà un'energia cinetica uguale a quella del fotone tolta la funzione lavoro."

Tabella 3.1: Griglia delle corrispondenze per la metafora dell'effetto fotoelettrico

<i>Termini nella metafora</i>	<i>Termini del fenomeno fisico reale</i>
bambini	elettroni
Il proprietario costringe tutti i minori di quindici anni a vivere in un seminterrato	l'elettrone si trova in uno stato legato
Seminterrato/ stanza	stato legato in cui si trova l'elettrone prima dell'interazione con la radiazione/ orbitale
un bambino può lasciare quel postaccio solo se paga a una guardia una tassa di 950 lire.	un elettrone può essere estratto dall'atomo soltanto a costo di un lavoro di estrazione
tassa	lavoro di estrazione
adulti che lanciano le monete	radiazione incidente
monete/banconote	radiazione (nella forma di "pacchetti discreti" di energia) con cui viene colpito l'atomo e, quindi, l'elettrone
50, 100, 1000 lire	valori possibili dei pacchetti di energia
I soldi sono stati ridistribuiti in modo che ogni adulto possieda solo banconote e monete di un unico tipo.	La radiazione incidente non è monocromatica e l'energia trasportata è "distribuita" sulle diverse lunghezze d'onda
Il portatore delle cinquanta lire inizia a gettare qualche moneta	La radiazione di una certa lunghezza d'onda colpisce l'atomo
Raccogliere	Assorbire un fotone
I fortunati bambini che riescono ad afferrare anche un solo biglietto (da 1000 lire) possono andarsene immediatamente.	Gli elettroni colpiti da un fotone "sufficientemente" energetico (che supera il valore di soglia) vengono estratti

Andarsene con il resto	L'elettrone, dopo l'estrazione, possiede una energia cinetica pari a $E = hv - W$
resto	Energia cinetica che rimane all'elettrone, una volta estratto $E = hv - W$
Al crescere della quantità di banconote gettate cresce anche il numero dei fuggiaschi	Al crescere del numero dei fotoni che interagiscono con l'atomo, cresce l'intensità del fascio di elettroni estratti

METAFORA SUL CORPO NERO

Valutazione generale:

Questa metafora è molto articolata dal punto di vista logico, complessa nelle corrispondenze e ricca di particolari che possono essere anche fuorvianti. Gli esperti suggeriscono che, più che introdurre il concetto di corpo nero, può essere utilizzata per dare un'immagine di che cosa sia la quantizzazione dell'energia.

"[...] secondo me le metafore devono avere come intuizione quello di far apprendere, a chi non ha gli strumenti matematici o appropriati, il significato di quello che sta succedendo, del sistema fisico...E io francamente ho fatto molta fatica a vederci un corpo nero in questa. La cosa interessate è che lui [l'autore] riesce a rendere finita la somma dei soldi di questi infiniti inquilini".

Come per la prima metafora, anche in questo caso è semplice riconoscere l'analogia moneta/energia come oggetto di scambio:

"I soldi che le persone danno a questo proprietario dovrebbe essere la radiazione emessa e quindi l'energia. [...] La somma delle energie di questi infiniti oscillatori, che corrispondono alle persone, dovrebbe essere infinita secondo la teoria classica."

"La somma che lui [il proprietario] riceve dipende dalla temperatura"

Gli individui rappresentano per gli esperti gli oscillatori armonici classici delle pareti interne del corpo nero, che a una data temperatura 'restituiscono' una determinata energia:

"Ci sono questi soldi che vanno al proprietario, come appunto c'è qualcosa che dall'interno va verso l'esterno: questa è la radiazione emessa dal corpo nero. La somma [delle energie] di infiniti oscillatori, che corrispondono alle persone, dovrebbe essere infinita secondo la teoria classica. Però, con questo 'trucchetto' che loro utilizzano, le persone *alias* gli oscillatori, il proprietario riesce a guadagnare una cifra solamente finita, non infinita come lui si aspettava.

Ma comunque non c'è nessun tipo di assorbimento."

La corrispondenza tra individui ed oscillatori classici giustifica infatti la famosa catastrofe ultravioletta, che può essere solamente evitata tramite il 'trucchetto' utilizzato dagli individui, ovvero introducendo la quantizzazione dell'energia. In questo frangente però si nota già uno dei

principali pericoli che gli esperti hanno trovato, ovvero la mancanza del concetto di equilibrio tra radiazione emessa e radiazione assorbita.

Limiti:

A causa della sua complessità e dei nodi concettuali espressi in maniera inadeguata o del tutto assenti nel testo, la metafora ha lasciato gli esperti alquanto insoddisfatti. Questi notano debolezze circa il concetto di equilibrio tra il processo di assorbimento e quello di emissione, che sta alla base del fenomeno del corpo nero e che non è abbastanza evidenziato nella metafora:

"Il corpo nero è complicato perché ha dentro un concetto di equilibrio tra materia e radiazione."

"Non è ben sottolineato il momento dello scambio che sussiste fra la radiazione incidente e la materia che inizia a vibrare e sembra quasi che questa radiazione, cioè i soldi degli inquilini, esca fuori dal cilindro ed interagisca [...] con la materia.[...] Non c'è nessun tipo di assorbimento, solo emissione e se uno vuole capire lo scopo vero, deve capire che ogni corpo assorbe ed emette ciò che assorbe. Il corpo nero assorbe tutto ed emette tutto. Qui non c'è l'assorbimento."

Infine, tutti i professori sono d'accordo sul dichiarare fuorviante e pericolosa l'ultima frase del brano "*[...] un'energia minima intrinseca più grande del valore che dovrebbe teoricamente fornire all'energia totale, non «paga» e rimane inerte*", perché non rispecchia la realtà fisica:

“Questa frase qui è proprio sbagliata, [un corpo nero] non rimane inerte. Il concetto di corpo nero è sostanzialmente l'opposto... Il corpo nero assorbe in maniera democratica qualunque fotone gli arrivi e lo 'ricicla'. Il punto vero è che [per un corpo nero] qualunque fotone tu gli mandi lo assorbe. [...] Nell'effetto fotoelettrico [il sistema] reste inerte, ma in quel contesto bisogna stare attenti, perché nell'effetto fotoelettrico resta inerte chi ha un'energia più bassa di una certa soglia. Chi ha un'energia più alta fa altre cose, più complicate.”

Tabella 3.2: Griglia delle corrispondenze per la metafora del corpo nero

<i>Termini nella metafora</i>	<i>Termini del fenomeno fisico reale</i>
Numero infinito di individui	Onde all'interno del corpo nero/ oscillatori
Stanzone gelido	Interno della cavità rappresentante un corpo nero
Termostato	Misuratore della temperatura e, quindi, indicatore dell'equilibrio termico all'interno della cavità.
Numero infinito di individui	Numero degli oscillatori delle pareti su cui può essere distribuita l'energia totale presente nella cavità (nell'ipotesi classica di continuità del campo stesso).

Tariffa imposta dal proprietario (a seconda della temperatura)	Quantità di energia emesso da ciascun oscillatore, in virtù della temperatura, nell'ipotesi termodinamica classica
Quantità infinita di denaro guadagnata dal proprietario	Catastrofe ultravioletta
50,100,...,50000 lire	Discretizzazione dei "pacchetti" d'energia che il campo può scambiare con gli oscillatori delle pareti
Raccogliere i soldi [...] organizzare il pagamento	Quantizzazione/ nuovo modo di "contare"
Un individuo prende tutte le monete da 50 lire, un altro tutte quelle da 100, e così via	Divisione delle energie degli oscillatori in base alla loro frequenza, come multipli di una grandezza fondamentale, come illustra il postulato di Planck [<i>Qualsiasi grandezza fisica con un grado di libertà la cui "coordinata" è una funzione sinusoidale del tempo può possedere solo energie totali E tali che sia soddisfatta la relazione $E=nhv$</i>]
Il proprietario si ritrova invece con la misera somma di 2.450 000 lire (ci sono 9 tipi di monete e banconote dalle 50 alle 50.000 lire, e quindi 9 persone che possono pagare 1e 250.000; aggiungendo 1e 200.000 pagate da chi ha le banconote da 100.000 il conto torna).	Tramite le intuizioni di Planck, sostituendo all'integrale per il calcolo dell'energia media una sommatoria sui valori discreti dell'energia, si riesce superare i risultati di Rayleigh-Jeans ed evitare la catastrofe ultra violetta

METAFORA SULLA FUNZIONE D'ONDA

Valutazione generale:

Anche questa metafora è stata bene accolta dagli esperti che l'hanno analizzata:

"L'ho trovata molto chiara per dare un' idea di come il concetto di funzione d'onda descriva il concetto di una funzione che varia nello spazio e nel tempo[...] questa idea del ladro che si distribuisce nello spazio e nel tempo può essere colta da una persona che non è ancora stata in contatto con questioni di Meccanica Quantistica e anche di questione probabilistiche."

"La metafora è molto efficace perché fa riferimento ad una mappa della città che è, come dire, quella che viene chiamata la 'rappresentazione' a cui noi attacchiamo la funzione d'onda, [in questo caso] una funzione della coordinata spaziale. [...]Naturalmente questa metafora ci dice non tanto che cos'è la funzione d'onda quanto il suo modulo quadro, cioè la probabilità di trovare la particella."

"Veramente non è banale dare un'intuizione del fatto, quando si misura la funzione d'onda, in questo caso quando si misura lo spazio dove ha agito il ladro, si provoca un collasso della

funzione d'onda e da lì, da quel punto dove siamo sicuri che il ladro ha agito, riparte in un certo senso l'onda di probabilità che si è concentrata in quel punto e da quel punto si dirama."

Le principali analogie che si vanno a cercare in questo caso riguardano l'elettrone – il ladro –, quali informazioni sono possibili avere circa la sua localizzazione e cosa significa fare una misura:

"La polizia [sono] gli osservatori e le informazioni che la polizia ha sul ladro, la funzione d'onda in un certo modo, che descrive l'elettrone."

"Il discorso che quando avviene un furto, questo è un intervento che corrisponde all'aver misurato il sistema. "

"Una misura comunque è un atto deterministico. Sono io, ho un sistema, lo misuro. In questo caso [la localizzazione] è un effetto a posteriori: l'idea di poter dire, se ho una rete di allarmi, come in una mappa, tante luci...quello è un sistema di misura, quando si accende la lampadina è avvenuto un furto e io posso dire, il ladro è lì!"

Limiti:

Il limite principale individuato riguarda la mancanza di distinzione tra il concetto di probabilità epistemica e probabilità non-epistemica (ontologica), essendo questa distinzione fondamentale per capire l'essenza della fisica quantistica. La metafora sembra invece dare l'idea che la probabilità con cui si può stabilire la posizione di un oggetto quantistico sia del tutto identica al tipo di probabilità con cui si può stabilire la posizione del ladro.

"Se il furto, diciamo l'evento non realizzato, è un qualcosa che ha un livello d'astrazione simile alla funzione d'onda, il ladro no: se noi non ne conosciamo la posizione è per una nostra ignoranza sul sapere dov'è. Ma lui c'è, in ogni istante di tempo quella variabile ha un valore. [...] di essere da qualche parte ed è solo un fatto d'ignoranza che ci limita a conoscerla"

"Non emerge in nessun modo il fatto che la differenza sostanziale in questa cosa [tra il ladro e l'elettrone] è che la probabilità che emerge qui è dovuta all'ignoranza dei poliziotti che con strumenti opportuni sarebbe più controllabile.[...] si aggancia al concetto che la probabilità è dovuta al fatto che sono io l'ignorante, che invece in Meccanica Quantistica non è proprio così"

In secondo luogo, imprecisioni più che altro formali e concettuali, oltre al fatto che questa metafora rappresenti non tanto la funzione d'onda in sé, ma il suo modulo quadro:

"La reale limitazione di questa metafora, è che la funzione d'onda, purtroppo o per fortuna, è un numero complesso, e, con questa metafora, ma non saprei con quali altre, non si riesce a capire perché questa funzione d'onda debba essere necessariamente complessa."

"Viene detto molto esplicitamente " *questa onda di probabilità non è una cosa tangibile, ma solo un insieme di numeri astratti...*[cit. Testo]" : secondo me dare un'idea che la funzione

d'onda sia una funzione di questo tipo è molto sbagliata, nel senso che è vero che la funzione d'onda non è una cosa misurabile direttamente però è un oggetto molto reale che contiene tutte le informazioni sullo stato fisico del sistema quindi non è un insieme di numeri astratti che descrivono la cosa. Questo secondo me è il limite concettuale più forte che c'è."

Tabella 3.3: Griglia delle corrispondenze per la metafora della funzione d'onda

<i>Termini nella metafora</i>	<i>Termini del fenomeno fisico reale</i>
Ladro	Elettrone
Polizia	Osservatore/scienziato/sperimentatore
Cartina della città	Spazio in cui l'elettrone può essere trovato (scatola vuota, in un orbitale, in una buca di potenziale...)
I poliziotti non riescono a determinare esattamente dove di trovi il ladro in ogni istante	La posizione dell'elettrone non è determinabile con certezza sulla base di una legge deterministica
Probabilità che avvengano furti nei vari quartieri	Probabilità di trovare l'elettrone nei vari punti dello spazio
Furto	Interazione tra l'elettrone e lo strumento (atto della misura)
Distribuzione di probabilità di trovare il ladro	Distribuzione di probabilità di trovare l'elettrone
Le case vicino alla prigione saranno più a rischio, ma l'area interessata si allarga con il tempo.	La funzione d'onda evolve nel tempo
Questo [il furto] cambia la distribuzione di probabilità, perché ora si sa che il ladro sarà nei paraggi della scena del crimine.	L'atto della misura permette di affermare che, subito dopo la misura stessa, l'elettrone si trova in una zona precisa

METAFORA DEL SUL PRINCIPIO DI INDETERMINAZIONE

Valutazione generale:

La metafora appare chiara nel suddividere le proprietà misurabili di un sistema fisico in coppie di variabili coniugate, rappresentabili con operatori che non commutano:

"Il fatto di avere due elenchi, quindi due oggetti presi da due elenchi, che rappresentano per esempio la posizione e la quantità di moto, complementari, incompatibili per la Meccanica Quantistica, coglie un aspetto essenziale che in fin dei conti è quasi assiomatico nella Meccanica Quantistica, ovvero che esistono grandezze che non commutano."

"I piatti di una lista e dell'altra sono le quantità fisiche che noi possiamo pensare di indagare, che noi pensiamo di conoscere per il sistema fisico. [...] Sei disposto a fare un piatto in cui ce ne un po' di uno un po' dell'altro [in modo tale da mantenere il prezzo fisso]? Da questo punto di vista sì, il prezzo delle due voci sulla stessa riga sarebbe 'h tagliato mezzi'."

Limiti:

Il limite concettuale maggiore della metafora risiede però nelle stesse osservazioni riportate sopra:

"[la metafora] non si pone per niente [il problema] di quanto questa [l'incompatibilità] è intrinseca nelle quantità che io voglio studiare o nella misura che io sto facendo. Se c'è un'incertezza o un'indeterminazione, questa è una cosa che dipende dalla misura o no? La posso o no evitare? [L'esempio] è utile per capire che avere una cosa ne esclude direttamente un'altra, che però, secondo me, non è quella la difficoltà del principio di Heisenberg: questo in fondo è un concetto che abbiamo tutti in una maniera o nell'altra. Quindi è limpidissima, ma mette la luce su una piccolissima cosa che ha a che fare con il principio. Secondo me qui un ragazzo non capisce! Capisce che esiste una cosa di questo tipo [l'incompatibilità] ma non capisce l'implicazione del principio."

"Questa metafora secondo me dice semplicemente che ci sono cose che non si possono fare simultaneamente, poi è efficace nel dirlo."

"C'è il menù, il ristorante, il piatto...correlarle a proprietà fisiche come impulso o velocità di una particella secondo me ci vuole un certo sforzo. Sono, come dire, cose piuttosto lontane. [...] Questa in particolare è una metafora che, secondo me,... quando uno va a pensare e vuole fare un ragionamento sulle proprietà fisiche a cui si riferisce questa metafora, c'è uno scarto."

Tabella 3.4: Griglia delle corrispondenze per la metafora del principio di indeterminazione.

<i>Termini nella metafora</i>	<i>Termini del fenomeno fisico reale</i>
Menù a prezzo fisso	Oggetto quantistico
Piatti	Proprietà dell'oggetto/ grandezze misurabili
Divisione in colonna A e colonna B	Divisione in due classi di proprietà dell'oggetto non commutabili
Anatra alla pechinese/aragosta alla cantonese	Esempio di grandezze coniugate da misurare: es. posizione e quantità di moto
Prezzo totale fissato	Il prodotto delle dispersioni è sempre $\geq \hbar/2$
Ordiniamo	Misuriamo una grandezza del sistema
Possiamo avere [...] ma non entrambi Tanto più precisa è....tanto meno precisa sarà...	Possiamo conoscere una grandezza del sistema con la precisione che vogliamo ma non entrambe le grandezze. Tanto più precisa è la misura dell'una, tanto meno precisa sarà l'altra

METAFORA DELL'ORNITORINCO

Valutazione generale:

Questo sicuramente è il brano più familiare agli esperti tra quelli proposti.

"Assolutamente è un bel modo di vedere, descrivere gli aspetti del dualismo stesso, che va inteso proprio in questo modo, è un manifestarsi di proprietà diverse di un oggetto che al contempo le contiene tutte ma che ci sfugge nella sua totalità."

"Questa metafora va bene proprio perché qualche volta vedo un becco e lo prendo [l'ornitorinco] per un' anatra qualche volta lo vedo per la coda e lo prendo per un coniglio. Quello che è... insomma due cose che fanno parte di quella realtà ma non sono tutta la realtà. "

"Il valore che ha [la metafora] è che ci sono tanti aspetti di un oggetto – che non sappiamo neanche che oggetto è – , e noi ne vediamo solo una parte, a seconda della prospettiva in cui ci mettiamo, dal tipo di misura che noi facciamo sull'oggetto."

Limiti:

La metafora è concettualmente consistente. L'unico errore sarebbe in questo caso fidarsi troppo e solo di essa.

"La difficoltà più grossa è fossilizzarsi troppo sulla metafora [...]: hanno sempre un rovescio della medaglia che è quello di essere prese troppo sul serio e di essere interpretate alla lettera. Gli ornitorinchi non passano per le due fenditure."

"Questa metafora qui può essere d'aiuto, non bisogna però abusarne o spiegarla male in modo tale che i ragazzi siano portati troppo a identificarsi con essa. E' l'unico tipo di rischio di vedo."

Tabella 3.5: Griglia delle corrispondenze per la metafora dell'ornitorinco.

<i>Termini nella metafora</i>	<i>Termini del fenomeno fisico reale</i>
Primi esploratori	I padri della M.Q./ tutti i fisici agli inizi del 900
Strani animali	Oggetti dai comportamenti strani
Becco da papera & piedi palmati corpo & coda pelosi	Coppie di proprietà non conciliabili in un unico modello: caratteristiche riconoscibili, ad esempio, come ondulatorie a caratteristiche riconoscibili, ad esempio, come corpuscolari
Talpanatra dualismo talpa-anatra	Dualismo onda-particella
Particolarità zoologiche	Proprietà del nuovo oggetto che non trovano riscontro

	nella fisica classica e che non sono riconducibili a proprietà ondulatori o proprietà corpuscolari
Nome proprio	Necessità di creare inventare una nuova parola per indicare una nuova entità
Ornitorinco	Quantone/oggetto quantistico

METAFORA DEI “CALZINI DI ERWIN”

Valutazione generale

Questo è l'unico brano tra le metafore proposte che è stato pensato direttamente per l'insegnamento. Infatti gli oggetti della metafora e le loro proprietà vengono utilizzati, nei primi capitoli del libro dal quale è presa, per esplicitare ed illustrare il formalismo vettoriale dello spazio di Hilbert e la sovrapposizione di stati.

"Questa potrebbe essere un buon modo per spiegare che cos'è la misura quantistica, io non so di che colore è il calzino fino a quando non apro il cassetto lo tiro fuori, lo guardo per bene e dico 'oh era blu!'. E quindi prima di aprire un cassetto non posso sapere se tirerò fuori un calzino rosso o blu. Se uno spiega prima queste cose allora può avere senso, allora può essere sì una metafora, un sistema per poter cercare di dare una illustrazione di che cosa può voler dire misura quantistica. Sia il calzino sia il gatto nella scatola."

"[la metafora] Ha una sua valenza: sembra un pochino più macchinosa rispetto all'altra [l'ornitorinco], un' impressione mia dovuta al fatto che bisogna fare bene la fatica prima e spiegare qual 'è la regola del gioco."

Limiti:

Anche in questo caso, come accade per la metafora dell'ornitorinco, il brano è coerente con la logica del fenomeno che vuole illustrare e l'unico pericolo rimane quello di rimanere troppo attaccati all'immagine che la metafora dà: "il tentativo, da parte di chi si raffigura in testa le cose attraverso la metafora, di attaccarsi troppo all'immagine della metafora stessa."

Un altro problema potrebbe essere il confronto macro-micro tra il sistema 'calzino' classico e il sistema 'elettrone' quantistico e il fatto che la metafora, come quella del menù cinese, si basa sulla “invenzione” del sistema sorgente, per cui la metafora attinge da una realtà che solo apparentemente è familiare.

"E' talmente insito nella nostra testa il ragionamento classico che fare un ragionamento quantistico e trovare delle analogie classiche a questo ragionamento diventa veramente imbarazzante."

"Se uno spiega molto bene prima quali sono le regole, che i calzini che possono cambiare colore senza che tu lo sappia... però è innaturale, mentre quella dell'ornitorinco è una cosa naturale, perché lo conosciamo tutti! Invece qui bisogna già fare una forzatura sulla realtà che è quella di dire: 'guarda che i calzini possono misteriosamente cambiare'; allora perché parlare di calzini? Parliamo di elettroni direttamente!"

Tabella 3.6: Griglia delle corrispondenze per la metafora dei calzini.

<i>Termini nella metafora</i>	<i>Termini del fenomeno fisico reale (in riferimento ad un apparato Stern & Gerlach)</i>
Erwin	Scienziato/sperimentatore
Collezione di calzini	Insieme di oggetti quantistici (fascio di fotoni, elettroni...)
Colore (rossi o blu) Lunghezza (corti o lunghi)	Coppia di grandezze fisiche che non commutano, ciascuna delle quali può assumere soltanto due valori (es. spin lungo z e spin lungo x)
Calzini rossi e blu	Ad esempio, stato di spin z su e di spin z giù
Calzini lunghi e corti	Ad esempio, stato di spin x su e di spin x giù
"Erwin teneva i calzini in due cassetti: in uno teneva i calzini rossi e nell'altro quelli blu."	Lo scienziato prepara il sistema fisico, facendolo passare attraverso uno strumento di misura, ad esempio attraverso un apparato di Stern e Gerlach disposto in modo tale da misurare lo spin degli atomi d'argento lungo z.
Due cassetti	I due autostati (possibili esiti di una misura) di una grandezza come lo spin
"[Erwin] dal cassetto dei calzini rossi estrae due calze lunghe o due corte" [] "andava a prendere da uno dei due cassetti [o corto o lungo] due calze rosse o blu"	Lo scienziato seleziona il fascio con spin z su e, su questo, fa una misura di spin x, facendolo passare attraverso un apparato di Stern e Gerlach disposto lungo x. Quindi seleziona il fascio corrispondente a spin x su o a spin x giù e lo fa di nuovo passare attraverso un apparato di Stern e Gerlach disposto lungo z.
Se scelgo un calzino lungo o corto "c'è una probabilità del 50% che ognuno dei due fosse rosso o blu" Se scelgo un calzino rosso o blu "c'è una probabilità del 50% che ognuno dei due fosse lungo o corto"	Se lo scienziato seleziona gli atomi dal fascio corrispondente a spin x su o giù, c'è una probabilità del 50% che gli atomi di ciascun fascio abbiano spin z su o giù.

	Se lo scienziato seleziona gli atomi dal fascio corrispondente a spin z su o giù, c'è una probabilità del 50% che gli atomi di ciascun fascio abbiano spin x su o giù.
"I calzini sembravano aver <i>dimenticato</i> la proprietà che Erwin aveva determinato precedentemente" "avevano <i>dimenticato</i> la proprietà di essere lunghi o corti."	Gli atomi sembrano aver dimenticato la proprietà che lo scienziato aveva determinato nella misura che aveva preceduto quella della variabile coniugata, ad esempio avevamo dimenticato la proprietà di avere spin z su, se su questo fascio poi faccio una misura di spin x.
Proprietà di colore Proprietà di lunghezza	Non si può dire che gli oggetti quantistici abbiano una proprietà determinata: questa proprietà, in generale, esiste solo in uno stato di sovrapposizione.

Sulla base di questa fase di validazione, emerge che:

1. Le metafore più "pulite" (anche se da utilizzare comunque con opportune attenzioni e precauzioni) sono quella sull'effetto fotoelettrico e quella sulla distribuzione di probabilità/ e funzione d'onda; la validazione porta dunque a ritenere che queste metafore siano potenzialmente utilizzabili come contesto per riflettere sul meccanismo metaforico (senza perdersi nelle complicazioni delle corrispondenze con il fenomeno fisico). Lo studio pilota con studenti universitari mostrerà anche il grado di intelligibilità della metafora da parte di persone che conoscono il fenomeno ma non sono esperti;
2. Le metafore sul corpo nero e sull'indeterminazione, date le loro complicazioni, non sembrano adatte per appropriarsi dello strumento, né per introdurre i due temi. Potrebbero invece rappresentare strumenti per innescare dinamiche di gruppo vivaci finalizzate a ripensare criticamente al processo di discretizzazione introdotto da Planck o alle implicazioni concettuali dell'indeterminazione nella modellizzazione dei fenomeni fisici. Metafore imperfette e migliorabili sono infatti strumenti potenti per la creatività, che viene stimolata in modo particolare quando si vedono i limiti della metafora stessa;
3. Le metafore dell'ornitorinco e dei calzini di Erwin hanno invece passato il vaglio degli esperti anche per un loro eventuale utilizzo in classe per appropriarsi dei concetti e dei fenomeni che rappresentano.

E' sulla base di queste considerazioni che sono state progettate e realizzate le attività didattiche realizzate con gli studenti universitari e con gli insegnanti del corso PLS e i cui risultati saranno

presentati, dopo avere riportato le considerazioni degli esperti coinvolti circa l'utilizzo delle metafore come strumento scientifico, didattico e/o divulgativo.

LA METAFORA NELLA DIVULGAZIONE, NELL'INSEGNAMENTO E NELLA RICERCA: IL PARERE DEGLI ESPERTI

Oltre a validare le metafore da un punto di vista dei contenuti e delle potenzialità didattiche, durante l'intervista si è voluto indagare quale fosse l'opinione di ricercatori e professori universitari riguardo alla metafore nella divulgazione, nell'insegnamento e nella ricerca.

Metafora nella divulgazione: Come già accennato in precedenza gli esperti hanno dato pareri positivi su quasi tutte le metafore che gli erano state proposte, pur evidenziando i limiti concettuali e le imprecisioni:

"La metafora serve anche per arrivare a distribuire un concetto a gente che magari non si è appropriata di certi strumenti matematici, quindi una scappatoia: è utile."

Quello che preme ai docenti però è evitare che le metafore si fossilizzino nella mente degli ascoltatori creando conoscenze errate o che possano prendere il posto della vera conoscenza scientifica:

"[Il ruolo della metafora] è quello di rendere semplice quello che è complesso, o lontano dalla nostra intuizione. Da questo punto di vista sono d'accordo che la metafora possa aiutare. Ma molti di questi testi divulgativi [che fanno uso di metafore] sono in realtà dei tentativi di fare finta che alcune cose complesse siano facili. [Il rischio] è quello di creare una catena di diseducazione anche con le migliori intenzioni."

Lo scienziato che si rivolge ad un pubblico (o il divulgatore e giornalista) ha quindi una responsabilità enorme: da una parte deve fare in modo di non cristallizzarsi con un linguaggio logico e formale ed irrigidirsi nel proprio modo di pensare, dall'altra deve sapere usare sapientemente strumenti come metafore ed analogie per veicolare una conoscenza accettabile, senza banalizzare il fenomeno.

Metafora nell'insegnamento: L'utilizzo della metafora come approccio a nuove idee è, secondo alcuni esperti, utile nelle prime fasi di introduzione del nuovo fenomeno:

"È chiaro che se uno prende i principi assiomatici della fisica quantistica è tutto lì.... però questo lo puoi usare in un percorso avanzato, in un percorso specialistico a livello universitario superiore avanzato, ma nell'ambito dell'insegnamento della fisica nella scuola superiore non

può essere quello l'approccio. Quindi inevitabilmente secondo me va fatto un lavoro sulle metafore e anche, aggiungo un elemento, un lavoro sulla storia."

Come per il divulgatore, anche l'insegnante deve essere consapevole delle scelte didattiche che sta facendo e quali siano i punti di forza o le debolezze dalla metafora, in linea con quanto detto nel paragrafo 1.2:

"In una classe è sempre difficile riuscire a trovare una metafora che colpisca tutti: qualcuno l'aveva già capita, qualcuno l'ha capita in quel momento altri ancora non l'hanno mai capita.

Il pericolo delle metafore è quello a volte di introdurre concetti nuovi che per te che hai la mente del fisico, e ti focalizzi solo su quell'aspetto, sono aspetti marginali, ma per gli studenti non lo sono. Devono essere utilizzate secondo me metafore più semplici possibili."

In ambito universitario invece quello che gli esperti evidenziano è che la principale analogia che si utilizza è la matematica stessa: grazie a questo linguaggio infatti lo studente impara a ragionare sui modelli matematici e a riconoscere che questi non sono solo strutture logiche intrinseche ad un determinato fenomeno, ma sono analogie applicabili a contesti differenti.

Non tutti gli intervistati hanno avuto esperienze prolungate di insegnamento della fisica, ma ripercorrendo con la mente i loro anni da studenti hanno concluso che anche nel momento di studio o appropriazione di una nuova idea è naturale crearsi delle metafore o delle analogie.

Metafora come strumento di ricerca: Per quanto riguarda la metafora come strumento di ricerca capace di generare o aiutare lo sviluppo di nuove idee, tutti gli intervistati hanno dato un parere positivo:

"Secondo me è utile anche ad aprire nuove strade, perché a volte la mente funziona in maniera particolare e magari attraverso una metafora si aprono dei canali che qualcuno non aveva ancora aperto."

La ricerca e la conseguente elaborazione di nuove idee nello sviluppo di un modello, soprattutto negli stadi iniziali, tramite il ricorso a metafore "è un processo molto intimo...molto criptico" nel quale lo scienziato effettua "un lavoro mentale che cerca di ragionare e di riconnettere categorie del pensiero apparentemente lontane: il pensiero formale-razionale e il pensiero più creativo-artistico".

L'atteggiamento che si è riscontrato è molto simile a quello che, da come è stato riportato nel capitolo 1, potrebbe avere avuto Maxwell. Come evidenziano gli esperti infatti:

"L'analogia è fortissima nel modo in cui io mi trovo a studiare le cose. Non siamo in grado di inventarci cose *ex novo*, ma costruirle in base a quello che già sai. [...] Quando si usano le analogie o metafore è importante capire fino a che punto arrivano queste cose: quando uno usa

questo strumento c'è qualcosa che "fitta". Quello che non "fitta" è la novità vera che uno deve spiegare!"

Metafore e analogie quindi sembrano giocare un ruolo importante per la genesi di nuove idee e solo più tardi, quando prende forma il modello e si traduce il fenomeno in un linguaggio logico formale, è possibile lasciare la metafora per approdare alla teoria: "nel momento di mettere giù in rigore [un modello] qualche metafora, qualche analogia è già intervenuta!"

3.2 VALIDAZIONE DELL'ATTIVITA' DA PARTE DI STUDENTI DI LAUREA MAGISTRALE

Dopo la validazione delle metafore da parte degli esperti, si è condotto un test di validazione dell'attività con persone che potessero avere una conoscenza di base confrontabile con quella degli insegnanti di matematica e fisica, per i quali l'attività principale era stata progettata. In questo caso si voleva valutare se l'attività era in grado di innescare discussioni interessanti sui concetti contenuti e se era efficace per formare al meccanismo metaforico. Dati gli obiettivi dell'attività, si è ritenuto che gli studenti del corso di Storia della Fisica della laurea magistrale in Fisica, anno 2016/2017, risultassero molto adatti.

In questo contesto, si considerano due metafore analizzate: quelle sull'effetto fotoelettrico e sulla funzione d'onda, ritenute, sulla base dell'analisi dagli esperti, le più adatte per lavorare sul concetto stesso di metafora, per la loro semplicità.

Gli studenti sono stati divisi in gruppi da 4/5 e si è chiesto loro di svolgere la seguente consegna in 2 ore:

Si discuta in gruppo sulla metafora scelta e si compilino le tabelle riportate sul retro.

Le prime due colonne devono essere compilate dopo una discussione di gruppo. Ognuno però è libero di compilare la tabella anche in modo autonomo e diverso dalle decisioni di gruppo, inserendo il proprio pensiero. Nella terza colonna, si valuti il grado di difficoltà incontrate nel trovare e/o riconoscere la corrispondenza, su una scala da 1 (nessuna difficoltà) a 5 (difficoltà elevatissima, ovvero io non l'avrei mai trovata da solo e ancora non la capisco del tutto).

Sulla base della discussione avvenuta nel gruppo, si risponda alle seguenti domande:

- Sulla base delle tue conoscenze, quali sono i limiti della metafora? Quali sono quegli aspetti che non rappresenta o include? Motivare la risposta

- La metafora è efficace a rappresentare il tema/concetto scientifico a cui si riferisce?
Motivare la risposta
- E' stata utile per riflettere sul tema? Motivare la risposta
- Desideri fare altri commenti?

3.2.1 ANALISI METAFORA SULL'EFFETTO FOTOELETTRICO

Risultato 1: La griglia

Si riporta la tabella riassuntiva costruita direttamente dal gruppo di studenti che ha lavorato sulla metafora dell'effetto fotoelettrico.

Tabella 3.7: Griglia d'analisi degli studenti per la metafora dell'effetto fotoelettrico

Personaggio, oggetto o luogo presenti nella metafora	Corrispondente fisico reale
Seminterato	Orbitali K N L, stato legato
Bambini	Elettroni
Soldi	fotoni
Tassa da 950	Gap energetico, energia necessaria per superare la funzione lavoro
Resto	Energia cinetica residua
Lancio dei soldi	Inviare fotoni
Genitori	Sorgente luminosa

Nella tabella sono evidenziate in grigio le corrispondenze comuni con la griglia degli esperti utili per l'analisi.

Le principali corrispondenze sono state trovate e questo è il segno che gli studenti sono stati in grado di ricostruire il fenomeno in questione ed estrapolare dal brano le caratteristiche salienti.

Ciò che emerge è quanto la tabella appaia essenziale: al suo interno gli studenti hanno analizzato solo i personaggi o le situazioni che per loro hanno un importante significato fisico estrapolando dalla metafora solo quello che rappresenta un evidente collegamento con il fenomeno in questione. Vedremo come gli insegnanti in servizio, invece, abbiano dettagliato l'analisi. Un altro aspetto interessante è la strategia di compilazione utilizzata: gli studenti riportano solo termini specifici e non sembrano avere avuto l'esigenza di creare corrispondenze tra espressioni. La metafora dunque sembra essere stata colta, ma non è chiaro

come lo studente riordini le corrispondenze e quale immagine complessiva si forma della metafora.

La difficoltà media associata a questa metafora risulta essere di 1,7 in una scala da 1 a 5, dove 1 significa difficoltà nulla e quindi la metafora è comprensibile, 5 significa invece che si è fatta molta fatica a formulare le corrispondenze e che l'interpretazione della metafora richiede uno sforzo maggiore .

Risultato 2: Discussione dei limiti

Gli studenti hanno ritrovato i limiti e le imprecisioni evidenziate anche dall'analisi degli esperti:

“Secondo la discussione la metafora è scorretta perché risulta imprecisa nel descrivere il fenomeno. Non specifica il fatto che i bambini per uscire devono avere solo un ‘pacchetto’ di denaro maggiore della quota richiesta. Secondo noi, invece, nel testo si permette la possibilità che i bambini possano ‘collezionare’ monete anche dai precedenti lanci.”

“ Si può migliorare dicendo che il bambino deve dare un'unica banconota (intera) al proprietario per lasciarlo andare al piano superiore”

L'analisi della metafora ha portato i ragazzi a ragionare in modo critico sulle mancanze del testo nel rappresentare il fenomeno in questione; nonostante questo, sono concordi a dare un giudizio positivo al brano per il tentativo di introdurre l'effetto fisico: “La metafora è efficace, curiosa, divertente, ironica e può aiutare a discutere la fisica (LASCIA UN'IMMAGINE IMPRESSA che è utile a ricordare il fenomeno)” [*maiuscolo dal questionario*].

Il lavoro sul brano ha interessato i ragazzi non solo per la ricerca del contenuto fisico all'interno della metafora ma, come sottolineato sopra, per l'opportunità che le diverse interpretazioni davano di discutere sul fenomeno in tutti i suoi aspetti:

“Utile perché ha dato molti spunti di considerazioni sull'effetto fotoelettrico”

“[Anche se ritengo possa creare confusione] E' stata comunque utile a riflettere sul tema, in quanto ha stimolato la fantasia per pensare a modifiche di questa o altre metafore efficaci, sulla base delle mie conoscenze, per esprimere questi concetti fisici”

Come si può vedere, non solo la metafora ha promosso un'analisi critica del fenomeno, ma ha anche incoraggiato gli studenti a esplorare alternative o correzioni per accomodare la metafora al fenomeno fisico reale.

3.2.2 ANALISI METAFORA SULLA FUNZIONE D'ONDA

Risultato 1: La griglia

Allo stesso modo è stata analizzata la metafora sulla funzione d'onda. Si presenta la tabella riassuntiva delle risposte degli studenti.

Tabella 3.8: Griglia d'analisi degli studenti per la metafora sulla funzione d'onda.

Personaggio, oggetto o luogo presenti nella metafora	Corrispondente fisico reale
Poliziotti	Osservatori
Ladro	Elettrone, particella quantistica
Città	Spazio di Hilbert
Furto	Misura, collasso della funzione d'onda
Zone ricche	Buca di potenziale
Appartamento	Posizione, unità spaziale più piccola

In grigio sono evidenziate le corrispondenze in comune tra le griglie degli esperti e degli studenti. Anche in questo caso, gli studenti hanno associato ad ogni corrispondenza da loro trovata un livello di difficoltà, con il quale si può associare a questa metafora una difficoltà media di 1,6 nella stessa scala da 1 a 5.

Ritroviamo una tabella essenziale e snella come nel caso precedente: gli studenti hanno subito colto quello che è effettivamente utile per mettere in corrispondenza i due domini evidenziando e ragionando sulle corrispondenze essenziali.

Risultato 2: Discussione dei limiti

Sono state ritrovate le imprecisioni accennate nell'analisi degli esperti riguardanti la proprietà di posizione propria del ladro e della confusione tra funzione d'onda e probabilità:

“Il ladro è effettivamente in un luogo preciso in ogni istante, l'ignoranza della posizione è intrinseca nel poliziotto e non nel ladro in se...l'elettrone è contemporaneamente in più posizioni fino all'atto di misura”

“non si fa distinzione tra funzione d'onda Ψ e modulo quadro della stessa [...] si perde anche il fatto che è possibile scrivere una dinamica per la Ψ , mentre per il modulo i valori sono istantanei.”

La metafora quindi risulta “efficace perché fa capire quale sia l'interpretazione probabilistica della Meccanica Quantistica” ma nel fare questo il “concetto di funzione d'onda non è affrontato”. Tutto il gruppo è concorde che il valore della metafora sia quello di stimolare la discussione su questioni

che spesso rimangono nascoste o di cui si discute poco, stimolando una argomentazione critica soprattutto riguardo ai limiti e alle imprecisioni.

Sulla base dello studio pilota, si può concludere che le metafore sull'effetto fotoelettrico e sulla funzione d'onda:

- sono alla portata di persone che hanno una formazione scientifica ma non sono esperti (come si può pensare siano gli insegnanti di scuola secondaria superiore);
- l'attività coinvolge e innesca dinamiche produttive sia sui contenuti scientifici della metafora (consentendo un consolidamento delle conoscenze) sia sul meccanismo della metafora in sé. In particolare, come ci si auspicava, la metafora ha innescato processi creativi orientati a superare i limiti delle metafore e a esplorarne possibili modifiche.

Questi risultati fanno pensare che l'attività sia adatta per insegnanti in formazione e diventare un esempio di attività creativa da riportare anche nelle loro classi.

3.3 ANALISI DELLE ATTIVITA' DEGLI INSEGNANTI

Come anticipato nel capitolo 2, la quinta lezione del corso PLS per insegnanti in servizio è stata dedicata alle metafore. In quella data erano presenti 33 insegnanti; sono stati formati 10 gruppi (con un numero variabile di individui all'interno), divisi a loro volta in due macrogruppi, uno che avrebbe analizzato la metafora dell'effetto fotoelettrico, l'altro la metafora sulla funzione d'onda. Durante la prima attività il gruppo aveva l'opportunità di discutere e studiare assieme la metafora per poi rispondere individualmente al questionario e compilare la griglia di analisi.

La seconda fase dell'attività ha previsto un confronto tra le griglie singole e la griglia degli esperti. I docenti sono stati quindi invitati a commentare le eventuali differenze o punti in comune.

Per queste prime due attività, al fine di valutare la capacità degli insegnanti di cogliere la metafora (e quindi dare una risposta alla prima domanda di ricerca esposta al termine del capitolo 2), si sono scelti due criteri guida:

- il *confronto* tra le corrispondenze individuate dai docenti con la griglia costruita sulle risposte degli esperti.
- l'analisi dei *limiti* della metafora riconosciuti e sottolineati dai docenti.

Come già sottolineato, l'attività numero tre è stata pensata al fine di riprendere i concetti trattati nella lezione 'Struttura interpretativa della fisica quantistica e sue applicazioni' tenuta dalla

professoressa E. Ercolessi nel quarto incontro pomeridiano del corso PLS. Pur non riguardando direttamente le metafore, aveva lo scopo di far lavorare gli insegnanti sugli esperimenti di Stern e Gerlach e arrivare a padroneggiare con maggior disinvoltura i concetti fondamentali e di familiarizzare con il formalismo alla Dirac per esprimere uno stato fisico. Durante la prova era permesso ai docenti di consultare gli appunti o le slide della lezione sopra citata.

Infine nell'attività 4, è stato chiesto agli insegnanti di analizzare, anche formalmente, la metafora dei calzini di Erwin. L'esercizio avrebbe permesso di esportare le conoscenze sviluppate in un contesto (gli esperimenti di Stern e Gerlach) e di applicarle in un altro (quello della metafora), rafforzando così anche i concetti fondamentali che stanno alla base del formalismo stesso.

3.3.1 RISULTATI DELLE ATTIVITA' 1 E 2: APPROPRIAZIONE DELLO STRUMENTO METAFORA ATTRAVERSO L'ANALISI DI METAFORE "SEMPLICI"

Si riporta la consegna dell'attività svolta dai docenti:

ATTIVITA' 1

"Si compili la tabella, indicando le corrispondenze individuate tra termini/espressioni della metafora (sistema sorgente) e aspetti/concetti fisici (sistema target).

Le prime due colonne devono essere compilate dopo una discussione di gruppo. Ognuno però è libero di compilare la tabella anche in modo autonomo e diverso dalle decisioni di gruppo, inserendo il proprio pensiero. Nella terza colonna, si valuti il grado di difficoltà incontrate nel trovare e/o riconoscere la corrispondenza, su una scala da 1 (nessuna difficoltà) a 5 (difficoltà elevatissima, ovvero io non l'avrei mai trovata da solo e ancora non la capisco del tutto)."

ATTIVITA' 2

"Si confronti la tabella precedentemente compilata con la seguente griglia costruita da esperti e si evidenzino le principali differenze, riportando le osservazioni personali nel foglio delle risposte."

Si riportano, di seguito, i risultati dell'analisi (sia della griglia che del foglio delle risposte) di queste due attività.

METAFORA SULL'EFFETTO FOTOELETTRICO

Risultati dell'attività 1: La costruzione della griglia

La tabella 3.9 è stata costruita sulla base delle risposte dei vari gruppi che hanno analizzato il brano di Greene riguardante l'effetto fotoelettrico. I nomi dei gruppi sono stati inventati dai gruppi stessi. La tabella riporta fedelmente quanto scritto nelle griglie (cfr. allegati nell'appendice D). Il primo elemento interessante è la possibilità stessa di unificare le varie griglie in un'unica tabella, a dimostrazione che esiste un insieme di termini metaforici facilmente identificabile dai docenti. I termini comuni sono evidenziati in grigio e sono sovrapponibili coi principali termini individuati anche dagli esperti e dagli studenti del Corso di Storia della fisica.

Come per la tabella degli studenti notiamo subito che vengono estrapolati dal brano solo termini e parole e non frasi articolate; anche in questo caso quindi gli insegnanti sono andati a cercare nel testo dei marcatori, gli elementi fondamentali per comprendere il fenomeno.

Tabella 3.9: griglia riassuntiva delle risposte dei docenti

Gruppo → Oggetto ↓	GES	NEUTRINE	MANTOVA\ RAVENNA	GIORDANO	Difficoltà Difficoltà media attribuita all'associazione
Bambini	Elettroni	Elettroni	Elettroni	Elettroni	1,25
Seminterrato\ postaccio	Metallo	Orbitali elettroni	Piastrina\ fotocatodo	Metallo	1,8
Monete (50,100..lire)	Fotoni\ quanto di energia	Fotoni\ energia	Energia\ energia minore della soglia	Fotoni di energie diverse	1,6
Tassa	Lavoro estrazione	di Soglia di energia	Energia di soglia	Lavoro di estrazione	1,8
Resto	Energia dell'elettrone	K Energia rimane	che Kmax dell'elettrone	K residua	2,6
Lancio		Raggio incidente		Inviare fotoni	1,5
Balconata	Sorgente fotoni	di			2

Adulto	Calore	Sorgente		Sorgente di fotoni a \neq f	2,6
Proprietario		Legame metallo		Potenziale d'estrazione	2
Recupero		Assorbimento		Ricevere Energia \geq W	1,5
Fuga		Emissione		Emissione	1
Difficoltà media attribuita dal gruppo all'analisi complessiva della metafora	2,1	1,9	2,4	1,3	

Come nel caso delle tabelle 3.7 e 3.8 sono evidenziati in grigio le corrispondenze comuni agli esperti. La tabella 3.9 mostra quanto i gruppi siano concordi nel riconoscere in alcuni termini della metafora gli oggetti o le proprietà fondamentali per comprendere l'effetto fotoelettrico; nella parte superiore della tabella infatti c'è una buona corrispondenza tra le associazioni trovate dai gruppi. La difficoltà media data da ogni gruppo di insegnanti per la metafora risulta essere più alta per la maggior parte dei gruppi di quella ricavata dai questionari degli studenti della magistrale (con una difficoltà media di 1,7). La difficoltà media di molte delle associazioni trovate è bassa, indice del fatto che questa metafora può essere utilizzata in contesti non specialisti anche di formazione di base. Ci sono invece associazioni che hanno una elevata difficoltà come i termini *balconata*, *proprietario* e *adulti*: questo perché si è cercato di dare a questi oggetti un significato fisico, forzando l'interpretazione del fenomeno. Una differenza interessante con la griglia degli studenti è il numero di corrispondenze: la tabella degli studenti è molto più snella e mira a estrapolare dal brano i concetti essenziali per la comprensione della metafora. Anche se queste corrispondenze vengono trovate nella tabella degli insegnanti, questi ultimi la arricchiscono con ulteriori associazioni o con l'esplorazione di possibili corrispondenze poco evidenti (per esempio l'associazione *adulto=calore*). Questo è un comportamento noto nella letteratura di ricerca che marca la differenza tra lo "stato di studente" e quello di "insegnante": mentre il primo stato orienta alla ricerca di una comprensione significativa *per sé*, il secondo stato spinge a immaginare cosa "altri possano capire" e quali domande o difficoltà uno studente possa incontrare. Questa uscita da sé rende l'atteggiamento verso il "proprio apprendimento" molto più esigente e pignolo.

Risultati dell'attività 2: il confronto con la griglia degli esperti condotto dal gruppo.

Il confronto con la tabella degli esperti è stato un momento molto apprezzato e fonte di soddisfazione:

- "C'è una corrispondenza sostanziale tra la tabella degli esperti e il nostro lavoro di gruppo" (gruppo GES)
- 1. "In linea di massima c'è corrispondenza tra le nostre tabelle e quelle degli esperti" (gruppo GIORDANO)

L'esame delle risposte mette in luce tre aspetti interessanti:

1. Un'osservazione comune di tutti i gruppi riguarda la corrispondenza dell'*elettrone legato* o dell'*orbitale* atomico con lo *stanzone/seminterrato* della metafora, come evidenziano queste risposte:
 - a) "Difficile da capire il collegamento tra elettroni legati, orbitale e stanza" (gruppo RAVENNA-MANTOVA)
 - b) "Punto di disaccordo riguardo all'associazione del seminterrato con gli orbitali. Per noi il seminterrato è il metallo." (gruppo GIORDANO)

Questi commenti evidenziano una differenza di approccio alla modellizzazione dell'effetto fotoelettrico: nella scuola secondaria la situazione sperimentale viene descritta macroscopicamente come un'interazione tra un fascio di luce incidente e un metallo; a livello universitario si tende a modellizzare l'effetto fotoelettrico fin da subito come urto tra elettrone legato e quanto di luce, ovvero con un approccio micro. Questa differenza nell'interpretazione emerge dall'analisi dei dati raccolti.

2. La griglia è stata utilizzata non solo per estrapolare le informazioni dalla metafora ma ha permesso anche un'analisi critica dei contenuti della metafora stessa, spingendo gli insegnanti ad interrogarsi sui limiti del brano. Alcuni gruppi infatti hanno ritrovato le stesse imprecisioni che erano state evidenziate dagli esperti:

"Si segnala che dal racconto non emerge che un bambino che raccoglie 2 monete da 500 lire (cosa che può sembrare probabile) non può comunque uscire." (gruppo GIORDANO).

Solo gli esperti hanno trovato all'interno della metafora una indicazione riguardo il rapporto *intensità della luce e numero di elettroni uscenti dal metallo* punto cruciale per la comprensione del

fenomeno in questione. Dalle griglie e dai commenti sui limiti, questo aspetto non emerge né per gli studenti né per i docenti.

METAFORA SULLA FUNZIONE D'ONDA

Risultati dell'attività 1: La costruzione della griglia

Lo stesso lavoro è stato fatto con i gruppi che invece hanno analizzato la seconda metafora, quella riguardo la funzione d'onda.

Tabella 3.10: griglia riassuntiva delle risposte dei docenti per la metafora della funzione d'onda.

Gruppo -> oggetto↓	ONDAINE	SAVE THE CAT	TAVOLONE	DIESEL	ONDA SU ONDA	Difficoltà Difficoltà media attribuita all'associazione
Ladro	Particella quantistica	elettrone	elettrone	elettrone	elettrone	1
città\ cartina	Spazio in cui si muove\ atomo	Ambiente apparato	spazio		Regione in cui si può trovare e	2
Polizia	Osservatore\ rivelatore	ossercatore	osservatore	osservatore	osservatori	1,3
Furto	Atto di misura	Misura posizione elettrone	Localizzazione spaziale	Misura\ evento	Eventi osservartt	2
Case ricche vicine	Zone con probabilità alta	Figura interferenza	Livelli energia ≠	Rivelatori \ dove trovo la particella	Massimi\ minimi della funzione	2,4
Prigione	Generatore di particelle	emettitore	Condizioni iniziali $\Psi(0,0)$	sorgente	Sorgente\ condizioni iniziali	2,8
Ondata di crimini	Raccolta dati		Funzione d'onda	Funzione d'onda	Funzione d'onda \di probabilità	2
allargasi nel tempo	Funzione che evolve					3
Solo uomo		Singolo elettrone				1

Movimenti dopo il rilascio	Traiettoria con condizioni al contorno					1,5
Cambio probabilità con il furto			Collasso funzione d'onda			3
Diff. media	2,4	2,1	1,8	1,6	1,6	

Anche in questo caso la prima parte della tabella evidenzia le corrispondenze comuni a tutti i gruppi che possono essere ritrovate sia nella griglia degli esperti che in quella degli studenti. Si è infatti attribuito gli stessi elementi fisici ai principali oggetti della metafora (ladro, polizia, città e furto), lasciando poi spazio per le diverse interpretazioni personali riguardo ad altri componenti. Come in precedenza l'indice di difficoltà risulta variabile da gruppo a gruppo anche se per la maggioranza la difficoltà risulta essere vicina a quella calcolata sulla base dei questionari degli studenti di magistrale, con una difficoltà media di 1,7.

Anche l'analisi delle corrispondenze mancanti è interessante: infatti se gli elementi principali (ladro, furto...) per capire la metafora sono stati colti da tutti i gruppi non si può dire la stessa cosa per quanto riguarda come si evolve e quale sia la dinamica di questo oggetto. Concetti come l'evoluzione nel tempo o il collasso della funzione stessa non sono stati infatti colti da tutti.

Risultati dell'attività 2: il confronto con la griglia degli esperti condotto dal gruppo.

Il confronto positivo con la tabella degli esperti ha confermato la loro interpretazione complessiva del brano:

- "Dopo aver analizzato le risposte degli esperti con quelle del nostro gruppo abbiamo notato che gli elementi fondamentali coincidono. [...] interessante è l'analisi delle azioni e dei verbi che il nostro gruppo non ha analizzato." (gruppo ONDA SU ONDA)

"Metafora molto bella. Abbiamo inquadrato quasi tutte le metafore. "

"Analisi molto utile; alcune corrispondenze sono univoche, altre più estese all'interpretazione personale" (gruppo SAVE THE CAT)

"Voglio rilevare che alcuni collegamenti tra personaggi ed oggetto fisico sono molto azzeccati" (gruppo DIESEL)

Emergono anche in questo caso i limiti evidenziati dagli esperti, riguardo alla confusione tra funzione di probabilità e probabilità e all'assegnare ad un oggetto quantistico una determinata proprietà, tipo la posizione:

- "E' necessario distinguere tra distribuzione/onda di probabilità e invece probabilità"

" (cit dal testo) 'non è possibile seguire l'elettrone'[...] può essere fuorviante. Suggerisce l'idea che l'elettrone è certamente da qualche parte"

Come per la metafora precedente quindi non si ha solo la ricostruzione del fenomeno fisico, ma questa analisi può dare spunti interessanti anche per eventuali discussioni teoriche che partendo dai limiti della metafora facciano ragionare sulla conoscenza del fenomeno in questione.

Ulteriori osservazioni:

1. Soggettività. Dalle risposte dei gruppi emerge un elemento molto importante per l'analisi delle metafore: il punto di vista personale. Non essendo esperti in materia, molti elementi della metafora vengono visti in maniera differente tra gli insegnanti, anche all'interno del gruppo stesso:

"Penso che non sia importante sforzarsi di trovare un confronto assoluto ma sia efficace il momento della discussione",

"[...] non abbiamo individuato alcune corrispondenze degli esperti ma ne abbiamo trovate di nuove."

2. Difficoltà. Sul giudizio che gli insegnanti danno a queste metafore incide anche la loro esperienza personale nel campo dell'insegnamento e riguardo le principali difficoltà che i ragazzi di V liceo potrebbero incontrare. Gli insegnanti infatti pensano che bisogna fare prima una revisione dei brani delle metafore, eliminando quello che può confondere gli alunni:

"Metafora molto ricca di particolari, ripetitivi e alcuni forse fuorvianti per gli studenti."

"La metafora andrebbe ripulita facendo più attenzione all'uso di termini più semplice (per uso didattico)" (gruppo DIESEL)

"Lo schema è troppo articolato. Rischia di far perdere il nucleo fondamentale della trattazione." (gruppo NEUTRINE)

I risultati di queste due attività confermano quanto già osservato con gli studenti e sono in linea con i criteri d'analisi che si erano fissati:

- La griglia permette di analizzare la metafora facilmente, riportando le corrispondenze trovate e permettendo di ragionare su di esse. Dal confronto delle tabelle sopra riportate con le griglie

compilate dagli esperti e dagli studenti si evince che c'è una sostanziale correlazione tra le corrispondenze trovate: i nuclei tematici delle metafore, i loro oggetti e le loro caratteristiche sono stati riconosciuti da tutti i docenti. Inoltre la difficoltà media per la comprensione del brano non è elevata indice che può essere alla portata, se utilizzata in maniera corretta, per una classe di V liceo.

- La lettura della metafora è soggettiva: la compilazione della griglia per gli insegnanti, così come per gli studenti, genera momenti di confronto utili per approfondire e indagare il fenomeno o per migliorare la metafora stessa.
- L'analisi delle corrispondenze trovate porta ad interrogarsi su quelle associazioni che sono ambigue o non presenti: è stato riportato infatti come la compilazione della griglia abbia favorito il riconoscimento di alcuni limiti delle metafore che già erano stati sottolineati dagli esperti.

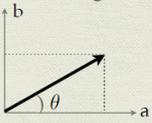
3.3.2 ATTIVITA' 3: COMPRENDERE E CONOSCERE IL FORMALISMO

Nella lezione tenuta durante il corso, la professoressa Ercolessi ha proposto un breve approfondimento sul formalismo minimo che permette di interpretare i risultati degli esperimenti di Stern e Gerlach.

Si riportano qui di seguito alcune delle slide relative alla descrizione del formalismo esposte nella lezione e che i docenti hanno avuto modo di consultare durante lo svolgimento della terza attività.

Approfondimento matematico (vettori e algebra lineare)

Un vettore di lunghezza 1 nel piano si scrive come



$$\vec{v} = \cos \theta \hat{a} + \sin \theta \hat{b}$$

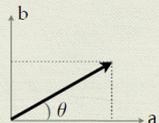
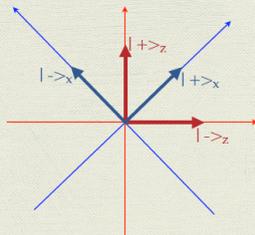
Ora, al posto dei due versori usiamo le due alternative: $|+\rangle_z$ e $|-\rangle_z$

Possiamo scrivere una qualunque combinazione lineare come:

$$|v\rangle = \cos \theta |+\rangle_z + \sin \theta |-\rangle_z$$

- I coefficienti sono *ampiezze di probabilità*: $a_+ = \cos \theta$, $a_- = \sin \theta$
 - Le probabilità di trovare + o - dopo una misura sono date da:
 $p_+ = |a_+|^2 = \cos^2 \theta$, $p_- = |a_-|^2 = \sin^2 \theta$

Un vettore di lunghezza 1 nel piano si scrive come

$$\vec{v} = \cos \theta \hat{a} + \sin \theta \hat{b}$$



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

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

$$\Leftrightarrow \begin{cases} |+\rangle_x = \frac{1}{\sqrt{2}} |+\rangle_z + \frac{1}{\sqrt{2}} |-\rangle_z \\ |-\rangle_x = \frac{1}{\sqrt{2}} |+\rangle_z - \frac{1}{\sqrt{2}} |-\rangle_z \end{cases}$$

In Fis. Quant., lo strumento matematico è lo stesso, diversa l'interpretazione.

☀ Un oggetto quantistico si trova in uno **STATO** che è descritto da un vettore, detto "vettore di stato", tale che:

1. Un generico vettore si può scrivere come sovrapposizione di un certo numero di vettori (di base), che rappresentano le possibili alternative classiche.
2. I coefficienti di tale sovrapposizione (componenti del vettore) sono delle **AMPIEZZE di PROBABILITÀ**, il cui quadrato fornisce la probabilità di ottenere un certo risultato in una misura.
3. In un processo i vettori si modificano con le seguenti regole:

☑ **IN SUCCESIONE, LE AMPIEZZE DI PROBABILITÀ SI MOLTIPLICANO**

☑ **L'AMPIEZZA FINALE È LA SOMMA DELLE POSSIBILI ALTERNATIVE**

☑ **LA PROBABILITÀ FINALE È IL QUADRATO DELLA AMPIEZZA FINALE**

Figura 3.1: alcune slide utilizzate durante la lezione della Professoressa Ercolessi.

La consegna era così strutturata:

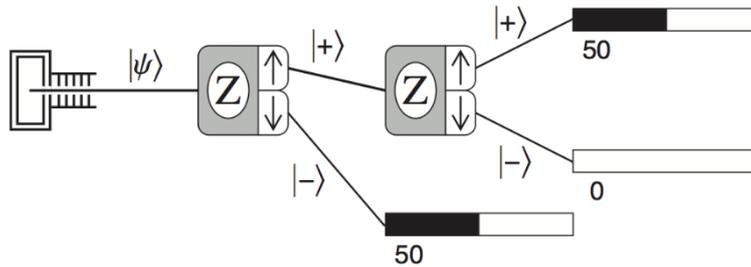


Fig. 1

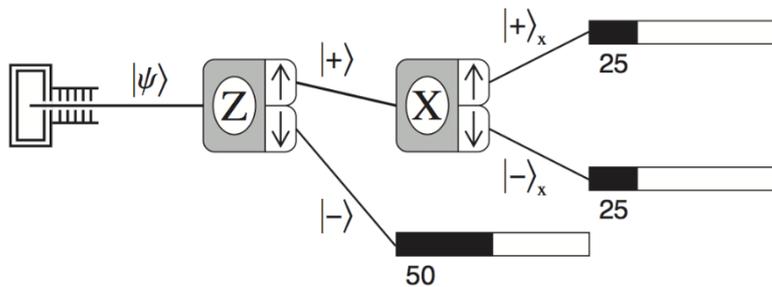


Fig. 2

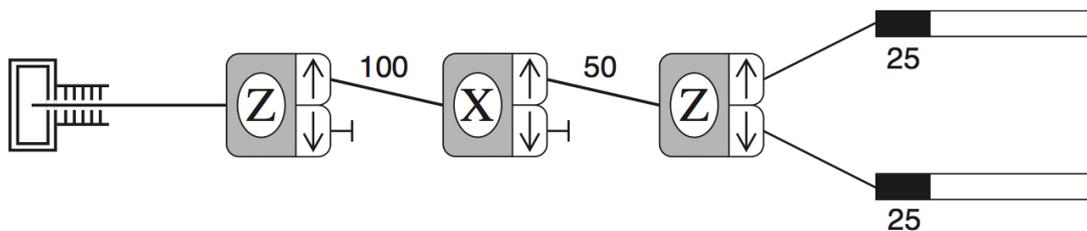


Fig. 3

"Dopo aver discusso in gruppo, si risponda individualmente alle seguenti domande:

1. Si trovi un modo conciso per illustrare il significato degli esperimenti di Stern e Gerlach di figura 1 e 2 e si ricostruisca il ragionamento per arrivare a descrivere, anche formalmente, gli esiti dell'esperimento di figura 3.
2. Facendo riferimento alle figure, si trovino espressioni concise ed efficaci per introdurre in classe, attraverso queste configurazioni dell'esperimento di Stern e Gerlach, i concetti di *stato di sovrapposizione*, *ampiezza di probabilità* e *preparazione-processo-misura* e di altre proprietà tipicamente quantistiche evidenziate dagli esperimenti di Stern e Gerlach."

Dall'analisi delle risposte si è notato che, anche se era indicato espressamente di descrivere almeno uno dei tre esperimenti in maniera formale, solo il 45% dei docenti ha scelto di utilizzare il formalismo per rispondere ai quesiti: infatti la maggior parte dei partecipanti ha esposto in maniera descrittiva le procedure e i risultati degli esperimenti. Nascono da questa divisione due approcci all'analisi e all'attività. Il primo è esemplificato dalle figure 3.2, il secondo dalle figure 3.3.

② $|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}|+\rangle_z + \frac{1}{\sqrt{2}}|-\rangle_z$ $\begin{cases} |+\rangle_z = \frac{1}{\sqrt{2}}|+\rangle_x + \frac{1}{\sqrt{2}}|-\rangle_x \\ |-\rangle_z = \frac{1}{\sqrt{2}}|+\rangle_x - \frac{1}{\sqrt{2}}|-\rangle_x \end{cases}$
 \downarrow $p = \left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right)^2 = \frac{1}{2} \rightarrow (50)$
 $\frac{1}{\sqrt{2}}|+\rangle_x = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\frac{1}{\sqrt{2}}|+\rangle_z + \frac{1}{\sqrt{2}}|-\rangle_z \right) = \frac{1}{2}|+\rangle_z + \frac{1}{2}|-\rangle_z$ $p = \left(\frac{1}{2}\right)^2 = \frac{1}{4} \rightarrow (25)$
 "le grandezze "Spin x" e "Spin z" sono linearmente indipendenti
 lo stato $|+\rangle_z$ coincide con una sovrapposizione di stati di $|+\rangle_x$ e $|-\rangle_x$

③ $|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}|+\rangle_x + \frac{1}{\sqrt{2}}|-\rangle_x$ \downarrow $p = \left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right)^2 = \frac{1}{2} \rightarrow (50)$
 $\frac{1}{\sqrt{2}}|+\rangle_x = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\frac{1}{\sqrt{2}}|+\rangle_z + \frac{1}{\sqrt{2}}|-\rangle_z \right) = \frac{1}{2}|+\rangle_z + \frac{1}{2}|-\rangle_z$ $p = \left(\frac{1}{2}\right)^2 = \frac{1}{4} \rightarrow (25)$
 la misura di una grandezza fa sì che l'"informazione" sul
 valore della grandezza è necessariamente indipendente verso "perce"

in un.
 Quando esco dal 1 analizzatore Z
 so il stato $|+\rangle_Z$
 che posso scrivere come ~~combinazione~~
 combinazione lineare degli stati che
 vengono fuori dall'analizzatore X
 $|+\rangle_Z = \frac{1}{\sqrt{2}}|+\rangle_X + \frac{1}{\sqrt{2}}|-\rangle_Z$ (dove ~~probabilmente~~
 ai fini)
 non considero questo
 ora sviluppando ottengo
 $\frac{1}{\sqrt{2}}|+\rangle_X = \frac{1}{\sqrt{2}}\left(\frac{1}{\sqrt{2}}|+\rangle_Z + \frac{1}{\sqrt{2}}|-\rangle_Z\right) = \frac{1}{2}|+\rangle_Z + \frac{1}{2}|-\rangle_Z$
 elevando al quadrato (completare)
 ottengo le probabilità associate.

Figura 3.2: esempi di risposte formali dei docenti.

Nelle figure 1: non è necessario pensare a stati di
 sovrapposizione → la probabilità giustifico
 il fenomeno (le due particelle $|+\rangle$ uscenti dal
 primo Z si trovano dopo il secondo Z)

Analogamente in figura 2: Dopo il primo passaggio in Z. c'è
 una misura. È giustificabile con le probabilità
 che i $50Z^+$ si dividono in $25X^+$ e $25X^-$
 $50Z^+$ presentano sovrapposizione X^+ ed X^-

Nelle fig. 3, ^{50 Z⁺ presentano sovrapposizione X⁺ ed X⁻} non c'è misura nell'apparato X.

Le particelle sembrano aver perso memoria di ciò che
 è accaduto in X. È meccanico parlare di sovrapposizione
 di stati e completezza di probabilità. La "probabilità"
 in senso classico non basta

Figura 3.3: esempio di risposta descrittiva dei docenti.

In tutti i casi si sono notate grande partecipazione e una dinamica feconda di discussione, che hanno
 da una parte confermata l'efficacia degli interventi realizzati e dall'altra una forte disponibilità da
 parte dei docenti in mettersi in gioco e cimentarsi con questi concetti che, per molti, erano nuovi.

3.3.3 ATTIVITA' 4: IL TRASFERIMENTO DI CONOSCENZE

Lo scopo di questa attività è utilizzare la metafora dei “calzini di Erwin” come strumento per trasferire le conoscenze sviluppate in un contesto (Stern e Gerlach) in un altro contesto apparentemente più familiare (i cassetti con calzini rossi o blu, lunghi o corti). Lo scopo era duplice: usare la metafora per consolidare i concetti acquisiti; riflettere sulle peculiarità della descrizione quantistica del mondo, mettendola a confronto con la logica che regola in modo “classico”.

La consegna dell'attività è la seguente:

“Si discuta la seguente **metafora dei calzini di Erwin** elaborata da McIntyre per introdurre gli esperimenti di Stern e Gerlach e per sottolineare alcune proprietà fondamentali degli oggetti quantistici.

La si analizzi, compilando la tabella riportata nel foglio delle risposte e applicando ai calzini il formalismo elaborato per descrivere gli esperimenti di Stern e Gerlach.

Dopo aver discusso in gruppo, si risponda individualmente alle seguenti domande :

- Quali differenze si evincono tra la descrizione classica e quella quantistica dei processi fisici, se si confrontano gli esperimenti di Stern e Gerlach coi calzini di Erwin?
- Quali interrogativi pensi possano essere stimolati dalla metafora in una classe di Liceo?
- Quali potenzialità didattiche ha, secondo te, questa metafora?”

Risultato 1: l'analisi delle corrispondenze.

L'analisi delle griglie fa vedere come gli insegnanti abbiano posto molta cura nella ricerca dei dettagli, andando a scovare all'interno del brano tutti gli elementi metaforici corrispondenti all'apparato fisico dell'esperimento, composto da uno o più analizzatori, e alla serie di passaggi che dal fascio originale portano alla misura quali Preparazione, Processo e Misura (in riferimento alla lezione della prof. Ercolessi). Anche in questo caso le griglie sono dettagliate ma snelle ed essenziali, indice che si è andato a cercare in modo mirato la corrispondenza con il fenomeno già noto (e assimilato).

Si riportano le principali corrispondenze comuni associate dagli insegnanti e ritrovate con l'analisi delle griglie:

- *calzini*: particelle;
- *cassetti*: apparati;
- *misure (vista e tatto)*: arbitrariamente la misura su X o Z;
- *corto o lungo, rosso o blu*: arbitrariamente gli spin +/- su gli assi X o Z;

- *dimenticare le proprietà*: la misura di una grandezza perturba l'altra.

Come per l'attività 1, si ha conferma che la griglia aiuta ad analizzare la metafora in modo tale da estrapolare le informazioni interessanti e promuovere così un'adeguata corrispondenza.

Risultato 2: riconoscere la logica di base.

La maggior parte degli insegnanti ha preferito utilizzare una analisi descrittiva piuttosto che tramite formalismo. Si propongono, quali esempi, le seguenti griglie appartenenti a diversi gruppi.

Come già accennato ritroviamo i punti evidenziati sopra: in tutti i gruppi infatti le proprietà di colore o lunghezza sono associati agli spin orientati lungo X o lungo Z, arbitrariamente da gruppo a gruppo, mentre l'atto della misura viene associato al toccare o al vedere.

4.1 Si analizzi la metafora dei calzini di Erwin, compilando la tabella seguente e applicando ai calzini il formalismo elaborato per descrivere gli esperimenti di Stern e Gerlach.

Esperimento di Stern e Gerlach	Calzini di Erwin	Difficoltà
X	COLORE $\leftarrow \begin{matrix} R \\ B \end{matrix}$	5
Z	TATTO $\leftarrow \begin{matrix} L \\ C \end{matrix}$	5
$ +\rangle_z$	L	5
$ -\rangle_z$	C	5
$ +\rangle_x$	R	5
$ -\rangle_x$	B	5
$ L\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} R\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}} B\rangle$		
$ R\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} L\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}} C\rangle$		

Esperimento di Stern e Gerlach	Calzini di Erwin	Difficoltà
particelle	calzini	1
colore SPIN LUNGO Z	COLORE DEI CALZINI	1
SPIN LUNGO X	LUNGHEZZA DEI CALZINI	1
$ +\rangle_z$	COLORE BLU $ B\rangle$	
$ -\rangle_z$	COLORE ROSSO $ R\rangle$	
$ +\rangle_x$	LUNGHEZZA $ L\rangle$	
$ -\rangle_x$	COZZI $ C\rangle$	
PRINCIPIO DI INDETERMINAZIONE	I CALZINI DIMENTICATI	

ERWIN PRENDE I CALZINI DAL CASSERO DEI CALZINI BLU $|B\rangle$
 TOCCANDO I CALZINI FA UNA MISURA DELLA LUNGHEZZA QUINDI
 $|B\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}|L\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}}|C\rangle$ E SAREMO AD ESPERIM. QUANDO TORNA
 A CUCINARE MISURA IL COLORE $\Rightarrow \frac{1}{\sqrt{2}}|L\rangle = \frac{1}{2}(\frac{1}{\sqrt{2}}|B\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}}|R\rangle)$
 $= \frac{1}{2}|B\rangle + \frac{1}{2}|R\rangle$ QUINDI META (DENTRO) BLU E META ROSSO

Figura 3.4a: griglie per l'analisi della metafora dei calzini.

Attività 4 – La metafora dei calzini

4.1 Si analizzi la metafora dei calzini di Erwin, compilando la tabella seguente e applicando ai calzini il formalismo elaborato per descrivere gli esperimenti di Stern e Gerlach.

Esperimento di Stern e Gerlach	Calzini di Erwin	Difficoltà
$Z \uparrow \downarrow$ & $X \uparrow \downarrow$	COLORE ROSSO/BLU & DIMENSIONE LUNGO/CORTO	1
DIVISIONE NEI CASSETTI	PREPARAZIONE DELLA MISURAZIONE	2
MISURAZIONE DELLA VARIABILE CONIUGATA	SCELTA TATILE DEL CALZINO DOPO AVER DIVISO X COLORE	2
RILEVAZIONE DELLO STATO COMPORATA IL RITORNO DELLA SOVRAPPOSIZIONE IN Z	GLI STATI LUNGHEZZA CERTA COMPORATA PERDITA DELLA MEMORIA DEL COLORE	
Z	OCCHI	
X	MANI	
PARTICELLE	CALZINI	

Figura 3.4b: griglie per l'analisi della metafora dei calzini.

È interessante, ai fini dell'attività, la sintesi del gruppo con la griglia di destra in figura:

"Erwin prende i calzini dal cassetto dei calzini blu $|B\rangle$. Toccando i calzini fa una misura della lunghezza quindi $|B\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} |L\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}} |C\rangle$ e seleziona ad esempio $|L\rangle$. Quando torna a guardare, misura il colore $\rightarrow \Psi = \frac{1}{\sqrt{2}} |L\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\frac{1}{\sqrt{2}} |B\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}} |R\rangle \right)$
 $= \frac{1}{2} |B\rangle + \frac{1}{2} |R\rangle$. Quindi metà (della metà) blu e metà rossi."

Esempi di riposta come questo sopra citato, o le griglie compilate in figura 3.4 mostrano la capacità dei docenti di leggere il brano in termini della realtà (gli esperimenti di Stern e Gerlach). La logica, e per alcuni docenti anche il formalismo, che erano stati consolidati nell'attività precedente sono ora uno strumento per interpretare la metafora.

L'esperienza degli insegnanti, tramite le risposte alle domande, porta alla luce interessanti questioni sull'utilizzo di questa metafora in campo didattico.

Punto 1: i docenti usano parole come quelle qui riportate per fare emergere le principali differenze tra il mondo classico e quello quantistico:.

"Strutturando un apparato di Stern.. con l'apparato Z che misura il colore, l'apparato X che misura la lunghezza ed il secondo apparato Z che seleziona il colore io troverei alla fine il 100% dei calzini di un solo colore (quello selezionato all'inizio dal I° Z). Questo non succede perché dal momento in cui misuro la lunghezza X perdo l'informazione sul colore e i calzini tornano ad essere in uno stato di sovrapposizione riguardante il colore (metà rossi e metà blu)" (gruppo GES).

"Nell'interpretazione classica la misura non interferisce con lo stato del sistema, cosa che invece accade nella descrizione quantistica: il processo influenza lo stato." (gruppo DIESEL).

"La descrizione classica considera le caratteristiche di un oggetto come proprie ed intrinseche. La meccanica quantistica assegna una proprietà ad un oggetto nel momento in cui viene misurato" (TAVOLONE).

Sono di fatto tre i concetti ritenuti maggiormente importanti:

1. La sovrapposizione quantistica che, quando applicata al mondo dei calzini, emerge come perdita di informazione
2. La misura quantistica che, a differenza di quella classica, "altera" il sistema che sto esaminando. Dalla metafora, tuttavia, non risulta chiaro se questa proprietà è da ritenersi intrinseca nell'atto della misura o del mondo quantistico oppure una sorta di finzione retorica.
3. Le caratteristiche e le proprietà dell'oggetto quantistico che, a differenza di quello classico, non sono definite a priori: non possiamo sapere con certezza di che colore è un calzino se non lo scelgo.

Punto 2: Il fatto che i calzini di Erwin, pur appartenendo apparentemente al mondo classico, seguano una logica quantistica, fa discutere diversi docenti: "quella quantistica [la descrizione] è sicuramente più accettabile della metafora perché del secondo esempio [dei calzini] abbiamo esperienza diretta" (SAVE THE CAT). Avere l'esperienza diretta degli oggetti e della probabilità in senso classico divide i docenti in due fazioni riguardo all'utilizzo della metafora.

Per alcuni attribuire ai calzini una proprietà che risiede fuori dall'esperienza comune ma che è propria del mondo microscopico/quantistico, come la sovrapposizione, è vista da una parte dei docenti come una barriera o un inghippo nella comprensione della metafora, perché si rimane ancorati alla conoscenza classica che ci conferma che quello che sta succedendo ai calzini è errato:

"La metafora rischia di essere fuorviante perché a livello macroscopico è assurda"
(GIORDANO)

"La metafora dei calzini può presentare dei dubbi poichè ciò che accade con i calzini (esperienza comune) è non comprensibile" (ONDA SU ONDA).

Per altri questo “squarcio” è visto come un trampolino di lancio per un nuovo mondo, per il quale si deve lasciare l'interpretazione quotidiana a favore di un nuovo modo di pensare:

"E' in grado di provocare uno shock che altrimenti potrebbe non passare semplicemente parlando di principio di indeterminazione" (SAVE THE CAT)

"Stimola nello studente una lettura della realtà diversa da quella classica"(TAVOLONE)

"La metafora costringe lo studente a mettere in discussione la logica che ha usato finora" (DIESEL)

CONCLUSIONI

L'inserimento della fisica del '900 all'interno dei programmi di V liceo ha spinto il gruppo di ricerca in didattica della fisica di Bologna a proporre e sperimentare percorsi e materiali didattici, con lo scopo non solo di formare l'insegnante su questi nuovi temi ma anche di favorire l'appropriazione negli studenti.

Le domande di questa tesi nascono, nello specifico, da una di queste sperimentazioni effettuate in una V liceo, con l'obiettivo di capire se un registro linguistico che utilizza metafore o analogie formali possa essere uno strumento utile e propizio in un contesto didattico. Il lavoro che ci si è proposti di fare è quindi la creazione di materiale didattico che accompagni l'insegnante e lo studente nell'analisi di una metafora, al fine di estrapolarne le caratteristiche salienti e di valorizzarla come strumento di riflessione critica su un fenomeno.

Sostenuti dall'abbondante letteratura di ricerca a riguardo, si è inoltre cercato di osservare in che modo una metafora potesse contribuire allo sviluppo di nuova conoscenza e come potesse veicolare strutture logiche-formali da un sistema ad un altro.

I risultati ottenuti nelle diverse fasi della sperimentazione riportata nella tesi evidenziano che:

- Sulla fisica quantistica esistono in letteratura metafore interessanti che possono essere valorizzate come strumento didattico, purché utilizzate con cautela e analizzate anche nei loro limiti;
- Attività strutturate con griglie di analisi delle metafore sono molto efficaci per diversi obiettivi: far capire velocemente il meccanismo metaforico, consolidare la conoscenza che già si ha in relazione ad un fenomeno; innescare dinamiche di gruppo vivaci, creative e proficue.
- Un risultato interessante emerso è inerente ad una differenza sostanziale tra le tabelle compilate degli studenti universitari e quelle dei docenti di scuola secondaria superiore è il numero di corrispondenze trovate: mentre uno studente tende a focalizzare la sua attenzione sulle corrispondenze più importanti, l'insegnante tende a forzare l'analogia e a studiarne le insidie. Questo è un atteggiamento noto in letteratura, dovuto alla particolare ottica con cui l'insegnante guarda ad una attività didattica: non solo un'occasione di crescita personale, ma

anche e soprattutto qualcosa da riportare in classe e padroneggiare davanti ai propri studenti.

La compilazione e il confronto fra le griglie ha inoltre portato i docenti a riflettere sulle corrispondenze mancanti e sui limiti del sistema metaforico. I docenti hanno sottolineato la componente soggettiva della lettura della metafora. La possibilità di una lettura soggettiva è stata accolta solitamente positivamente dai docenti che hanno apprezzato lo stimolo creativo che l'analisi di un brano può offrire all'interno di gruppi di lavoro.

Tuttavia, se da una parte la lettura soggettiva può stimolare la fantasia e la creatività degli studenti, dall'altra è anche stato sottolineato che una metafora troppo ricca di particolari, a volte superflui, può distogliere l'attenzione e risultare dannosa ai fini dell'apprendimento.

Sulla base risultati ottenuti, si sta valutando di seguire alcuni di questi insegnanti nel loro lavoro in classe per vedere come gestiscono le metafore in classe e per capire come studenti alle prime armi con la fisica quantistica utilizzano la griglia di analisi. Inoltre, nell'ottica di riproporre questo materiale in contesti di formazione degli insegnanti, si propone di integrare il materiale didattico riguardante le metafore con una guida per l'insegnante, che comprenda, oltre alla griglia precompilata da parte di esperti e una lista dei punti di forza ma anche dei limiti della metafora stessa.

BIBLIOGRAFIA

- Angela, P (2009), Le vie della divulgazione scientifica, in:
[http://www.treccani.it/enciclopedia/le-vie-della-divulgazione-scientifica_\(XXI-Secolo\)/](http://www.treccani.it/enciclopedia/le-vie-della-divulgazione-scientifica_(XXI-Secolo)/)
- Bachman, L. F. (1990), *Foundamental Consideration in Language Testing*, Oxford: Oxford University Press.
- Black, M. (1979) More about Metaphor, in *Metaphor and Thought*. Ed. Andrew Ortony. Cambridge: Cambridge University Press, 1979, pp. 19-43.
- Bodmer, W. (1985). *The Public Understanding of Science*. London: Royal Society.
- Boyd, R. Metaphor and Theory Change: What is 'Metaphor' a Metaphor For, in *Metaphor and Thought*. Ed. Andrew Ortony. Cambridge: Cambridge University Press, 1979, pp 356-408
- Cavendish, R. (1967). *The black arts*. New York: Capricorn Books.
- Dawkins, R. (2001). *L'arcobaleno della vita*. Collana saggi, Mondadori.
- Dunbar, K., Blanchette, I. (2001). The In vivo/Invitro Approach to Cognition: The Case of Analogy, in *Trends in Cognitive Sciences*, 5, pp. 334-339.
- Eco, U. (1990). *The limits of interpretation*. Bloomington: University of Indiana Press.
- Eco, U. (2004). Aspetti conoscitivi della metafora in Aristotele, in Eco et al.(2004), pp 5-7.
- Evans, R. , Evans, G. (1988). Cognitive Mechanism in Learning From Metaphors, in *Journal of Experimental Education*, 58, 1.
- 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.; Correlatore: Levrini, O.
- Gibbs, R. (1994). *Poetics of mind*, Cambridge University Press.
- Joli E., (2004). Elementi di una geografia della metafora nella scienza in :
[https://jcom.sissa.it/sites/default/files/documents/jcom0301\(2004\)C03_it.pdf](https://jcom.sissa.it/sites/default/files/documents/jcom0301(2004)C03_it.pdf) .
- Lai, G. (2015). Similitudini e metafore nella didattica della fisica moderna, in *Giornale di Fisica*, DOI: [10.1393/gdf/i2015-10216-9](https://doi.org/10.1393/gdf/i2015-10216-9) , VOL. LVI, N.1
- Lakoff, G. Johnson, M. (1998). *Metafora e vita quotidiana*. Milano: Bompiani.
- Lévy-Leblonde, J.M. (1999). *Quantum words for a quantum world*, DOI:10.1007/978-94-017-1454-9_5

- Lodovico, L. (2016). *Processi di appropriazione nello studio della fisica quantistica: analisi di una sperimentazione didattica in una quinta liceo scientifico*. Tesi di Laurea Magistrale in Fisica, Università di Bologna, Relatore: Levrini, O.
- Malgeri, M. Et all (2014). Teaching quantum physics by the sum over paths approach and GeoGebra simulation, in *European Journal of Physics*, Volume 35, Number 5
- Martari, Y. (2010). Manovre Cognitive. Un modello teorico della creatività, in *Intersezioni*, 2010, XXX, 2.
- McNamara, D. S. (2001). Reading both high-coherence and low coherence texts: Effects of text sequence and prior knowledge, in *Canadian Journal of Experimental Psychology*, 55(1).
- Ortony, A. (1993). *Metaphor and Thought*, Cambridge University Press.
- Pascolini, A. (2004). Metafore e comunicazione scientifica, in *Journal of Science Communication* 3(1).
- Petrie, H., Oshlag, R. Metaphor and Learning in *Metaphor and Thought*. Ed. Andrew Ortony. Cambridge: Cambridge University Press, 1979, pp 579-609.
- Petruccioli, S. (1994). *Atomi metafore paradossi, Neils Bohr e la costruzione di una nuova fisica*. Cambridge University Press.
- Piaget, J. (1971). *The principles of genetic epistemology*. New York: Basic Book.
- Piazza, G. (1987). Metafore e scoperte nella ricerca scientifica, in F. Alberoni (ed.), *Il presente e i suoi simboli*, Milan: Franco Angeli.
- Ravaioli, G. (2016). *Learning and accepting quantum physics. Re-analysis of a teaching proposal*. Tesi di Laurea Magistrale in Fisica, Università di Bologna, Relatore: Levrini, O.
- Scocca, F. (2016). *Formazione iniziale all'insegnamento della fisica quantistica con attività di cooperative learning: progettazione e realizzazione di uno studio pilota*. Tesi di Laurea Magistrale in Fisica, Università di Bologna, Relatore: Levrini, O.
- Tobey, R.(1971). *The american ideoloy of national science*. Pittsburg, PA: Univeristy of Pittsburgh Press
- Tomlison, W., Hansen, J (2011). *Metaphor and Creativity in Learning Science*.
- Turner, J. (1955). Maxwell and the Method of Physical Analogy, in *The British Journal for the Philosophy of Science*. Vol. 6, No. 23 (Nov., 1955), pp 226-238.
- Vickers, B. (1984). Analogy versus identity: The rejection of occult symbolism, 1580-1680. In B. Vickers (ed.), *Occult and scientific mentalities in the Renaissance*. Cambridge University Press.
- Zook, K.B., Di Vesta, J.M. (1991). Instructional analogies and conceptual misrepresentations, in

Journal of Educational Psychology, 86, pp. 589-600.

APPENDICI

APPENDICE A

LISTA DELLE METAFORE

Da 'L'universo elegante' p.44, 1999, Brian Greene. Metafora dell'effetto fotoelettrico.

"Per capire come Einstein sia riuscito a spiegare il fenomeno dell'effetto fotoelettrico, torniamo al nostro stanzone, dove ora fa un bel calduccio. L'orrido proprietario detesta i bambini e costringe tutti i minori di quindici anni a vivere in un seminterrato, che gli adulti possono vedere affacciandosi a una balconata. Come crudeltà aggiuntiva, ha stabilito che un bambino può lasciare quel postaccio solo se paga a una guardia una tassa di 950 lire. I bimbi non possiedono denaro, e così gli adulti cercano di salvarli gettando loro monete e banconote dalla balconata.

Ricordiamo che i soldi sono stati ridistribuiti in modo che ogni adulto possieda solo banconote e monete di un unico tipo. Il portatore delle cinquanta lire inizia a gettare qualche moneta, ma la somma è troppo scarsa per soddisfare la marea « infinita » di bambini che lottano selvaggiamente per accaparrarsi il denaro. Anche se la quantità di monete da 50 lire gettate è enorme, praticamente nessuno riuscirà in questo modo a raccogliere la cifra sufficiente per andarsene. Lo stesso accade quando iniziano i lanci di monete da 100 , 200 e 500 lire. Ma quando il possessore delle 1.000 lire inizia a gettare banconote, succede un fatto nuovo: i fortunati bambini che riescono ad afferrare anche un solo biglietto possono andarsene immediatamente. Al crescere della quantità di banconote gettate cresce anche il numero dei fuggiaschi, ognuno dei quali si ritrova esattamente con 50 lire di resto."

Da **'La fisica dei perplessi'**, 2014, Jim al-Khalili. Metafora della funzione d'onda.

"Un ladro è appena uscito di prigione e la polizia non è per nulla convinta che abbia cambiato vita, per cui, studiando una cartina della città, cerca di seugire i suoi movimenti dopo il rilascio. I poliziotti non riescono a determinare esattamente dove di trovi il ladro in ogni istante, ma possono cercare di indovinare la probabilità che avvengano furti negli appartamenti dei vari quartieri. Per cominciare, le case vicino alla prigione saranno più a rischio, ma l'aera interessati si allarga con il tempo; si può anche dire con relativa certezza che le zone più ricche saranno più a rischio di quelle povere. Questa ondata di crimini dovuti a un solo uomo si estende in tutta la città, e si può considerare come un'onda di probabilità: non è una cosa tangibile, o reale, è solo un insieme di numeri astrattamente assegnati a ogni luogo in città. In modo simile, la funzione d'onda si estende dal punto in cui l'elettrone è stato visto l'ultima volta e ci permette di calcolare quanto è probabile che ora si trovi in un punto o in un altro.

Gli investigatori si accorgono che la loro intuizione era corretta quando avviene un furto in un certo appartamento. Questo cambia la distribuzione di probabilità, perché ora si sa che il ladro sarà nei paraggi della scena del crimine. Allo stesso modo, se l'elettrone viene rilevato in un certo punto, allora la sua funzione d'onda cambia immediatamente. Nel momento della rilevazione ci sarà probabilità zero di trovarlo in qualunque altro posto, e poi la funzione d'onda evolve nel tempo e si estende di nuovo."

Da 'L'universo elegante' pag41, 1999, Brian Greene. Quantizzazione dell'energia nel corpo nero

"Vi trovate insieme con un enorme numero di individui -diciamo un numero «infinito» - inscatolati in uno stanzone gelido, il cui proprietario è un profittatore. Un termostato ultimo modello fa mostra di sé alla parete; ma vi accorgete presto che le tariffe imposte dal proprietario per il riscaldamento sono altissime. Se il termostato viene messo sui 10° C, ognuno deve pagare 100.000 lire al giorno; se si alza a 15° C, la cifra sale a 150.000 e così via. Visto che i vostri compagni di sventura sono infiniti, vi rendete conto che il malvagio proprietario guadagnerà una quantità infinita di denaro non appena il riscaldamento verrà acceso.

Ma leggendo meglio il contratto di affitto, vi accorgete di una possibile scappatoia. Il proprietario è un uomo molto occupato e non intende dare resto, soprattutto a un numero infinito di inquilini. Esiste dunque un sistema basato sulla fiducia: solo chi può pagare la cifra esatta paga interamente, gli altri danno quello che hanno. Vi viene allora in mente di raccogliere tutti i soldi dei vostri compagni e di organizzare il pagamento in questa maniera: un individuo prende tutte le monete da 50 lire, un altro tutte quelle da 100, e così via; in questo strano mondo, però, esistono strane banconote, e dopo quelle da 500 000 lire ve ne sono altre di valore ancora superiore, senza un limite massimo. Spavaldamente, posizionate il termometro a 25°C. Subito il proprietario si presenta a riscuotere il dovuto (250.000 lire a testa). Ecco cosa succede: chi ha le monete da 50 lire gliene dà 5000, chi ha quelle da 100 lire gliene dà 2500 e così via, fino ad arrivare a chi ha le banconote da 50 000, che ne paga 5, e a chi ha quelle da 100.000, che ne dà solo 2 (perché con 3 il proprietario dovrebbe dare resto). Tutti gli altri, però, hanno solo banconote da 500 000 in su, e quindi non possono pagare, perché ci sarebbe comunque un resto. Il proprietario, che si aspettava una quantità infinita di denaro, si ritrova invece con la misera somma di 2.450 000 lire (ci sono 9 tipi di monete e banconote dalle 50 alle 50.000 lire, e quindi 9 persone che possono pagare 1e 250.000; aggiungendo 1e 200.000 pagate da chi ha le banconote da 100.000 il conto torna).

Planck si comportò in modo molto simile nei confronti delle pretese dell'energia infinita. Arditamente, avanzò l'ipotesi che l'energia trasportata da un'onda elettromagnetica potesse presentarsi - come il denaro contante - solo in pacchetti ben precisi. Introdotta una «Moneta energetica», i valori possibili sono solo multipli interi di questa unità: uno, due, tre eccetera, e nient'altro, proprio come non esiste un quarto di cento lire o mezza banconota da mille. Come gli inquilini che non possono pagare il proprietario perché hanno banconote troppo grandi, se un'onda ha un'energia minima intrinseca più grande del valore che dovrebbe teoricamente fornire all'energia totale, non «paga» e rimane inerte."

Da **'On the nature of quantons'**, 2003, Science & Education, Levy-Leblonde

"Che la vera natura degli oggetti quantistici sia ancora oggetto di confusione è nota dalle ancora troppo comuni descrizioni in termini di un presunto "dualismo onda-particella". Bisogna sottolineare subito che questa formulazione è ambigua. Secondo questa l'oggetto quantistico è una volta onda e particella, o a volte onda e a volte particella. Nessuna di queste interpretazioni però ha senso. "Onda " e "particella" non sono oggetti ma concetti, addirittura incompatibili; di conseguenza, non possono descrivere la stessa entità. Mentre è vero che gli oggetti quantistici possano in alcuni casi sembrare come onde, e in altri casi come particelle, ed è più che vero che in molte occasioni, in particolare quelle esplorate dai moderni esperimenti, non somigliano ne a una ne all'altra.

La situazione qui è simile a quella incontrata dai primi esploratori dell'Australia, dove scoprirono strani animali che abitavano nei ruscelli. Osservati da davanti, avevano un becco da papera e i piedi palmati, mentre, osserati da dietro, mostravano un corpo peloso e una coda. Vennero così soprannominati "talpanatre". Si scoprì più tardi che questo "dualismo talpa-anatra" aveva una validità limitata e che le caratteristiche zoologiche di questi animali meritavano un nome proprio, e fu scelto "ornitorinco". La proposta di Bunge di chiamare quanti, costruita su una terminologia comune (elettroni, fotoni, nucleoni, etc..) ed estesa ad una comune categorizzazione, arriva dritto al punto, e si spera che questa terminologia gradualmente acquisti vigore."

"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 piatto 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 cose se ci fosse concesso di assaporare un piatto contenente un pò di anatra alla pechinese e di aragosta alla cantonese, ma solo in porzioni tali da corrispondere allo stesso prezzo totale, quanto più precisa è la nostra conoscenza di un 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."

Liberamente tratto da '**Quantum mechanics-A paradigms approach**' pag XXI, 2012, McIntyre.

"Erwin aveva una collezione di calzini molto semplice – rossi o blu, per andare all'università o per giocare a pallone, corti o lunghi a seconda che li portasse con pantaloni o pantaloncini.

Erwin teneva i calzini in due cassette: in uno teneva i calzini rossi e nell'altro quelli blu, ritenendo di poter capire se erano lunghi o corti semplicemente toccandoli.

Ma non era proprio così: infatti ogni volta che dal cassetto dei calzini rossi, estraeva due calze lunghe o due corte, c'era una probabilità del 50% che ognuno dei due fosse rosso o blu; stesso risultato per il cassetto blu. I calzini sembravano aver *dimenticato* la proprietà che Erwin aveva determinato precedentemente, ovvero il loro colore!

Erwin decise così di organizzare i calzini secondo la loro lunghezza: fece un cassetto con i calzini lunghi ed uno per i calzini corti. Quando però andava a prendere da uno dei due cassette due calze rosse o blu, c'era una probabilità del 50% che ognuno dei due fosse lungo o corto...avevano *dimenticato* la proprietà di essere lunghi o corti."

APPENDICE B

DOMANDE DELLE INTERVISTE

Per ogni metafora proposta, rispondere alle seguenti domande:

- Quali sono le caratteristiche del sistema fisico o i concetti che la metafora descrive in modo corretto? Quali invece, se presenti, vengono presentati in maniera imprecisa? Quali invece quelle che non vengono illustrate? Fare una lista.
- Quali possono essere le difficoltà nella comprensione del testo per un non-esperto in materia?

Domande generali (sull'utilizzo delle metafore):

- Queste metafore possono essere utili nella divulgazione o nell'insegnamento di principi base della Meccanica Quantistica? Perché?
- Ha mai utilizzato metafore o analogie durante le sue lezioni o nel corso della sua carriera scientifica? Se sì, quali sono le metafore che ha usato e che ritiene particolarmente efficaci?
- Le metafore possono essere, secondo lei, uno strumento scientifico (e non solo retorico) che può aiutare a generare nuove idee? Se sì, le è mai capitato nella sua vita professionale di far ricorso a metafore quando cercava nuove idee?

APPENDICE C

ATTIVITA' PROPOSTA AGLI STUDENTI

GRUPPO N. _____

METAFORA ANALIZZATA _____

Informazioni (compilare individualmente)

Corso di laurea _____

Contesti nei quali hai studiato la fisica quantistica:

- ⑨ Mai
- ⑨ A livello di scuola secondaria
- ⑨ In uno o più corsi universitari (indicare quali) _____

Livello di competenza che si ritiene di avere sul tema specifico trattato nella metafora:

- ⑨ Non ho nessuna competenza (non l'ho mai studiata)
- ⑨ Livello di competenza basso (l'ho studiato come tema marginale e senza approfondirlo)
- ⑨ Livello di competenza medio (l'ho studiato come tema importante)
- ⑨ Livello di competenza alta (oltre ad averlo studiato come tema importante, l'ho approfondito e/o ci ho ragionato parecchio e/o l'ho usato e applicato)

Attività (da svolgere in gruppo e individualmente)

- Di discussa in gruppo sulla metafora scelta e si compilino le tabelle riportate sul retro.

N.B. Le prime due colonne devono essere compilate dopo una discussione di gruppo. Ognuno però è libero di compilare la tabella anche in modo autonomo e diverso dalle decisioni del gruppo, inserendo il proprio pensiero.

Nella terza colonna, si valuti, il grado di difficoltà incontrate nel trovare e/o riconoscere la corrispondenza, su una scala da 1 (nessuna difficoltà) a 5 (difficoltà elevatissima, ovvero io non l'avrei mai trovata da solo e ancora non la capisco del tutto).

- Sulla base della discussione avvenuta nel gruppo, si risponda alle seguenti domande:
 2. Sulla base delle tue conoscenze, quali sono i limiti della metafora? Quali sono quegli aspetti che non rappresenta o include? Motivare la risposta
 3. La metafora è efficace a rappresentare il tema/concetto scientifico a cui si riferisce? Motivare la risposta
 4. E' stata utile per riflettere sul tema? Motivare la risposta
 5. Desideri fare altri commenti?

APPENDICE D

ATTIVITA' PROPOSTA AI DOCENTI

Attività 1 – ANALISI DI UNA METAFORA

Effetto Fotoelettrico

Si discuta in gruppo la seguente metafora e si compili la tabella riportata nel foglio delle risposte, indicando le corrispondenze individuate tra termini/espressioni della metafora (sistema sorgente) e aspetti/concetti fisici (sistema target).

L'universo elegante pag 44, 1999, Brian Greene. Effetto fotoelettrico

Per capire come Einstein sia riuscito a spiegare il fenomeno dell'effetto fotoelettrico, torniamo al nostro stanzone, dove ora fa un bel calduccio. L'orrido proprietario detesta i bambini e costringe tutti i minori di quindici anni a vivere in un seminterrato, che gli adulti possono vedere affacciandosi a una balconata. Come crudeltà aggiuntiva, ha stabilito che un bambino può lasciare quel postaccio solo se paga a una guardia una tassa di 950 lire. I bimbi non possiedono denaro, e così gli adulti cercano di salvarli gettando loro monete e banconote dalla balconata.

Ricordiamo che i soldi sono stati ridistribuiti in modo che ogni adulto possieda solo banconote e monete di un unico tipo. Il portatore delle cinquanta lire inizia a gettare qualche moneta, ma la somma è troppo scarsa per soddisfare la marea « infinita » di bambini che lottano selvaggiamente per accaparrarsi il denaro. Anche se la quantità di monete da 50 lire gettate è enorme, praticamente nessuno riuscirà in questo modo a raccogliere la cifra sufficiente per andarsene. Lo stesso accade quando iniziano i lanci di monete da 100 , 200 e 500 lire. Ma quando il possessore delle 1.000 lire inizia a gettare banconote, succede un fatto nuovo: i fortunati bambini che riescono ad afferrare anche un solo biglietto possono andarsene immediatamente. Al crescere della quantità di banconote gettate cresce anche il numero dei fuggiaschi, ognuno dei quali si ritrova esattamente con 50 lire di resto.

Attività 2 – La risposta degli esperti

Si confronti la tabella precedentemente compilata con la seguente griglia costruita da esperti e si evidenzino le principali differenze, riportando le osservazioni personali nel foglio delle risposte.

Attività 1 – ANALISI DI UNA METAFORA

Funzione d'onda

Si discuta in gruppo la seguente metafora e si compili la tabella riportata nel foglio delle risposte, indicando le corrispondenze individuate tra termini/espressioni della metafora (sistema sorgente) e aspetti/concetti fisici (sistema target).

La fisica dei perplessi, 2014, Jim al-Khalili. Sulla funzione d'onda e la natura probabilistica.

Un ladro è appena uscito di prigione e la polizia non è per nulla convinta che abbia cambiato vita, per cui, studiando una cartina della città, cerca di seguire i suoi movimenti dopo il rilascio. I poliziotti non riescono a determinare esattamente dove si trovi il ladro in ogni istante, ma possono cercare di indovinare la probabilità che avvengano furti negli appartamenti dei vari quartieri. Per cominciare, le case vicino alla prigione saranno più a rischio, ma l'area interessata si allarga con il tempo; si può anche dire con relativa certezza che le zone più ricche saranno più a rischio di quelle povere. Questa ondata di crimini dovuti a un solo uomo si estende in tutta la città, e si può considerare come un'onda di probabilità: non è una cosa tangibile, o reale, è solo un insieme di numeri astrattamente assegnati a ogni luogo in città. In modo simile, la funzione d'onda si estende dal punto in cui l'elettrone è stato visto l'ultima volta e ci permette di calcolare quanto è probabile che ora si trovi in un punto o in un altro.

Gli investigatori si accorgono che la loro intuizione era corretta quando avviene un furto in un certo appartamento. Questo cambia la distribuzione di probabilità, perché ora si sa che il ladro sarà nei paraggi della scena del crimine. Allo stesso modo, se l'elettrone viene rilevato in un certo punto, allora la sua funzione d'onda cambia immediatamente. Nel momento della rilevazione ci sarà probabilità zero di trovarlo in qualunque altro posto, e poi la funzione d'onda evolve nel tempo e si estende di nuovo.

Attività 2 – La risposta degli esperti

Si confronti la tabella precedentemente compilata con la seguente griglia costruita da esperti e si evidenzino le principali differenze, riportando le osservazioni personali nel foglio delle risposte.

Attività 3 - Gli esperimenti di Stern e Gerlach

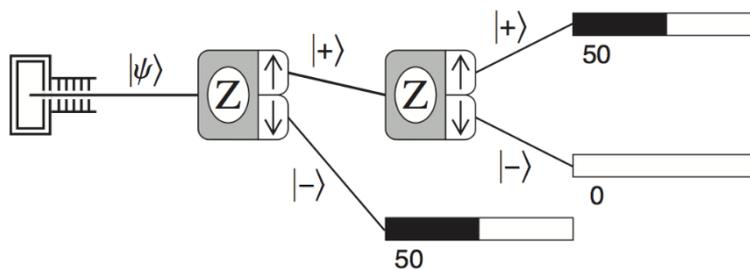


Fig. 1

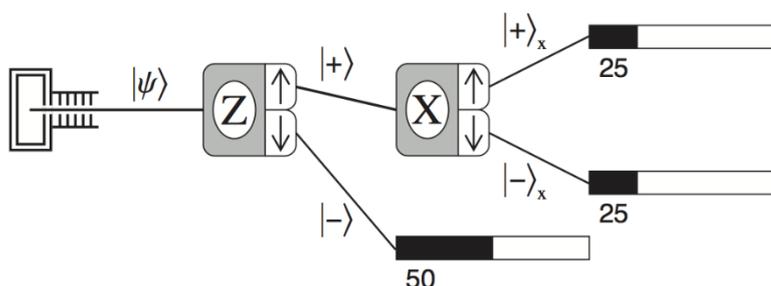


Fig. 2

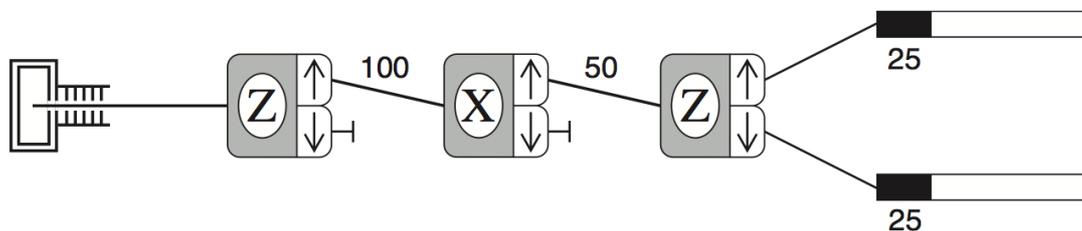


Fig. 3

Dopo aver discusso in gruppo, si risponda individualmente alle seguenti domande nel foglio di risposta:

- Si trovi un modo conciso per illustrare il significato degli esperimenti di Stern e Gerlach di figura 1 e 2 e si ricostruisca il ragionamento per arrivare a descrivere, anche formalmente, gli esiti dell'esperimento di figura 3.
- Facendo riferimento alle figure, si trovino espressioni concise ed efficaci per introdurre in classe, attraverso queste configurazioni dell'esperimento di Stern e Gerlach, i concetti

di *stato di sovrapposizione*, *ampiezza di probabilità* e *preparazione-processo-misura* e di altre proprietà tipicamente quantistiche evidenziate dagli esperimenti di Stern e Gerlach.

Attività 4 – La metafora dei calzini

4.1 Si discuta la seguente **metafora dei calzini di Erwin** elaborata da McIntyre per introdurre gli esperimenti di Stern e Gerlach e per sottolineare alcune proprietà fondamentali degli oggetti quantistici.

La si analizzi, compilando la tabella riportata nel foglio delle risposte e applicando ai calzini il formalismo elaborato per descrivere gli esperimenti di Stern e Gerlach.

Liberamente tratto da **Quantum mechanics - A paradigms approach** pag XXI, 2012, McIntyre.

Erwin aveva una collezione di calzini molto semplice – rossi o blu, per andare all'università o per giocare a pallone, corti o lunghi a seconda che li portasse con pantaloni o pantaloncini.

Erwin teneva i calzini in due cassette: in uno teneva i calzini rossi e nell'altro quelli blu, ritenendo di poter capire se erano lunghi o corti semplicemente toccandoli.

Ma non era proprio così: infatti ogni volta che dal cassetto dei calzini rossi, estraeva due calze lunghe o due corte, c'era una probabilità del 50% che ognuno dei due fosse rosso o blu; stesso risultato per il cassetto blu. I calzini sembravano aver *dimenticato* la proprietà che Erwin aveva determinato precedentemente, ovvero il loro colore!

Erwin decise così di organizzare i calzini secondo la loro lunghezza: fece un cassetto con i calzini lunghi ed uno per i calzini corti. Quando però andava a prendere da uno dei due cassette due calze rosse o blu, c'era una probabilità del 50% che ognuno dei due fosse lungo o corto...avevano *dimenticato* la proprietà di essere lunghi o corti.

Dopo aver discusso in gruppo, si risponda individualmente alle seguenti domande nel foglio di risposta:

- a. Quali differenze si evincono tra la descrizione classica e quella quantistica dei processi fisici, se si confrontano gli esperimenti di Stern e Gerlach coi calzini di Erwin?
- b. Quali interrogativi pensi possano essere stimolati dalla metafora in una classe di Liceo?
- c. Quali potenzialità didattiche ha, secondo te, questa metafora?

APPENDICE E

ESEMPI DI GRIGLIE DEI DOCENTI

Attività 1

Metafora analizzata:
 Funzione d'onda
 Effetto fotoelettrico

Si compili la tabella, indicando le corrispondenze individuate tra termini/espressioni della metafora (sistema sorgente) e aspetti/concetti fisici (sistema target).

N.B. Le prime due colonne devono essere compilate dopo una discussione di gruppo. Ognuno però è libero di compilare la tabella anche in modo autonomo e diverso dalle decisioni del gruppo. Nella terza colonna si valuti il grado delle difficoltà incontrate nel trovare e/o riconoscere la corrispondenza, su una scala da 1 (nessuna difficoltà) a 5 (difficoltà elevatissima, ovvero io non l'avrei mai trovata da solo e ancora non la capisco del tutto).

Personaggio, oggetto o azione presente nella metafora	Corrispondente fisico reale	Difficoltà
RENOSTRONA LADRO	ELETTRONE	1
POLIZIA	OSSE RIVATICE	1
CARTINA CITTA	AMBIENTE / APPARATO SPECIFICHE	3
MOVIMENTI DOPO IL RILASCIO	TRANSIZIONI DATE LE CONDIZIONI AL GIORNO	2
FURTO	MISURA DELLA POSIZIONE DELL'ELETTRONE	2
ZONE RICCHE E POVERE	INTERFERENZA	3
PRIGIONE	EMETTITORE DI ELETTRONI	4
CAMBIO DI VITA		5
SOLO UOMO	SINGOLO ELETTRONE	1

Attività 1

Metafora analizzata:
 Funzione d'onda
 Effetto fotoelettrico

Si compili la tabella, indicando le corrispondenze individuate tra termini/espressioni della metafora (sistema sorgente) e aspetti/concetti fisici (sistema target).

N.B. Le prime due colonne devono essere compilate dopo una discussione di gruppo. Ognuno però è libero di compilare la tabella anche in modo autonomo e diverso dalle decisioni del gruppo. Nella terza colonna si valuti il grado delle difficoltà incontrate nel trovare e/o riconoscere la corrispondenza, su una scala da 1 (nessuna difficoltà) a 5 (difficoltà elevatissima, ovvero io non l'avrei mai trovata da solo e ancora non la capisco del tutto).

Personaggio, oggetto o azione presente nella metafora	Corrispondente fisico reale	Difficoltà
ladro	elettrone	1
poliziotti	gli osservatori, cioè che fanno le misure	1
giudice di animo	funzione d'onda	1
carcere	regione in cui si può trovare l'elettrone	1
affollamento ricchi	memoria della funzione d'onda	2
zoo favore	memoria della funzione d'onda	2
tutti	eventi osservati	3
prigione	superficie dell'elettrone l'interazione con i sistemi	3

Attività 1

Metafora analizzata:
 Funzione d'onda
 Effetto fotoelettrico

Si compili la tabella, indicando le corrispondenze individuate tra termini/espressioni della metafora (sistema sorgente) e aspetti/concetti fisici (sistema target).

N.B. Le prime due colonne devono essere compilate dopo una discussione di gruppo. Ognuno però è libero di compilare la tabella anche in modo autonomo e diverso dalle decisioni del gruppo. Nella terza colonna si valuti il grado delle difficoltà incontrate nel trovare e/o riconoscere la corrispondenza, su una scala da 1 (nessuna difficoltà) a 5 (difficoltà elevatissima, ovvero io non l'avrei mai trovata da solo e ancora non la capisco del tutto).

Personaggio, oggetto o azione presente nella metafora	Corrispondente fisico reale	Difficoltà
PERSONAGGI: URSALIMPROPRIETARIO, AGLIUTI, o BAIABIANI	→ regione → sorgente	2
OGGETTI: BALCONOTE, TAGLIO DI 1000 €, MONETE, RESTO	→ FOTONI → SOGLIA	2
AZIONI: LANCIO, IL RECUPERO, LA FUGA	→ RAGGIO INCIDENTE → EMISSIONE DI FOTONI	2
A non c'è nessuna misura da 950 anni di fatto	→ ASSORBIMENTO	

Attività 1

Metafora analizzata:
 Funzione d'onda
 Effetto fotoelettrico

Si compili la tabella, indicando le corrispondenze individuate tra termini/espressioni della metafora (sistema sorgente) e aspetti/concetti fisici (sistema target).

N.B. Le prime due colonne devono essere compilate dopo una discussione di gruppo. Ognuno però è libero di compilare la tabella anche in modo autonomo e diverso dalle decisioni del gruppo. Nella terza colonna si valuti il grado delle difficoltà incontrate nel trovare e/o riconoscere la corrispondenza, su una scala da 1 (nessuna difficoltà) a 5 (difficoltà elevatissima, ovvero io non l'avrei mai trovata da solo e ancora non la capisco del tutto).

Personaggio, oggetto o azione presente nella metafora	Corrispondente fisico reale	Difficoltà
ladro	elettrone	1
poliziotti	osservatore	1
furto	evento osservato (misura)	2
prigione	sorgente di elettroni	2
case	rivelatori	2
"ondate dei comini"	funzione d'onda	1

Attività 1

Metafora analizzata:
 Funzione d'onda
 Effetto fotoelettrico

Si compili la tabella, indicando le corrispondenze individuate tra termini/espressioni della metafora (sistema sorgente) e aspetti/concetti fisici (sistema target).

N.B. Le prime due colonne devono essere compilate dopo una discussione di gruppo. Ognuno però è libero di compilare la tabella anche in modo autonomo e diverso dalle decisioni del gruppo. Nella terza colonna si valuti il grado delle difficoltà incontrate nel trovare e/o riconoscere la corrispondenza, su una scala da 1 (nessuna difficoltà) a 5 (difficoltà elevatissima, ovvero io non l'avrei mai trovata da solo e ancora non la capisco del tutto).

Personaggio, oggetto o azione presente nella metafora	Corrispondente fisico reale	Difficoltà
postaccio	metallo	1
bambini	elettroni	2
monete	fotoni	2
tassa 90 lire	lavoro di estrazione	1
balconata	sergente di fotoni	2
adulto	colore	4
50, 100, 200... lire	quanto di energia	3
resto	energia cinetica elettroni	2

Attività 1

Metafora analizzata:
 Funzione d'onda
 Effetto fotoelettrico

Si compili la tabella, indicando le corrispondenze individuate tra termini/espressioni della metafora (sistema sorgente) e aspetti/concetti fisici (sistema target).

N.B. Le prime due colonne devono essere compilate dopo una discussione di gruppo. Ognuno però è libero di compilare la tabella anche in modo autonomo e diverso dalle decisioni del gruppo. Nella terza colonna si valuti il grado delle difficoltà incontrate nel trovare e/o riconoscere la corrispondenza, su una scala da 1 (nessuna difficoltà) a 5 (difficoltà elevatissima, ovvero io non l'avrei mai trovata da solo e ancora non la capisco del tutto).

Personaggio, oggetto o azione presente nella metafora	Corrispondente fisico reale	Difficoltà
BAMBINI	ELETRONI	1
950 LIRE	ENERGIA DI ESTRAZIONE ENERGIA IN SOGLIA	2
MONETE DA 100, 100, 500 LIRE	ENERGIE INFERIORI ALL'ENERGIA DI SOGLIA	2
MONETE DI UN UNICO TIPO	RADIAZIONE MONOCROMATICA	2
SEMINTERRATO	PIASTRINA	1
I BAMBINI NON POSSIEDONO DENARO	GLI ELETRONI NON HANNO ENERGIA SUFF. PER FARE IL SALTO	2
50 LIRE DI RESTO	ENERGIA CINETICA MASSIMA	2/3
QUANTITA' DI MONETE E MONETE	INTENSITA' DELLA RADIAZIONE	
BANCNOTE	FOTONE	

Attività 1

Metafora analizzata:
 Funzione d'onda
 Effetto fotoelettrico

Si compili la tabella, indicando le corrispondenze individuate tra termini/espressioni della metafora (sistema sorgente) e aspetti/concetti fisici (sistema target).

N.B. Le prime due colonne devono essere compilate dopo una discussione di gruppo. Ognuno però è libero di compilare la tabella anche in modo autonomo e diverso dalle decisioni del gruppo. Nella terza colonna si valuti il grado delle difficoltà incontrate nel trovare e/o riconoscere la corrispondenza, su una scala da 1 (nessuna difficoltà) a 5 (difficoltà elevatissima, ovvero io non l'avrei mai trovata da solo e ancora non la capisco del tutto).

Personaggio, oggetto o azione presente nella metafora	Corrispondente fisico reale	Difficoltà
postaccio	metallo	1
bambini	elettroni	2
monete	fotoni	2
tassa 950 lire	lavoro di estrazione	1
balconata	sergente fotoni	2
adulto	colore	4
50 lire, 100 lire...	quanto di energia	3
resto	energia cinetica dell'elettrone	2