



ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

DEPARTMENT OF PHYSICS AND ASTRONOMY “A. RIGHI”

SECOND CYCLE DEGREE

PHYSICS

**MODELLI DI SPIEGAZIONE TRA FISICA
CLASSICA E QUANTISTICA:
UN MODULO DIDATTICO
SULLE DISUGUAGLIANZE DI BELL**

Supervisor

Prof.ssa Olivia Levrini

Defended by

Giulia Belardinelli

Co-Supervisor

Dott.ssa Sara Satanassi

Graduation Session March 2026

Academic Year 2024/2025

Abstract

Questa ricerca si colloca nell'ambito della ricerca in Didattica della Fisica e affronta la sfida di rendere accessibile l'entanglement nella scuola secondaria di secondo grado, elemento chiave della seconda rivoluzione quantistica. Il lavoro si inserisce nel contesto di ricerca *design-based* del corso extracurricolare PLS "Le due Rivoluzioni Quantistiche" (Università di Bologna) e valorizza il gioco di Bell nella formulazione divulgativa proposta da Gisin, per rendere espliciti i vincoli che la località impone alle spiegazioni classiche e, quando queste non risultano più soddisfacenti, sostenere l'emergere del concetto di entanglement come spiegazione non locale.

Per indagare i ragionamenti degli studenti emersi durante il percorso, è stato costruito un Tutorial sul gioco di Bell, impiegato come guida e supporto in interviste semistrutturate. L'analisi qualitativa di tre casi studio (Ivan, Francesco, Ester) è stata condotta nel framework della *Coordination Class Theory*, interpretando l'evoluzione del ragionamento come riorganizzazione progressiva di *readout strategies* e *reti causali* quando la località viene progressivamente messa in discussione, fino alla costruzione della disuguaglianza di Bell e alla successiva violazione. In particolare, gli elementi che caratterizzano una forma di pensiero quantistico emersi dall'analisi delle interviste sono: *i)* disporre di alternative classiche e di *readout strategies* funzionali per estrarre informazioni rilevanti anche quando il contesto le mette alla prova; *ii)* essere disposti a mettere in discussione *il sistema di inferenze* quando il Tutorial conduce al vincolo (disuguaglianza) e alla tensione introdotta dalla violazione; *iii)* accettare la negoziabilità dell'assunto di località, trattandolo come ipotesi rivedibile e non come presupposto intoccabile.

Indice

Introduzione.....	4
Capitolo 1. La Seconda Rivoluzione Quantistica.....	7
1.1. Prima e Seconda Rivoluzione Quantistica.....	7
1.2. Breve revisione della letteratura.....	10
1.3. Approcci in letteratura per introdurre l'entanglement.....	15
1.4. Contributo del Gruppo di Ricerca di Bologna.....	26
Capitolo 2. La seconda RQ: sfide sperimentali, concettuali e epistemologiche.....	31
2.1. Il Grande Paradosso della Meccanica Quantistica.....	31
2.1.1. Il paradosso EPR.....	33
2.1.2. La posizione di Bohr: la replica al paradosso e l'importanza della procedura di misurazione.....	37
2.1.3. Spunti di riflessione: il vero problema di Einstein.....	40
2.2. Dalle ipotesi di EPR alle disuguaglianze di Bell.....	46
2.2.1. Il programma a variabili nascoste.....	46
2.2.2. John Bell e la svolta nell'interpretazione della MQ.....	50
2.2.3. Spunti di riflessione: da dibattito metafisico a vincolo sperimentale.....	57
2.2.4. Il Gioco di Bell.....	59
2.3. Le verifiche sperimentali del teorema di Bell.....	63
2.3.1. Gli esperimenti di Clauser.....	64
2.3.2. Gli esperimenti di Aspect.....	69
2.3.3. Gli esperimenti di Zeilinger e la chiusura del locality loophole.....	74
2.3.4. Gli esperimenti dal 2000 al 2015: la chiusura del fair-sampling loopholes.....	77
2.3.5. Dal BIG Bell Test al Cosmic Bell tests: la chiusura del freedom-of-choice loophole.....	79
Capitolo 3. Il Corso PLS tra progettazione e sperimentazione.....	82
3.1. Il PLS come contesto sperimentale.....	82
3.2. Descrizione del corso.....	84
3.3. Entanglement e non località: le novità nella progettazione del corso 2025.....	87
3.3.1. Prima parte: Località, Correlazione e Spiegazione.....	88
3.3.2. Seconda parte: Influenza e Causa comune alla prova.....	92
3.3.3. Terza parte: Il passaggio al modello e alla logica binaria.....	95
3.4. Dal percorso PLS alla progettazione del Tutorial.....	105
Capitolo 4. Metodologia di Analisi.....	109
4.1. Materiali raccolti e Metodologia.....	109
4.1.2. Scelta del campione.....	111
4.1.3. Fasi metodologiche.....	112
4.2. Teoria delle Classi di Coordinazione.....	113
4.2.1. L'architettura interna degli elementi della Teoria delle Classi di Coordinazione.....	113
4.2.2. Processi attraverso i quali una coordination class viene costruita.....	115
4.2.3. Elementi problematici nella creazione di una nuova Classe di Coordinazione.....	117
4.3. La ricerca in didattica della fisica e Classi di Coordinazione.....	119

Capitolo 5. Analisi e Discussione dei Risultati.....	121
5.1. Analisi dei Dati.....	121
5.1.1. Il caso di Ivan.....	121
5.1.2. Il caso di Ester.....	135
5.1.3. Il caso di Francesco.....	146
5.2. Discussione dei risultati.....	158
Conclusioni.....	163
Bibliografia.....	165
Appendice 1.....	173
Appendice 2.....	177
Appendice 3.....	180
Appendice 4.....	182
Appendice 5.....	190

Introduzione

rivoluzióne s. f. [dal lat. tardo *revolutio* -onis «rivolgimento, ritorno», der. di *revolvĕre*: v. *rivolgere*]. – [...] 2. Mutamento radicale di un ordine statuale e sociale, nei suoi aspetti economici e politici: [...] b. In senso più ampio, qualsiasi processo storico o movimento attraverso il quale si determini un radicale mutamento di fatto delle strutture economico-sociali e politiche, o di particolari settori di attività: [...] r. scientifica, nella storiografia della scienza, il periodo (sec. 17°) che vide l’affermarsi della «nuova» fisica di Galileo e di Newton; [...] c. fig. Mutamento, trasformazione, innovazione radicale: [...] . (Istituto della Enciclopedia Italiana)

“Se fossimo vissuti all’epoca della rivoluzione newtoniana, avremmo desiderato capire che cosa stava accadendo? Oggi la fisica quantistica ci offre l’opportunità di vivere una rivoluzione concettuale di analoga importanza.” (Gisin, 2014, Prefazione).

Il termine rivoluzione indica un mutamento radicale e, in senso esteso, può riferirsi a processi che trasformano in profondità particolari settori di attività. Questa espressione è stata più volte utilizzata nella storiografia della scienza per rendere evidenti alcune fasi di riorganizzazione di teorie, idee e strumenti appartenenti alla disciplina. In questo momento storico, la citazione di Gisin (2014) in esergo ci invita a fare attenzione ad un nuovo cambiamento radicale, che viene chiamato con il termine *Seconda Rivoluzione Quantistica*. Negli ultimi anni lo sviluppo delle tecnologie quantistiche ha reso sempre più urgente, per la ricerca in didattica della fisica, interrogarsi su quali contenuti e quali forme di insegnamento possano rendere accessibili a studenti e studentesse della scuola secondaria di secondo grado i concetti chiave della *Seconda Rivoluzione Quantistica*. In questo scenario, l’entanglement assume un ruolo centrale: non soltanto come risorsa per diverse applicazioni tecnologiche (crittografia, teletrasporto, calcolo), ma soprattutto come concetto capace di mettere in tensione assunzioni profonde del ragionamento fisico di senso comune, in particolare l’idea di località. In letteratura, tuttavia, emergono ancora pochi percorsi che mettano l’entanglement al centro come oggetto di apprendimento per questo target e, soprattutto, manca una reale uniformità di approccio.

Il presente lavoro di tesi si colloca nel programma di ricerca del gruppo di Didattica della Fisica dell’Università di Bologna, impegnato da anni nella progettazione e sperimentazione

iterativa di moduli sulle *Due Rivoluzioni Quantistiche* in un'ottica di ricerca *design-based*. Il contesto sperimentale è rappresentato dal corso extracurricolare PLS “Le due Rivoluzioni Quantistiche”, rivolto a studenti e studentesse di scuola secondaria di secondo grado. All'interno dell'edizione descritta in questa tesi, una parte significativa del lavoro è stata dedicata alla progettazione di attività sul gioco di Bell nella formulazione proposta da Nicolas Gisin, che permette di rendere espliciti i vincoli che la località impone alle spiegazioni delle correlazioni e, in modo non formale, apre alla necessità di una riorganizzazione concettuale che porta all'accettazione dell'entanglement come spiegazione non locale.

Lo scopo del progetto è duplice: da un lato vuole contribuire alla progettazione di un percorso che introduca l'entanglement valorizzandone le dimensioni concettuale, epistemologica e sperimentale; dall'altro vuole indagare se e come gli studenti hanno colto pienamente il ragionamento proposto. Per questo secondo punto, è stato sviluppato e sperimentato un Tutorial rispetto alla proposta didattica, strumento che permette di far emergere il filo conduttore del ragionamento e che, tramite interviste semistrutturate, ci ha permesso di indagare il cambiamento concettuale degli studenti.

La tesi è strutturata come segue.

Il capitolo 1 inquadra la seconda rivoluzione quantistica e ne discute lo stato dell'arte nella ricerca in didattica della fisica, mettendo in evidenza la necessità di nuovi approcci e presentando la proposta sviluppata in questo lavoro di tesi all'interno del suo contesto di ricerca.

Il capitolo 2 ricostruisce gli eventi storici legati all'entanglement, dal paradosso EPR, fino alle verifiche sperimentali e alle sfide legate ai *loopholes*, in un'ottica che vuole evidenziarne il valore concettuale, epistemologico e sperimentale.

Il capitolo 3 descrive il corso PLS come contesto di progettazione e sperimentazione ed esplicita le scelte didattiche adottate per introdurre l'entanglement attraverso il gioco di Bell. Nell'ultima parte è presentato il Tutorial “Il gioco di Bell”, centro della sperimentazione.

Il capitolo 4 presenta materiali, campione e metodo di analisi, motivando la scelta di utilizzare la *Coordination Class Theory* come lente per interpretare la riorganizzazione delle *readout strategies* e *reti inferenziali* quando l'assunto di località viene progressivamente messo sotto pressione dal percorso.

Il capitolo 5 riporta l'analisi di tre casi studio e la discussione dei risultati, ricostruendo in dettaglio i ragionamenti degli studenti lungo le quattro parti del Tutorial e discutendo che cosa emerge rispetto al cambiamento concettuale osservabile nei dati.

Capitolo 1

La Seconda Rivoluzione Quantistica

1.1. Prima e Seconda Rivoluzione Quantistica

Negli ultimi anni, l'impatto delle tecnologie quantistiche ha reso sempre più utile attribuire un nome al cambiamento in corso. Dowling e Milburn (2003) propongono una distinzione tra una prima e una seconda rivoluzione quantistica. La prima, sviluppatasi nei primi decenni del Novecento, ha introdotto nuovi principi per descrivere i fenomeni microscopici (come la quantizzazione dell'energia e la dualità onda-particella), ponendo le basi teoriche per lo sviluppo di una prima era di tecnologie quantistiche alla base del funzionamento della società contemporanea, quali i semiconduttori e i laser. La seconda rivoluzione quantistica, secondo gli stessi autori, si caratterizza invece per la possibilità di isolare, controllare e manipolare singoli sistemi quantistici. Essa non consiste soltanto nell'applicazione di una teoria già consolidata, ma in un cambiamento delle pratiche scientifiche: fenomeni come la sovrapposizione e l'entanglement diventano risorse operative, alla base di sviluppi quali il calcolo quantistico, la comunicazione quantistica e la metrologia avanzata (Dowling & Milburn, 2003).

A partire dai primi anni del decennio 2010, lo sviluppo delle tecnologie quantistiche ha progressivamente assunto un ruolo centrale nelle strategie nazionali di ricerca e innovazione di numerosi Paesi. Per esempio, negli Stati Uniti il *National Quantum Initiative Act*, approvato dal Congresso nel 2018, ha istituito un quadro federale coordinato per sostenere la ricerca e lo sviluppo in *quantum information science and technology*, con l'obiettivo di allineare investimenti, infrastrutture e programmi di finanziamento pubblico. In Cina, le tecnologie quantistiche sono state progressivamente inserite nei piani di sviluppo quinquennali, evolvendo da programmi di ricerca esplorativa verso una strategia statale coordinata di lungo periodo che copre comunicazione quantistica, calcolo quantistico e sensori quantistici, con consistenti investimenti pubblici e una forte centralizzazione della pianificazione tecnologica.

Nel contesto dell'Unione europea, il *Quantum Manifesto* del 2016 ha costituito un documento di riferimento per l'elaborazione di programmi europei dedicati alle tecnologie quantistiche, mobilitando una vasta comunità scientifica e industriale attorno all'idea di un'iniziativa integrata su larga scala. Su questa base, nel 2018 è stata lanciata la *Quantum Technologies Flagship*, un programma di ricerca e innovazione decennale con un finanziamento complessivo previsto di circa un miliardo di euro, concepito per consolidare e ampliare la capacità europea di generare risultati scientifici e tecnologici di rilievo nelle principali aree applicative del quantum. Negli anni più recenti, la Commissione europea ha presentato una strategia dedicata alle tecnologie quantistiche (*Quantum Europe Strategy*) e ha avviato l'elaborazione di un quadro normativo specifico (*Quantum Act*), con l'obiettivo di rafforzare il coordinamento tra le iniziative nazionali e definire strumenti comuni di governance e di sostegno allo sviluppo del settore.

All'interno di questi documenti, la dimensione educativa è integrata nelle linee strategiche di sviluppo dell'ecosistema quantistico europeo. In particolare, la *Strategic Research and Industry Agenda 2030* della Quantum Flagship definisce per il periodo 2023–2026 una serie di obiettivi che coinvolgono direttamente i sistemi di istruzione e formazione. Tra questi rientrano:

- i. La promozione della consapevolezza dei diversi casi d'uso delle tecnologie quantistiche nei settori economici attraverso interventi in ambito educativo, formativo e decisionale;
- ii. L'aumento della consapevolezza e dell'accettazione delle tecnologie quantistiche a tutti i livelli accademici e nella popolazione generale;
- iii. La costruzione di un ecosistema educativo aperto e completo, costituito da moduli integrabili nei percorsi di divulgazione, scuola secondaria, università e formazione industriale, aggiornato in relazione ai bisogni dell'industria e della società;
- iv. L'allineamento degli obiettivi di apprendimento delle tecnologie quantistiche nell'istruzione superiore con la formazione industriale e i criteri di assunzione mediante un *Competence Framework* volto a consentire un adattamento e una revisione periodica dei curricula (European Quantum Flagship, 2024, p. 181).

In tale configurazione, l'educazione è formalmente inclusa tra i mezzi con cui si sostiene lo sviluppo scientifico, tecnologico e industriale associato alla seconda rivoluzione quantistica. Nel contesto italiano le tecnologie quantistiche compaiono nei documenti di programmazione educativa e strategica. In particolare, il Piano Scuola 4.0 (Ministero dell'Istruzione, 2022)

include il calcolo quantistico tra le aree rilevanti per il potenziamento delle competenze STEM nella scuola secondaria di secondo grado. La Strategia Quantistica Italiana (MIUR, 2025) prevede l'introduzione della *Quantum Science and Technologies* nei percorsi della scuola secondaria di secondo grado, con l'obiettivo di favorire lo sviluppo di competenze qualificate e di rafforzare la cultura scientifica. In questo quadro, la dimensione educativa è richiamata come ambito attraverso cui sostenere la preparazione delle future professionalità e la partecipazione informata ai processi di innovazione scientifica e tecnologica.

Nell'ultimo decennio, è dunque sorta la necessità di sviluppare percorsi didattici per preparare le nuove generazioni di esperti. Negli ultimi anni, la ricerca in Didattica della Fisica ha compiuto progressi significativi in questa direzione, sviluppando percorsi, ambienti digitali, piattaforme interattive (Bondani et al., 2022; DeVore & Singh, 2020; De Renzi et al., 2025) e proposte game-based (Chiofalo et al., 2022; De Renzi et al., 2025) finalizzate all'introduzione dei concetti alla base delle tecnologie quantistiche.

Sul piano curricolare, tuttavia, l'insegnamento della meccanica quantistica nella scuola secondaria italiana è prevalentemente incentrato su un'introduzione pseudo-storica dei nuclei della cosiddetta "vecchia teoria dei quanti" (MIUR, 2010). Studi hanno mostrato che tale impostazione, spesso organizzata secondo una successione cronologica delle scoperte, può favorire una trattazione frammentata dei concetti, rendendo complesso per gli studenti coordinare in modo unitario gli elementi teorici e distinguere le specificità del quadro quantistico rispetto agli schemi classici (i.e., Levrini & Fantini, 2013; Ravaioli, 2016).

Alla luce dei risultati della ricerca didattica, l'attuale contesto scientifico e tecnologico apre un'opportunità particolarmente significativa: ripensare l'insegnamento della fisica quantistica nella scuola secondaria non solo in termini di contenuti e modalità di introduzione dei concetti fondamentali, ma anche in relazione al ruolo culturale che esso può assumere in una società contemporanea.

La seconda rivoluzione quantistica può essere letta come una trasformazione dei sistemi di conoscenza entro i quali si articolano pratiche scientifiche, strumenti tecnologici e rappresentazioni della realtà (Renn, 2020). Non si tratta dunque esclusivamente di un avanzamento tecnico e tecnologico, ma di una riconfigurazione delle strutture epistemiche e materiali attraverso le quali la conoscenza viene prodotta, stabilizzata e trasmessa. Anche Gisin (2014) invita a riconoscere nella fase attuale un momento di particolare rilevanza per la fisica quantistica, paragonabile, per portata concettuale, ad altre fasi di riorganizzazione della

conoscenza scientifica, come le rivoluzioni darwiniana e newtoniana. In questo senso, la seconda rivoluzione quantistica non riguarda esclusivamente lo sviluppo di nuove tecnologie, ma riapre la riflessione sui fondamenti, sulle interpretazioni e sul rapporto tra scienza, tecnologia, natura e società (Satanassi & Levrini, 2025).

Considerare tale dimensione consente di riconoscere nell'insegnamento della fisica quantistica uno dei luoghi in cui può essere compresa ed elaborata la trasformazione epistemica e culturale in atto, contribuendo al contempo ad allineare l'istituzione scolastica alle dinamiche scientifiche e tecnologiche che caratterizzano la società contemporanea.

1.2. Breve revisione della letteratura

La ricerca internazionale in Didattica della Fisica da tempo si sta dedicando allo sviluppo di percorsi per introdurre la fisica quantistica a studenti di diversi gradi scolastici e con diversi background. Tra i contributi più significativi si collocano studi che non si concentrano esclusivamente sui contenuti da introdurre, ma mettono in luce la natura dinamica della fisica quantistica, evidenziandone il ruolo nello sviluppo delle tecnologie emergenti e il carattere ancora aperto del dibattito interpretativo. In tale prospettiva, la disciplina appare come un campo di conoscenza in trasformazione, nel quale innovazione tecnologica e riorganizzazione concettuale procedono congiuntamente. Se da un lato si osserva come la letteratura relativa alla prima rivoluzione quantistica sia già notevolmente sviluppata (i.e., Levrini & Fantini, 2013; Loviseti, 2024; Micheli & Stefanel, 2004; Micheli et al., 2004; Stefanel, 2007; Malgieri, 2015), la letteratura riguardante l'insegnamento e l'apprendimento delle tecnologie quantistiche o la seconda rivoluzione quantistica è in progressiva crescita. Iniziano ad esserci diversi studi, tra cui proposte didattiche, che presentano percorsi rivolti a studenti di scuola secondaria di secondo grado e ne analizzano l'impatto sull'apprendimento (Bondani et al., 2022; DeVore & Singh, 2020; Chiofalo et al., 2022; Folkers et al., 2025; Zuccarini et al., 2024; Montagnani et al., 2023). Inoltre, ci sono proposte sviluppate per la formazione degli insegnanti con l'obiettivo di esplorare se, e in che misura, possano essere interessati a incorporare le tecnologie quantistiche a scuola (Pallotta et al., 2022; Sutrin et al., 2022; Förster & Pospiech, 2025; Pospiech, 2019). Anche in ambito di outreach e comunicazione cominciano ad essere sviluppati diversi progetti (De Renzi et al., 2025; Mendoza et al., 2025;

Gooney et al., 2022; Foti et al., 2021). Nella presente sezione mi concentro su alcuni contributi alla ricerca e alla didattica della fisica relativi alla seconda rivoluzione quantistica.

Chiofalo e colleghi (2022) hanno condotto uno studio pilota con 20 studenti di scuola secondaria che aveva lo scopo di introdurre gli stessi concetti di base della fisica quantistica attraverso un two-state approach e in particolare la polarizzazione, per poi applicarli in un contesto di gioco, il TiqTaqToe quantistico. In particolare, lo studio ha testato le risorse disponibili sulla piattaforma QPlayLearn e un approccio game-based per l'apprendimento dei concetti chiave. Sempre un approccio game-based è stato proposto da Montagnani e colleghi (2023) che hanno progettato e sperimentato un percorso, con studenti dell'ultimo anno di liceo scientifico (una cinquantina di studenti di due classi quinte), per introdurre la fisica quantistica sempre attraverso la polarizzazione, arrivando a toccare il cuore del dibattito intorno alla non-località. La parte conclusiva ha coinvolto gli studenti nel consolidamento degli elementi appresi attraverso il gioco quantistico TiqTaqToe. Accanto alla progettazione dei percorsi, un contributo significativo nello sviluppo di risorse per il game-based-learning è il lavoro di Bondani e colleghi (2024), i quali sviluppano la risorsa Qtris, un gioco da tavolo costruito per rappresentare in modo operativo la meccanica quantistica di nove qubit attraverso tre fasi esplicite: preparazione, operazioni, misura. L'obiettivo dichiarato, che lo distingue dalle altre proposte, è di rendere il gioco isomorfo al formalismo, dove le strategie di gioco permettono di mettere a fuoco la differenza tra miscele statistiche e sovrapposizioni coerenti. I contributi riportati possono essere inquadrati nella cornice proposta da Chiofalo e colleghi (2024), che evidenzia i *quantum games* come risorse per sostenere forme diverse di apprendimento e partecipazione alla cultura quantistica. Pensato invece per un pubblico più generale, dalla scuola secondaria ai primi corsi universitari, il contributo di Folkers e colleghi (2025) presenta i *Quantum Dice*, una coppia di dadi elettronici interattivi pensati per rendere esplorabili i concetti di stato, superposizione, misura e correlazioni entangled tramite un'analogia aptica supportata da display, sensori di orientamento e comunicazione wireless. Gli autori propongono anche due attività sulla quantum key distribution, quali una versione semplificata di BB84 con un solo dado e una versione di E91 con due dadi entangled.

Il richiamo al tema della comunicazione quantistica trova un riscontro diretto in proposte didattiche più strutturate nel contesto delle tecnologie quantistiche. Bondani e colleghi (2022) lavorano sulla progettazione e l'implementazione di un percorso extracurricolare online con studenti di scuola secondaria (circa 250 studenti complessivamente coinvolti), con lo scopo di introdurre in modo efficace alcuni concetti di base della fisica quantistica nel contesto delle

tecnologie quantistiche, includendo anche l'entanglement. Gli autori introducono la logica quantistica attraverso la logica dell'informazione. Il percorso presentato integra diversi tipi di risorse, come l'IBM Quantum Composer, e introduce il protocollo crittografico BBM92 attraverso le simulazioni di QuVis. Bondani è protagonista di un altro esempio¹ particolarmente virtuoso di come le scuole superiori possano diventare luoghi di sperimentazione scientifica avanzata. Dalla collaborazione degli enti di ricerca nello sviluppo di un progetto PCTO all'interno di un liceo genovese, un gruppo di studenti ha realizzato con successo l'esperimento per la violazione delle disuguaglianze di Bell. Presentato al pubblico nell'aprile 2025, il progetto rappresenta il primo caso in Italia. Con un focus sulla quantum information, si cita anche il contributo di Zuccarini e colleghi (2024), che presentano la progettazione, la sperimentazione e una prima valutazione di un corso di quantum information science per studenti di scuola secondaria, costruito per integrare la presentazione teorica con pratiche di laboratorio. Oltre all'introduzione dei concetti di base, gli autori presentano anche alcuni importanti algoritmi come quelli di Grover e Deutsch e protocolli quantistici come il teletrasporto. Un contributo che mette al centro della sua progettazione la crittografia quantistica è quello di Pospiech (2021), che sviluppa un approccio per la scuola secondaria in cui il filo conduttore concettuale è la quantum key distribution, con l'obiettivo di chiarire il nesso tra principi quantistici, protocollo e metodi di comunicazione sicura. Un esempio di implementazione di uno strumento diagnostico nell'ambito universitario è presentato dal progetto di DeVore e Singh (2020) che utilizza un *Quantum Interactive Learning Tutorial* (QuILT) sulla *quantum key distribution* per studenti di corsi avanzati di meccanica quantistica. Il QuILT utilizza un sistema a due stati basato sulla polarizzazione di singoli fotoni e guida gli studenti, tramite domande strutturate, a collegare formalismo e interpretazione fisica. Dopo aver presentato i concetti di qubit, sovrapposizione, misura, gli studenti confrontano un protocollo non sicuro con il protocollo sicuro B92.

Sul piano della formazione docenti, Sutrini e colleghi (2022) presentano un percorso PLS (20h) seguito da circa 30 docenti con l'obiettivo di aumentare conoscenze e consapevolezza sulla *quantum computation* e *quantum information* per applicarle in percorsi scolastici interdisciplinari. Attraverso la notazione circuitale, a partire dalla computazione classica, si arriva all'introduzione del qubit e simulazioni di Stern-Gerlach su QuVis. L'entanglement è considerato in maniera esplicita il traguardo della seconda parte del corso, nel quale si

¹ <https://nqsti.it/news/violazione-delle-disuguaglianze-di-bell-un-liceo-italiano-fa-la-storia>

prevede di introdurre stati di Bell, disuguaglianze di Bell, no-cloning e protocolli di comunicazione quantistica. Questa logica collaborativa è descritta anche da Pallotta, Parola e Bondani (2022), che costruiscono un progetto di collaborazione tra ricercatori e docenti per rendere accessibili i contenuti della seconda rivoluzione quantistica nelle scuole. L'approccio proposto si concentra su sovrapposizione ed entanglement ed utilizza esperimenti e simulazioni per guidare gli studenti dal confronto tra previsioni e risultati verso la nozione di stato e una lettura dei dati non classica. L'entanglement viene affrontato nel quadro EPR e delle disuguaglianze di Bell, usando simulazioni per costruire strumenti di confronto tra previsioni classiche e quantistiche. Se questi due contributi lavorano prevalentemente su docenti in servizio, Förster e Pospiech (2025) lavorano sulla formazione di futuri insegnanti. Gli autori presentano un corso universitario per la formazione iniziale pensato per sviluppare conoscenze e strumenti didattici su *quantum information science* e le *quantum technologies* e per collegare l'insegnamento a una dimensione *career-oriented*. Il percorso integra tre componenti: un seminario teorico in università, un tirocinio didattico in aziende ed enti attivi nelle tecnologie quantistiche e una fase di trasferimento con progettazione e implementazione di unità didattiche a scuola. Infine, rispetto alle strategie comunicative, Pospiech (2019) analizza le posizioni di futuri insegnanti sull'uso di metafore per rendere comunicabili concetti ostici come incertezza ed entanglement, discutendo il rischio di una lingua della fisica modellata sul classico e proponendo metafore non radicate nella fisica classica per supportare visualizzazioni senza innescare interpretazioni fuorvianti.

Infine, presentiamo alcune proposte nell'ambito dell'outreach e della comunicazione. De Renzi e colleghi (2025) propongono un percorso sviluppato nella mostra interattiva "Dire l'indicibile" (Italian Quantum Weeks), per introdurre a un pubblico non esperto entanglement e disuguaglianze di Bell, distinguendo in modo operativo correlazioni classiche e quantistiche. L'entanglement viene introdotto a partire dallo stato fondamentale dell'elio e dall'argomento EPR, mettendo a fuoco realismo e località. Il percorso si chiude con un gioco di carte e una "messa in scena" ispirate all'esperimento di Aspect. In linea con gli obiettivi, un altro contributo è presentato da Mendoza e colleghi (2025), i quali portano la divulgazione a scuola. Presentano infatti due exhibit portatili *hands-on*, sviluppati al Lederman Science Center (Fermilab), per introdurre a studenti di scuola media e superiore i concetti di sovrapposizione ed entanglement. Il primo usa una semisfera di Bloch con sensori e una barra LED per mostrare le probabilità di misura, mettendo a confronto modalità "classica" e "quantistica". Il secondo sfrutta due lampadine e tre setting per osservare e discutere le

correlazioni. Inseriamo anche un contributo che si pone sul confine tra arte e scienza, Robin Baumgarten presenta nel 2021 *Quantum Jungle*², un'installazione artistica interattiva *hands-on* che permette di visualizzare i concetti sovrapposizione, interferenza e collasso, traducendo l'evoluzione di una particella quantistica in pattern luminosi su una parete sensibile al tocco. L'installazione è stata esposta a Pisa e proposta anche in formato workshop per scuole e pubblico generale nelle Italian Quantum Weeks, in integrazione con risorse didattiche di QPlayLearn. Questa piattaforma, già richiamata nella progettazione didattica, è una piattaforma online gratuita pensata per sostenere la *quantum literacy* con contenuti multilivello rivolti a docenti, studenti e pubblico generale, indipendentemente dall'età o dal background. La piattaforma organizza l'esperienza in percorsi *play* → *discover* → *learn* ed integra risorse multimediali e interattive, tra cui anche giochi come TiqTaqToe per familiarizzare con sovrapposizione ed entanglement in modo graduale. Citiamo infine due contributi sul piano teorico. Goorney e colleghi (2022) lavorano su un quadro teorico per la divulgazione delle quantum science and technologies basato sul *culturo-scientific storytelling*, con l'obiettivo di sviluppare nel pubblico non solo conoscenze ma anche competenze di pensiero scientifico, consapevolezza epistemologica e capacità di gestire futuri incerti. La narrazione è descritta come un “viaggio” nella *discipline-culture* della fisica quantistica sostenuto da attività cicliche di osservazione, modellizzazione e riflessione. Un'altra proposta teorica arriva da Foti e colleghi (2021), in cui il tempo emerge come effetto dell'entanglement tra due sistemi quantistici non interagenti, uno dei quali funge da “orologio”, seguendo il meccanismo di Page e Wootters. Usando stati coerenti generalizzati e prendendo prima il limite classico dell'orologio e poi anche del sistema, gli autori mostrano che si ottengono rispettivamente l'equazione di Schrödinger e le equazioni di Hamilton, con lo stesso parametro che gioca il ruolo di tempo: non esistono quindi un “tempo quantistico” e uno “classico”, ma un unico tempo, interpretabile come manifestazione dell'entanglement.

Nel lavoro del gruppo di ricerca in didattica della fisica di Bologna (descritto nel dettaglio nella Sez. 1.4), Levrini e Satanassi sviluppano un approccio alle due rivoluzioni quantistiche, valorizzandole, in primo luogo, come rivoluzioni culturali.

² <https://www.wobblylabs.com/quantum-jungle>

1.3 Approcci in letteratura per introdurre l'entanglement

Di seguito presentiamo nel dettaglio i lavori di due personaggi molto celebri all'interno del dibattito sui fondamenti della meccanica quantistica, Bernard d'Espagnat e GianCarlo Ghirardi.

L'approccio di Bernard d'Espagnat

Nell'articolo *The Quantum Theory and Reality* (1979), pubblicato sul *Scientific American*, d'Espagnat distingue due richieste che generalmente vengono rivolte ad una teoria fisica di successo: i) produrre previsioni accurate rispetto agli esiti di un esperimento (o almeno assegnarvi le corrette probabilità) e ii) fornire una comprensione dei processi fisici che si ipotizzano essere alla base dei risultati osservati. Propone l'esempio della funzione d'onda, che descrive un'accurata stima delle probabilità di trovare l'elettrone; tuttavia, l'atto della misura restituisce sempre una posizione definita, portando ad interrogarsi su quale sia l'immagine fisica da mantenere. A causa di questa ambiguità, nota che molti fisici preferiscono trattare la MQ come insieme di regole per calcolare gli esiti sperimentali. Tuttavia, questo non risolve il problema perchè entra in contrasto con una visione "naturale" del mondo, basata su tre assunzioni che formano la base delle *local realistic theories* (teorie realistiche locali):

1. Realismo: *"dottrina secondo cui le regolarità nei fenomeni osservati sono causate da una qualche realtà fisica la cui esistenza è indipendente dagli osservatori umani"*;
2. Inferenza induttiva: *"un modo di ragionare valido e può essere applicata liberamente, così che da osservazioni coerenti si possano trarre conclusioni legittime."*;
3. Separabilità (o località) einsteiniana: *"nessuna influenza di alcun tipo può propagarsi più velocemente della velocità della luce."* (d'Espagnat, 1979, p.158)

l'autore considera queste premesse essenziali per la nostra interpretazione di senso comune del mondo ma, tuttavia, anticipa che una di queste dovrà essere abbandonata o limitata.

Per chiarire le previsioni delle teorie realistiche locali a partire dalle tre premesse, d'Espagnat costruisce un esempio basato sulle correlazioni e, a partire da queste, costruisce un'analogia esempio-esperimento. L'autore immagina un psicologo che inventa un test che ha due soli esiti (pass/fail). Su individui isolati non può affermare con certezza se il test misuri un'abilità reale o no, perciò lo prova in un caso speciale, ovvero su coppie sposate. Separando

i mariti dalle mogli, se emerge una correlazione forte e persistente può concludere che il test riveli una proprietà reale degli individui, presente prima del test e quindi prima della separazione. Accettando la premessa per la quale si esclude ogni possibile comunicazione tra marito e moglie durante il test (il test misura una proprietà reale), lo psicologo può fare un'inferenza induttiva: se il campione soddisfa gli standard statistici, allora qualsiasi coppia avrà entrambi i coniugi (o nessuno dei due) dotati (o privi) della proprietà testata. Inoltre, può espandere questa conclusione ad un largo gruppo non testato.

D'Espagnat, quindi, paragona questo esempio a un ricercatore che spara singoli protoni in uno strumento con due soli esiti (+/-). Con individui isolati non può affermare con certezza se il test misuri una proprietà reale o no, perciò ci prova in un caso speciale, ovvero su coppie. Per farlo, utilizza due strumenti identici e una sorgente che emette due protoni simultaneamente. Emerge una correlazione negativa tra i due strumenti, che porta a concludere che esista una proprietà reale preesistente alla misura. Se i dati superano i test statistici, l'induzione autorizza a estendere l'inferenza anche a casi non misurati. Queste conclusioni sono ragionevoli solo se si accettano le tre premesse³. In meccanica quantistica, però, esistono argomenti secondo cui correlazioni e proprietà non devono necessariamente essere considerate preesistenti alla misura. Questo contrasto porta alla luce la domanda: la particella aveva già quella posizione prima della misura? Molti fisici quantistici non accetterebbero che la particella abbia sempre una posizione definita. Tuttavia, Einstein era un'eccezione. A partire dall'insoddisfazione di Einstein rispetto alla natura probabilistica delle interpretazioni standard, l'autore afferma che lo scienziato costruì la sua critica in modo simile al ragionamento attribuito allo psicologo. Richiama quindi l'articolo EPR (1935) e la teoria a variabili nascoste, per la quale costruisce un controargomento: se i parametri nascosti esistessero, non dovrebbero entrare in una teoria scientifica perché i) andrebbero a complessificare il formalismo già confermato dagli esperimenti e ii) anche se aggiunti, non produrrebbero nuove predizioni controllabili, rendendo l'argomento metafisico. Infine, siccome la teoria a variabili nascoste porta a predizioni sperimentali differenti da quelle della meccanica quantistica, d'Espagnat sostiene l'esigenza di un test sperimentale. Introduce quindi lo *spin* e ricostruendo l'esperimento attraverso questa proprietà chiave. In particolare,

³ Qui l'autore introduce anche una versione più restrittiva della separabilità: l'influenza è vietata quando le misure sono così simultanee che richiederebbero propagazione superluminale

l'autore osserva che non vi è conflitto tra le teorie se consideriamo una sola componente dello spin, ma può nascere quando si ragiona su componenti diverse.

Costruisce quindi l'esperimento a partire da 3 assi arbitrari A, B e C. D'Espagnat afferma che non possono essere fatte misure su più componenti contemporaneamente, ma si può costruire un dispositivo regolabile per misurarne una alla volta scelta arbitrariamente. Ogni misura, come nell'esperimento precedente, ha esito binario (+/-). Risulta che per misure su coppie di protoni, se i due rivelatori misurano la stessa componente, si osserva una correlazione negativa stretta (+,- oppure -,+). *“La correlazione negativa rigorosa per i protoni nello stato singoletto è prevista solo quando si misura la stessa componente di spin su entrambi i protoni. Che cosa accade quando gli strumenti sono impostati per misurare componenti diverse?”* (ibid., p.167).

L'autore discute quindi la dimostrazione della disuguaglianza. Come negli esperimenti precedenti, si preparano molte coppie in singoletto che vengono separate. Ogni protone viene testato per una sola componente scelta a caso: se per entrambi viene misurata la stessa componente, vengono scartati, altrimenti si dividono in tre popolazioni: AB, AC, BC. L'autore arriva alla disuguaglianza in due modi diversi. La dimostrazione viene affrontata in due fasi: *Step 1*. Si considerino particelle dotate di tre proprietà stabili A, B e C, ciascuna con valori binari +/- . Dunque, possiamo avere $2^3 = 8$ combinazioni possibili. Successivamente, dalle misure su una particella otteniamo $A+$ e $B-$, da cui possiamo concludere che essa appartenga alla classe $A+B-C+$ oppure alla classe $A+B-C-$. Se $N(A+B-)$ è il numero di particelle misurate $A+B-$, possiamo affermare che $N(A + B -) = N(A + B - C +) + N(A + B - C -)$. Analogamente, $N(A+C-) = N(A+B+C-) + N(A+B-C-)$ e $N(B-C+) = N(A+B-C+) + N(A-B-C+)$. Attraverso la rappresentazione insiemistica possiamo vedere come le diverse comparazioni in Fig. 1.1(a) vadano a costruire la disuguaglianza $N(A + B -) \leq N(A + C -) + N(B - C +)$, da cui poi si ricava, attraverso i passaggi in Fig. 1.1(b), la disuguaglianza:

$$N(A + B -) + N(A - B +) \leq N(A + C -) + N(A - C +) + N(B + C -) + N(B - C +) \quad [1]$$

Step.2. Chiamiamo i protoni della coppia 1 e 2. D'Espagnat considera qui il caso in cui il protone 1 della coppia sia misurato lungo l'asse A, ottenendo $A+$, e il protone 2 sia misurato lungo B, ottenendo $B+$. A questo punto, l'esistenza della correlazione negativa stretta implica che il protone 1 abbia proprietà $A+B-$, viceversa il protone 2, $A-B+$. Attraverso l'argomento

raccontata in Fig. 1.2, l'autore arriva a dire che $n[A+B+]$ (con n numero di coppie con questa combinazione) dev'essere proporzionale a $N(A+B-)$. Analogamente, $n[A+C+]$ è proporzionale a $N(A+C-)$ e $n[B+C+]$ a $N(B-C+)$, dove la costante di proporzionalità è la stessa. Sostituendo nella disuguaglianza del primo stadio, si ottiene l'espressione misurabile:

$$n[A + B +] \leq n[A + C +] + n[B + C +] \quad [2]$$

ovvero la disuguaglianza di Bell, vera solo se le tre premesse sono assunte come valide. Conclusa la dimostrazione, sottolinea che si possono costruire molte disuguaglianze simili cambiando simboli e segni, ma tutte pongono in diretto conflitto la meccanica quantistica e le teorie a variabili nascoste.

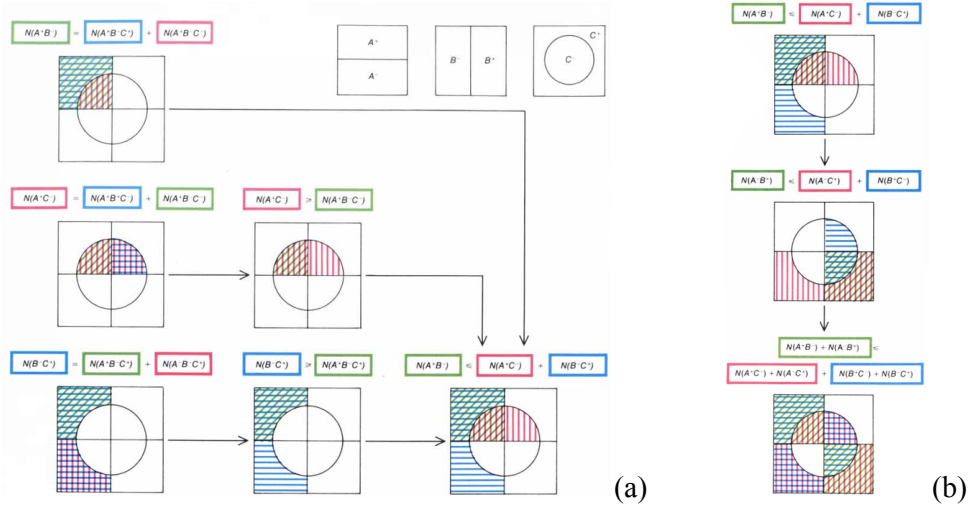


Figura 1.1: Visualizzazione dello step 1 per mezzo dell'insiemistica. I colori aiutano il lettore a tenere traccia delle intersezioni tra diverse caratteristiche, al fine di costruire una prima disuguaglianza. Fonte: d'Espagnat (1979).

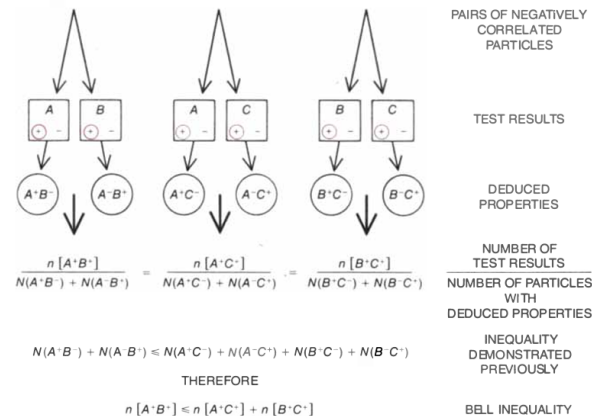


Figura 1.2: Visualizzazione dello step 2 che aiuta il lettore a ricostruire la statistica, guidandolo verso la formulazione della disuguaglianza di Bell. Fonte: d’Espagnat (1979)

“Il conflitto solleva due domande. Primo: quali sono i fatti sperimentali della situazione? La disuguaglianza di Bell è soddisfatta oppure viene violata? Qualunque sia l’esito di un test sperimentale, deve esserci un errore di qualche tipo o nelle regole della meccanica quantistica oppure nelle teorie realistiche locali. La seconda domanda, quindi, è: quale premessa alla base della teoria confutata è quella sbagliata?” (ibid., p.171) A questo punto, d’Espagnat ricostruisce, da EPR (1935) fino al 1976, la storia degli esperimenti reali, descrivendo l’assetto comune dei test in coerenza con le variabili utilizzate in precedenza ed affermando che portano alla violazione della disuguaglianza. Un aspetto importante è l’attenzione che l’autore dedica ai vincoli sperimentali, come l’inefficienza nella rivelazione, la necessità di correzioni e di assunzioni aggiuntive, generalizzazioni pratiche della disuguaglianza. Ad esempio, per testare senza alcun dubbio la separabilità di Einstein, l’autore suggerisce esperimenti a commutazione rapida degli analizzatori, quasi ad introduzione del lavoro che Aspect pubblicherà pochi anni dopo.

Ribadisce quindi che gli esperimenti hanno violato l’esistenza delle variabili nascoste, che sono derivabili dalle tre premesse e per questo motivo portano a metterne in dubbio una. L’analisi dell’autore è fortemente orientata al realismo, che definisce come l’idea che una teoria debba offrire più di una descrizione dei dati o di una ricetta predittiva. Infatti, la mente cerca spiegazioni oggettive delle regolarità, cioè cause. In questo senso, l’opzione positivista gli appare come una rinuncia troppo forte in quanto rischia di trasformare la scienza da studio della natura a mero calcolo di previsioni. Passa quindi all’induzione, punto delicato del ragionamento. Richiama qui la risposta di Bohr a EPR, nella quale lo stato e le proprietà

dipendono dal contesto di misura, perché sistema e apparato non sono separabili nella descrizione dell'esperimento. Questo rende illegittimo inferire "che cosa è" il sistema senza specificare le condizioni di misura. La sua conclusione risulta quindi obbligata alla rinuncia della terza assunzione. Se si vogliono mantenere realismo e una forma forte di induzione scientifica, allora la via più naturale è abbandonare la separabilità di Einstein. D'Espagnat affronta anche il problema dei segnali superluminali invitando a riflettere sul fatto che le influenze istantanee che sembrano in gioco negli esperimenti di correlazione a distanza, secondo lui, non possono essere usate per trasmettere informazione, che possono invece passare invece attraverso i canali classici.

L'approccio di GianCarlo Ghirardi

Nel volume *Un'occhiata alle carte di Dio* (Il Saggiatore, 1997), GianCarlo Ghirardi ricostruisce un percorso accessibile per il grande pubblico. Seppur copra svariati argomenti, entra nel vivo della discussione rilevante per questa tesi nel capitolo 10 "*la disuguaglianza di Bell e la località*" (Ghirardi, 1997) che, a partire dall'argomento EPR introdotto nel capitolo 8 e l'introduzione della teoria a variabili nascoste nel capitolo 9, arriva fino alla formulazione della disuguaglianza di Bell e alla discussione della nonlocalità. Ghirardi apre il capitolo 10 definendo la disuguaglianza di Bell "*il più importante recente contributo alla scienza*" (*ibid.*, 203). Anche se il teorema di Bell ha una grande semplicità formale, Ghirardi afferma che la difficoltà sta nel capire con precisione che cosa mostrasse davvero e quali ipotesi implicite stessero entrando in gioco. Propone quindi un esempio. Ghirardi immagina due artisti, Alice e Bob, separati in due cabine senza possibilità di comunicare e riescono comunque a creare uno spettacolo sbalorditivo. A intervalli regolari due spettatori consegnano loro un biglietto con un numero scelto in maniera del tutto casuale tra 1, 2 e 3. Successivamente, indipendentemente dal numero, ciascuno deve scrivere sul proprio biglietto SI o NO, senza sapere cosa sceglie l'altro. Se osserviamo una singola sequenza di risposte, le risposte risultano distribuite in modo casuale e saranno circa il 50% indipendentemente dal numero ricevuto (cfr. Fig. 1.3) ma, tutte le volte, Alice e Bob danno la stessa risposta. Questo show spettacolare li porta ad affermare di essere telepatici.

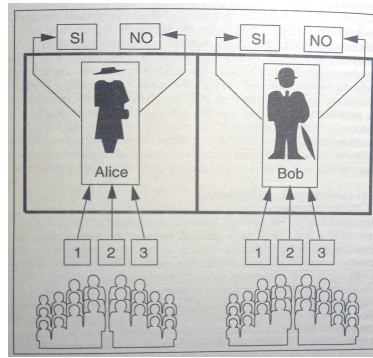


Figura 1.3: La dinamica della performance di Alice e Bob. Fonte: Ghirardi (1997)

Il pubblico comincia quindi ad analizzare la situazione: alcuni spettatori ingenui credono alla telepatia, mentre altri ipotizzano che Alice e Bob si siano messi d'accordo prima della performance. Ad esempio, nel primo round potrebbero decidere di rispondere entrambi:

- SI nel caso uscisse il numero 1;
- SI nel caso uscisse il numero 2;
- NO nel caso uscisse il numero 3;

In questo modo hanno preparato una strategia che gli permette di rispondere allo stesso modo senza comunicazione. Per mantenere il fattore dell'imprevedibilità devono semplicemente cambiare ogni volta strategia.

Analogamente, l'autore introduce i fotoni correlati. Supponiamo infatti, presa una sorgente di coppie di fotoni entangled, che due osservatori lontani fra loro (Alice e Bob) facciano delle misure sui fotoni eseguendo tre test di polarizzazione a 0, 60 e 120 gradi. I numeri diventano ora le esecuzioni del test e sul biglietto si segna SI se il fotone passa il test e NO se lo fallisce. Per ciascun fotone, l'esito del test è casuale con probabilità del 50%, tuttavia, come per il caso precedente, se viene eseguito lo stesso test allora i risultati sono perfettamente correlati (o passano entrambi i fotoni oppure nessuno). A questo punto viene chiesto al lettore di pensare nuovamente all'argomento EPR in luce a quanto visto e ne identifica gli autori con un terzo gruppo di spettatori, ancora più furbo degli altri, perché ha trovato come unica possibile spiegazione al di fuori della telepatia la stipulazione di accordi prima del test. Nell'analisi EPR, gli accordi sono gli elementi di realtà fisica, cioè caratteristiche (istruzioni) possedute dai fotoni prima della misura e tali da definire come reagiranno a tutte le possibili domande sperimentali. In questo senso, la meccanica

quantistica è per EPR incompleta perché non spiega come si originano le caratteristiche comuni (addirittura l'interpretazione ortodossa insiste che lo stato quantistico sia la descrizione massima ottenibile e considera "illegittimo" parlare di accordi precedenti).

L'autore indica come stia proprio in questo punto la genialità di Bell: fare un controllo a tappeto su cosa succede in tutte le combinazioni dei biglietti di Alice e Bob. Considerando la statistica globale, i due artisti sono in accordo circa nel 50% dei casi. Questo consente ai ricercatori seri di concludere che Alice e Bob non si sono accordati. Infatti, siccome l'assegnazione ad un determinato test è casuale, si hanno nove coppie totali.

1,1	1,2	1,3	2,1	2,2	2,3	3,1	3,2	3,3
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

Ma se davvero esistono accordi prestabiliti, quante coppie concordi (o discordi) ci dobbiamo aspettare? Prendendo ad esempio la strategia riportata nell'elenco puntato qui sopra, otteniamo:

1,1	1,2	1,3	2,1	2,2	2,3	3,1	3,2	3,3
SI,SI	SI,NO	SI,NO	NO, SI	NO, NO	NO, NO	NO, SI	NO, NO	NO, NO

dove in verde sono riportate le strategie concordi (5) ed in rosso le discordi (4), che portano l'autore a concludere (con un campione statistico abbastanza grande) che qualunque accordo preso tra i due attori porta ad almeno 5/9 delle risposte corrette. In particolare, se scelgono di rispondere sempre allo stesso modo ottengono 9/9. Dunque, la conclusione è che Alice e Bob, non possono essersi messi d'accordo prima perché queste probabilità sono in contrasto con le premesse iniziali. Non essendoci un accordo prestabilito l'unica spiegazione che resta è la telepatia.

Analogamente, l'autore introduce i fotoni correlati. Per ciascuna direzione di misura, gli esiti (SI/NO) compaiono con la stessa frequenza e, quando Alice e Bob misurano lungo la stessa direzione, ottengono sempre risultati concordi. Quando invece le direzioni scelte sono diverse (60 o 120 gradi relativi), l'analisi quantistica mostra che la probabilità di avere esiti concordi è 1/4. Dunque, date 9 coppie equiprobabili di biglietti, in 1/3 dei casi le direzioni coincidono (misure identiche) e sono sicuramente concordi, mentre nei restanti due terzi si misurano direzioni diverse e sono concordi con probabilità (1/4). Da cui:

$$(1/3) + (2/3) \times (1/4) = (1/3) + (1/6) = 1/2 \quad [3]$$

Quindi, considerando tutte le possibilità, risposte concordi e discordi sono uguali e lo show viene ricostruito. A questo punto è chiaro che Alice e Bob non devono essere telepatici per realizzare la loro performance, ma devono possedere una sorgente di fotoni in uno stato entangled e dei polarizzatori. In questo modo possono scegliere la direzione di misura in base al numero ricevuto e registrano SI o NO a seconda che il proprio fotone superi o meno il test. L'autore ragiona qui sul fatto che la telepatia non riguarda i protagonisti, ma i fotoni, che si comportano coerentemente quando vengono sottoposti allo stesso test. Ghirardi riassume le due posizioni con le quali si potrebbe osservare la statistica completa:

- Posizione EPR: per evitare di accettare la telepatia con misure uguali e correlazione perfetta, si ipotizzano proprietà già fissate (elementi di realtà). Poiché la meccanica quantistica non le descrive, è incompleta;
- Posizione Bell: considerando tutte le combinazioni statistiche non si possono ipotizzare accordi preesistenti. Le previsioni quantistiche, confermate dagli esperimenti, sono incompatibili con l'idea di elementi di realtà che determinano gli esiti per ogni possibile test.

Per concludere, Ghirardi afferma come dalle parole di Einstein possiamo inferire come egli avesse capito benissimo il problema, fermo restando che per lui era impossibile.

In questo momento l'autore reputa importante specificare cosa intenda Bell con il concetto di località. Nel considerare una situazione del tipo EPR in cui due costituenti del sistema (A,B) si trovano in regioni spazialmente separate, detti a e b gli osservabili associati ai due rami dell'esperimento (fotoni entangled) e detti α e β i relativi esiti (supera o non supera), introduciamo λ come collezione di tutte le variabili che ne specificano lo stato (che identificano e teorie a variabili nascoste). La richiesta di località nel senso di Bell (LB) è quindi

$$\text{LB:} \quad p_{\lambda}^{AB}(a, b; \alpha, \beta) = p_{\lambda}^A(a, *; \alpha), p_{\lambda}^B(b, *; \beta) \quad [4]$$

dove $p_{\lambda}^{AB}(a, b; \alpha, \beta)$ è la probabilità di ottenere gli esiti α e β assumendo che lo stato fisico del sistema sia descritto da λ^4 e $p_{\lambda}^A(a; \alpha)$ e $p_{\lambda}^B(b; \beta)$ sono le probabilità degli esiti quando si esegue soltanto una misura su uno dei due bracci. Inoltre, in questa formulazione non si introduce come ipotesi necessaria il determinismo, ma nemmeno lo si esclude. Per concludere, nelle parole di Gisin: *“la relazione appena descritta asserisce che la probabilità di ottenere una coppia di risultati in una misura congiunta ai due estremi dell’apparato è semplicemente il prodotto delle probabilità di ottenere ciascuno di essi indipendentemente dal fatto che l’altra misura venga eseguita o no.”* (ibid., p.215).

Si può quindi passare alla formulazione generale del teorema di Bell. Il risultato può essere espresso dicendo che nessuna teoria che rispetti LB, deterministica o probabilistica, riesce a riprodurre tutte le probabilità previste dalla meccanica quantistica. Questo vale anche se si ammette che la preparazione non determini del tutto lo stato e si introducono variabili aggiuntive λ . La dimostrazione ricava una disuguaglianza che segue da LB, ma che le previsioni quantistiche violano.

Considerando una coppia di fotoni in uno stato entangled, possiamo identificare gli esiti possibili α e β rispettivamente con il fatto che il fotone superi il test (SI) o no (NO). Scelte le direzioni a e b per i due rami A e B per un valore fissato λ , otteniamo quattro funzioni di probabilità congiunte: $p_{\lambda}^{AB}(a, b; SI, SI)$, $p_{\lambda}^{AB}(a, b; SI, NO)$, $p_{\lambda}^{AB}(a, b; NO, SI)$, $p_{\lambda}^{AB}(a, b; NO, NO)$. In termini delle quattro probabilità congiunte, si può definire la funzione:

$$E_{\lambda}(a, b) = p_{\lambda}^{AB}(a, b; SI, SI) - p_{\lambda}^{AB}(a, b; SI, NO) - p_{\lambda}^{AB}(a, b; NO, SI) + p_{\lambda}^{AB}(a, b; NO, NO) \quad [5]$$

ovvero la somma delle probabilità di esiti concordi meno somma delle probabilità di esiti discordi. Assumendo LB, si ottiene tramite manipolazione algebrica la disuguaglianza

$$|E_{\lambda}(a, b) - E_{\lambda}(a, d)| + |E_{\lambda}(c, b) + E_{\lambda}(c, d)| \leq 2 \quad [6]$$

⁴ Si sottolinea che deve rappresentare la specificazione più completa possibile dello stato. Infatti, se lo stato non è descritto in modo esaustivo, si può essere indotti a concludere frettolosamente che LB fallisca anche in esempi classici e palesemente locali.

che coinvolge quattro espressioni E_λ valutate su quattro direzioni arbitrarie a,b,c e d. I dettagli della dimostrazione sono in appendice (ibid., p.231). Queste quantità però, non sono direttamente confrontabili con l'esperimento. Infatti, in una teoria a variabili nascoste, non si dispone di un metodo per preparare sistemi con un valore assegnato e controllabile di λ . Per confrontarsi con la meccanica quantistica si deve allora considerare un insieme di sistemi e farne la media sulle diverse λ presenti. Dato insieme di N sistemi caratterizzati dal valore λ , abbiamo che:

$$E(m, n) = \sum_i \frac{N_i}{N} E_{\lambda_i}(m, n) \quad [7]$$

Si mostra poi (ibid., p.232) che le quantità medie così definite soddisfano la stessa forma di vincolo:

$$|E(a, b) - E(a, d)| + |E(c, b) + E(c, d)| \leq 2 \quad [8]$$

che è la forma generale della disuguaglianza di Bell, detta disuguaglianza CHSH. Trovata la disuguaglianza, si possono calcolare le quantità che compaiono nell'equazione nel caso dei fotoni attraverso qualche calcolo con le probabilità congiunte:

$$|\cos(45) - \cos(135)| + |\cos(-45) - \cos(45)| = 2\sqrt{2} \sim 2.828 > 2 \quad [11]$$

Dunque, per queste direzioni particolari e per lo stato considerato, la disuguaglianza di Bell è largamente violata. L'autore quindi conclude che non esiste alcuna teoria completabile dall'assegnazione delle variabili λ che, rispettando LB, riesca a riprodurre le previsioni quantistiche, indipendentemente dalla loro distribuzione. In particolare, un completamento deterministico compatibile con LB è impossibile. *“La lezione che si può dedurre dalla disuguaglianza di Bell è che non è la specifica teoria o l'interpretazione adottata, ma la natura stessa e il peculiare comportamento dei microsistemi che implica la non località (vale a dire la violazione di LB) a livello dei singoli sistemi individuali.”* (ibid., p.2018)

In questa sezione abbiamo visto due celebri esempi di lavori che rendendo accessibile il concetto di entanglement ad un ampio pubblico. Questo lavoro di tesi vedrà al centro della progettazione un terzo autore molto rilevante, Nicholas Gisin. Gisin è un fisico teorico e sperimentale svizzero, professore all'Università di Ginevra, pioniere nei settori del teletrasporto quantistico e dell'informazione quantistica, nonché primo vincitore del

prestigioso *John Steward Bell prize*⁵. Nel volume *Quantum Chance: Nonlocality, Teleportation and Other Quantum Marvels*, l'autore propone una ricostruzione accessibile dei concetti chiave legati alle correlazioni non locali, al teorema di Bell e l'entanglement, mostrando come tali risultati siano alla base di procedure come la crittografia ed il teletrasporto quantistici. Nel capitolo 3, descriveremo nel dettaglio l'approccio utilizzato all'interno di questo lavoro di tesi.

1.4 Contributo del Gruppo di Ricerca di Bologna

Questa sezione introduce il lavoro di ricerca del gruppo di ricerca in Didattica della Fisica dell'Università di Bologna con il quale ho collaborato per il lavoro di tesi.

Il gruppo è da molti anni che lavora sulla prima rivoluzione quantistica e dal 2018 anche sulla seconda rivoluzione quantistica. A partire dal progetto Erasmus + I SEE, ha sviluppato un modulo e un approccio alle tecnologie quantistiche, che è stato arricchito e rivisto attraverso il lavoro nei progetti IDENTITIES e FEDORA. Questi progetti, che avevano obiettivi e target group diversi, hanno portato il gruppo, attraverso cicli iterativi di implementazione, analisi e revisione, a sviluppare un approccio al tema che unisce gli aspetti di fondamento (concettuali ed epistemologici) della fisica con aspetti interdisciplinari, aspetti di Science and Technologies Studies (STS) e aspetti legati ai Future Studies. In particolare, i processi di revisione e affinamento hanno portato il gruppo a sviluppare un approccio alternativo alla prima e seconda rivoluzione quantistica che ha l'obiettivo di valorizzare in primis come rivoluzioni culturali. Tra i principali risultati che il gruppo ha ottenuto è la formulazione di principi di design che integrano, a livello progettuale, la dimensione culturale delle rivoluzioni. Satanassi e Levrini (2025) affermano che *“le rivoluzioni quantistiche hanno un forte potenziale formativo per gli studenti. Il carattere interdisciplinare del tema e la pluralità di rappresentazioni esterne utilizzabili offrono diversi punti di accesso all'argomento e possono attivare percorsi di apprendimento personalizzati.”* (Satanassi & Levrini, 2025, p.15).

⁵ <https://cqiqc.physics.utoronto.ca/bell-prize/>

Il primo *design principle* consiste nel confrontare la prima e la seconda rivoluzione quantistica per mettere in luce le similarità e le differenze tra le due. Come riportato da Satanassi e Levrini (2025):

Design principle 0: compare-and-contrast le due rivoluzioni quantistiche da una prospettiva concettuale, epistemologica e sperimentale.

Il confronto si concentra su due concetti rivoluzionari: *complementarità* ed *entanglement*, che permettono di ricostruire le dimensioni concettuale ed epistemologica, mostrandone anche l'evoluzione sperimentale. In particolare, l'entanglement rompe il modello classico di interazione basato su località e realismo. In un sistema entangled, misurare una particella determina immediatamente lo stato dell'altra, anche se è molto lontana. Partendo dal lavoro di Aspect (2004), le due rivoluzioni quantistiche vengono introdotte attraverso due grandi dibattiti tra Bohr ed Einstein ed i rispettivi esperimenti mentali: il primo nasce durante la conferenza di Solvay del 1927, nella quale venivano discussi la complementarità e la natura dell'oggetto quantistico; il secondo invece, nasce da due pubblicazioni del 1935 che vertono sulla completezza della meccanica quantistica ed in particolare sul suo carattere non locale. Entrambe le sfide concettuali si sono successivamente trasformate in sfide sperimentali. Al centro della prima vi è l'esperimento della doppia fenditura, presentato rispetto al celebre "esperimento più bello del mondo", realizzato per la prima volta da Merli, Missiroli e Pozzi (1976), mentre nel secondo caso abbiamo la dimostrazione della violazione della disuguaglianza di Bell, di cui si prende l'esperimento di Aspect (1982).

Gli altri *design principle* nascono dall'osservazione di un'asimmetria. Quando si partecipa ad un seminario divulgativo sui computer classici, e il loro ruolo nella società contemporanea, raramente si sente parlare di bit, porte logiche, dell'hardware o di come operano. Quando si partecipa a seminari o convegni che introducono al grande pubblico le tecnologie quantistiche, i relatori spesso partono dall'introdurre i concetti alla base del loro funzionamento (stato quantistico come qubit, manipolazione, misura ed entanglement) (Satanassi e Levrini, 2025; Satanassi, Ercolessi e Levrini, 2022). Questa dicotomia ha portato le autrici a chiedersi cosa distingue computer classici e quantistici:

Design principle 1: Favorire il confronto tra computer classico e computer quantistico, non come elenco di concetti astratti, ma come differenza nella logica fisica alla base dei loro hardware.

Operativamente, il computer classico è utilizzato per introdurre il principio del *terzum non datum*, alla cui base vi è la logica booleana, lineare e deterministica. Successivamente, la Seconda Rivoluzione Quantistica lascia spazio al computer quantistico, che è costruito enfatizzando cosa cambia quando si passa dal *bit* al *qubit*, che sfrutta invece porte logiche e circuiti di tipo quantistico.

Questo principio conduce direttamente alla questione del rapporto tra hardware ed esperimenti fisici. Nel contesto del calcolo quantistico, apparati come l'interferometro di Mach-Zehnder o il dispositivo di Stern-Gerlach possono essere interpretati come simulatori quantistici. Questa interpretazione si colloca nella prospettiva, formulata esplicitamente da David Deutsch nel 1985, secondo cui l'informazione è intrinsecamente fisica: ogni processo di elaborazione dell'informazione è necessariamente realizzato attraverso un sistema fisico che evolve secondo leggi della fisica. In questo senso, alcuni esperimenti fondamentali della fisica quantistica possono essere letti anche come dispositivi che implementano trasformazioni di stati e producono risultati osservabili, analogamente a quanto avviene in un processo computazionale. Il secondo design principle è dunque :

Design principle 2: Riconcettualizzare gli esperimenti cardine in termini di computazione (mettendo a confronto e in contrasto il circuito e l'esperimento).

Operativamente, il principio permette di mappare sistematicamente le fasi dell'esperimento a) preparazione b) evoluzione/manipolazione c) misura attraverso una lettura computazionale in termini di a) input b) processamento c) output.

Il terzo e il quarto principio hanno una natura più cognitiva e vengono dalla tradizione di ricerca in didattica della fisica. Il terzo principio è un vincolo sulla chiarezza, vuole evitare che gli studenti restino intrappolati nel formalismo o, al contrario, nei dettagli del set-up sperimentale:

Design principle 3: mantenere i tecnicismi quantistici il più possibile semplici e chiare, per favorire una comprensione profonda dei concetti essenziali.

Operativamente, l'obiettivo non è arrivare alla conoscenza di tecnicismi avanzati, ma permettere agli studenti di comprendere i concetti centrali (stato quantistico, sovrapposizione, manipolazione/evoluzione, misura, entanglement). Infatti, per quanto teletrasporto e

crittografia siano esperimenti alquanto complicati, i percorsi sviluppati li rendono contenuti accessibili a studenti di scuola secondaria.

Il quarto design principle si inserisce nella tradizione di ricerca in didattica della fisica sviluppata dal gruppo e, in particolare, nella prospettiva che mira a sostenere processi di appropriazione dei contenuti disciplinari (Levrini et al., 2015). In questa prospettiva, l'apprendimento non consiste soltanto nell'acquisizione di nuovi concetti, ma nella possibilità per gli studenti di farli progressivamente propri e di utilizzarli come risorse per interpretare i fenomeni fisici. In tale ottica, la progettazione didattica mira a offrire molteplici porte di accesso ai concetti della fisica. Come riportato in Satanassi e Levrini (2025) e Satanassi, Erolessi e Levrini (2022):

Design principle 4: rendere i moduli il più possibile inclusivi valorizzando le QT come temi STEM, cioè come argomenti interdisciplinari.

Operativamente, il principio è stato implementato valorizzando l'intrinseca interdisciplinarietà delle *quantum science* per fornire diversi entry point. In particolare, in studi hanno mostrato come è stato operativizzato, costruendo un ambiente con rappresentazioni multiple che appartengono da diversi domini disciplinari, in particolare la fisica, l'algebra, la geometria, la logica, e l'informatica (per approfondimenti si veda Satanassi, 2023). In figura 1.4 è riportato un esempio specifico in cui le diverse rappresentazioni multiple sono mostrate a confronto.

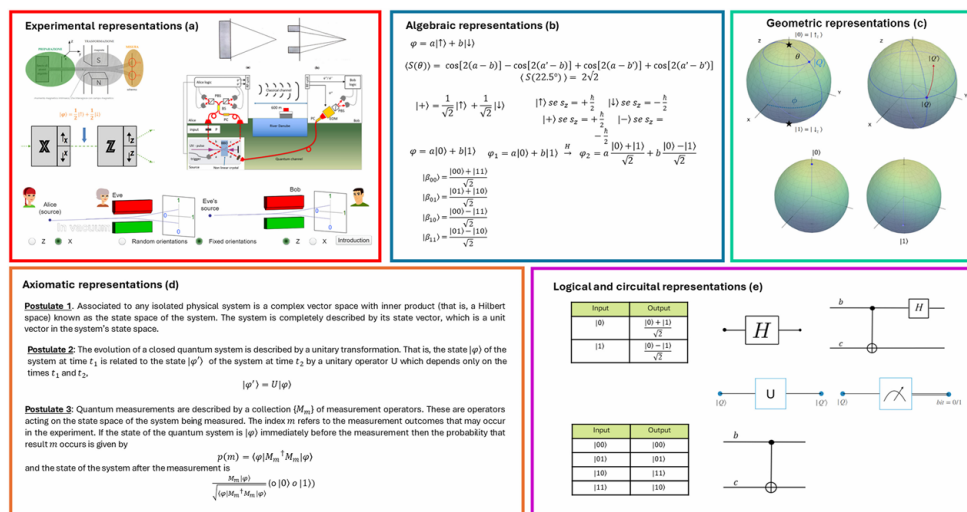


Figura 1.4: Immagini utilizzate durante il percorso che vanno a sottolineare come le rappresentazioni multiple abbiano costituito un elemento centrale nell'apprendimento. Fonte: Satanassi & Levrini (2025)

Il presente lavoro di tesi si inserisce nel lavoro del gruppo di ricerca di Bologna. In particolare, si vuole fare un approfondimento sull'entanglement e arricchire l'approccio fino ad ora sviluppato. In continuità con una riflessione del gruppo, l'entanglement viene qui progressivamente spaccettato per interrogare le categorie interpretative classiche e linguistiche attraverso cui vengono descritti i fenomeni fisici. Si è dunque scelto di ispirarsi a *Quantum Chance* di Nicholas Gisin (2014), che offre agli studenti uno spazio in cui ragionare sull'entanglement come elemento che mette in crisi i limiti della spiegazione classica. In particolare, questo viene fatto attraverso lo "spaccettamento" del problema nel contesto del gioco di Bell.

In particolare, sono state sviluppate le seguenti domande di ricerca:

RQ1. *Quale approccio didattico può essere sviluppato per sostenere negli studenti e nelle studentesse della scuola secondaria di secondo grado il riconoscimento e lo sviluppo del potenziale concettuale ed epistemologico dell'entanglement?*

RQ2. *Come si caratterizza, nel contesto del percorso proposto, la transizione nel ragionamento degli studenti e delle studentesse dagli schemi interpretativi classici verso forme di "pensiero quantistico"?*

Nei prossimi capitoli, le domande di ricerca guidano lo/a studente/ssa attraverso ricerca la progettazione di materiali didattici e la successiva analisi su un gruppo ristretto di studenti. In particolare, il percorso descritto nel capitolo 3 di permette di ragionare sulle correlazioni quantistiche e sui limiti delle spiegazioni classiche, rimodellando la nostra comprensione della natura e ridefinendo gli assunti che non molto tempo fa erano considerati pilastri invalicabili.

Capitolo 2

La seconda RQ: sfide sperimentali, concettuali e epistemologiche

2.1. Il Grande Paradosso della Meccanica Quantistica

Nel 2012 la Royal Swedish Academy of Sciences ha premiato Serge Haroche e David J. Wineland per *“metodi sperimentali pionieristici che permettono la misura e la manipolazione di singoli sistemi quantistici”*, riconoscendo l’alta controllabilità degli oggetti quantistici in laboratorio (Nobel Prize Outreach, 2012). Successivamente, il 4 ottobre 2022, il Premio Nobel per la Fisica è stato conferito ad Alain Aspect, John F. Clauser e Anton Zeilinger *“per esperimenti con fotoni entangled, che hanno stabilito la violazione delle disuguaglianze di Bell e aperto la strada alla scienza dell’informazione quantistica”* (Nobel Prize, 2022; Nobel Prize Outreach, 2022), i cui contributi saranno discussi in questo capitolo ed hanno permesso di dimostrare la non località della meccanica quantistica attraverso la manipolazione delle coppie entangled. Infine, più di recente, il Nobel per la Fisica 2025, assegnato a John Clarke, Michel H. Devoret e John M. Martinis *“per la scoperta del tunnelling quantistico meccanico su scala macroscopica e della quantizzazione dell’energia in un circuito elettrico”* (Nobel Prize Outreach, 2025), rafforza ulteriormente l’idea di una tecnologia quantistica ormai matura. Nel loro insieme, questi riconoscimenti non celebrano soltanto gli importanti contributi di questi scienziati, ma segnano anche il punto di svolta che ha dato avvio ed oggi ci rende partecipi della Seconda Rivoluzione Quantistica.

Il capitolo si articola in tre sezioni principali. Nella prima parte (2.1) verrà discussa l’origine del dibattito sull’entanglement, ovvero l’esperimento di Einstein, Podolsky e Rosen e le discussioni che vi sono seguite. La seconda parte invece (2.2) è dedicata al contributo di John Stewart Bell, formulato per la prima volta nell’articolo del 1964, e la formulazione del gioco di Bell che da esso deriva. Infine, nella terza sezione (2.3), sono discussi gli esperimenti che seguirono il lavoro del 1964 e da cui partirono le sfide per la chiusura dei *loopholes*.

Nel 1935 Albert Einstein, Boris Podolsky e Nathan Rosen pubblicarono un articolo in cui misero in discussione la completezza della meccanica quantistica sulla base di un esperimento mentale con due sistemi correlati, dando così avvio a un dibattito fondativo che ha avuto sviluppi duraturi nella teoria quantistica e nelle sue interpretazioni. In quegli anni infatti, la meccanica quantistica disponeva di una formulazione matematica stabilizzata nelle sue versioni matriciale e ondulatoria, ed era applicata alla descrizione della struttura atomica e di fenomeni microscopici per i quali la fisica classica si era rivelata inadeguata (Dirac, 1981; Jammer, 1966). Il confronto sviluppatosi nel corso del decennio precedente, anche in sedi istituzionali quali i Congressi di Solvay, aveva contribuito a chiarire sia l'impianto formale della teoria sia le sue implicazioni concettuali (Beller, 1999; Mehra & Rechenberg, 1982). In tale contesto, l'interpretazione di Copenaghen costituiva la posizione di riferimento per una parte significativa della comunità scientifica, con l'accettazione del principio di indeterminazione e l'attribuzione di un ruolo centrale ai processi di osservazione e misura (Jammer, 1974). Il suo orientamento pragmatico sarà successivamente sintetizzato nella nota espressione "shut up and calculate", formula posteriore spesso associata a David Mermin (Mermin, 1989). La robustezza della formulazione matematica era già intuibile nel 1927 dalle parole di Born ed Heisenberg, pronunciate durante un discorso alla Conferenza di Solvay, dove descrivevano la meccanica quantistica come una teoria ormai "chiusa"⁶ intendendo intendendo con ciò una teoria i cui presupposti fisici e matematici fondamentali erano ritenuti ormai stabilizzati e non più suscettibili di modifiche sostanziali. Nelle parole di Bokulich e colleghi (2006):

"Vorremmo sottolineare che... consideriamo la meccanica quantistica una teoria chiusa, i cui presupposti fisici e matematici fondamentali non sono più suscettibili di alcuna modifica". (p. 92)

Già durante la stessa Conferenza di Solvay del 1927 l'idea che la meccanica quantistica potesse essere considerata una teoria definitivamente stabilizzata fu messa in discussione, in particolare dalle obiezioni sollevate da Einstein attraverso una serie di esperimenti mentali volti a mettere alla prova il principio di indeterminazione e l'interpretazione emergente della teoria (Bacciagaluppi & Valentini, 2009). Nel 1935 Einstein, Podolsky e Rosen formularono un'argomentazione volta a mostrare che la meccanica quantistica non potesse essere considerata una descrizione completa della realtà fisica, riaprendo in termini espliciti la

⁶ Nell'articolo è riportata l'espressione "closed theory" (Bokulich et al., 2006, p.92)

questione del rapporto tra formalismo teorico e ontologia. L'argomentazione è stata proposta nel celebre articolo *"Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?"* (Einstein et al., 1935), meglio conosciuto come articolo EPR dai cognomi degli autori Albert Einstein, Boris Podolsky e Nathan Rosen, i quali proposero un esperimento mentale per mostrare la non completezza della teoria. Come scrivono gli autori:

"Qualsiasi seria riflessione su una teoria fisica deve tenere conto della distinzione tra la realtà oggettiva, che è indipendente da qualsiasi teoria, e i concetti fisici con cui la teoria stessa opera. Tali concetti hanno come scopo quello di descrivere quella realtà oggettiva e, attraverso di essi, costruiamo l'immagine che abbiamo del mondo."
(ibid., p.777)

2.1.1. Il paradosso EPR

Il Gedankenexperimente⁷ di Einstein, Podolsky e Rosen (1935) pone le sue fondamenta su due premesse:

- Condizione di completezza: *"ogni elemento di realtà fisica deve avere un corrispettivo nella teoria fisica. [...] Questi elementi non possono essere stabiliti basandoci su considerazioni filosofiche a priori, ma devono essere individuati attraverso i risultati di esperimenti e misurazioni."* (ibid., p.777)
- Criterio di realtà: *"Se, senza in alcun modo perturbare un sistema, possiamo prevedere con certezza (cioè con probabilità pari a uno) il valore di una grandezza fisica, allora esiste un elemento della realtà fisica corrispondente a quella grandezza."* (ibid., p.777)

Successivamente, gli autori costruiscono l'argomento. Considerano un sistema costituito da una singola particella con un solo grado di libertà e assumono che il suo comportamento sia descritto in maniera completa dallo stato quantistico descritto dalla funzione d'onda

$$\psi = \exp(2\pi i/h \cdot P_0 x) \quad [1]$$

dove h è la costante di Planck, P_0 è una costante numerica ed x è la variabile indipendente.

Prendono quindi l'operatore corrispondente all'osservabile momento della particella

$$p = (h/2\pi i)\partial/\partial x \quad [2]$$

⁷ In tedesco, Gedankenexperimente significa "esperimento mentale".

da cui si ottiene

$$p\psi = (\hbar/2\pi i)\partial\psi/\partial x = p_0\psi \quad [3]$$

Si può quindi affermare che ψ è autofunzione dell'operatore p a cui corrisponde l'autovalore p_0 . Ne consegue che una misura del momento restituirebbe con probabilità unitaria il valore p_0 . Nel quadro del criterio di realtà proposto da Einstein, Podolsky e Rosen, a tale grandezza può dunque essere attribuito un elemento di realtà. Considerando invece l'osservabile posizione, l'operatore q agisce sulla funzione d'onda secondo la relazione

$$q\psi = x\psi \quad [4]$$

In questo caso, non si tratta di un'autofunzione dell'operatore posizione q , di conseguenza, alla coordinata non è associato un valore determinato nello stato in Eq. 1, ma una distribuzione di probabilità. L'eventuale determinazione della posizione richiede un atto di misura che modifica lo stato del sistema, il quale non è più descritto dalla funzione d'onda in Eq. 1. Dunque, nel formalismo standard della meccanica quantistica, per grandezze incompatibili come posizione e quantità di moto, la conoscenza precisa dell'una esclude quella dell'altra: *“quando è nota la quantità di moto di una particella, le sue coordinate non hanno realtà fisica”* (Einstein et al., 1935, p.778) e, più in generale, se due operatori non commutano ($AB \neq BA$) *“la conoscenza precisa di una di esse preclude una tale conoscenza dell'altra. Inoltre, qualsiasi tentativo di determinare sperimentalmente quest'ultima altererà lo stato del sistema in modo tale da distruggere la conoscenza della prima.”* (ibid., p.778). A questo punto, gli autori arrivano a definire due opzioni: o O1) la descrizione quantomeccanica della realtà data dalla funzione d'onda ψ non è completa, oppure O2) quando due operatori che corrispondono a due quantità fisiche non commutano, le due quantità non possono avere realtà fisica simultaneamente. Non vi è una terza opzione, infatti, se le due grandezze non commutanti (i.e., posizione e momento) avessero valori definiti e quindi avessero entrambe realtà simultanea, secondo la condizione di completezza queste informazioni dovrebbero essere contenute nella funzione d'onda, ovvero i valori entrerebbero nella descrizione completa e sarebbero quindi predicibili. Non essendo questo il caso per via del Principio di Indeterminazione, restano solamente le due alternative enunciate.

Volendo dimostrare che la descrizione quantomeccanica non è completa (O1), gli autori propongono un esperimento mentale nel quale si considerano due sistemi, I e II, che, dopo aver interagito per un tempo $0 \leq t \leq T$, vengono separati e non sono più soggetti ad alcuna interazione reciproca. Supponendo che lo stato dei due sistemi sia noto prima di $t = 0$, possiamo calcolare lo stato del sistema combinato $I + II$ per qualsiasi tempo a venire $t > T$. Dopo l'interazione, lo stato del sistema totale non è in generale esprimibile come prodotto di stati dei singoli sottosistemi, ma è descritto da un'unica funzione d'onda $\Psi(x_1, x_2)$.

Sia A un'osservabile del sottosistema I, con autovalori $a_1, a_2, a_3, \dots$ e autofunzioni corrispondenti $u_1(x_1), u_2(x_1), u_3(x_1), \dots$ nei quali x_1 rappresenta le variabili che descrivono il primo sistema. La funzione d'onda dello stato combinato $\Psi(x_1, x_2)$, considerata come funzione di x_1 , può essere sviluppata come

$$\Psi(x_1, x_2) = \sum_{n=1}^{\infty} \psi_n(x_2) u_n(x_1) \quad [5]$$

dove x_2 indica le variabili che descrivono il secondo sistema e le funzioni $\psi_n(x_2)$ sono i coefficienti dell'espansione di Ψ nella base ortogonale $u_n(x_1)$. Ora, se si decide di misurare l'osservabile A e si ottiene l'autovalore a_k , viene attuato il processo di riduzione del pacchetto d'onda e la funzione d'onda $\Psi(x_1, x_2)$ collassa nel singolo termine $\psi_k(x_2) u_k(x_1)$, che rappresenta lo stato del sistema subito dopo la misura. Quindi, la misura di A sul primo sistema permette di descrivere il secondo sistema mediante la funzione d'onda $\psi_k(x_2)$. In alternativa, volendo scegliere un'altra grandezza fisica, ad esempio B con autovalori $b_1, b_2, \dots$ e autofunzioni $v_1(x_1), v_2(x_1), \dots$, la funzione d'onda complessiva $\Psi(x_1, x_2)$ può essere sviluppata come

$$\Psi(x_1, x_2) = \sum_{s=1}^{\infty} \varphi_s(x_2) v_s(x_1) \quad [6]$$

dove i coefficienti $\varphi_s(x_2)$ sostituiscono i precedenti. Ora, se si decide di misurare B e si ottiene l'autovalore b_r , la funzione d'onda $\Psi(x_1, x_2)$ collassa nel singolo termine $v_r(x_1) \varphi_r(x_2)$, che rappresenta lo stato del sistema subito dopo la misura. Vediamo quindi che, a seconda di quale misura si effettua sul primo sistema, il secondo risulta descritto da

due funzioni d'onda diverse, rispettivamente $\psi_k(x_2)$ e $\varphi_r(x_2)$. Tuttavia, poiché al momento della misura i due sistemi non sono più in interazione, un'operazione compiuta sul primo non può produrre alcuna modifica reale nel secondo. Ne consegue che, dopo la separazione dei due sistemi, dunque in assenza di interazione, è possibile attribuire due funzioni d'onda differenti ad una medesima realtà fisica a seconda dell'osservabile scelto. Supponiamo che $\psi_k(x_2)$ e $\varphi_r(x_2)$ siano autofunzioni di due operatori non commutanti associati a due grandezze fisiche distinte, ad esempio la quantità di moto P e la posizione Q . Si prendano quindi due sottosistemi, ad esempio due particelle descritte dalla funzione d'onda congiunta

$$\Psi(x_1, x_2) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{\frac{2\pi i}{h}(x_1 - x_2 + x_0)p} dp \quad [7]$$

dove x_0 è una costante. Se si sceglie come osservabile A la quantità di moto della prima particella, le sue autofunzioni risultano $u_p(x_1) = e^{\left(\frac{2\pi i}{h}\right)px_1}$ corrispondenti all'autovalore p . Nel caso di spettro continuo, l'Eq. 5 si scrive come

$$\Psi(x_1, x_2) = \int_{-\infty}^{\infty} \psi_p(x_2) u_p(x_1) dp \quad [8]$$

dove $\psi_p(x_2) = e^{-\frac{2\pi i}{h}(x_1 - x_0)p}$ è autofunzione dell'operatore $P = \frac{h}{2\pi i} \frac{\partial}{\partial x_2}$ associato all'autovalore $-p$, corrispondente alla quantità di moto della seconda particella. Se invece si considera come osservabile B la coordinata della prima particella, le autofunzioni risultano $v_x(x_1) = \delta(x_1 - x)$ corrispondenti all'autovalore x . Nel caso di spettro continuo, l'Eq. 6 diventa quindi

$$\Psi(x_1, x_2) = \int_{-\infty}^{\infty} \varphi_x(x_2) v_x(x_1) dx \quad [9]$$

dove $\varphi_x(x_2) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{\frac{2\pi i}{h}(x - x_2 + x_0)p} dx = h\delta(x - x_2 + x_0)$ è autofunzione dell'operatore $Q = x_2$ associato all'autovalore $x + x_0$, corrispondente alla coordinata della seconda particella. Per concludere, è possibile prevedere con certezza e senza in alcun modo

disturbare il secondo sistema il valore della grandezza P (ovvero p_k) o della grandezza Q (ovvero q_r).

Proprio qui, per gli autori emerge un evidente paradosso: lo stesso sistema fisico, ovvero la seconda particella, può essere descritto da due funzioni d'onda diverse a seconda di quale osservabile venga misurata sulla prima particella, seppur non interagenti. Einstein, Podolsky e Rosen affermano quindi che, se la meccanica quantistica fosse una teoria completa, questa ambiguità non dovrebbe esistere e di conseguenza la realtà fisica della seconda particella dovrebbe avere una descrizione unica, non dipendente dalle scelte compiute su un sistema ormai separato. Dal momento che la funzione d'onda dipende dalla scelta di misura, si conclude che la meccanica quantistica nella sua formulazione standard non fornisce una rappresentazione completa della realtà. Infine, gli autori ritornano alle due opzioni inizialmente poste O1 ed O2: se si assume che la funzione d'onda dia effettivamente una descrizione completa della realtà fisica (O2), si è costretti ad attribuire realtà simultanea a due osservabili non commutanti. Tuttavia, ciò contrasta con la struttura formale della meccanica quantistica, secondo la quale osservabili non commutanti non ammettono stati con valori simultaneamente definiti; ne segue che la funzione d'onda non può costituire una descrizione completa della realtà fisica (O1). Nelle righe finali dell'articolo, gli autori sottolineano la convinzione che sia possibile sviluppare una teoria più soddisfacente della meccanica quantistica allora disponibile.

2.1.2. La posizione di Bohr: la replica al paradosso e l'importanza della procedura di misurazione

Nel 1935, solamente due mesi dopo la pubblicazione dell'articolo EPR, Niels Bohr invia a *Nature* una breve replica (Bohr, 1935a), che verrà poi sviluppata nella sua interezza nell'ottobre del 1935 in un articolo recante lo stesso titolo del lavoro di Einstein, Podolsky e Rosen (Bohr, 1935b). Fin dall'incipit Bohr dichiara l'obiettivo di mostrare che il “criterio di realtà fisica” di EPR contiene un'ambiguità essenziale quando viene applicato ai fenomeni quantistici e che questa può essere risolta considerando la complementarità.

Nel suo scritto, Bohr riprende quanto enunciato in EPR e ne accetta l'impianto di ragionamento, ma ne rifiuta il criterio di realtà in quanto *“Tale argomentazione, tuttavia, difficilmente sembrerebbe adatta a compromettere la solidità della descrizione della*

meccanica quantistica. [...]” (ibid., p.696). Per Bohr, infatti, il punto di vista della filosofia naturale non tiene conto della particolarità dei fenomeni quantistici ed è necessaria una *“rinuncia definitiva all’ideale classico di causalità e di una radicale revisione del nostro atteggiamento nei confronti del problema della realtà fisica”* (ibid., p.697), che per l’autore viene a realizzarsi solo attraverso l’accettazione della complementarità, unica descrizione completamente razionale dei fenomeni quantistici.

Bohr propone quindi un esperimento mentale dove si prende in considerazione il passaggio di una particella attraverso un diaframma con fenditura, discutendone due configurazioni mutuamente esclusive. Anche se la sua quantità di moto è nota prima dell’attraversamento, la diffrazione dell’onda piana implica un’incertezza nella quantità di moto della particella dopo che essa ha attraversato il diaframma; inoltre, la larghezza della fenditura può essere assunta come l’incertezza Δq della posizione della particella rispetto al diaframma. Bohr collega quindi l’incertezza sul momento e quella sulla posizione tramite il principio generale di Heisenberg. Dunque, siccome l’incertezza sul momento è inseparabile dalla possibilità di uno scambio di quantità di moto tra particella e diaframma, l’autore si domanda fino a che punto il momento scambiato può essere presa in considerazione nella descrizione del fenomeno. In questo caso, *“la quantità di moto scambiata tra la particella e il diaframma, insieme alla reazione della particella sugli altri corpi, passa in questo supporto comune, e ci siamo così volontariamente preclusi ogni possibilità di tenere conto separatamente di queste reazioni nelle previsioni riguardanti il risultato finale dell’esperimento”* (ibid., p.698). Prendiamo ora in considerazione le due modalità mutuamente esclusive: se l’apparato è rigidamente fissato al supporto che definisce il sistema di riferimento, la fenditura fornisce un vincolo spaziale preciso e consente di localizzare la particella (misura di posizione); al contrario, se il diaframma è libero di muoversi, permette di registrare il rinculo e consente di misurare il momento prima e dopo il passaggio (misura del trasferimento di quantità di moto). Nel secondo caso, la determinazione accurata del momento rende indeterminata la posizione durante il passaggio della particella. Si giunge quindi alla conclusione che non si può ottenere simultaneamente un apparato perfettamente rigido (per definire la posizione) e perfettamente libero (per registrare la quantità di moto). Di conseguenza, il controllo su una variabile comporta l’inevitabile perdita dell’accuratezza del controllo sull’altra e per questo i due tipi di predizione sono legati a contesti di misura mutuamente esclusivi. Per questo motivo Bohr afferma che le due configurazioni realizzano alternative sperimentali complementari, spiegando perché posizione e quantità di moto non possano essere rese simultaneamente

determinate. Il paradosso nasce solo se confondiamo risultati provenienti da assetti incompatibili. Da questa alternativa operativa nasce quella che Bohr chiama esplicitamente una “free choice”:

“Siamo liberi di scegliere se conoscere la quantità di moto della particella o la sua posizione iniziale.” (Bohr, 1935b, p. 698)

L'arbitrarietà riguarda unicamente la nostra libertà nel utilizzare gli strumenti di misura, caratteristica della stessa idea di esperimento. La scelta dell'una o dell'altra procedura sperimentale permette *“un uso non ambiguo di concetti classici complementari”* (ibid., p.699). Questa è l'essenza della risposta di Bohr: non due proprietà preesistenti da rivelare simultaneamente, ma due schemi di misura complementari. Applicata al caso particolare trattato da EPR, la tesi di Bohr afferma che misurare una particella non disturba meccanicamente l'altra a distanza; tuttavia, la scelta dell'assetto sperimentale sulla prima particella modifica le condizioni rilevanti che definiscono quali predizioni sulla particella entangled sono legittime per il fenomeno considerato. Se si esegue una misura di posizione sul sistema *I*, le affermazioni formulabili con certezza sul sistema *II* riguardano la posizione; complementariamente, una misura della quantità di moto sul sistema *I* permette di determinare la quantità di moto del sistema *II*.

“L'impossibilità di un'analisi più approfondita delle reazioni tra la particella e lo strumento di misura non è in effetti una peculiarità della procedura sperimentale descritta, ma piuttosto una proprietà essenziale di qualsiasi dispositivo adatto allo studio di fenomeni del tipo in questione, dove abbiamo a che fare con una caratteristica dell'individualità completamente estranea alla fisica classica.” (ibid., p.697)

L'intera digressione dell'esperimento mentale confluisce nella critica al criterio di realtà adottato da Einstein, Podolski e Rosen. In particolare, Bohr contesta la clausola *“without in any way disturbing a system”* in quanto ambigua: nel quadro concettuale quantistico, non esiste un insieme univoco e simultaneamente definito di proprietà preesistenti indipendente dall'assetto sperimentale che la teoria dovrebbe semplicemente enumerare o rappresentare in modo esaustivo. Poiché le grandezze fisiche dipendono dal contesto di misura, il criterio di realtà EPR non risulta idoneo a valutare la completezza della teoria. In particolare, osservabili non commutanti, come posizione e quantità di moto, esigono procedure sperimentali mutuamente esclusive ed è proprio questa esclusione reciproca che consente una definizione

non ambigua delle grandezze complementari, rendendo coerente la coesistenza di leggi fisiche che, a prima vista, potrebbero apparire come inconciliabili. Alla luce di tali considerazioni, se per Einstein, Podolski e Rosen la conclusione è l'incompletezza della teoria, per Bohr risulta necessario abbandonare l'ideale classico di causalità e riconoscere la completezza della descrizione quantistica relativamente a un contesto sperimentale fissato.

2.1.3. Spunti di riflessione: il vero problema di Einstein

Il dibattito innescato dall'articolo di Einstein, Podolsky e Rosen (1935) rappresenta un momento di svolta nello sviluppo concettuale ed epistemologico della meccanica quantistica. Proprio quando gran parte della comunità scientifica riteneva sostanzialmente consolidato l'assetto teorico e concettuale della meccanica quantistica, il celebre articolo riapre il dibattito sui fondamenti. Infatti, pur essendo straordinariamente efficace sul piano predittivo, la formulazione standard della meccanica quantistica non assegna alle osservabili valori determinati prima della misura, ma fornisce esclusivamente distribuzioni di probabilità per i possibili esiti sperimentali. Nella fisica classica, al contrario, una teoria è considerata completa quando, una volta fissate le condizioni iniziali e le leggi dinamiche, il valore di ogni grandezza fisica risulta (almeno in linea di principio) determinabile. L'incertezza classica non è un tratto costitutivo della natura, bensì un effetto della nostra ignoranza circa lo stato completo di un sistema.

Can quantum mechanical description of physical reality be considered complete (Einstein et al., 1935) discute che la natura probabilistica della meccanica quantistica indica una forma di incompletezza: se è possibile prevedere con certezza il risultato della misura su un sistema distante senza perturbarlo, tale risultato deve corrispondere a un elemento di realtà preesistente, non a una generazione estemporanea dell'apparato di misura. La questione diventa particolarmente spinosa nel caso delle particelle entangled: le regolarità osservate sono il prodotto di relazioni predeterminate già inscritte nei sistemi? Oppure emergono in modo intrinsecamente non locale? Tale questione verrà formalizzata negli anni Sessanta attraverso le disuguaglianze di Bell, le quali mostrano che le predizioni della meccanica quantistica non sono compatibili con una teoria che attribuisce alle osservabili valori determinati e locali prima della misura. Nessuna teoria che mantenga simultaneamente il principio di località e l'esistenza di valori preesistenti è in grado di riprodurre l'intero insieme delle predizioni quantistiche.

L'impianto argomentativo di EPR e l'interpretazione storiografica dominante, spesso veicolata dallo stesso resoconto di Bohr del 1949 (Bohr, 1987), hanno indotto a considerare il realismo il tema principale del confronto aperto dall'articolo. In contrapposizione a ciò, incrociando le fonti storiche⁸ con studi più recenti (Fabris, 2024; Howard, 1985; Bacciagaluppi et al., 2024; Maudlin, 2022), emerge che il vero problema per Einstein era la tenuta congiunta di località e separabilità. Lo stesso Einstein non considerava pienamente soddisfacente la formulazione dell'argomento apparsa nell'articolo del 1935, tant'è che nella famosa lettera del 19 giugno 1935 indirizzata a Schrödinger, lo scienziato esprime le sue perplessità:

“Per motivi di linguaggio, questo [articolo] è stato scritto da Podolsky dopo molte discussioni. Ma non è ancora uscito bene come avrei voluto; al contrario, il punto principale è stato, per così dire, sepolto dall'erudizione.” (Einstein a Schrödinger, 19 giugno 1935; Howard, 1985)

Questa osservazione, come sottolineato da vari studi storici, allude al fatto che l'articolo poneva l'accento sul realismo mentre il *“punto principale”* che infastidiva Einstein, articolato nella parte successiva della lettera⁹, era la tensione tra la struttura del formalismo quantistico e l'idea che sistemi spazialmente separati possiedano stati fisici indipendenti, ovvero l'impossibilità di conciliare la località-separabilità con la descrizione quantistica degli stati composti. Come osserva Howard (1985), è possibile distinguere la posizione pubblica dell'articolo del 1935 dalla posizione più profonda e coerente che Einstein elabora nella corrispondenza privata. Don Howard (1985) osserva che le perplessità di Einstein sono state spesso trattate come un aggrappamento ad una *“metafisica deterministica e antiquata”* (Don Howard, 1985, p.172), mentre le sue ragioni erano di natura diversa. L'affermazione *“Der*

⁸ Le fonti storiche primarie che ci permettono di ricostruire il pensiero di Einstein sono molteplici, di seguito alcuni esempi: “Sulla situazione attuale del problema della radiazione” (1909), lettera a Lorentz del 1909, le dispute con Bohr e gli esperimenti mentali esposti nei Congressi di Solvay tra il 1927 e il 1930 (tra cui l'emblematico “fotone nella scatola”), la lettera a Schrödinger del 1935, “Fisica e Realtà” (1936), «Meccanica quantistica e realtà» (1948), etc. Nello stesso articolo EPR (Einstein et al., 1935) possiamo vedere come gli autori facciano implicitamente uso di quello che poi sarà definito nel periodo maturo come Principio di Località: “This makes the reality of P and Q depend upon the process of measurement carried out on the first system, which does not disturb the second system in any way. No reasonable definition of reality could be expected to permit this.”.

⁹ Ciò che ora è essenziale è soltanto che $[\psi_k]$ e $[\phi_r]$ siano effettivamente diversi tra loro. Sostengo che questa differenza sia inconciliabile con l'ipotesi che la descrizione ψ corrisponda biunivocamente alla realtà fisica (allo stato reale). Infatti, dopo la collisione lo stato reale di $[(I,II)]$ consiste dello stato reale di $[I]$ e dello stato reale di $[II]$, due stati che non hanno nulla a che vedere l'uno con l'altro. Lo stato reale di $[I]$, a questo punto, non può dipendere da quale misura io esegua su $[II]$ (il «principio di separazione» menzionato sopra). Ne consegue però che allo stesso stato di $[I]$ corrispondono due (in realtà arbitrariamente molte) [funzioni d'onda per I] ugualmente legittime, il che contraddice l'ipotesi di una descrizione biunivoca o completa degli stati reali. (Bacciagaluppi et al., 2024, pp. 299)

Herrgott würfelt nicht” (ovvero, “*Dio non gioca a Dadi*”) rappresenta probabilmente la citazione più spesso richiamata per sostenere l’importanza del determinismo all’interno del modo di interpretare il mondo di Einstein; tuttavia, l’argomento di Einstein circa l’incompletezza discende dall’unione di due premesse, che sono logicamente indipendenti (Fabris, 2024):

- Località (L): lo stato di un sistema può essere modificato solo attraverso l’azione di effetti locali che si propagano con velocità finita ed inferiore a quella della luce;
- Separabilità (S): sistemi spazialmente (o spaziotemporalmente) separati sono ontologicamente indipendenti e una qualsiasi coppia di tali sistemi deve possedere stati propri, reali e distinti.

Einstein considera la prima (L) garantita dai vincoli della relatività ristretta, la seconda (S) una restrizione ontologica necessaria per qualsiasi teoria fisica fondamentale. All’interno degli scritti dello scienziato, questo punto trova la sua formulazione più chiara nel periodo maturo. Come riporta Fabris (2024) all’interno della sua tesi di laurea, l’ultima enunciazione pubblica dell’argomento mostra esplicitamente come l’incompletezza della meccanica quantistica segua dall’assunzione congiunta di località e separabilità. La versione compiuta giunge in *Meccanica quantistica e realtà* (1948), dove località e separabilità sono finalmente distinte e poste a fondamento del suo realismo scientifico. Senza separabilità, osserva Einstein

“Senza una tale assunzione dell’esistenza reciprocamente indipendente [...] di cose spazialmente distanti, un’assunzione che ha origine nel pensiero quotidiano, il pensiero fisico nel senso che ci è familiare non sarebbe possibile. Senza una simile netta separazione, non si vedrebbe neppure come leggi fisiche potrebbero essere formulate e controllate.” (Einstein, 1948)

e senza località

“La completa sospensione di questo principio di base renderebbe impossibile l’idea dell’esistenza di sistemi (quasi) chiusi e, perciò, l’istituzione di leggi controllabili empiricamente nel senso che ci è familiare.” (Einstein, 1948)

Assunte congiuntamente località e separabilità, si può considerare completa una teoria se e solo se ad ogni stato reale del sistema corrisponde un’unica rappresentazione della teoria,

ossia se la funzione d'onda è in corrispondenza biunivoca con lo stato reale. Tuttavia, nel caso di sistemi composti, la meccanica quantistica consente di attribuire funzioni d'onda differenti a uno stesso sottosistema indisturbato a seconda della misura effettuata sull'altro, qualunque sia la loro distanza: ciò contraddice la pretesa di completezza. I due principi (L ed S) rappresentano per Einstein una condizione irrinunciabile per qualsiasi teoria fisica accettabile; l'indipendenza spazio-temporale di due oggetti acquisisce un carattere ontologico. In particolare, in una lettera inviata a Max Born, Einstein scrive:

“La seguente idea caratterizza l'indipendenza relativa di oggetti (A e B) molto distanti nello spazio: un'influenza esterna su A non ha alcuna influenza diretta su B.” (Born, 1971)

Un'altra dichiarazione di Einstein dice:

“Sembra difficile riuscire a sbirciare le carte di Dio. Ma che Egli giochi a dadi e si serva di metodi “telepatici” (come l'attuale teoria quantistica Gli richiederebbe) è qualcosa in cui non posso credere nemmeno per un istante.”
(Maudlin, 2014, p.2)

Quindi Einstein non è tormentato soltanto dall'idea che Dio giochi a dadi, ma soprattutto dal fatto che Egli ricorra a metodi “telepatici”, ovvero della più conosciuta “*spukhafte Fernwirkung*” (“azione spettrale a distanza” o “*spooky action at a distance*”). Le perplessità di Einstein sulle relazioni di indeterminazione e la conseguente caduta del determinismo erano secondarie rispetto a un'esigenza più profonda: chiarire come la meccanica quantistica tratti i sistemi composti e, in particolare, la perdita della separabilità, che comprometterebbe la possibilità stessa di “fare fisica” nel senso familiare del termine.

L'argomento EPR fu percepito come uno stimolo inatteso per la comunità dei fisici grazie alla sua semplicità e all'apparente ragionevolezza delle ipotesi. La reazione di Bohr mostra quanto l'entanglement incida non solo sul formalismo, ma anche sulla struttura epistemica della fisica stessa, dove si radicano le loro convinzioni metodologiche e ontologiche. Come ricorda Ghirardi nel suo libro (1997) attraverso la descrizione di Leon Rosenfeld

“Questo attacco feroce ci colpì come un fulmine a ciel sereno. Il suo effetto su Bohr fu enorme [...] non appena Bohr ascoltò la mia relazione sull'argomento di Einstein, abbandonò ogni altro problema ... Eccitatissimo, Bohr iniziò immediatamente a

dettarmi lo schema ... di una risposta. Quasi subito, tuttavia, egli si fece esitante: "No, questo non basta, dobbiamo tentare tutto da capo ... dobbiamo essere assolutamente chiari ...". Continuò così per un certo tempo, mentre aumentava in lui la meraviglia per l'insospettata acutezza dell'argomento ... " (p.161)

Dopo un'iniziale impetuosa risposta (Bohr, 1935a), Bohr rielaborò la propria argomentazione con crescente attenzione. Ciononostante, la sua seconda replica (Bohr, 1935b) è spesso ritenuta oscura (i.e., Ghirardi, 1997; Fabris, 2024), tant'è che lo stesso Einstein e, più tardi, Bell dichiararono di non averne compreso pienamente la sua posizione. Alcuni punti appaiono particolarmente problematici: che cosa intenda Bohr per “*disturbi meccanici*” da trascurare; come interpretare l'espressione “*un'influenza sulle precise condizioni che definiscono i possibili tipi di previsioni*” senza ricadere nell'idea, già ammessa da EPR, che misure diverse in A informano diversamente B; e che cosa significhi l’“*interazione finita e incontrollabile tra oggetto e strumento*”, dato che nell'impostazione di Einstein, assumendo località, solo A è direttamente perturbato mentre si ottengono informazioni su B (Fabris, 2024). Nei suoi scritti, Bohr sembra agire affidandosi completamente alla sua idea di complementarità ma, per quanto possa sembrare una valida osservazione, non risulta decisiva in quanto l'argomento EPR non richiede esecuzioni simultanee delle misure. Inoltre, come abbiamo visto, le relazioni di indeterminazione a cui Bohr fa appello non emergono come aspetto centrale rispetto al vero argomento di Einstein contro la completezza della meccanica quantistica. Nonostante ciò, per l'opinione pubblica e la comunità scientifica dell'epoca, forse in maniera troppo acritica (Fabris, 2024), fu Bohr a chiudere il dibattito da vincitore.

Anche Erwin Schrödinger partecipò al dibattito portando, a distanza di pochi mesi, due contributi significativi. Nel primo, *Discussion of Probability Relations between Separated Systems* (Schrödinger, 1935a), Schrödinger conia il termine *Verschränkung*, oggi entanglement, per indicare la non separabilità dello stato di un sistema composto. Dopo un'interazione, anche quando i sistemi sono di nuovo spazialmente separati, non è in generale possibile attribuire a ciascuna parte una descrizione indipendente. Schrödinger lo chiamerà infatti “*...il tratto caratteristico della meccanica quantistica, quello che impone il suo completo distacco dalle linee di pensiero classiche.*” (Schrödinger, 1935b, p. 555). La seconda pubblicazione, *Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik* (Schrödinger, 1935b) è il saggio nel quale presenta il famoso paradosso del gatto, concepito per mettere in risalto l'apparente assurdità del principio di sovrapposizione a livello macroscopico. Per

Schrödinger, la tensione epistemica prende forma nel testo stesso: la scelta dei termini, le strategie retoriche e le cautele espressive rivelano quanto il terreno concettuale fosse instabile. L'autore accoglie i dubbi circa l'“*ovvia ma molto sconcertante*” (Schrödinger, 1935a) verità della meccanica quantistica e definisce la situazione “*piuttosto inquietante*”. La difficile accettazione della teoria traspare all'interno del linguaggio impiegato: espressioni come “*importanza inquietante*”, sistemi che possono essere “*guidati o 'pilotati' [...] alla mercé dello sperimentatore*”, “*completo abbandono*”, “*controintuitiva*”, “*ambiguità essenziale*”, “*contraddizione apparente*”, fino a inviti a una “*una revisione radicale del nostro atteggiamento*” o a una “*rinuncia*”, segnalano che siamo di fronte a una vera rivoluzione concettuale ed epistemologica. L'insistenza su termini che evocano spaesamento, rottura e riformulazione mette in evidenza l'entanglement come fenomeno che costringe a ripensare modalità di osservazione, descrizione e spiegazione.

Per concludere, il dibattito non è solo un esempio storico di disputa interpretativa attorno ad un esperimento mentale, ma un confronto sulla nostra immagine di scienza e sul modo di fare scienza: ciascun autore, a suo modo, ridefinisce che cosa significhi per una teoria essere “completa”. Per EPR, la completezza implica che ogni elemento della realtà fisica abbia un corrispettivo nel formalismo. L'argomentazione nasce da una convinzione realista, la quale afferma che il compito della fisica è rivelare la struttura causale sottostante ai fenomeni. La meccanica quantistica, a loro avviso, non poteva costituire la descrizione definitiva, poiché offre soltanto previsioni statistiche sugli esiti delle misure senza fornire un quadro degli stati reali delle cose. Bohr, al contrario, sposta l'accento da ciò che esiste a ciò che può essere detto in modo significativo sulla natura. I limiti imposti dalle condizioni di misura, incarnati nel principio di complementarità, non definiscono un'imperfezione della teoria, bensì il vero orizzonte del fare fisica. Infine, la posizione di Schrödinger mostra le conseguenze paradossali di assumere la funzione d'onda come descrizione letterale del mondo, al culmine della quale troviamo la celebre metafora del gatto, che mette in luce l'impossibilità di mantenere insieme l'ideale classico di uno stato oggettivo e il formalismo quantistico che dissolve la separabilità.

2.2. Dalle ipotesi di EPR alle disuguaglianze di Bell

Dopo l'acceso confronto del 1935, il dibattito attorno all'entanglement rimane prevalentemente confinato al piano interpretativo. L'atteggiamento dominante da parte della comunità dei fisici è di tipo pragmatico: l'attenzione è rivolta principalmente alla fisica nucleare e delle particelle, alla materia condensata e all'elettrodinamica quantistica; perciò, le questioni sollevate dall'articolo EPR vengono spesso considerate di natura meramente filosofica, piuttosto che l'oggetto di un programma teorico o sperimentale autonomo in linea con l'interpretazione di Copenaghen, che accetta l'entanglement come proprietà formale. Inoltre, la trattazione di von Neumann del 1932 viene ampiamente ritenuta, sebbene in modo improprio, come verrà dimostrato da D. Bohm (1952) ed in maniera conclusiva circa trent'anni dopo da John Bell (1966), una confutazione generale delle variabili nascoste, rafforzando l'idea che l'entanglement non giustifichi teorie alternative. Tuttavia, alcuni sviluppi esterni alla corrente dominante meritano menzione, in particolare i cosiddetti programmi a variabili nascoste.

2.2.1. Il programma a variabili nascoste

Una teoria a variabili nascoste è una teoria fisica che assume che il formalismo quantistico standard non descriva l'intero stato fisico di un sistema. Secondo questa prospettiva, le grandezze rappresentate dalla funzione d'onda costituiscono solo una parte dell'informazione fisicamente rilevante, ed esistono ulteriori variabili, non incluse nella meccanica quantistica ortodossa, che determinano o contribuiscono a determinare gli esiti delle misurazioni. L'obiettivo non è aggiungere parametri ad hoc, ma restituire un'ontologia chiara e completa, fornendo ciò che Maudlin chiama *“a fully intelligible account of physical processes”* (Maudlin, 2011). In questa prospettiva, l'indeterminismo della teoria standard non è fondamentale, ma riflette la nostra ignoranza di un livello descrittivo più profondo. Le teorie a variabili nascoste nascono quindi dalla convinzione che l'indistinguibilità tra stato fisico e l'informazione disponibile, tipica dell'interpretazione di Copenaghen, sia concettualmente fragile. Questa esigenza diventa ancora più forte dopo la pubblicazione dell'articolo EPR (Einstein et al., 1935). De Broglie, a partire dagli anni Venti, tenta una prima formulazione dinamica di questo quadro, e la ripresa sistematica del suo approccio da parte di Bohm (1952) mostra che è possibile costruire un modello coerente, matematicamente definito e compatibile con tutte le previsioni della meccanica quantistica. La teoria di Bohm dimostra che *“Le teorie*

a variabili nascoste non solo sono possibili, ma spesso sono concettualmente più chiare della teoria che mirano a sostituire.” (Bohm, 1952 in Maudlin, 2011). Piuttosto che rappresentare una proposta unificata, le teorie a variabili nascoste costituiscono un'ampia famiglia di proposte¹⁰ volte a integrare lo stato quantistico con parametri aggiuntivi che determinano, o almeno aiutano a spiegare, i risultati delle misurazioni. La motivazione alla base di questo approccio non è semplicemente il desiderio di determinismo, ma il requisito di completezza nel senso dell'argomento EPR. Da questa prospettiva, infatti, lo stato quantistico appare insufficiente, poiché produce solo previsioni probabilistiche e non fornisce alcuna spiegazione dei singoli processi che portano a risultati specifici.

La teoria di de Broglie-Bohm

Il 15 gennaio del 1952 viene pubblicata sul *Physical Review* la proposta di David Bohm, filosofo e fisico statunitense, di una teoria a variabili nascoste deterministica ed esplicitamente non locale (*de Broglie-Bohm theory*), matematicamente coerente ma accolta con scarso favore dalla comunità scientifica (Bohm, 1952). Il periodo in cui matura questa proposta è particolarmente significativo: Bohm era allora impegnato nella redazione di *Quantum Theory*, un trattato che si distingue per l'attenzione ai problemi concettuali e interpretativi della meccanica quantistica. In un primo momento egli aderì pienamente all'impostazione ortodossa, condividendo la posizione di Bohr e difendendo la completezza della teoria. Le frequenti discussioni con Einstein, tuttavia, produssero un progressivo mutamento di prospettiva, spingendolo a interrogarsi sui limiti dell'interpretazione dominante. Nel suo articolo, Bohm (1952) riconosce la coerenza interna della meccanica quantistica, ma sottolinea che tale coerenza non implica l'unicità dell'interpretazione:

“La consueta interpretazione [della MQ] è, senza dubbio, coerente; tuttavia, la semplice dimostrazione di tale coerenza non esclude la possibilità di altre interpretazioni ugualmente coerenti, che introducano elementi o parametri aggiuntivi in grado di fornire una descrizione causale e continua di tutti i processi, senza rinunciare alla possibilità di concepire il livello quantistico in termini precisi. [...] tali elementi o parametri aggiuntivi potrebbero essere definiti “variabili nascoste”. ”
(Bohm, 1952, p.166)

¹⁰ Si parla infatti di un programma di ricerca, più che di una singola teoria, perché include proposte eterogenee. Ad esempio, alcune cercano di preservare un vincolo di località, altre invece lo abbandonano in modo esplicito, introducendo una dinamica non locale.

Da questa riflessione nacque quella che Ghirardi definisce una “*conversione dall’ortodossia all’eresia*” (Ghirardi, 1997), che portò Bohm alla formulazione della cosiddetta meccanica bohmiana. In tale prospettiva, egli apre all’eventuale superamento dei postulati standard che potrebbe richiedere l’introduzione di strumenti concettuali più ampi:

“E se tali postulati dovessero rivelarsi inadeguati, è concepibile che si renda necessario introdurre operatori non locali, campi non lineari, matrici-S, ecc.” (Bohm, 1952, p.169)

Pur riconoscendo la coerenza interna della teoria, Bohm osserva che il formalismo standard non fornisce un modello concettuale univoco per descrivere, in termini classici, le relazioni tra i fenomeni registrati in apparati di misura distinti. Nella sua rilettura, invece, l’esperimento può essere rappresentato tramite un modello preciso formulato nello spazio delle configurazioni: per un sistema a due particelle, la descrizione coinvolge un campo d’onda in $\mathbb{R}^6$ e una traiettoria ben definita nello stesso spazio. In questo quadro, la funzione d’onda non collassa ma determina, attraverso la struttura di fase e il potenziale quantistico, l’evoluzione della traiettoria nel tempo, permettendo una ricostruzione causale dei processi che resta compatibile con le statistiche di Born. In questo modello, la funzione d’onda viene espressa nella forma $\psi = Re^{iS/\hbar}$, con $R, S \in \mathbb{R}$. Inserendo questa decomposizione nell’equazione di Schrödinger, nel caso del problema a due corpi, si ottengono due relazioni fondamentali: l’equazione di continuità, che regola l’evoluzione della densità R^2 , e una versione modificata dell’equazione di Hamilton–Jacobi,

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{(\nabla_1 S)^2 + (\nabla_2 S)^2}{2m} + V(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2) + U(\mathbf{x}) = 0 \quad [10]$$

dove $U(\mathbf{x})$ è il potenziale quantistico, ovvero:

$$U(\mathbf{x}) = -\frac{\hbar^2}{2m_i} [\nabla_1^2 R + \nabla_2^2 R] \quad [11]$$

Nel quadro bohmiano, la funzione d’onda $\psi = Re^{iS/\hbar}$ non rappresenta una mera ampiezza di probabilità, ma un campo reale che esercita un’azione causale sul sistema fisico. Il potenziale quantistico introduce una correzione non classica al potenziale esterno V e determina un

comportamento che riflette la struttura ondulatoria della funzione d'onda (nel limite in cui il potenziale quantistico U diviene trascurabile, la teoria converge alla meccanica classica). In questa prospettiva, la funzione d'onda non subisce alcun collasso al momento della misura: essa agisce invece come un'onda pilota che orienta il moto delle particelle.

Le posizioni delle particelle costituiscono le variabili nascoste della teoria. Esse non compaiono nella formulazione ortodossa della meccanica quantistica e non possono essere determinate sperimentalmente senza modificare lo stato del sistema. I limiti previsionali espressi dal principio di indeterminazione non derivano quindi dall'assenza di valori definiti per le grandezze fisiche, ma dal modo in cui le procedure di misura intervengono sul sistema. L'insieme delle soluzioni dell'equazione di Hamilton–Jacobi quantistica e dell'equazione di continuità definisce un'ensamble di traiettorie possibili (cfr. Fig. 2.1), ognuna determinata causalmente dalla fase S e dal potenziale U . Assumendo, per la distribuzione iniziale delle posizioni, la condizione di *equilibrio quantistico*, $\rho = |\psi|^2$, la teoria bohmiana riproduce esattamente le stesse statistiche previste dalla meccanica quantistica convenzionale.

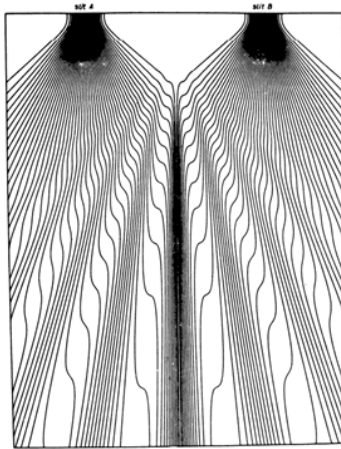


Figura 2.1: Traiettorie bohmiane nell'esperimento a doppia fenditura. Ogni linea rappresenta il percorso deterministico di una particella, guidato dalla fase della funzione d'onda e dal potenziale quantistico U . L'interferenza emerge come effetto collettivo del campo d'onda, pur in presenza di traiettorie singole definite. Fonte: Bohm (1993)

Tuttavia, come anticipato precedentemente, questa riformulazione introduce un'importante conseguenza: la non località. Nei sistemi a molti corpi, la fase $S(x_1, \dots, x_N)$ dipende dalla configurazione complessiva, e la dinamica di ciascuna particella risulta funzione dell'intero

sistema. Il moto di una singola particella può dunque dipendere istantaneamente dallo stato delle altre, anche a grandi distanze spaziali. Infine, Bohm affronta la questione relativistica distinguendo con cura tra non località dinamica e segnalazione. La dipendenza istantanea dalla configurazione complessiva del sistema non consente, infatti, la trasmissione di segnali superluminali: per trasformare il “trasferimento istantaneo” (ad esempio di quantità di moto) in un “canale informativo” sarebbe necessario conoscere operativamente cosa avrebbe fatto la seconda particella in assenza dell’osservazione sulla prima, ma tale informazione non è accessibile. In tal senso, fintanto che il formalismo standard risulta corretto, l’interpretazione bohmiana non entra in conflitto con la relatività, pur mettendo in luce una struttura non locale della dinamica a livello del sistema complessivo.

La teoria di Bohm fu a lungo considerata marginale, ma fu rivalutata a partire dagli anni '70 proprio grazie a John Bell, che rimase affascinato dal concetto di onda pilota, considerandola un esempio di una formulazione deterministica e non locale della meccanica quantistica. In quegli stessi anni, anche l’interpretazione “a molti mondi” di Everett (1957) suscitò interesse, seppur limitato, rimanendo discussa soprattutto in contesti filosofici più che nella letteratura di fisica. Come riassunto nella documentazione del Nobel per la Fisica del 2022¹¹:

“Poiché le teorie di Bohm ed Everett non formulavano alcuna previsione sperimentalmente verificabile che differisse dalla meccanica quantistica standard, la maggior parte dei fisici considerava questi tipi di proposte piuttosto esoteriche [...] Questa era la situazione nel 1964, quando John Bell pubblicò la sua disuguaglianza [...]” (Nobel, 2022)

È proprio a partire da questo scenario, come vedremo nel prossimo paragrafo, che John S. Bell compie il salto concettuale ed epistemologico, spostando il focus dall’indeterminazione alla località e dimostrando che nessuna teoria a variabili nascoste locali può riprodurre tutte le previsioni quantistiche.

2.2.2. John Bell e la svolta nell’interpretazione della MQ

All’inizio degli anni Sessanta, l’entanglement era ancora considerato un fenomeno piuttosto strano della meccanica quantistica, ma non come un problema di natura sperimentale. Fu John Stewart Bell, fisico teorico di origine britannica, a riaprire la questione mostrando come

¹¹ <https://www.nobelprize.org/uploads/2023/10/advanced-physicsprize2022-4.pdf>

le teorie a variabili nascoste locali non costituiscono semplicemente un'interpretazione alternativa del formalismo, ma formulano previsioni sperimentalmente verificabili diverse da quelle della meccanica quantistica.

Nel 1964 John Bell riapre il dibattito sull'entanglement con il celebre articolo *On the Einstein–Podolsky–Rosen Paradox*. Bell propone un'analisi che segnerà una svolta radicale nell'interpretazione della teoria quantistica. Nonostante la scarsa risonanza immediata, il lavoro di Bell acquistò progressivamente importanza a partire dal 1966, grazie a un successivo saggio in cui l'autore discusse criticamente le argomentazioni di von Neumann e i limiti delle sue dimostrazioni dell'impossibilità delle teorie a variabili nascoste. Successivamente, Bell pubblicò la raccolta *Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics* (Bell, 2004), consolidando la portata storica dei suoi scritti e rendendo accessibili lavori meno noti come quello del 1964.

Bell apre il suo articolo (1964) richiamando l'argomento EPR e chiarendo l'obiettivo e la portata del suo lavoro:

“In questa nota, tale idea [di una teoria fondata sulla causalità e sulla località] verrà formulata matematicamente e mostrata essere incompatibile con le previsioni statistiche della meccanica quantistica” (Bell, 1964, p.195)

Con questa affermazione, Bell annuncia una delle conclusioni più profonde della fisica moderna: nessuna teoria locale-realistica può riprodurre le correlazioni statistiche previste dalla meccanica quantistica. Nel suo articolo, Bell richiama le precedenti dimostrazioni dell'impossibilità di una teoria a variabili nascoste, in particolare quella di John von Neumann, affermando che sono carenti¹². L'esistenza di modelli come quello di Bohm dimostra infatti che è possibile formulare teorie a variabili nascoste coerenti con le previsioni della meccanica quantistica, purché si accetti di rinunciare al principio di località.

Il corpo dell'articolo può essere suddiviso in tre sezioni principali:

1. la formulazione dell'argomento,
2. l'illustrazione di alcuni aspetti concettuali rilevanti,

¹² Bell fa un riferimento particolare alla teoria di Von Neumann e simili, di cui critica fortemente le premesse nell'articolo del (1966). In particolare, afferma che *“i loro assiomi essenziali sono irragionevoli.”* (Bell, 1966, p.1)

3. la parte conclusiva dedicata alla contraddizione, in cui presenta la dimostrazione annunciata nell'introduzione.

Nella fase di formulazione, Bell definisce il suo argomento sfruttando come punto di partenza la versione Bohm-Aharonov del paradosso EPR (Bohm & Aharonov, 1957), basata su un sistema di due particelle di spin 1/2 preparate in uno stato di singoletto ψ che si allontanano in direzioni opposte e vengono analizzate da due strumenti di misura posti agli estremi dell'apparato sperimentale, ad esempio due apparati di Stern–Gerlach (cfr. Fig. 2.2).

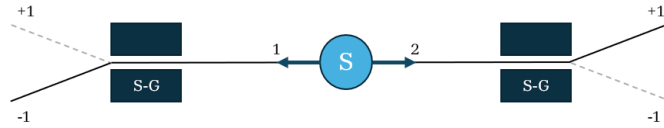


Figura 2.2: Apparato che riproduce l'esperimento descritto da John Bell.

Ciascun apparato misura le componenti di spin selezionate per le due particelle $\vec{\sigma}_1$ e $\vec{\sigma}_2$ lungo una direzione arbitraria definita dai vettori unitari. Si introducono quindi un insieme di variabili nascoste, indicate con λ , che rappresentano gli elementi di realtà sottostanti e gli osservabili A e B, ottenuti rispettivamente dal risultato della misurazione di $\vec{\sigma}_1 \cdot \vec{a}$ e di $\vec{\sigma}_2 \cdot \vec{b}$ tali per cui

$$A(\vec{a}, \lambda) = \pm 1, \quad B(\vec{b}, \lambda) = \pm 1 \quad [12]$$

L'assunzione cruciale della località richiede inoltre che B non dipenda da $\vec{a}$ e A non dipenda da $\vec{b}$. Allora il valore medio del prodotto degli esiti, sia $\rho(\lambda)$ la probabilità di distribuzione di λ , è

$$P(\vec{a}, \vec{b}) = \int d\lambda \rho(\lambda) A(\vec{a}, \lambda) B(\vec{b}, \lambda) \quad [13]$$

che dovrebbe uguagliare la previsione quantistica per il singoletto

$$P_{QM}(\vec{a}, \vec{b}) = \langle \vec{\sigma}_1 \cdot \vec{a} \vec{\sigma}_2 \cdot \vec{b} \rangle = -\vec{a} \cdot \vec{b} \quad [14]$$

Bell anticipa che ciò è impossibile sotto le ipotesi date.

Si passa quindi alla fase di illustrazione, nella quale, prima di passare alla dimostrazione, lo scienziato vuole mostrare in primo luogo che per una singola particella di spin $\frac{1}{2}$ in uno stato puro caratterizzato da un vettore unitario di polarizzazione $\vec{p}$, è possibile costruire un modello deterministico a variabili nascoste che riproduce

$$\langle \vec{\sigma} \cdot \vec{a} \rangle = \cos\theta \quad [15]$$

Egli introduce la variabile nascosta $\vec{\lambda}$, vettore unitario distribuito uniformemente sull'emisfero $\vec{\lambda} \cdot \vec{p} > 0$, e definisce l'esito della misura di una componente $\vec{\sigma} \cdot \vec{a}$ come $A(\vec{a}, \vec{\lambda}) = \text{sign}(\vec{\lambda} \cdot \vec{a}')$, dove $\vec{a}'$ è un vettore unitario dipendente da $\vec{a}$ e $\vec{p}$. Mediando su $\vec{\lambda}$ si ottiene $\langle \vec{\sigma} \cdot \vec{a} \rangle = 1 - 2\theta'/\pi$, con θ' angolo tra $\vec{a}'$ e $\vec{p}$. In questo modo, ipotizzando che $\vec{a}'$ sia ottenuto ruotando $\vec{a}$ verso $\vec{p}$ fino a che $1 - 2\theta'/\pi = \cos\theta$, si ottiene l'Eq. 15. In questo caso semplice, dunque, non c'è alcuna difficoltà a sostenere che l'esito di ogni misura è determinato dal valore di una variabile extra e che le caratteristiche statistiche della meccanica quantistica emergono dal fatto che il valore di tale variabile è ignoto nei singoli casi. In secondo luogo, riprendendo la forma generale in Eq. 13, Bell osserva che non è difficile ricostruire un modello locale che riproduca l'Eq. 14 nella forma in Eq. 13, cioè

$$P(\vec{a}, \vec{a}) = -P(\vec{a}, -\vec{a}) = -1 \quad [16a]$$

$$P(\vec{a}, \vec{b}) = 0 \quad \text{se} \quad \vec{a} \cdot \vec{b} = 0 \quad [16b]$$

spesso citate nelle discussioni riguardanti il paradosso EPR. Sceglie quindi λ come vettore unitario $\vec{\lambda}$ uniformemente distribuito su tutte le direzioni e definisce gli esiti

$$A(\vec{a}, \vec{\lambda}) = \text{sign}(\vec{\lambda} \cdot \vec{a}') \quad [17a]$$

$$B(\vec{a}, \vec{b}) = -\text{sign}(\vec{b} \cdot \vec{\lambda}) \quad [17b]$$

Ne segue che la correlazione lineare tra $\vec{a}$ e $\vec{b}$ per l'angolo θ è:

$$P(\vec{a}, \vec{b}) = -1 + \frac{2\theta}{\pi} \quad [18]$$

Infine, Bell mostra che se permettiamo agli esiti su A di dipendere anche dall'orientazione $\vec{b}$ (vale anche il viceversa sostituendo A e $\vec{b}$ con B ed $\vec{a}$), allora si può ricostruire esattamente la

correlazione quantistica $-\vec{a} \cdot \vec{b}$ al caro prezzo della violazione della località: il risultato su un lato dipenderebbe infatti dall'assetto strumentale più lontano, proprio ciò che vogliamo evitare.

Si arriva quindi alla parte definita come contraddizione, che contiene la dimostrazione principale dell'articolo. Siccome ρ è una distribuzione di probabilità normalizzata

$$\int d\lambda \rho(\lambda) = 1 \quad [19]$$

e valendo le proprietà (b1), il valore di aspettazione $P(\vec{a}, \vec{b})$ in Eq. 13 non può essere minore di -1 e può assumere tale valore nel caso in cui $\vec{a} = \vec{b}$ solamente se

$$A(\vec{a}, \lambda) = -B(\vec{b}, \lambda) \quad [20]$$

ad esclusione di un set di valori di λ con misura di probabilità nulla. Assumendo ciò, Eq. 13 può essere riscritta come

$$P(\vec{a}, \vec{b}) = - \int d\lambda \rho(\lambda) A(\vec{a}, \lambda) A(\vec{b}, \lambda) \quad [21]$$

Dato un terzo vettore di modulo unitario $\vec{c}$, siccome $A(\vec{b}, \lambda) A(\vec{b}, \lambda) = 1$, segue che

$$\begin{aligned} P(\vec{a}, \vec{b}) - P(\vec{a}, \vec{c}) &= - \int d\lambda \rho(\lambda) [A(\vec{a}, \lambda) A(\vec{b}, \lambda) - A(\vec{a}, \lambda) A(\vec{c}, \lambda)] \\ &= \int d\lambda \rho(\lambda) [A(\vec{a}, \lambda) A(\vec{b}, \lambda) A(\vec{b}, \lambda) A(\vec{c}, \lambda) - A(\vec{a}, \lambda) A(\vec{b}, \lambda)] \\ &= \int d\lambda \rho(\lambda) A(\vec{a}, \lambda) A(\vec{b}, \lambda) [A(\vec{b}, \lambda) A(\vec{c}, \lambda) - 1] \end{aligned} \quad [22]$$

Applicando nuovamente Eq. 12 si ha che

$$|P(\vec{a}, \vec{b}) - P(\vec{a}, \vec{c})| \leq \int d\lambda \rho(\lambda) [1 - A(\vec{b}, \lambda) A(\vec{c}, \lambda)] \quad [23]$$

e successivamente, riapplicando l'Eq. 19 ed Eq. 21, si ottiene la formulazione originaria della famosa disuguaglianza di Bell

$$1 + P(\vec{b}, \vec{c}) \geq |P(\vec{a}, \vec{b}) - P(\vec{a}, \vec{c})| \quad [24]$$

A meno che P non sia costante, la parte destra di Eq. 24 è dell'ordine di $|\vec{b} - \vec{c}|$ per piccoli valori di $|\vec{b} - \vec{c}|$ e perciò $P(\vec{b}, \vec{c})$ non può essere stazionario in prossimità del suo valore

minimo, ovvero -1 quando $\vec{b} = \vec{c}$, e si dimostra che non può eguagliare il valore quantomeccanico in Eq. 14, ma nemmeno la correlazione quantomeccanica in Eq. 14 può essere approssimata arbitrariamente bene da Eq. 13. Segue la dimostrazione formale nella quale si considerano, al posto di Eq. 13 ed Eq. 14, rispettivamente

$$\overline{P(\vec{a}, \vec{b})} \text{ e } \overline{(-\vec{a} \cdot \vec{b})} \quad [25]$$

ovvero le medie dei rispettivi valori $P(\vec{a}, \vec{b})$ e $-\vec{a} \cdot \vec{b}$ al variare dei vettori $\vec{a}$ e $\vec{b}$ entro piccoli angoli specifici di $\vec{a}$ e $\vec{b}$. Ora, supponiamo che per tutti gli $\vec{a}$ e $\vec{b}$ il modulo della differenza dei due valori medi risulti delimitato da ϵ

$$\left| \overline{P(\vec{a}, \vec{b})} - \overline{(-\vec{a} \cdot \vec{b})} \right| = \left| \overline{P(\vec{a}, \vec{b})} + \overline{\vec{a} \cdot \vec{b}} \right| \leq \epsilon \quad [26]$$

si può vedere che ϵ non può assumere valori arbitrariamente piccoli. Supponendo che per ogni a e b si abbia

$$\left| \overline{\vec{a} \cdot \vec{b}} - \vec{a} \cdot \vec{b} \right| \leq \delta \quad [27]$$

dall'Eq. 26 si ha che

$$\left| \overline{P(\vec{a}, \vec{b})} + \overline{\vec{a} \cdot \vec{b}} \right| \leq \epsilon + \delta \quad [28]$$

Quindi, richiamando Eq. 13, possiamo scrivere

$$\overline{P(\vec{a}, \vec{b})} = \int d\lambda \rho(\lambda) \overline{A(\vec{a}, \lambda)} \overline{B(\vec{b}, \lambda)} \quad [29]$$

dove

$$\left| \overline{A(\vec{a}, \lambda)} \right| \leq 1 \quad \text{e} \quad \left| \overline{B(\vec{b}, \lambda)} \right| \leq 1 \quad [30]$$

Da Eq. 28 e 29, con $a = b$, si ha che

$$d\lambda \rho(\lambda) \left[\overline{A(\vec{a}, \lambda)} \overline{B(\vec{b}, \lambda)} + 1 \right] \leq \epsilon + \delta \quad [31]$$

E dall'Eq. 29

$$\overline{P(\vec{a}, \vec{b})} - \overline{P(\vec{a}, \vec{c})} = \int d\lambda \rho(\lambda) \left[\overline{A(\vec{a}, \lambda)} \overline{B(\vec{b}, \lambda)} - \overline{A(\vec{a}, \lambda)} \overline{B(\vec{c}, \lambda)} \right] =$$

$$= \int d\lambda \rho(\lambda) \bar{A}(\vec{a}, \lambda) \bar{B}(\vec{b}, \lambda) [1 - \bar{A}(\vec{b}, \lambda) \bar{B}(\vec{c}, \lambda)] - \int d\lambda \rho(\lambda) \bar{A}(\vec{a}, \lambda) \bar{B}(\vec{c}, \lambda) [1 - \bar{A}(\vec{b}, \lambda) \bar{B}(\vec{b}, \lambda)] \quad [32]$$

ed usando Eq. 30 otteniamo

$$|\bar{P}(\vec{a}, \vec{b}) - \bar{P}(\vec{a}, \vec{c})| \leq \int d\lambda \rho(\lambda) [\bar{A}(\vec{b}, \lambda) \bar{B}(\vec{c}, \lambda) + 1] + \int d\lambda \rho(\lambda) [\bar{A}(\vec{b}, \lambda) \bar{B}(\vec{b}, \lambda) + 1] \quad [33]$$

da cui, applicando Eq. 29 e 31

$$|\bar{P}(\vec{a}, \vec{b}) - \bar{P}(\vec{a}, \vec{c})| \leq 1 + \bar{P}(\vec{b}, \vec{c}) + \epsilon + \delta \quad [34]$$

Infine, usando Eq. 28

$$|\vec{a} \cdot \vec{c} - \vec{a} \cdot \vec{b}| - 2(\epsilon + \delta) \leq 1 - \vec{b} \cdot \vec{c} + 2(\epsilon + \delta) \quad [35]$$

oppure

$$4(\epsilon + \delta) \geq |\vec{a} \cdot \vec{c} - \vec{a} \cdot \vec{b}| + \vec{b} \cdot \vec{c} - 1 \quad [36]$$

che, ad esempio prendendo $\vec{a} \cdot \vec{c} = 0$, $\vec{a} \cdot \vec{b} = \vec{b} \cdot \vec{c} = 1/\sqrt{2}$

$$4(\epsilon + \delta) \geq \sqrt{2} - 1 \quad [37]$$

Pertanto, per valori piccoli e finiti di δ , ϵ non può essere arbitrariamente piccolo. Ne segue che il valore di aspettazione quantomeccanico dato da Eq. 14 non può essere rappresentato né accuratamente né con precisione arbitraria nella forma Eq. 13. Lo scienziato britannico arriva quindi a dimostrare che nessuna teoria deterministica e locale è compatibile con le previsioni della meccanica quantistica.

Il contributo di Bell è particolarmente celebre in quanto spostò la discussione riguardante l'entanglement traducendo le assunzioni filosofiche di località e realismo a vincoli quantitativi testabili definiti dalla disuguaglianza di Bell. Grazie ad essa, il fisico dimostra che le teorie locali a variabili nascoste non sono soltanto un'alternativa interpretativa, ma producono previsioni sperimentalmente distinguibili dalla meccanica quantistica. L'articolo si conclude con le seguenti parole:

“In una teoria in cui si aggiungono parametri alla meccanica quantistica per determinare i risultati delle singole misurazioni, senza cambiare le previsioni statistiche, deve esistere un meccanismo per cui l'impostazione di un apparato di misura possa influenzare la lettura di un altro strumento, per quanto remoto. Inoltre, il

segnale coinvolto dovrebbe propagarsi istantaneamente, cosicché una tale teoria non potrebbe essere invariante di Lorentz.

Naturalmente, la situazione è diversa se le previsioni della meccanica quantistica hanno validità limitata. È concepibile che esse si applichino soltanto a esperimenti in cui le impostazioni degli strumenti siano fissate con sufficiente anticipo da permettere loro di stabilire un certo accordo reciproco mediante scambio di segnali con velocità minore o uguale a quella della luce. In questo contesto, esperimenti del tipo proposto da Bohm e Aharonov, in cui le impostazioni sono cambiate durante il volo delle particelle, sono cruciali.” (Bell, 1964)

Queste ultime righe sono allo stesso tempo una sentenza allo studio classico della realtà come la conosciamo nella nostra quotidianità, ma allo stesso tempo definiscono i passi successivi per la ricerca che dominerà la fisica sperimentale degli anni a venire.

2.2.3. Spunti di riflessione: da dibattito metafisico a vincolo sperimentale

Come discusso nella sezione precedente, il teorema di Bell si colloca nella cornice elaborata dall’articolo EPR del 1935. La forte continuità che si può vedere tra i lavori del 1935 ed il 1964 è supportata anche dal fatto che il problema centrale sia per Einstein sia per Bell è lo stesso. Come sottolinea Maudlin (1994; 2014), l’unica assunzione fisicamente rilevante che consente di derivare le disuguaglianze di Bell è che l’esperimento effettuato su una particella non possa influire sugli esiti delle osservazioni sull’altra. È in questo contesto che Bell sviluppa la sua analisi delle teorie a variabili nascoste locali. Tuttavia, presentare il suo risultato come una confutazione delle teorie deterministiche a variabili nascoste locali può erroneamente suggerire che la violazione sperimentale delle disuguaglianze potrebbe essere “salvata” rinunciando al determinismo o alle variabili nascoste. Da qui deriva un fraintendimento circa la portata effettiva del risultato di Bell. Molti fisici perdono di vista che la conclusione riguarda la struttura stessa del mondo fisico, che risulta inevitabilmente non locale (2014). L’apprezzamento di Bell per l’argomento EPR è evidente non solo dal titolo del suo celebre articolo, *On the Einstein Podolski Rosen Paradox*, ma anche dalla struttura stessa della sua analisi: egli dà per acquisito che il lettore abbia già compreso che la spiegazione quantistica standard delle correlazioni EPR non è locale, e che ciò non esclude, almeno a livello di principio, la possibilità di costruire teorie locali alternative. In

quest'ottica, le variabili nascoste sono uno strumento per perseguire un obiettivo più profondo: la possibilità di un *“resoconto omogeneo del mondo”*. Come scrive egli stesso:

“È questa possibilità, di un resoconto omogeneo del mondo, che è per me la motivazione principale dello studio della cosiddetta possibilità della ‘variabile nascosta’.” (Bell, 1971)

In questo quadro, la ricerca di una spiegazione locale delle correlazioni EPR porta necessariamente verso teorie deterministiche: la località è il vero obiettivo, mentre il determinismo costituisce soltanto il mezzo tecnico per perseguirlo. In questo senso, il problema centrale sia per Einstein sia per Bell è, in ultima analisi, la non località. Una volta assunto il vincolo di indipendenza locale, secondo cui l'esito di una misura su una particella è indipendente da ciò che viene fatto sull'altra, nessuna teoria locale può riprodurre le corrette previsioni quantistiche, qualunque sia il numero di variabili introdotte. Ciò che il teorema di Bell, congiuntamente ai risultati sperimentali, dimostra essere incompatibile con tali correlazioni non è il determinismo, né l'esistenza di variabili nascoste o il realismo in quanto tale, bensì la località, in un senso rigoroso. Se, come osserva Maudlin (2014), Einstein fu il primo a riconoscere l'indeterminismo come intrinseco alla struttura della teoria quantistica che può comportare implicazioni non locali, il lavoro di Bell si colloca esattamente su questa linea e ne esplora la testabilità, traducendo in vincoli quantitativi l'immagine einsteiniana del mondo. A Bell viene dunque attribuito il merito di aver colto fino in fondo la portata concettuale del dibattito e di aver trasformato una questione dal sapore metafisico in una previsione matematica dalla straordinaria eleganza e chiarezza argomentativa, suscettibile di verifica sperimentale.

“Il lavoro di Bell ha trasformato ciò che era stato un dibattito metafisico in una questione affrontabile sperimentalmente.” (Maudlin 2011)

“Questa conclusione apre la possibilità di portare le questioni che abbiamo preso in considerazione nel campo sperimentale.” (Bell, 1971)

Tuttavia, ottenere sperimentalmente questa violazione non è così immediato come si può inizialmente pensare. Matematicamente infatti, le condizioni che definiscono un modello locale a variabili nascoste implicano un'intera famiglia di vincoli (numero di osservabili, numero di risultati, adattamento allo schema sperimentale, ...) ed una particolare scelta sui

vincoli produce una diversa disuguaglianza. Bell stesso riconosce i limiti del suo lavoro, in quanto l'applicazione sperimentale deve tenere conto dei molti fattori strumentali:

“Of course, the situation envisaged above is highly idealized. [...] The question then is whether the inevitable departures from this ideal situation can be kept sufficiently small in practice that the quantum mechanical prediction still violates the inequality.” (1971)

Per questo motivo non si parla di una singola disuguaglianza, ma piuttosto si preferisce usare il termine al plurale, quasi come fosse una classe di disuguaglianze che tutti i modelli locali devono soddisfare. Successivamente, Bell stesso pubblicò diverse varianti del teorema (Bell, 1964; Bell, 1971; Bell, 2004, Capitoli 7 e 24), alcune di queste con condizioni meno stringenti e meglio adattabili all'ambito sperimentale. Sia in questo paragrafo sia nel capitolo successivo, verranno esaminate diverse formulazioni delle disuguaglianze di Bell, in relazione agli apparati sperimentali effettivamente realizzati e rispetto alle varie proposte di *giochi di Bell* sviluppate dal 1964 fino ai giorni nostri. Inoltre, nell'estratto emerge che bisogna tener conto non solo dell'incertezza strumentale dell'apparato, ma anche dei vincoli che la sua stessa costruzione impone. Un problema importante è infatti la possibilità che esista un meccanismo, nell'ipotesi di validità di una teoria a variabili nascoste, dove l'impostazione di uno strumento di misura può influenzare la lettura di un altro strumento, per quanto remoto. L'unica scappatoia che permette di testare questa situazione, ammette lo scienziato, sarebbe che le previsioni quantistiche valessero solo quando le impostazioni dei rivelatori sono fissate con largo anticipo, consentendo ai dispositivi di raggiungere una separazione di tipo spazio (*spacelike*). Da qui nasce l'idea cruciale, ripresa dalle proposte di Bohm e Aharonov (Bohm et al., 1957), di modificare le impostazioni durante il volo delle particelle, così da impedire qualunque coordinamento causale a velocità $\leq c$. Questa richiesta diventa la firma operativa del “Bell's test”: non basta misurare correlazioni elevate, ma bisogna farlo in condizioni che escludano comunicazioni ordinarie tra gli apparati. È la svolta che trasformò un teorema in un'agenda sperimentale fatta di sfide tecnologiche che occuperanno i successivi 50 anni.

2.2.4. Il Gioco di Bell

L'argomentazione di Bell è matematicamente essenziale ed elegante, ma la sua portata concettuale risulta non è immediata. Per ricostruire il ragionamento proposto si sono sviluppate una serie di formulazioni definite sotto il nome di Giochi di Bell, un enigma

proposto per la prima volta da David Mermin (1981) e ripreso successivamente da Tim Maudlin (1994). Questi contributi sono considerati particolarmente importanti perché permettono di avere una dimostrazione della non località logicamente molto incisiva ed allo stesso tempo estremamente leggera nella costruzione dell'apparato e della formalizzazione matematica. In questa sezione riportiamo la ricostruzione eseguita da Vincenzo Fano e Giovanni Macchia (2016) del gioco di Bell di Maudlin (1994, cap.1).

Gli autori considerano il processo di fluorescenza di un vapore di calcio eccitato da un laser. Gli atomi eccitati decadono nel loro stato fondamentale emettendo luce. In particolare, ogni atomo emette una coppia di fotoni emessi in direzioni opposte, uno a destra ed uno a sinistra, fino a che non raggiungono entrambe un filtro polarizzatore, uno a destra ed uno a sinistra della sorgente considerata. Lo strumento è orientato con un angolo φ , che misura il grado di disallineamento del dispositivo sulla sinistra rispetto a quello sulla destra. Se $\varphi = 0^\circ$, allora succederà che o passano entrambi i fotoni, oppure vengono assorbiti entrambi dai loro rispettivi filtri, ciascuna realizzata con il 50% di probabilità. Se invece:

- $\varphi = 30^\circ$, i fotoni sono in accordo 3 volte su 4;
- $\varphi = 60^\circ$, i fotoni sono in accordo 1 volta su 4;
- $\varphi = 90^\circ$, i fotoni sono sempre in disaccordo.

Generalizzando, la probabilità per ogni fotone di passare è $\cos^2 \varphi$. Per rendere il problema più intuitivo, gli autori traducono la situazione in un gioco, al quale partecipano due squadre: Gigi e Marina (che rappresentano i due fotoni) contro i loro Avversari (i due polarizzatori). Gigi e Marina possono incontrarsi e creare una strategia solo nella sala da pranzo (ovvero l'atomo di calcio), poi vengono separati in due stanze diverse. In ciascuna stanza è presente un Avversario, che pone una delle seguenti tre domande al giocare lì presente:

- Cosa succede se $\varphi = 0^\circ$;
- Cosa succede se $\varphi = 30^\circ$;
- Cosa succede se $\varphi = 60^\circ$.

Le risposte possibili sono solamente due:

- +1, ovvero "il fotone passa";
- -1, ovvero "il fotone viene assorbito".

Il vincolo del gioco è il seguente:

“Località (L): Gigi e Marina non hanno alcuna possibilità di comunicare dopo che hanno lasciato la sala da pranzo.” (Fano & Macchia, 2016, p.5)

mentre lo scopo è riprodurre il comportamento dei fotoni. Gigi e Marina vincono solo se, dopo aver giocato a molte partite, le loro risposte soddisfano i seguenti vincoli:

- A. Se i due avversari fanno la stessa domanda, Gigi e Marina devono dare sempre la stessa risposta;
- B. Se le domande sono diverse con un angolo di 30° (le rispettive domande sono $\varphi = 30^\circ$ e $\varphi = 60^\circ$, oppure $\varphi = 0^\circ$ e $\varphi = 30^\circ$), Gigi e Marina devono essere d'accordo 3 volte su 4;
- C. Se le domande sono diverse con un angolo di 60° (le rispettive domande sono $\varphi = 0^\circ$ e $\varphi = 60^\circ$), Gigi e Marina devono essere d'accordo 1 volta su 4;
- D. Su un lungo periodo le risposte devono essere metà delle volte +1 e metà -1.

Gigi e Marina possono usare qualsiasi strategia e possono anche cambiarla volta per volta, purché rispettino il vincolo L. Inoltre, gli avversari, sul lungo periodo faranno ogni domanda con una probabilità di $\frac{1}{3}$.

Gli autori affermano che rispettare il vincolo A impone che le strategie dei giocatori prevedano che essi alla stessa domanda rispondano sempre alla stessa maniera, questo implica che devono fissare una strategia per ciascuna combinazione di angoli. Le strategie possibili sono 8, riportate in Fig. 2.3.

Strategia	$\varphi=0^\circ?$	$\varphi=30^\circ?$	$\varphi=60^\circ?$
a	+1	+1	+1
b	+1	+1	-1
c	+1	-1	+1
d	+1	-1	-1
e	-1	-1	-1
f	-1	-1	+1
g	-1	+1	-1
h	-1	+1	+1

Figura 2.3: Le strategie di gioco di Gigi e Marina. Fonte: Fano & Macchia (2016)

Indicando con $\alpha, \beta, \gamma, \delta, \epsilon, \zeta, \eta, \theta$ le frequenze con cui le otto strategie (a-h) vengono rispettivamente usate, vale $\alpha + \beta + \gamma + \delta + \epsilon + \zeta + \eta + \theta = 1$. Poiché non ci interessa tanto il segno quanto se le risposte dei due concordano o meno, e imponendo anche il vincolo D, le

frequenze ($\alpha=\varepsilon, \beta=\zeta, \gamma=\eta, \delta=\theta$) e le rispettive strategie vincenti (a,b,c,d) si riducono a quattro. Consideriamo quindi solo $\alpha, \beta, \gamma, \delta$. Perciò l'espressione diventa:

$$\alpha + \beta + \gamma + \delta = 1/2 \quad [38]$$

Gli autori si concentrano poi sui casi in cui gli Avversari pongono domande diverse. Il vincolo B corrisponde alle strategie c,d,g,h, ovvero $2\gamma + 2\delta$ situazioni nel caso della coppia $(0^\circ, 30^\circ)$, e alle strategie b,c,f,g ovvero $2\beta + 2\gamma$ situazioni nel caso della coppia $(30^\circ, 60^\circ)$. Dunque deve valere:

$$2\gamma + \delta + \beta = 1/8 \quad [39]$$

Il vincolo C invece corrisponde alle strategie b,d,f,h, ovvero $2\beta + 2\delta$ situazioni nel caso della coppia $(0^\circ, 60^\circ)$. Dunque deve valere:

$$\beta + \delta = 3/8 \quad [40]$$

Dalle equazioni [38], [39] e [40] segue che

$$\gamma = -1/8 < 0 \quad [41]$$

che è impossibile in quanto è un valore di frequenza. Possiamo quindi concludere che, in assenza di informazioni sulle domande poste, non esiste una strategia escogitata nella sala da pranzo che può permettere a Gigi e Marina di vincere il gioco. *“In altre parole, essi devono rimanere in qualche maniera in comunicazione quando sono distanti l'uno dall'altra nelle loro stanze!”* (Fano & Macchia, 2016, p.7).

I due autori collegano quindi il gioco all'esperimento fisico, ovvero alla coppia di fotoni in uno stato entangled:

$$\psi = \frac{1}{\sqrt{2}} (| + 1 \rangle | + 1 \rangle + | - 1 \rangle | - 1 \rangle) \quad [42]$$

A e D riflettono il modo in cui la coppia è preparata: la polarizzazione dei due fotoni definisce una correlazione positiva imposta dal vincolo A e il coefficiente $1/\sqrt{2}$ corrisponde invece al vincolo D. B e C invece corrispondono ai risultati sperimentali sulle correlazioni al variare dell'angolo. Dunque, finché viene rispettato il vincolo L, Gigi e Marina non possono vincere al gioco.

“Il fatto che i due fotoni non abbiano alcuna possibilità di mettersi d’accordo quando sono vicini in modo da soddisfare i vincoli B. e C. è sconvolgente dal punto di vista ontologico.” (Fano & Macchia, p.6). Infatti, sul piano interpretativo, sembra che Gigi pur essendo lontano riesca comunque a comunicare con Marina, e viceversa. Concludendo, gli autori aggiungono che, per quanto riguarda il fenomeno fisico, sembra che ciascun fotone sappia com’è orientato il filtro lontano e la loro connessione è particolare perché è selettiva ed istantanea.

2.3. Le verifiche sperimentali del teorema di Bell

Questa sezione è costruita a partire dalle lezioni di Maria Bondani, ricercatrice presso l’Istituto di Fotonica e Nanotecnologie (IFN) tenutosi durante i PLS del 2023/2024 e 2024/2025. A seguito dei suoi interventi, si è approfondito il tema, trovando in letteratura contributi che riorganizzavano i numerosi esperimenti sulla violazione delle disuguaglianze in termini dei loopholes che andavano a chiudere. Dunque, la ricostruzione proposta si basa principalmente sull’articolo di Kaiser (2020) dal titolo ‘Tackling Loopholes in Experimental Tests of Bell’s Inequality’ e sulle slide di Maria Bondani, integrando informazioni degli articoli originali.

Dal lavoro di John Bell ha quindi inizio un viaggio sperimentale molto particolare. Fin dai primi tentativi di sottoporre la disuguaglianza di Bell a verifica sperimentale, i fisici hanno riconosciuto diverse scappatoie da affrontate prima di poter concludere che le alternative realiste locali alla meccanica quantistica siano state effettivamente escluse (Kaiser, 2020). Queste “scappatoie” sono chiamate *loopholes*, ovvero possibilità logiche attraverso le quali, per quanto apparentemente remote o implausibili, una teoria locale potrebbe dare origine a correlazioni misurabili che possono imitare le aspettative quantistiche e violare così la disuguaglianza di Bell. La grande quantità di obiezioni, mai così alta all’interno di tutta la fisica sperimentale, evidenzia molto bene come i loopholes possano essere considerati come una proiezione della sfida epistemologica portata dall’entanglement e la conseguente difficoltà dei fisici ad abbandonare l’assunto di località.

Nella formulazione originaria del 1964 (Bell, 1964), Bell sviluppò la sua disuguaglianza partendo da una coppia di particelle di spin $\frac{1}{2}$ preparate in stato entangled e sottoposte a misure Stern–Gerlach perfettamente allineate, tali da garantire una perfetta anticorrelazione

dei risultati. Tuttavia, come accennato nella sezioni precedente, tale condizione rappresenta un modello teorico ideale che le verifiche sperimentali reali non possono presupporre che essa valga rigorosamente. Per questo motivo, nei test empirici successivi si rende necessario abbandonare l'assunzione di anticorrelazione ideale e formulare la disuguaglianza in una versione compatibile con l'inevitabile imperfezione delle misure. Per poter realizzare un apparato reale e allo stesso tempo soddisfare i criteri richiesti dalla chiusura dei loopholes, è possibile vedere la crescente complessità degli apparati sperimentali. Questo rende ben visibile non solo la sfida epistemologica, ma anche la delicatissima sfida tecnologica-sperimentale che si è posta davanti ai ricercatori.

In questo paragrafo vedremo quindi come si è sviluppata la sfida epistemologica e sperimentale dell'entanglement dopo la pubblicazione del lavoro di John Bell, venuta a completamento nel 2015 con la verifica sperimentale del *loopholes free bell test* e celebrata nel 2022 con il premio Nobel per la Fisica. Per enfatizzare le meraviglie sperimentali ma allo stesso tempo non appesantire ulteriormente il capitolo, si è deciso di approfondire in maniera accurata le prime innovazioni sperimentali e solo uno dei tre grandi loopholes, ovvero il *locality loophole*. Successivamente, sono brevemente presentati gli altri due loopholes, ovvero il *freedom-of-choice* ed il *fair-sampling*, al fine di fornire una visione completa al lettore.

2.3.1. Gli esperimenti di Clauser

Verso la fine degli anni Sessanta, John Clauser rimase affascinato dall'articolo pubblicato nel 1964 da John Bell. Lo scienziato rimase profondamente entusiasta ed era impaziente di realizzare l'esperimento descritto, ma il suo supervisore di dottorato e altri professori lo scoraggiarono dal proseguire su quella strada, ritenendo l'argomento più filosofico che fisico (Hill, 2022). Malgrado la resistenza trovata, lo scienziato non rinunciò al desiderio di mettere alla prova la disuguaglianza e scrisse allo stesso Bell per assicurarsi che nessun esperimento di quel tipo fosse già stato condotto. Incoraggiato dalla conferma e dal sostegno di Bell, iniziò a progettare come tradurre la situazione idealizzata dell'articolo in un apparato sperimentale reale (Hill, 2022). Nel fare ciò, entrò in contatto con altri studiosi interessati alle disuguaglianze di Bell, quali Abner Shimony, il suo dottorando Michael Horne alla Boston University e Richard Holt ad Harvard.

Nel 1969 viene pubblicato l'articolo *Proposed Experiment to Test Local Hidden-Variable Theories*, nel quale “la proposta estensione dell'esperimento di Kocher e Commins, sulla correlazione di polarizzazione di una coppia di fotoni ottici, fornirà un test decisivo tra la meccanica quantistica e le teorie delle variabili nascoste locali.” (Clauser et al., 1969). Nel loro articolo, Clauser, Horne, Shimony ed Holt (1969) affrontano tre aspetti centrali. Il primo consiste nella formulazione di una generalizzazione del teorema di Bell che possa essere applicata ad esperimenti realizzabili, ovvero espressa nella forma

$$|P(a, b) - P(a, c)| + |P(b, b') + P(b' c)| \leq 2 \quad [43]$$

dove $P(i, j)$ è la funzione di correlazione ed i e j sono parametri regolabili dell'apparato¹³. Al fine di ricavare dalla disuguaglianza appena descritta delle predizioni sperimentali, gli autori dovettero tenere in considerazione polarizzatori non perfetti, rilevatori con efficienza < 1 , abbandonare l'ipotesi di una perfetta correlazione e inserire una configurazione di controllo con polarizzatore rimosso, arrivando alla forma

$$|R(\alpha) - R(\alpha + \beta)| + R(\gamma) + R(\beta + \gamma) - R_1 - R_2 \leq 0 \quad [44]$$

dove $R(\theta)$ è il tasso di coincidenza per gli angoli α, β, γ scelti fra i polarizzatori e R_1 ed R_2 sono i tassi di coincidenza (costanti) dei singoli polarizzatori. Il secondo passaggio chiave è stato prendere in considerazione esperimenti già esistenti per quanto riguarda la polarizzazione di fotoni correlati, in particolare l'esperimento di Wu & Shakhnov e quello di Kocher & Commins (1967) come punto di partenza dal quale costruire il loro esperimento. Decisero quindi di partire dall'esperimento di Kocher & Commins ed il terzo aspetto è perciò la prima proposta sperimentale (cfr. Fig. 2.4). L'apparato da cui sono partiti prevedeva l'utilizzo della cascata $6^1S_0 \rightarrow 4^1P_1 \rightarrow 4^1S_0$ dell'atomo di calcio per studiare la correlazione di polarizzazione delle coppie di fotoni emesse attraverso due polarizzatori con orientazioni relative fissate a 0° e 90° , e modificarlo per includere osservazioni con due opportune orientazioni relative dei polarizzatori, con anche la possibilità di rimuoverne prima uno e poi l'altro. A partire dalla disuguaglianza in Eq. 44, per polarizzatori sufficientemente efficienti, si hanno violazioni massime per angoli $\alpha=22.5^\circ, \beta=45^\circ, \gamma=157.5^\circ$ per la cascata 0-1-0 ed a

¹³ Bell stesso, nella successiva trattazione pubblicata nel 1971, farà riferimento all'articolo del 1969 affermando che “la relazione generalizzata (essenzialmente) è stata scritta per la prima volta da Clauser, Holt, Horne e Shimony [...]” (Bell, 1971).

$\alpha=67.5^\circ, \beta=135^\circ, \gamma=112.5^\circ$ per la cascata 0-1-1, entrambe caratterizzate da due sole orientazioni relative dei polarizzatori, ovvero 22.5° e 67.5° .

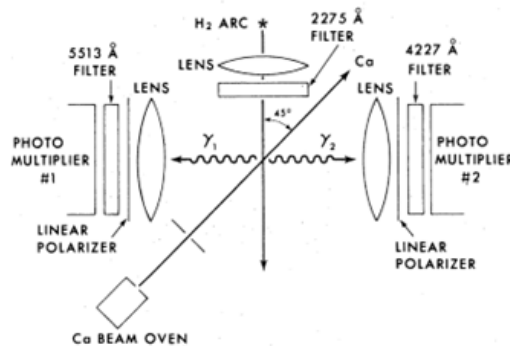


Figura 2.4: Schema dell'apparato sperimentale utilizzato Carl A. Kocher ed Eugene D. Commins nel loro esperimento sulla correlazione della polarizzazione di fotoni emessi in una cascata atomica. Fonte: Kocher & Commins (1967)

Nello stesso anno della pubblicazione dell'articolo, Clauser cominciò un postdoc al *Lawrence Berkeley National Laboratory* sotto la supervisione di Charles Townes, al quale chiese di lavorare non solo agli esperimenti di radioastronomia, ma anche ad un test sperimentale sulla violazione della disuguaglianza di Bell (Hill, 2020). Townes accettò e nel corso di due anni Clauser e Freedman, dottorando sotto la guida di Eugene Commins, costruirono l'apparato sperimentale. L'esperimento del 1972, in continuità con quello di Kocher e Commins (1967), misura la correlazione tra coppie di fotoni entangled generate tramite la cascata atomica del calcio (Hill, 2020). Il calcio viene vaporizzato in un forno in tantalio e gli atomi così prodotti sono eccitati dalla radiazione UV di una lampada ad arco all'idrogeno. Come possiamo vedere in Fig. 2.5, i fotoni prodotti sono indirizzati verso i polarizzatori (polarizer 1 e polarizer 2) e successivamente raccolti dai rispettivi rivelatori (single photon detectors, PM1 e PM2). I risultati sono poi registrati da un contatore di coincidenze. I polarizzatori sono entrambi composti da un foglio di vetro spesso 0.3mm, inclinati molto vicino all'angolo di Brewster e montati su un dispositivo che li ruotava periodicamente di $22,5^\circ$ per variare gli angoli di analisi. I rilevatori invece sono dei fotomoltiplicatori raffreddati così da ridurre i conteggi spuri (Clauser & Freedman, 1972).

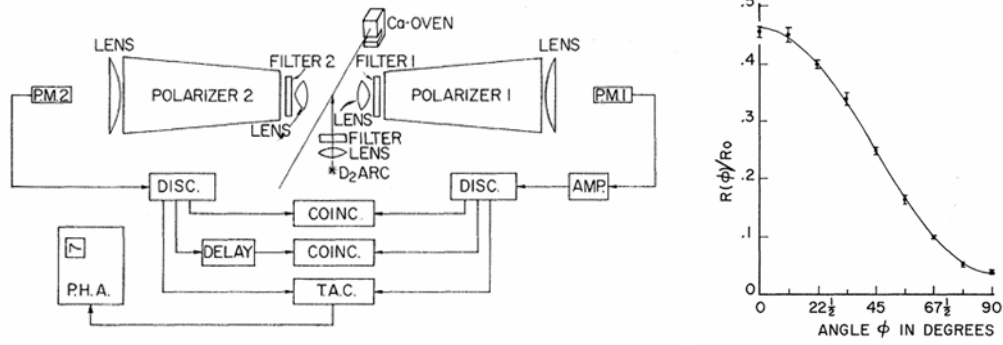


Figura 2.5: A sinistra, lo schema dell'apparato sperimentale e l'elettronica associata dell'esperimento di Clauser e Freedman. A destra, il tasso di coincidenza normalizzato rispetto all'angolo (in gradi) tra i due polarizzatori. La linea rappresenta la predizione quantomeccanica, mentre i punti sono i dati raccolti attraverso l'esperimento. Fonte: Clauser e Freedman (1972)

Se le seguenti assunzioni per una teoria a variabili nascoste sono rispettate (Clauser & Freedman, 1972):

- 1) I due fotoni si propagano come particelle separate;
- 2) Si verifica un processo di selezione binaria per ogni fotone che interagisce con il rispettivo e tale selezione non dipende dall'orientazione del polarizzatore a distanza;
- 3) Tutti i fotoni incidenti sul rivelatore hanno una probabilità di rilevazione indipendente dal fatto che il fotone sia passato o meno attraverso il polarizzatore.

allora il tasso di coincidenza è limitato alla seguente disuguaglianza

$$-1 \leq \Delta(\phi) \leq 0 \quad [45]$$

dove corrisponde a

$$\Delta(\phi) = \frac{3R(\phi)}{R_0} - \frac{R(3\phi)}{R_0} - \frac{R_1 - R_2}{R_0} \quad [46]$$

nella quale $R(\phi)$ è il tasso di coincidenza, ϕ è l'angolo tra i due polarizzatori ed R_1 , R_2 , R_0 sono rispettivamente i tassi di coincidenza del singolo polarizzatore 1, del singolo polarizzatore 2 ed in assenza di polarizzatori. La novità maggiore rispetto a Kocker & Commins (1967) risiede nella presa dati senza uno o entrambi i polarizzatori, che viene

sfruttata per normalizzare e calibrare l'efficienza dei rivelatori. Sfruttando gli angoli per i quali si ha la massima violazione (22.5° e 67.5°), l'espressione può essere ridotta alla forma più conveniente

$$\delta = |R(22.5^\circ)/R_0 - R(67.5^\circ)/R_0| - 1/4 \leq 0 \quad [47]$$

Per eseguire le misure il sistema è stato sottoposto a cicli di conteggio di 100 secondi ed i risultati, ottenuti da un tempo totale di integrazione di ~200h ed i risultati sono visibili in Fig. 2.5. Dal grafico sulla destra possiamo osservare il perfetto accordo tra i dati sperimentali e le predizioni quantomeccaniche (linea nera). In particolare, per le misurazioni eseguite a 22.5° e 67.5°, si ottiene

$$\delta = 0.050 \pm 0.008 \quad [48]$$

in violazione della disuguaglianza in Eq. 47.

A seguito del lavoro del 1972, svolto con l'obiettivo di distinguere le previsioni della meccanica quantistica da quelle dell'intera classe delle teorie a variabili nascoste locali [...] Clauser e Horne (1974) mostrarono che tali test mettono alla prova persino una classe più ampia di teorie, le cosiddette teorie locali oggettive (Clauser, 1976)¹⁴. *“Tuttavia, i risultati sperimentali ottenuti fino ad allora risultavano tra loro in conflitto: l'esperimento di Freedman e Clauser a Berkeley (1972) confermava in modo eccellente le previsioni quantistiche, escludendo così le teorie locali oggettive; al contrario, i risultati non pubblicati di Holt e Pipkin ad Harvard sembravano favorire proprio queste teorie, in aperto contrasto con la meccanica quantistica”*. (Clauser, 1976, p.1223) Il lavoro del 1976 si inserisce in questo scenario come un tentativo di chiarire tale discrepanza. Il risultato del 1976 fornì un test indipendente che confermò nuovamente la meccanica quantistica

$$\delta_{exp} = 0,0385 \pm 0,0093 \quad [49]$$

viola nettamente la previsione della disuguaglianza in Eq. 47 ed in buon accordo con la previsione quantistica

$$\delta_{QM} = 0.0348 \quad [50]$$

¹⁴ Nel testo di Clauser (1976), sono definite come tutte quelle teorie *che includono qualsiasi modello fondato su oggettività e “ingenuità localistica”, dotate quindi di un forte fascino intuitivo.*

Per concludere, gli anni '70 furono il decennio in cui le variabili nascoste, un problema un tempo considerato una questione filosofica, entrarono in laboratorio. Per quanto vada affermato il merito della prima trasposizione sperimentale del gruppo CHSH del 1972, dopo la prima generazione di esperimenti dei primi anni Settanta la situazione rimase irrisolta: gruppi diversi, pur utilizzando tecniche simili basate su cascata atomica, riportavano risultati contrastanti, alcuni a favore della meccanica quantistica e altri a sostegno di modelli locali oggettivi o a variabili nascoste locali. Bisogna però ricordare che, come mostra Freire (2006), questo “*pareggio sperimentale*” non attenuò l’interesse ma, al contrario, intensificò la ricerca di test più decisivi, stimolando lo sviluppo di nuove strategie sperimentali, sorgenti più stabili e rivelatori più efficienti. A metà degli anni Settanta, i lavori successivi di Clauser (1976) e di Fry & Thompson (1976) contribuirono a risolvere la discrepanza a favore della meccanica quantistica, creando così le condizioni per il passo successivo: una nuova stagione di esperimenti al cui centro sarà il secondo premio Nobel, Alain Aspect.

2.3.2. Gli esperimenti di Aspect

Nonostante la svolta rappresentata dai primi test sperimentali delle disuguaglianze di Bell negli anni Settanta, i risultati ottenuti nella prima generazione di esperimenti non potevano ancora considerarsi conclusivi. Le violazioni osservate, infatti, dipendevano ancora da assunzioni aggiuntive legate alle condizioni reali dell’apparato, le quali lasciavano margini a possibili interpretazioni a favore delle spiegazioni locali. Il punto centrale dei nuovi esperimenti, perciò, non è soltanto mostrare la violazione, ma progettare degli esperimenti capaci di chiudere i principali loopholes ed avvicinarsi il più possibile all’esperimento ideale.

Il primo loophole individuato nei test delle disuguaglianze di Bell è comunemente noto come *locality loophole*. Esso mette in discussione l’effettiva indipendenza causale tra le due ali dell’apparato ponendo dei limiti sul flusso di informazioni che viaggia durante l’esperimento. Infatti, se fosse possibile una qualunque comunicazione tramite segnali tra le due estremità dell’esperimento, allora tale scambio di informazione potrebbe in linea di principio riprodurre le forti correlazioni osservate tra gli esiti di misura senza abbandonare il quadro del realismo locale (Kaiser, 2020). Lo stesso John Bell, nel suo articolo originale (1964), mette a fuoco il problema osservando che le predizioni della meccanica quantistica potrebbero valere “*solo per esperimenti in cui le impostazioni degli strumenti sono fissate con sufficiente anticipo da non permettere loro di raggiungere una qualche intesa reciproca mediante scambio di*

segnali con velocità minore o uguale a quella della luce” (Bell, 1964). Clauser condivise l’idea di Bell e, nella sua prima lettera al celebre fisico, ipotizzò che si potessero ruotare i polarizzatori tramite effetti magneto-ottici mentre i fotoni erano in volo (Kaiser, 2020). Tuttavia, un cambio rapido delle impostazioni rappresentava una sfida sperimentale notevole e negli esperimenti della prima generazione le direzioni dei polarizzatori venivano impostate manualmente prima dell’emissione delle coppie entangled. Se gli sperimentatori decidono di fissare le impostazioni dei rivelatori e, solo successivamente, emettere le particelle dalla sorgente, allora una descrizione locale e realista può spiegare le correlazioni tra gli esiti permettendo che uno dei due dipenda dall’impostazione dell’altro. Perciò, la sequenza temporale degli eventi consente, anche solo logicamente, una trasmissione di informazione tra le due ali. Una possibilità analoga si presenta se le misure non sono sostanzialmente simultanee. Infatti, se la misura su una particella viene completata sufficientemente prima dell’altra, allora il rivelatore di destra potrebbe sfruttare l’informazione sulla misura più lontana per predisporre un esito correlato. Queste spiegazioni sono compatibili con il realismo locale proprio perché lavora con comunicazioni trasmesse a velocità finite, consentite dalla geometria spazio-temporale del rivelatore in quanto non escludono la comunicazione tra le due ali. Risulta quindi fondamentale poter costruire degli esperimenti dove, durante il volo delle particelle, vengono a modificarsi le impostazioni di volo. In questo modo, viene eliminata qualsiasi possibilità di comunicazione tra le due ali del dispositivo.

L’idea di Bell divenne concreta attraverso il lavoro di Alan Aspect, che cominciò a lavorare sul famoso teorema nel 1974 appena tornato dal Camerun per i suoi studi universitari presso l’Università di Parigi (Hill, 2022). Durante i suoi tre anni di insegnamento nel paese dell’Africa centrale, aveva letto e riflettuto sulla teoria quantistica e nell’estate del 1976 partecipò ad una scuola estiva dedicata ai fondamenti della Meccanica Quantistica dove Bell discusse apertamente il *locality loophole* (Hill, 2022). Aspect stava già lavorando ad un esperimento concepito per affrontare in modo diretto il problema, e nello stesso anno pubblica *Proposed experiment to test the nonseparability of quantum mechanics* (Aspect, 1976). Nel momento in cui presenta la sua proposta, Aspect chiarisce innanzitutto che molti test di Bell fino ad allora erano stati letti come un confronto tra meccanica quantistica e teorie a variabili nascoste che soddisfano la condizione di località. Tuttavia, *“per quanto una tale condizione di località appaia altamente ragionevole, non è prescritta da alcuna legge fisica fondamentale”* (Aspect, 1976, p.1944). Seguendo un suggerimento di Bell, Aspect progetta un esperimento in cui l’assunzione di località è sostituita dal principio di separabilità di

Einstein, più debole ma formulabile in termini relativistici *“l'impostazione di un dispositivo a un certo istante (evento A) non influenza il risultato ottenuto con un altro dispositivo (evento B) se B non è nel cono di luce futuro di A”* (ibid., p.1944). Ogni teoria che soddisfa la condizione di località di Bell obbedisce anche al principio di separabilità di Einstein ma non vale il contrario e proprio per questo i precedenti esperimenti, nei quali le impostazioni risultano determinate con un anticipo tale da non permettere l'esclusione di coordinamenti consentiti dalla struttura causale relativistica, non sono sufficienti. Da qui, Aspect deriva la sua metodologia: *“per testare queste teorie, è stato proposto di cambiare rapidamente, ripetutamente e indipendentemente le orientazioni dei polarizzatori”* (ibid., p.1976). In questa configurazione, la risposta di un polarizzatore non può essere influenzata dall'orientazione dell'altro polarizzatore nello stesso istante. In questo modo, le disuguaglianze possono essere ricavate dal principio di separabilità senza introdurre ulteriori assunzioni di località ed impedendo così che una spiegazione locale e realista sfrutti comunicazioni subluminali tra le due ali dell'apparato per scambiare informazioni. La soluzione tecnica per cui opta Aspect sono i commutatori acustico-ottici, capaci di cambiare rapidamente configurazione tra la sorgente (S) e i rivelatori posti a sinistra e a destra, direzionando ciascun fotone verso uno dei due polarizzatori fissi. In Fig. 2.6 si può vedere lo schema dell'esperimento proposto. A partire da un atomo di calcio, attraverso il metodo a cascata, sono prodotti due fotoni correlati e vengono diretti verso i commutatori C_A e C_B . Entrambi, direzionano il fotone ν nel rispettivo primo polarizzatore (in Fig.2.6 corrispondono a I_1 per ν_A , II_1 per ν_B) e successivamente cambiano stato, indirizzando il fotone nel secondo polarizzatore (in Fig. 2.6 corrispondono a I_2 per ν_A , II_2 per ν_B). Le quattro orientazioni a_1, a_2, b_1, b_2 restano fisse per tutta la presa dati ed è il commutatore che decide quale coppia (a_i, b_i) incontrerà il fotone. I dati prodotti vengono infine raccolti attraverso il contatore di coincidenze.

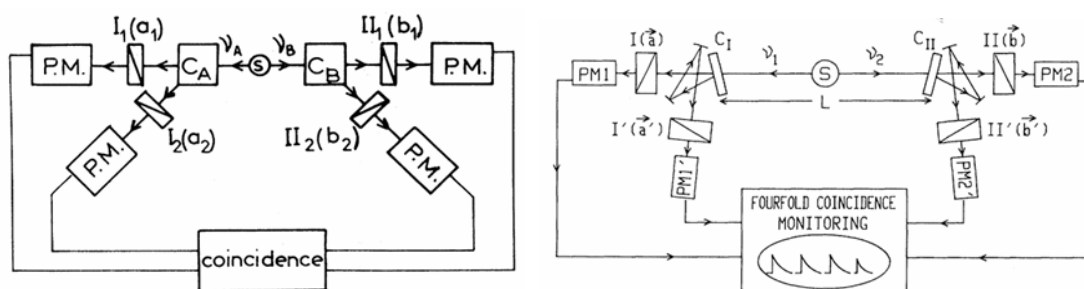


Figura 2.6: A sinistra, lo schema dell'esperimento proposto da Aspect e colleghi (1976). A destra, lo schema dell'apparato sperimentale del 1982. Fonte: Aspect (1976; 1982)

La disuguaglianza testabile di Aspect, ripresa dalle quantità sperimentali usate da Clauser e colleghi (1967), ha la forma

$$S = \frac{N_{11}(a_1, b_1)}{N_{11}(\infty, \infty)} - \frac{N_{12}(a_1, b_2)}{N_{12}(\infty, \infty)} + \frac{N_{21}(a_2, b_1)}{N_{21}(\infty, \infty)} + \frac{N_{22}(a_2, b_2)}{N_{22}(\infty, \infty)} - \frac{N_{2j}(a_2, \infty)}{N_{2j}(\infty, \infty)} - \frac{N_{i1}(\infty, b_1)}{N_{i1}(\infty, \infty)} \quad [51]$$

dove $-1 \leq S \leq 0$ ed S corrisponde alla disuguaglianza CHSH generalizzata ed $N_{ij}(a_i, b_j) = \epsilon_{ij} P_{ij} N$ è il tasso di rilevazioni congiunte (N è il tasso medio di emissioni delle coppie rilevate ed ϵ_{ij} è l'efficienza dei rilevatori). $N_{ij}(\infty, \infty)$ è il tasso medio di emissione delle coppie di fotoni (assunto che non cambi quando i polarizzatori vengono rimossi). Dopodiché, Aspect scrive che la violazione massima si ottiene scegliendo orientazioni relative di 22.5° o 67.5° e 67.5° o 202.5° . Per queste orientazioni specifiche riporta valori $S = (0.207, 1.207)$, che violano il vincolo $-1 \leq S \leq 0$ in quanto positivi.

Tra il 1981 ed il 1982, Alan Aspect, Philippe Grangier, Jean Dalibard e Gérard Roger, eseguono tre esperimenti presso l'*Institut d'Optique Théorique et Appliquée di Orsay*. Questi esperimenti, passo dopo passo, rispondono ai limiti metodologici della prima generazione di esperimenti migliorando drasticamente sorgente e stabilità ed introducendo il cambio rapido delle impostazioni per attaccare direttamente il *locality loophole*. Nel primo esperimento (1981) Aspect, Grangier e Roger riprendono lo schema a cascata atomica già impiegato negli anni Settanta, ma ne potenziano la sorgente. La cascata del calcio viene eccitata selettivamente tramite assorbimento a due fotoni con due laser in modo da ottenere un'emissione intensa e stabilizzata. Questa modifica li porta ad ottenere conteggi di coincidenza più robusti e controllabili. In continuità con Clauser & Freedman (1972), il test resta basato su polarizzatori a singolo canale e sulla disuguaglianza che richiede misure ausiliarie con uno o entrambi i polarizzatori rimossi. Assumendo inoltre l'invarianza rotazionale, sempre in continuità con il lavoro del 1972, la disuguaglianza si contrae nella forma in Eq. 47. I dati mostrano una violazione netta per le misure effettuate ad orientazioni di 22.5° e 67.5° , per le quali si ottiene

$$\delta_{exp} = 5.72 \times 10^{-2} \pm 0.43 \times 10^{-2} \quad [52]$$

in accordo con la previsione quantistica ed una violazione della disuguaglianza di Bell con significatività pari a 5 sigma. Si riporta anche la misura della quantità S per un set specifico di orientazioni, trovando $S_{exp} = 0.126 \pm 0.014$ nuovamente in buon accordo con la meccanica quantistica ($S_{QM} = 0.118 \pm 0.005$).

Nel secondo esperimento Aspect, Grangier e Roger (1982a) realizzano una trasposizione molto più fedele del Gedankenexperiment di EPR/Bohm, sostituendo i polarizzatori a trasmissione a singolo canale con polarizzatori a due canali. Questo gli permette di ottenere misure dicotomiche ± 1 per ciascun fotone. In questo schema la correlazione $E(a,b)$ viene ricostruita direttamente dai quattro tassi di coincidenza dei canali $(+, +)$, $(+, -)$, $(-, +)$, $(-, -)$, e diventa quindi possibile applicare direttamente la CHSH

$$- 2 \leq S \leq 2 \quad [53]$$

con

$$S = E(a, b) - E(a, b') + E(a', b) + E(a', b') \quad [54]$$

Attraverso questa forte configurazione simmetrica del dispositivo (trattamento equivalente dei due esiti ± 1), si rende maggiormente plausibile l'assunzione per la quale il campione di coppie effettivamente rivelate sia rappresentativo (nota come assunzione di *fair-sampling*). Utilizzando la cascata $0 - 1 - 0$ del Ca-40 eccitata a due fotoni, la violazione ottenuta è

$$S_{exp} = 2.697 \pm 0.015 \quad [55]$$

da confrontare con $S_{QM} = 2.70 \pm 0.05$ per le condizioni reali dell'esperimento. In chiusura, gli autori notano esplicitamente che, per chi volesse ancora difendere teorie realistiche senza azione a distanza, restano due vie di fuga: i) l'efficienza non ideale dei rivelatori e ii) il carattere statico delle impostazioni nei test fino ad allora realizzati (Aspect et al, 1982a).

Quest'ultimo punto viene risolto nel terzo esperimento (Aspect, 1982b), definito come *timing experiment*. Questo esperimento è quello decisivo nella discussione del *locality loophole*. Aspect, Dalibard e Roger realizzano quanto introdotto nell'articolo del 1976 e sostituiscono ciascun analizzatore con un commutatore acusto-ottico seguito da due polarizzatori a orientazioni diverse (a, a') su un lato e (b, b') sull'altro (cfr. Fig. 2.6). In questo modo, l'apparato equivale a un polarizzatore che passa rapidamente tra due impostazioni durante il

volo dei fotoni. I commutatori operano a frequenze prossime a 50 MHz, con switching su scala di ns . Inoltre, ogni switch è posto a circa 6 m dalla sorgente, così che vi sia separazione spaziotemporale tra scelta dell'impostazione e rivelazione. In questa configurazione gli autori scrivono una forma di disuguaglianza generalizzata nella forma $-1 \leq S \leq 0$. Scegliendo le orientazioni particolari già citate e facendo due misurazioni, la loro media risulta

$$S_{exp} = 0.101 \pm 0.020 \quad [56]$$

che corrisponde ad una violazione 5 deviazioni standard e paragonabile alla previsione quantistica $S_{QM} = 0.112$. Tuttavia, il cambio di impostazioni non è veramente casuale, ma quasi-periodico. Questo limite, noto agli autori, fa sì che il test chiuda solo il primo loophole.

In conclusione, i lavori di Aspect e colleghi furono fondamentali e contribuirono alla chiusura del *locality loophole*.

2.3.3. Gli esperimenti di Zeilinger e la chiusura del locality loophole

Il contributo che portò alla chiusura definitiva del *locality loophole* è l'esperimento del gruppo di Anton Zeilinger, allora guidato da Gregor Weihs e collocato presso l'Università di Innsbruck negli anni '90. Nel loro articolo, intitolato "*Violation of Bell's Inequality under Strict Einstein Locality Conditions*" (Weihs, 1998), gli autori (Gregor Weihs, Thomas Jennewein, Christoph Simon, Harald Weinfurter, and Anton Zeilinger) presentano l'esperimento nel seguente modo:

We for the first time fully enforce the condition of locality, a central assumption in the derivation of Bell's theorem. The necessary spacelike separation of the observations is achieved by sufficient physical distance between the measurement stations, by ultrafast and random setting of the analyzers, and by completely independent data registration. (Weihs et al., 1998, p. 5039)

L'esperimento considera due stazioni di rivelazione separate da circa 400 m nel campus di scienze dell'Università di Innsbruck, una distanza maggiore rispetto agli esperimenti, così che il tempo di propagazione della luce tra le due stazioni fosse di circa $1.3 \mu s$ (e non 40ns come per Aspect), rendendo più robusto il vincolo di separazione spazio-temporale tra gli

eventi di misura¹⁵. In Fig. 2.7(a) possiamo vedere come, la selezione casuale della direzione dell'analizzatore, l'impostazione dell'analizzatore e, infine, la rivelazione di un fotone costituiscono il processo di misura, che deve trovarsi interamente all'interno della regione ombreggiata (in grigio), la quale non è accessibile a Bob durante la sua misura (Weihs et al., 1998, p.5040). In questo modo, si impedisce ad un segnale (anche ipotetico) di raggiungere l'altra stazione prima della conclusione della misura corrispondente.

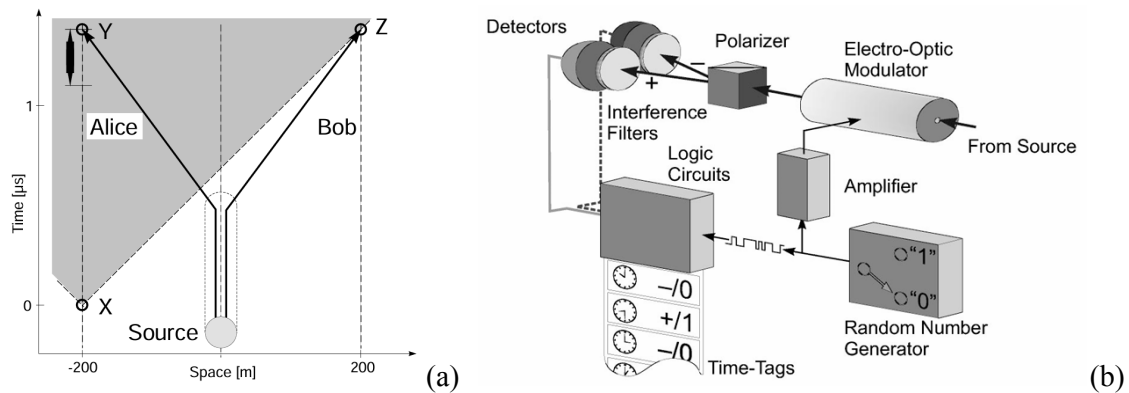


Figura 2.7: (a) Diagramma spazio-temporale dell'esperimento di Weihs et al. (1998). Nell'esperimento, il processo di misura (indicato dalla barra nera), inclusa la scelta di un numero casuale, richiedeva meno di un decimo del tempo massimo consentito. Le parti verticali delle linee d'universo spezzate dei fotoni che emergono dalla sorgente rappresentano le bobine di fibra ottica poste presso la sorgente (irrilevanti ai fini dell'argomento di località). Fonte: Weihs et al. (1998); (b) Disegno che raffigura una delle due stazioni di osservazione dell'esperimento di Weihs et al. (1998). Un generatore di numeri casuali pilota il modulatore elettro-ottico. Come rivelatori vengono utilizzati fotodiodi a valanga in silicio. Fonte: Weihs et al. (1998)

Un elemento centrale fu la combinazione di scelta rapida e imprevedibile delle impostazioni di misura e registrazione indipendente dei dati. Ciascuna stazione, rappresentata in Fig. 2.7(b), disponeva di un generatore fisico di numeri casuali (basato su LED, beam splitter e fotomoltiplicatori), collegato a un modulatore elettro-ottico che determinava rapidamente la

¹⁵ L'ipotesi di località nella derivazione del teorema di Bell richiede che i processi di misura individuali dei due osservatori siano separati da un intervallo di tipo spazio (*spacelike separated*) (cfr. Fig. 2.7). Noi definiamo una misura individuale come l'intervallo che va dal primo istante temporale che può influenzare la scelta dell'impostazione dell'analizzatore fino alla registrazione finale del fotone. Una tale misura individuale deve quindi essere sufficientemente rapida da rendere impossibile che qualunque informazione relativa ad essa possa propagarsi, attraverso qualsiasi canale (anche eventualmente ignoto), verso l'altro osservatore prima che questi, a sua volta, completi la propria misura. (Weihs et al., 1998, pp. 5039)

base di misura. Il generatore produce bit con frequenza massima di commutazione dell'ordine di 500 MHz, mentre il sistema di modulazione opera fino a 30 MHz. Gli autori misurarono inoltre i ritardi complessivi del sistema e ne stimano una finestra temporale tipicamente di alcuni nanosecondi (tutti i dati riportati rimangono sotto una finestra di 6ns), ben inferiore al limite imposto dalla separazione tra le stazioni, rafforzando così l'argomento di località (Weihs et al., 1998, p. 5041). Rilevante è anche l'indipendenza delle due stazioni. Infatti, a differenza di molte configurazioni precedenti, i risultati non venivano trattati tramite un circuito di coincidenze in tempo reale condiviso tra i due lati. In questo caso, gli eventi sono registrati indipendentemente ed ogni lato disponeva di un proprio orologio atomico con un'accuratezza di 0.5ns per la sincronizzazione temporale degli eventi, i quali venivano confrontati solo dopo la misura.

Per la misura della violazione viene utilizzata la disuguaglianza di Clauser et al (1969). I risultati (run di 10 s con circa 14.700 coincidenze) mostrano una chiara violazione della disuguaglianza CHSH, riportando un valore di

$$S = 2.73 \pm 0.02 \quad [57]$$

che è in accordo con la previsione quantistica $S_{QM} = 2.82$ entro le incertezze sperimentali e corrisponde ad una violazione pari a 30 deviazioni standard (Weihs et al., 1998, p. 5042).

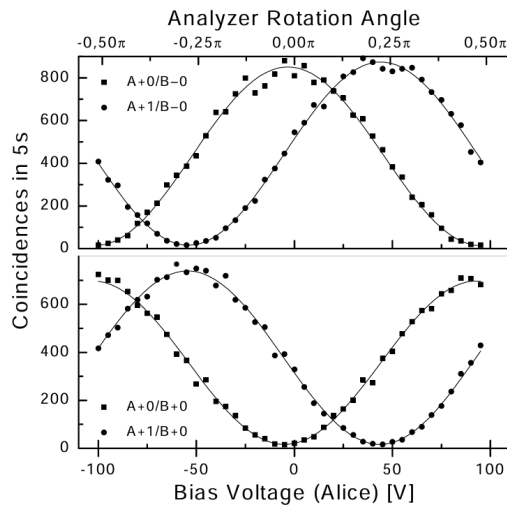


Figura 2.8: Quattro dei sedici tassi di coincidenza tra diversi canali di rivelazione, riportati in funzione della tensione di bias (angolo di rotazione dell'analizzatore) del modulatore di Alice. Le diverse altezze delle curve sono attribuite alle differenti efficienze dei rivelatori. Un

fit non lineare χ^2 mostra un accordo ottimo con l'andamento sinusoidale previsto dalla teoria quantistica. Fonte: Weihs et al. (1998)

In conclusione, Kaiser (2020) cita questo esperimento come il momento in cui il problema della località viene affrontato in maniera diretta rispetto agli esperimenti precedenti, in particolare confrontandolo con Aspect. L'esperimento di Weihs e collaboratori (1998) rappresenta dunque una tappa cruciale nella storia delle sfide tecniche e sperimentali legate all'entanglement, perché affronta in modo molto più stringente il problema della località rispetto agli esperimenti eseguiti in precedenza.

2.3.4. Gli esperimenti dal 2000 al 2015: la chiusura del fair-sampling loopholes

Il *fair-sampling loophole* (talvolta indicato anche come *detector-efficiency loophole* o talvolta come *detection loophole*) nasce dal fatto che, in un esperimento di Bell, l'efficienza di un rivelatore reale è minore di 1. Questo fa sì che vengano tralasciati eventi emessi dalla sorgente e, analizzando solo gli eventi rivelati, resta aperta la possibilità che essi costituiscano un campione distorto dell'insieme totale. Il dubbio sorge quindi nel fatto che una teoria locale-realista potrebbe riprodurre una violazione apparente della disuguaglianza sfruttando i conteggi mancanti. Kaiser (2020) sottolinea come la disuguaglianza CHSH possa essere modificata rispetto all'efficienza del rivelatore, facendo emergere una soglia critica di efficienza pari a $\eta^* = 82,8\%$. Anche se questo vincolo (ed il conseguente loophole) viene identificato già negli anni Settanta, affrontare sperimentalmente il problema si rivelò più difficile del previsto a causa delle limitazioni tecnologiche. Anche l'esperimento di Weihs e colleghi (1998) esplicita questa problematicità riportando una registrazione del 5% delle coppie emesse, lasciando quindi aperta la possibilità di una spiegazione alternativa basata appunto sul *fair-sampling*.

I primi esperimenti che affrontano con successo il *fair-sampling loophole* usarono coppie di ioni entangled a bassa velocità intrappolati in trappole magnetiche ad alta fedeltà. Queste, al contrario dei fotoni entangled, mantenevano gli ioni accessibili per tempi lunghi. In questo modo i gruppi sperimentali riuscirono a ottenere efficienze ben superiori alla soglia critica η^* (Kaiser, 2020, p.14) In particolare, si ricordano qui *Experimental violation of a Bell's inequality with efficient detection* (Rowe et al., 2001), ovvero l'esperimento NIST di Boulder del 2001 che, utilizzando gli ioni di Berillio ottiene un segnale pari a $S = 2.25 \pm 0.03$.

Rowe e colleghi (2001) presentano il proprio risultato come violazione della disuguaglianza di Bell con rivelazione efficiente, affermando esplicitamente di eliminare il *fair-sampling loophole*, pur riconoscendo che la separazione tra gli ioni non è sufficiente a chiudere il *locality loophole*.

Qualche anno dopo, nel 2013, si apre una fase di rapidi progressi segnata dagli esperimenti ad alta efficienza su fotoni entangled. Kaiser (2020) li definisce come un avanzamento tecnico decisivo perché grazie a rivelatori TES criogenici (transition-edge sensors) e configurazioni a breve distanza con perdite totali contenute, due gruppi di ricerca (Christensen et al., 2013; Giustina et al., 2013) riescono a realizzare la chiusura del *fair-sampling loophole*, senza però chiudere contemporaneamente quello di località. I risultati si rivelano impressionanti:

We present a source of entangled photons that violates a Bell inequality free of the “fair-sampling” assumption, by over 7 standard deviations. (Christensen et al., 2013 p.1)

Without relying on any assumed error distribution, we statistically verify a violation of Eberhard’s inequality by nearly 70 standard deviations and thus clearly demonstrate the necessity of abandoning all local realistic theories that take advantage of unfair sampling to explain the observed values. (Giustina et al., 2013, p.229)

Bisogna però considerare che, per quanto il lavoro di Giustina e colleghi (2013) sia stato pubblicato per primo, l’articolo di Christensen e colleghi (2013) critica il lavoro precedente e presenta il proprio esperimento come il primo a chiudere pienamente il *fair-sampling loophole* con fotoni. Tuttavia, entrambi gli esperimenti si concentrano solamente su uno dei problemi rilevati. Solo due anni più tardi, alla fine del 2015, tre gruppi realizzarono esperimenti che chiudevano sia il *locality loophole* sia il *fair-sampling loophole*. Ad esempio, il gruppo guidato da Krister Shalm al NIST (Boulder) realizzò un test con fotoni entangled in polarizzazione, costruito direttamente sui progressi del 2013 nei rivelatori a fotone singolo ad alta efficienza. La configurazione triangolare possiede una sorgente entangled al vertice e due stazioni di rivelazione collegate da fibre ottiche, distanti 130 m dalla sorgente e 185 m tra loro. Inoltre, QRNG co-localizzati con i rivelatori permettevano di generare nuovi bit casuali circa ogni 5 ns, così che le impostazioni cambiassero più volte mentre i fotoni erano in volo. In questa configurazione, gli eventi rilevanti potevano essere disposti in modo compatibile

con la separazione *spacelike* richiesta per il loophole di località, mantenendo al tempo stesso le condizioni sperimentali necessarie per la chiusura del *fair-sampling*. I dati ammettono una violazione corrispondente ad oltre 5 deviazioni standard. Nello stesso periodo, il gruppo di Anton Zeilinger a Vienna, guidato da Marissa Giustina, realizzò un altro test con fotoni entangled in polarizzazione. L'esperimento prevedeva una configurazione colineare con sorgente centrale e due stazioni di rivelazione, ciascuna a 29 m dalla sorgente, posizionate ai lati opposti di un lungo corridoio nel seminterrato dell'Hofburg Palace di Vienna e collegate tramite fibre ottiche. I QRNG locali implementavano nuove impostazioni entro finestre temporali di 26 ns (tempo di volo pari a 96,7 ns) così da garantire la separazione *spacelike* degli eventi rilevanti. I dati ammettono una violazione corrispondente a quasi 12 deviazioni standard. (Kaiser, 2020, p. 17)

2.3.5. Dal BIG Bell Test al Cosmic Bell tests: la chiusura del freedom-of-choice loophole

Nel 1976, Shimony, Horne e Clauser identificano un terzo loophole significativo negli esperimenti sulla disuguaglianza di Bell, ovvero il *freedom-of-choice loophole*, che riguarda la possibile esistenza di correlazioni statistiche tra i parametri nascosti (λ) e le impostazioni di misura (a, b) scelte nei due rami del test. Gli autori (Clauser et al., 1976) misero in evidenza come, nel calcolo di $p(A, B|a, b)$, la legge della probabilità totale richiede di considerare un termine del tipo $p(\lambda|a, b)$. Perciò, se

$$p(\lambda|a, b) \neq p(\lambda) \quad [58]$$

una teoria local-realista potrebbe in linea di principio riprodurre correlazioni forti senza violare formalmente la struttura locale del modello (Kaiser, 2020, p.17-18). Kaiser osserva anche che, l'uso di generatori quantistici di numeri casuali (QRNG) nei Bell tests, pur essendo sperimentalmente molto efficace, lascia aperta una possibile obiezione: se la randomicità quantistica è parte di ciò che il test mette in gioco, allora fondare la scelta delle impostazioni su dispositivi la cui imprevedibilità è giustificata dalla stessa teoria quantistica può introdurre un elemento di circolarità nell'argomentazione (Kaiser, 2020).

Una strategia utilizzata per affrontare questo problema è stata sfruttare le scelte umane in tempo reale. Infatti, il 30 novembre 2016, è stata avviata una collaborazione internazionale in cui circa 100.000 partecipanti hanno generato sequenze di bit tramite un videogioco progettato per renderle il meno prevedibili possibile. Questo gioco era il BIG Bell Test

(2018), un tentativo sperimentale innovativo di affrontare questo *loophole* attraverso la scelta delle impostazioni dell'apparato sperimentale. I bit generati, per un totale dell'ordine di 10^8 , furono inviati tramite reti ad alta velocità a 12 laboratori distribuiti in cinque continenti e successivamente utilizzati per determinare le impostazioni di misura nei test di Bell (cfr. Fig. 2.9). I laboratori partecipanti riportarono violazioni statisticamente significative della disuguaglianza di Bell (Kaiser, 2020, p. 20; Fabris, 2024, p. 37).

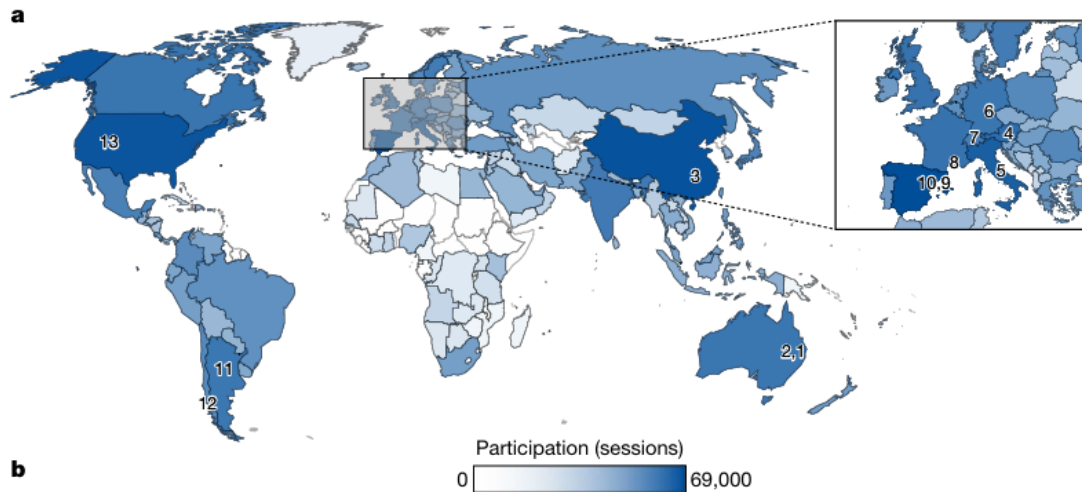


Figura 2.9: Localizzazione dei 13 esperimenti BBT (numerati da est a ovest). La colorazione dei Paesi indica il numero totale di sessioni di partecipazione. Fonte: Big Bell Test (2018)

Una seconda strategia impiega i *Cosmic Bell tests*, nei quali la scelta delle impostazioni di misura è affidata a ARNG (astronomical random number generators) basati su eventi astronomici remoti. L'obiettivo è spostare quanto più indietro possibile nel tempo l'istante in cui un'eventuale correlazione potrebbe essersi instaurata, riducendo in modo significativo l'insieme delle spiegazioni locali e realiste compatibili con i dati (Kaiser, 2020, pp. 20-21). Nel primo Cosmic Bell test (Handsteiner et al., 2016), le impostazioni furono determinate dalla luce di stelle della Via Lattea osservate in tempo reale e la configurazione spazio-temporale fu progettata in modo da chiudere il *loophole* di località e, al tempo stesso, da retrodatare di circa 600 anni il più recente momento in cui un meccanismo locale e realista avrebbe potuto sfruttare il *freedom-of-choice loophole*. Nel secondo Cosmic Bell test (Rauch, 2018), l'utilizzo di quasar ad alto redshift spostò il vincolo fino a quasi 8 miliardi di anni. Kaiser (2020, p.22) evidenzia inoltre che, per la specifica geometria spazio-temporale dell'esperimento, tali scenari local-realisti legati al *freedom-of-choice loophole* risultavano

esclusi dal 96% del volume spazio-temporale del cono di luce passato rilevante per l'esperimento.

In questa sezione abbiamo ricostruito come, a partire dagli anni Settanta, una successione di esperimenti progressivamente più sofisticati abbia indagato la violazione delle disuguaglianze di Bell. Tali risultati hanno alimentato un dibattito scientifico e filosofico molto ampio confermando con grande precisione, e poche eccezioni, le previsioni della meccanica quantistica. La storia dei loopholes ci insegna, tuttavia, che la forza di questi risultati non dipende soltanto dall'osservazione della violazione, ma piuttosto dal lungo processo con cui essa è stata verificata in condizioni sperimentali sempre più stringenti. Il fatto che siano stati necessari quasi cinquant'anni per arrivare alla chiusura congiunta dei principali loopholes mette in evidenza, da un lato, l'eccezionale difficoltà sperimentale di combinare nello stesso apparato requisiti tecnici spesso in tensione tra loro e, dall'altro, la severità dei criteri che viene richiesto alla comunità scientifica di accettare. Infatti, proprio perché i test di Bell incidono su assunzioni che hanno occupato una posizione centrale nella fisica moderna, tra cui la località, la loro accettazione ha richiesto un livello di controllo sperimentale particolarmente elevato.

Capitolo 3

Il Corso PLS tra progettazione e sperimentazione

3.1. Il PLS come contesto sperimentale

Il contesto sperimentale in cui si è sviluppato il lavoro di tesi è il corso extracurricolare “Le due rivoluzioni quantistiche”¹⁶, sviluppato da Sara Satanassi, Olivia Levrini ed Elisa Ercolessi del dipartimento di Fisica e Astronomia dell’università di Bologna con la partecipazione mia e di Maria Bondani, dell’Istituto di Fotonica e Nanotecnologie (IFN) del Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR). Il corso, rivolto a studenti di scuola secondaria di secondo grado, è stato organizzato in collaborazione con il progetto Piano Lauree Scientifiche (PLS).

Il *Progetto Lauree Scientifiche* (PLS) nasce nel 2004, su proposta della Conferenza nazionale dei Presidi delle Facoltà di Scienze e Tecnologie, con un finanziamento del Ministero dell’Istruzione, dell’Università e della Ricerca e in collaborazione con Confindustria. L’obiettivo era quello di aumentare i numeri di iscritti/e e di laureati/e nelle discipline di Chimica, Fisica e Matematica, in risposta ad un numeroso calo osservato nei dieci anni precedenti, con l’obiettivo di mantenere un alto standard di qualità e potenziare il loro inserimento nel mercato del lavoro. Dall’anno accademico 2010/2011, il Progetto Lauree Scientifiche è stato rinominato *Piano Lauree Scientifiche* (PLS), per sottolineare la crescente necessità di sistematizzare l’impianto culturale e metodologico sperimentato con successo negli anni precedenti. Oggi, il PLS coinvolge, in tutta Italia, studenti delle scuole secondarie di secondo grado, insegnanti, università e enti di ricerca (come INFN), con l’obiettivo di “*combattere la crescente disaffezione dei giovani nei confronti delle discipline scientifiche*. In particolare, *i laboratori PLS offerti dal Dipartimento di Fisica e Astronomia hanno il duplice obiettivo di orientare allo studio della fisica, offrendo agli studenti la possibilità di*

¹⁶ <https://pls.unibo.it/editions/646>

avvicinarsi a temi di ricerca avanzata, e di far acquisire competenze di base sul “mestiere del fisico”. La varietà dei laboratori offre una ampia panoramica sulle dimensioni della fisica, del suo intreccio con altre discipline e delle sue implicazioni a livello sociale. In ogni laboratorio saranno anche sviluppate competenze trasversali (soft skill) oggi richieste dal mondo del lavoro (creatività, progettazione, competenze di comunicazione, saper lavorare in gruppo)”¹⁷.

Il corsi proposti in collaborazione con il PLS sono inoltre riconosciuti come attività di PCTO¹⁸, un percorso rivolto a studenti italiani di età compresa tra 16 e 18 anni, nell’ambito del quale gli studenti devono maturare un certo numero di ore partecipando ad attività finalizzate all’orientamento formativo e professionale e allo sviluppo di competenze trasversali (soft skills).

Nel contesto attuale, caratterizzato dalla ricerca e lo sviluppo di una seconda fase di tecnologie quantistiche, si è sentita la necessità di dedicare uno spazio specifico alle scienze quantistiche all’interno delle attività del progetto PLS. Il gruppo di ricerca in Didattica della Fisica dell’Università di Bologna lavora sulla fisica quantistica da anni (e.g., Levrini e Fantini 2013). Ha iniziato a lavorare sul tema delle tecnologie quantistiche nel 2018, promuovendo diverse iniziative con molteplici obiettivi e rivolte a differenti target, sia studenti di scuola secondaria superiore sia docenti in formazione e in servizio. L’obiettivo del corso è di introdurre agli studenti le tecnologie quantistiche ed i concetti alla base della seconda rivoluzione quantistica, sottolineandone l’impatto culturale e sociale.

Nel corso degli anni, il corso è stato oggetto di analisi e affinato spostando il focus dalle tecnologie quantistiche alla “Seconda Rivoluzione Quantistica” alle “Due Rivoluzioni Quantistiche” (cfr. Tab. 3.1), seguendo un approccio *design-based*, caratterizzato da cicli ricorsivi di confronto tra ipotesi didattiche ed evidenze empiriche (Satanassi & Levrini, 2025).

¹⁷ <https://pls.unibo.it/>

¹⁸ I PCTO, ovvero i Percorsi per le Competenze Trasversali e l’Orientamento, sono progetti dedicati agli studenti di scuola secondaria di secondo grado volti ad integrare la tradizionale formazione in classe con periodi formativi presso strutture sia private che pubbliche convenzionate, laboratori della scuola, e-learning o ambienti di simulazione. Questo percorsi seguono delle linee guida specifiche, definite attraverso il Decreto Ministeriale n. 774 del 4 settembre 2019 (<https://www.mim.gov.it/-/decreto-ministeriale-n-477-del-4-settembre-2019>). Da settembre 2025 i PCTO hanno cambiato nome e sono ora denominati FSL, acronimo di Formazione Scuola Lavoro.

Tabella 3.1 - Nella tabella sono presentati i diversi moduli elaborati dal 2016 fino all'anno corrente da parte del gruppo di Didattica della Fisica dell'Università di Bologna. Fonte: Satanassi & Levrini, 2025.

Anno	Nome del corso	Target
2019	Computer quantistici	Studenti di scuola secondaria di secondo grado
2020	Computer quantistici	Studenti di scuola secondaria di secondo grado
2021 (a)	Tecnologie quantistiche: una nuova sfida per la didattica	Docenti di scuola secondaria in servizio e in formazione
2021 (b)	La seconda rivoluzione quantistica	Studenti di scuola secondaria di secondo grado
2022	La seconda rivoluzione quantistica	Studenti di scuola secondaria di secondo grado
2023	Le due rivoluzioni quantistiche	Studenti di scuola secondaria di secondo grado
2024	Le due rivoluzioni quantistiche	Docenti di scuola secondaria in servizio e in formazione
2025	Le due rivoluzioni quantistiche	Studenti di scuola secondaria di secondo grado
Prossimamente (2026)	Le due rivoluzioni quantistiche	Docenti di scuola secondaria in servizio e in formazione

Questo lavoro ha portato il gruppo di ricerca ad individuare un set di *design principles* (Satanassi & Levrini, 2025; Satanassi, 2023; Satanassi, Ercolessi e Levrini, 2022), introdotti nel capitolo 1, che vogliono valorizzare la Seconda Rivoluzione Quantistica come una rivoluzione culturale. Nella prossima sezione si introduce la sperimentazione specifica entro cui si colloca la mia tesi.

3.2. Descrizione del corso

Il corso PLS a cui ho partecipato è stato svolto nei mesi di gennaio, febbraio e marzo 2025 presso il Dipartimento di Fisica e Astronomia dell'Università di Bologna e si propone agli studenti con i seguenti obiettivi¹⁹:

¹⁹ <https://pls.unibo.it/editions/646>

- acquisire le conoscenze di base di fisica quantistica necessarie per cogliere la differenza tra computer classico e quantistico e per cogliere le potenzialità di queste nuove tecnologie;
- riflettere sulle implicazioni scientifiche, sociali e culturali delle tecnologie quantistiche (computer quantistico, simulatore quantistico, internet quantistico...);
- cogliere la multidimensionalità che caratterizza il tema ed orientarsi rispetto a possibili professioni in settori STEM (Scienza, Tecnologia, Ingegneria e Matematica);
- sviluppare competenze di futuro e di un pensiero critico che possa guidare ad orientarsi in questo periodo di grande cambiamento.

Alla luce di questi obiettivi, il corso si propone di affrontare le sfide concettuali, epistemologiche e tecnologiche che riguardano la Prima e la Seconda Rivoluzione Quantistica. Il percorso prevede l'introduzione a tecnologie quantistiche attualmente in fase di sviluppo, oggi al centro della ricerca e degli investimenti di numerosi paesi, basate sulla capacità di isolare, controllare e manipolare singoli oggetti quantistici, alle loro applicazioni e implicazioni sulla ricerca, l'economia, l'ambiente, l'etica, la società e la didattica.

Il corso si è articolato in sei incontri a cadenza settimanale da tre ore ciascuno (cfr. Tabella 2). Durante questi laboratori sono state previste diverse tipologie di attività:

- A) lezioni tenute da esperti ed esperte, di carattere prevalentemente frontale, nelle quali ricercatrici e ricercatori hanno introdotto i principali temi di riferimento e sono state svolte discussioni collettive;
- B) Lavori di gruppo proposti durante le lezioni e per la costruzione del progetto finale.

La tabella 3.2 presenta le attività nel dettaglio, una breve descrizione, le docenti coinvolte e le tipologie di attività svolte. Ai sei incontri inizialmente definiti, si è successivamente deciso di aggiungere un settimo incontro, aperto anche a docenti e studenti di altre scuole secondarie di secondo grado, durante il quale è stata organizzata una Passeggiata Quantistica, all'interno di un progetto di terza missione dell'Ateneo di Bologna, "Matematica, fisica e astronomia: passeggiate scientifiche per le strade di Bologna"²⁰, coordinato dal Dipartimento di Matematica e di cui il Dipartimento di Fisica e Astronomia era collaboratore. L'evento prevedeva un percorso attraverso i laboratori del Dipartimento di Fisica pensato per scoprire i principali temi di ricerca e di frontiera, teorici e sperimentali, su cui i diversi gruppi di ricerca sono coinvolti.

²⁰ <https://site.unibo.it/turismo-matematico/it>

La descrizione dettagliata delle attività è riportata in appendice 5, questo capitolo è dedicato invece alla descrizione del mio specifico contributo al corso.

Tabella 3.2: Numero dell'incontro (N.), Data, Descrizione, Speaker e Attività svolte all'interno delle diverse giornate del PLS "Le due Rivoluzioni Quantistiche" 2025. In particolare, le attività svolte fanno riferimento all'elenco soprastante: A) lezioni tenute da esperti ed esperte, di carattere prevalentemente frontale, nelle quali ricercatrici e ricercatori hanno introdotto i principali temi di riferimento; B) lavori di gruppo per acquisire strumenti operativi; C) lavori di gruppo per la costruzione di un progetto.

N.	Data	Breve descrizione	Speaker	Attività svolte
1°	Martedì 28/01	La prima rivoluzione quantistica: sfide concettuali, epistemologiche e sperimentali. La natura dell'oggetto quantistico come primo mistero	Olivia Levrini	A
		Introduzione dei concetti base della logica quantistica: 'stato quantistico', 'principio di sovrapposizione', 'variabili compatibili e incompatibili', 'preparazione dello stato', 'trasformazione di uno' e 'misura quantistica'	Sara Satanassi	
2°	Martedì 04/02	La seconda rivoluzione quantistica: sfide concettuali, epistemologiche e sperimentali. L'entanglement come secondo mistero	Sara Satanassi Giulia Belardinelli	A
		Il gioco di Bell: prima parte		
3°	Lunedì 10/02	Il gioco di Bell: dai gemelli alla disuguaglianza (d'Espagnat)	Sara Satanassi Maria Bondani Giulia Belardinelli	A
		Il gioco di Bell: seconda parte		
4°	Martedì 18/02	Introduzione alle tecnologie quantistiche: una nuova rivoluzione culturale	Sara Satanassi Elisa Ercolessi Giulia Belardinelli	A
		Il gioco di Bell: terza parte		
		Sistemi a più qubit		
5°	Lunedì 24/02	La seconda rivoluzione quantistica: il protocollo del teletrasporto	Sara Satanassi Giulia Belardinelli	A, C
		Attività per riflettere sull'impatto delle tecnologie quantistiche: prima parte		
6°	Lunedì 03/03	Attività per riflettere sull'impatto delle tecnologie quantistiche: seconda parte	Sara Satanassi Giulia Belardinelli	C
7°	Martedì 18/03	Passeggiata Quantistica	Sara Satanassi Altri	//

Il corso proposto nell'anno 2025 e descritto in questa tesi si concentra sul tema dell'*entanglement*. In particolare, sono state sviluppate delle attività sul gioco di Bell nella specifica formulazione proposta nel libro *Quantum Chance* di Nicholas Gisin (Gisin, 2014). In questo testo, il gioco di Bell mette *“in evidenza come alcune correlazioni non possono essere ottenute se si ammettono soltanto interazioni locali, intese come influenze che si propagano punto per punto nello spazio”* (Gisin, 2014, p.7). Lo stesso autore presenta questa sezione come la più difficile ma allo stesso cruciale, pur sottolineando che il ragionamento può essere portato avanti senza introdurre formalismi o nozioni specifiche di fisica quantistica. Come scrive nel libro: *“Le regole del gioco sono volutamente semplici ed è facile giocare la dinamica è immediata, dunque, ciò che risulta più impegnativo è comprendere quale sia l'obiettivo e soprattutto, perché il gioco funzioni. Il punto non è l'attività in sé, ma la comprensione dei vincoli concettuali che essa impone e delle conseguenze che apre rispetto alle correlazioni non locali e al ruolo dell'indeterminazione”* (ibid., p. 7).

Nella prossima sezione verrà presentato il gioco di Bell proposto durante il corso PLS.

3.3. Entanglement e non località: le novità nella progettazione del corso 2025

In questa sezione viene descritto come il testo di Gisin è stato utilizzato per progettare l'intervento didattico basato sul gioco di Bell per introdurre l'*entanglement*. L'obiettivo principale di queste 5 ore di attività è introdurre l'*entanglement* come mistero principale all'interno della seconda rivoluzione quantistica, enfatizzandone:

- la sfida concettuale: riconoscere l'*entanglement* come proprietà dello stato composto e accettare che l'*entanglement* mette in crisi l'idea classica di interazione locale (si vedrà più avanti che per giustificare la violazione della disuguaglianza serve accettare la possibilità di una strategia non locale);
- la sfida epistemologica: riconoscere che assumere la località implica schemi di spiegazione delle correlazioni limitati e riconoscerne ed eventualmente accettarne la negoziabilità (si vedrà più avanti che il percorso porta a scartare una ad una le spiegazioni locali fino alla costruzione della disuguaglianza, che impone l'abbandono dell'assunto di località)
- la sfida sperimentale: riconoscere che per mettere alla prova la località servono scelte indipendenti, sincronizzazione e condizioni che escludano comunicazione. Inoltre,

riconoscere la violazione sperimentale come contributo fondamentale nel ragionamento logico.

Per raggiungere l'obiettivo, l'attività è stata articolata in 3 parti:

- 1) Prima parte: Località, Correlazione e Spiegazione.
- 2) Seconda parte: Influenza e Causa comune alla prova.
- 3) Terza parte: Il passaggio al modello e alla logica binaria.

L'attività proposta ricostruisce la versione del gioco di Bell di Gisin (2014) in versione didattica, arricchendola di diversi momenti di attività di gruppo, discussioni collettive e momenti di inquiry personale.

3.3.1. Prima parte: Località, Correlazione e Spiegazione

Dopo un breve richiamo alla portata culturale, concettuale, epistemologica e sperimentale che hanno accompagnato la formulazione dell'entanglement, nel percorso proposto in classe è stato introdotto un primo concetto chiave, ovvero l'*interazione* tra sistemi spazialmente separati. A questo scopo, si è ripreso l'incipit nel quale Gisin richiama due schemi intuitivi: ridurre la distanza muovendosi verso l'oggetto, oppure estendere il proprio raggio d'azione mediante un mezzo materiale. Come scrive l'autore:

“Nella nostra più tenera età impariamo che per interagire con un oggetto che si trova fuori dalla nostra portata abbiamo solo due possibilità. O ci spostiamo verso di esso, strisciando come fanno i bambini, oppure ci procuriamo un oggetto lungo, come un bastone, che ci permetta di estendere il nostro raggio d'azione. In seguito, abbiamo scoperto che possono essere messi in atto anche meccanismi più sofisticati” (Gisin, 2014, Introduction, p.xiii)

Per far emergere ancor di più l'idea di una propagazione continua, vengono poi richiamati alcuni esempi legati alla quotidianità. Il primo è l'acquisto online: quando si ordina un pacco, l'oggetto non raggiunge istantaneamente chi lo ha acquistato, ma viene preparato dal venditore, trasportato su un aereo, un camion, oppure tramite una combinazione di mezzi diversi. Infine, dopo aver attraversato lo spazio necessario, viene consegnato alla porta della persona che lo ha ordinato. Nelle parole di Gisin:

“Internet, la televisione e molti altri esempi quotidiani ci insegnano che, in fin dei conti, qualsiasi interazione e qualsiasi comunicazione tra due oggetti spazialmente separati deve propagarsi in maniera continua da un punto al successivo tramite qualche meccanismo che può essere complesso, ma che segue sempre una traiettoria continua che può essere identificata nello spazio e nel tempo, almeno in linea di principio.” (ibid., p.xiii)

Anche quando i meccanismi diventano più sofisticati, l’interazione può essere sempre pensata come una catena di passaggi localizzabili nello spazio e nel tempo.

Si introduce quindi la *località* come assunto di riferimento per interpretare e spiegare certe tipologie di correlazione e si costruisce l’idea di *causalità locale*: anche quando due sistemi si trovano ad una grande distanza, ogni fenomeno può essere ricostruito, proprio come l’esempio dell’ordine del pacco, tramite una sequenza di eventi, con un ‘prima’ ed un ‘dopo’, ossia una catena di processi locali che si articolano nello spazio-tempo.

Per sottolineare la presenza della località anche all’interno di procedimenti non osservabili ad occhio nudo, viene proposto come secondo esempio l’equilibrio termodinamico tra due corpi (A e B) a contatto. Se inizialmente il corpo A è più caldo rispetto al corpo B, il contatto fra i due (causa), attraverso lo scambio di energia sotto forma di calore, permette di raggiungere l’equilibrio termodinamico (effetto). A partire da una causa locale si giunge quindi a un effetto locale, in questo caso la temperatura di equilibrio, lungo un processo collocato nello spazio e nel tempo. Anche in questo caso si enfatizza con gli studenti come l’evoluzione, pur non essendo osservabile in ogni suo dettaglio microscopico, può essere concepita come una sequenza di eventi, tracciabile in ogni punto dello spazio-tempo.

Successivamente, si anticipa come la fisica quantistica, in particolare il concetto di entanglement, metta in tensione il modello classico di interazione costruito fino a questo punto. Nelle sue parole:

“Ciò nonostante, la fisica quantistica, la quale esplora un mondo che va oltre quello che possiamo percepire direttamente, sostiene che oggetti spazialmente distanti tra loro possono talvolta formare un'unica unità.” (ibid., p.xiii)

In particolare, si è sottolineata la caratteristica più controintuitiva dell’entanglement, ovvero che, anche quando due oggetti entangled sono molto distanti tra loro, perturbando uno dei due la perturbazione agisce anche sull’altro.

Si introduce quindi il la *correlazione* come formulata da Gisin (2014), seguita da alcuni esempi legati alla quotidianità:

“Ogni giorno facciamo delle scelte che hanno delle conseguenze. Certe scelte e le loro conseguenze sono più importanti di altre. Certe conseguenze dipendono solamente dalle nostre scelte, ma molte altre dipendono anche dalle scelte fatte dagli altri. In questo caso, le conseguenze delle nostre scelte non sono indipendenti l’una dall’altra: sono correlate.” (ibid., p.8)

La celebre osservazione di John Bell:

“Correlations cry out for explanations” (ibid., p.7)

agisce qui come chiave di lettura grazie alla quale è stato possibile sottolineare come il lavoro scientifico consista essenzialmente nel riconoscere correlazioni e nel cercarne una spiegazione. Per fare ciò, gli scienziati usano tanti strumenti differenti tra cui gli esperimenti mentali.

Viene quindi introdotto agli studenti l’esperimento mentale di Alice e Bob come strumento per ragionare su un caso particolare di correlazione e sulle sue spiegazioni plausibili. Il problema fornito agli studenti si articola in due fasi (cfr. appendice 1):

- 1) Fase 1. Alice e Bob vivono a Bologna, in due case vicine. Ogni sera, senza accordarsi, comprano e mangiano esattamente lo stesso pasto. A volte pizza, a volte pasta, ma sempre lo stesso piatto. Agli studenti è stato chiesto di leggere il problema e rispondere alla domanda: Come possiamo spiegare questa perfetta correlazione? E’ stato chiesto loro di proporre e motivare tre possibili spiegazioni.
- 2) Fase 2. Alice e Bob vivono in due città diverse. Ogni sera, senza accordarsi, continuano a comprare e mangiare esattamente lo stesso pasto. Agli studenti è stato chiesto di leggere il problema e rispondere nuovamente alla domanda (Come possiamo spiegare questa perfetta correlazione?), proponendo e motivando tre possibili spiegazioni.

Dopo aver lavorato in gruppo, viene chiesto agli studenti di condividere quanto emerso.

Attraverso la discussione collettiva vengono quindi presentate le due categorie di spiegazioni: ‘influenza diretta’ e ‘causa comune’, schematizzate in Fig. 3.1 e descritte da Gisin come segue:

1. **Influenza diretta.** *“Una prima possibilità è che Bob copi sistematicamente Alice e quindi non scelga davvero il proprio menù, oppure, al contrario, che sia Alice a copiare Bob. Ecco dunque un primo possibile tipo di spiegazione della correlazione: un primo evento influenza un secondo evento.” (ibid., p.8)*
2. **Causa comune.** *“Una seconda possibile spiegazione è che il negozio di alimentari più vicino ad Alice e quello più vicino a Bob offrano esattamente lo stesso prodotto, per cui in realtà non c’è alcuna scelta. Molto tempo prima, i due negozi potrebbero aver stabilito una lista di menù serali per gli anni successivi. Questi menù potrebbero variare da una sera all’altra, ma ogni sera i due negozianti seguono le istruzioni presenti nelle loro liste. La lista potrebbe essere stata preparata dal responsabile di una catena di negozi di alimentari e inviata via e-mail a tutti i membri del consorzio. In questo modo, Alice e Bob finiscono necessariamente per avere lo stesso menù, giorno dopo giorno.” (ibid., p.9)*

Nel caso della fase 2 dell’attività proposta, ci si è soffermati particolarmente sul fatto che i menù di Alice e Bob possono anche dipendere da una causa comune avvenuta nel passato e che ha potuto influenzare entrambi nonostante la distanza: *“Si parla allora di causa comune locale: comune perché nasce da un passato condiviso, e locale perché tutto avviene sempre localmente e in modo continuo, da un punto dello spazio a quello successivo.” (ibid., p.9)*

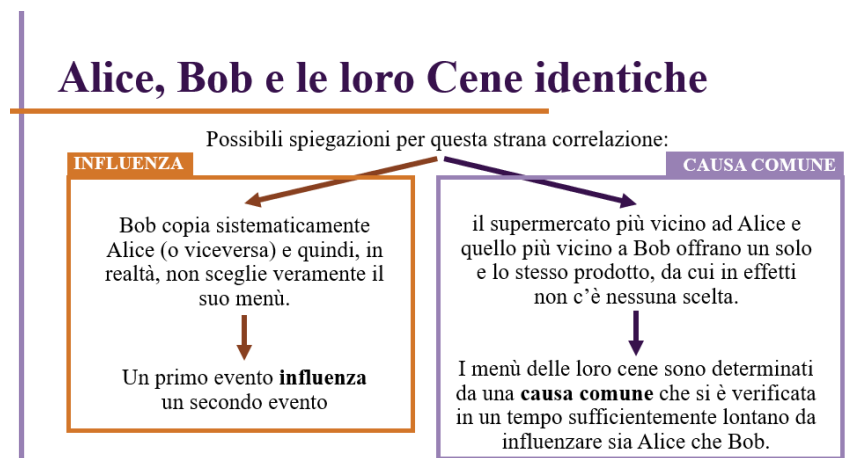


Figura 3.1: Slide utilizzata durante il corso PLS che schematizza le due possibili, ‘influenza diretta’ e ‘causa comune’.

Come evidenziato da Gisin (2014), influenza e causa comune sono, assunta la località, le uniche due spiegazioni plausibili:

“Tutte le correlazioni classiche osservate nelle scienze, tranne che nella fisica quantistica, possono essere spiegate in due modi: o come influenza di un evento su un altro (prima spiegazione), oppure tramite cause comuni locali, come il responsabile dei due negozi (seconda spiegazione). In entrambi i casi, l’influenza o la causa comune si propaga in modo continuo da un punto all’altro nello spazio e, in questo senso preciso, tutte queste spiegazioni sono locali. [...] Questi due tipi di spiegazione sono locali perché fanno riferimento a una catena di meccanismi che si propaga in modo continuo da un punto all’altro dello spazio. Per quanto sorprendente possa sembrare, gli scienziati non hanno mai trovato un terzo tipo di schema di spiegazione locale che tenga conto del fatto che Alice e Bob finiscono per mangiare ogni sera la stessa cena.” (ibid., p.9)

A questo punto, gli studenti sono invitati a mettere in dubbio il pensiero di Gisin e a chiedersi se esiste una terza spiegazione che possa giustificare la perfetta correlazione delle cene di Alice e Bob.

3.3.2. Seconda parte: Influenza e Causa comune alla prova

La seconda parte del percorso si apre richiamando nuovamente la chiave di lettura sul lavoro dello scienziato: se prima l’obiettivo era trovare spiegazioni, ora si chiede agli studenti di metterne alla prova la solidità. In particolare, si riflette su che cosa renda una spiegazione “buona” e su quali condizioni la caratterizzino. Per valutare la “bontà” di una spiegazione si riprendono i criteri proposti da Gisin: una buona spiegazione deve essere *accurata*, dev’essere capace di “raccontare una storia” convincente e dev’essere anche robusta (ovvero, non può essere modificata facilmente). Gisin li definisce come segue:

1. La spiegazione è “accurata”: *“Il primo criterio viene formalizzato in equazioni matematiche, che permettono di fare previsioni da confrontare poi con osservazioni ed esperienza.” (ibid., p.10)* In questo caso, una spiegazione è buona quando genera previsioni che risultano coerenti nel confronto coi dati sperimentali. Tuttavia, secondo Gisin non è la caratteristica più importante;
2. Non può essere modificata facilmente: *“Il secondo criterio di una buona spiegazione è che non possa essere modificata facilmente. Per questo, una buona spiegazione può essere messa alla prova dagli esperimenti, perché non può essere adattata con facilità*

a nuovi dati sperimentali che altrimenti la contraddirebbero. Con le parole di Popper, deve poter essere falsificata.” (ibid., p.10)

3. Racconta una storia: *“Ogni lezione di scienze inizia con una storia. Altrimenti, come si potrebbero introdurre nuovi concetti, come energia, molecola, strato geologico o correlazione? Fino all’avvento della fisica quantistica, tutte queste storie si svolgevano in modo perfettamente continuo nello spazio e nel tempo e, per questo, erano storie locali.” (ibid., p.10)*

Dunque, richiamando le due tipologie di spiegazione individuate (influenza e causa comune) nella prima parte del percorso, è stato proposto un lavoro di gruppo (cfr. appendice 2) in cui gli studenti erano chiamati a costruire due scenari che mettessero alla prova i limiti delle spiegazioni sulla base dei criteri introdotti. Per ciascuno scenario, gli studenti dovevano inoltre esplicitare le scelte compiute nella sua costruzione (ad esempio le variabili mantenute costanti o modificate) e motivare in che modo tali scelte consentissero di sottoporre la spiegazione considerata a un caso critico.

Dopo aver raccolto e discusso gli scenari, vengono presentati gli scenari proposti da Gisin per mettere alla prova i due tipi di spiegazione.

Il primo è:

“Immaginiamo di separare Alice e Bob in modo che siano veramente molto lontani l'uno dall'altro, in due diverse città o in due differenti continenti, ma essendo sicuri che ognuno di loro abbia accesso ad un supermercato locale. Per assicurarci che non possano influenzarsi a vicenda, imponiamo che Alice e Bob facciano la spesa esattamente nello stesso momento. E meglio ancora, immaginiamo che si trovino in due galassie diverse. In queste condizioni, sarebbe impossibile per loro comunicare, o anche influenzarsi inconsapevolmente, come accade quando qualcuno sbadiglia e fa sbadigliare un altro. (ibid., p.8)

In questo caso, vengono messi in evidenza due elementi fondamentali: la simultaneità degli eventi e la distanza intergalattica, che rendono impossibile qualsiasi forma di influenza tra Alice e Bob, indipendentemente dal fatto che sia volontaria o involontaria. In questo scenario, la spiegazione ‘influenza diretta’ non può essere considerata una buona spiegazione in quanto, nelle parole di Gisin, viene “falsificata”. A distanza intergalattica, non resta più

alcuna possibilità che possa verificarsi. Tuttavia, la spiegazione ‘causa comune’ continua a rispettare i canoni di una buona spiegazione.

A questo punto, immaginiamo che la perfetta correlazione tra le cene di Alice e Bob continui a mantenersi. Si cerca quindi di mettere alla prova il secondo tipo di spiegazione, ovvero la ‘causa comune’, tramite un secondo scenario. Nelle parole di Gisin:

“Immaginiamo ora che vicino a casa di Alice ci siano due negozi di alimentari, uno a sinistra quando esce e uno a destra. Allo stesso modo, vicino a casa di Bob ci sono due negozi, uno a sinistra e uno a destra. Alice e Bob continuano a vivere in due galassie diverse e non possono quindi influenzarsi a vicenda. Ma immaginiamo che, ogni volta che entrambi scelgono, del tutto per caso, di fare la spesa nel negozio a sinistra, finiscano sempre per avere lo stesso menù. L’unica spiegazione locale di questa correlazione è che i negozi di sinistra condividano una lista che, sera dopo sera, determina l’unico menù serale disponibile. Per i negozi di sinistra, la situazione è esattamente la stessa di prima. Tuttavia, il fatto che vicino sia ad Alice sia a Bob ci siano più negozi permette di immaginare una gamma di correlazioni diverse. Per esempio, se Alice sceglie il negozio di sinistra e Bob quello di destra, possiamo di nuovo immaginare che finiscano sempre con lo stesso menù. Lo stesso vale se Alice va nel negozio di destra e Bob in quello di sinistra. Si conclude allora che l’unica spiegazione locale di queste tre correlazioni (sinistra-sinistra, sinistra-destra e destra-sinistra) è, ancora una volta, che i quattro negozi condividano la stessa lista di menù. Ma immaginiamo ora che, quando Alice e Bob vanno entrambi nel negozio di destra, non abbiano mai lo stesso menù. È possibile? Be’, sembra proprio che sarebbe difficile da realizzare.” (ibid., p.10)

Si è discusso collettivamente con gli studenti se e in che modo gli scenari proposti da Gisin mettessero alla prova le due spiegazioni. Mentre, l’influenza, spostando Alice e Bob su due galassie diverse, è facilmente falsificabile (criterio 2), la spiegazione causa comune è più sottile. Tuttavia, Gisin costruisce uno scenario in cui la causa comune inizia a vacillare.

Nel momento in cui la narrazione non ci fornisce più una possibile soluzione, è necessario lavorare in maniera più precisa e controllata sulla spiegazione causa comune. Bisogna quindi costruire un modello che permetta di costruire vincoli matematici che rendano tale spiegazione accurata.

3.3.3. Terza parte: Il passaggio al modello e alla logica binaria

Nella terza parte del percorso viene introdotto il gioco di Bell. In primo luogo si costruisce il modello con l'obiettivo di adottare un approccio scientifico e semplificare l'esperimento mentale dei due ristoranti. Nelle parole di Gisin:

“A questo punto siamo molto vicini allo spirito del gioco di Bell. Lasciamo quindi qui i nostri supermercati. Dobbiamo adottare un approccio scientifico e semplificare la situazione il più possibile. Invece di parlare di menù serale, parleremo di risultati e, poiché è sufficiente considerarne solo due possibili, non avremo bisogno di altro.”
(*ibid.*, p.10)

Si procede quindi alla modellizzazione dell'esperimento mentale di Alice e Bob che, nel nostro caso, avviene attraverso l'introduzione di due scatole (controller).

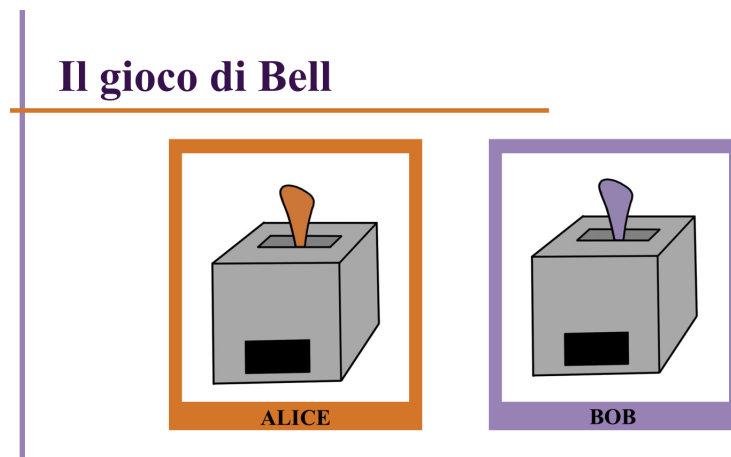


Figura 3.2: Slide utilizzata durante il corso PLS, nella quale è possibile osservare le due scatole sulle quali si costruisce la modellizzazione. Le scatole dei due giocatori sono identiche ed hanno due caratteristiche fondamentali: un joystick ed uno schermo.

Come mostrato in Fig. 3.2, ciascuna scatola è composta da un joystick, inizialmente a riposo in posizione verticale e che può essere spostato a destra o a sinistra, ed uno schermo sul quale, subito dopo il movimento del joystick, compare il risultato “0” oppure “1”. Viene sottolineato anche come l'utilizzo delle scatole permetta di leggere i risultati sotto forma di “bit di informazione”. Le scatole assegnate ad Alice e Bob appaiono identiche e, per ciascuna

di esse, il risultato può essere casuale. Nel passaggio dall'esperimento mentale alla modellizzazione è stato dedicato del tempo per esplicitare l'analogia con lo scenario dei supermercati (cfr. Fig. 3.3):

- La scelta del supermercato (destra o sinistra) corrisponde al movimento del joystick (destra o sinistra);
- Il pasto (tortellini o carbonara) corrisponde al numero sullo schermo (0 o 1). In questo caso, mangiare la stessa cosa corrisponde ad avere lo stesso numero sullo schermo.

In particolare, durante la costruzione di questa analogia, è stato sottolineato che la codifica binaria del pasto è sufficiente per il modello. In questo momento non si è interessati a codificare l'informazione "cosa mangiano Alice e Bob?" ma piuttosto a "Alice Bob mangiano la stessa cosa?".



Figura 3.3: Slide utilizzata durante il corso PLS, nella quale si può osservare a sinistra: l'analogia fra supermercato e joystick; a destra: l'analogia tra pasto e numero presente sullo schermo.

Viene quindi introdotto agli studenti il gioco di Bell. Alice e Bob sono in possesso di:

- due scatole identiche;
- due orologi sincronizzati.

Una volta raccolto tutto il materiale, i due giocatori si allontanano nello spazio. A questo punto, dalle 9:00 e successivamente ad intervalli regolari di un minuto, entrambi azionano il joystick simultaneamente, spingendolo a destra o sinistra, e registrano in una tabella l'orario, la direzione scelta e il risultato visualizzato sullo schermo prestando molta attenzione (cfr. Fig. 3.4). Le scelte di Alice e Bob sono completamente indipendenti, Alice non conosce la scelta di Bob, e viceversa. Viene reso esplicito che lo scopo dell'attività non è barare, ma

raccogliere dati utili per comprendere il funzionamento delle scatole e, di conseguenza, trovare una eventuale spiegazione per la correlazione dei risultati.

Come si gioca



Esattamente alle 9 del mattino, e successivamente **per ogni minuto**, entrambi spingono il joystick da un lato o dall'altro.





Orario	Direzione	Risultato
09:00	Sinistra	0
09:01	Sinistra	1
09:02	Destra	1
...	...	...
15:40	Destra	0

Ognuno di loro sceglie come muovere il joystick in maniera **completamente indipendente!**

Orario	Direzione	Risultato
09:00	Sinistra	0
09:01	Destra	1
09:02	Destra	0
...	...	...
15:40	Sinistra	0



Figura 3.4: Slide utilizzata durante il corso PLS nella quale sono riportate le istruzioni per giocare al gioco di Bell.

Si passa quindi alla descrizione del gioco di Bell. Alice e Bob giocano dalle 9:00 alle 15:59 e raccolgono 400 prove. Siccome le loro scelte sono completamente indipendenti, ci si aspetta una distribuzione approssimativamente uniforme dei casi nelle quattro combinazioni possibili, che nel nostro caso corrispondono a:

- 100 casi sinistra-sinistra;
- 100 casi sinistra-destra;
- 100 casi destra-sinistra;
- 100 casi destra-destra.

Il calcolo del punteggio avviene seguendo le regole:

1. *“Ogni volta che Alice spinge il joystick a sinistra o Bob spinge il suo a sinistra, o quando entrambi spingono il loro joystick a sinistra, ottengono un punto se il loro risultato è lo stesso;*
2. *Ogni volta che sia Alice che Bob scelgono di spingere i loro joystick a destra, ottengono un punto se i loro risultati sono differenti.” (ibid., p.12)*

Viene infine illustrato agli studenti il modo con cui si determina il punteggio finale e le condizioni di vittoria (cfr. Fig. 3.5). Gisin lo riporta come segue:

Per ognuna delle quattro combinazioni di scelte, Alice e Bob calcolano prima il loro tasso di successo, [...] poi sommano questi 4 tassi di successo. Perciò, otteniamo che il punteggio massimo è 4 [...]. Per esempio, un punteggio di 3.41 significa che Alice e Bob hanno vinto in media 3.41 volte su 4, o 341 volte su 400. (ibid., p.12)

che riassumiamo nella forma:

$$S = \frac{n_{SS}}{100} + \frac{n_{SD}}{100} + \frac{n_{DS}}{100} + \frac{n_{DD}}{100}$$

con $0 \leq S \leq 4$ e dove n_{SS} è il numero di punti ottenuti per la combinazione sinistra-sinistra (SS), e così via per tutte le combinazioni.

Segue la condizione di vittoria:

“Quando diremo che [Alice e Bob] vincono il gioco di Bell, intenderemo che vincono più di 3 volte su 4.” (ibid., p.12)

Una volta conclusa l'impostazione dell'architettura del gioco, è stata dedicata una parte della lezione a chiarire perché sia fondamentale rappresentare le informazioni attraverso variabili binarie. Come scrive Gisin:

“Gli scienziati amano codificare gli oggetti che stanno analizzando utilizzando i numeri, proprio come abbiamo fatto qui con i risultati esposti sugli schermi delle scatole di Bell. Questo li aiuta a concentrarsi solo sull'essenziale senza essere confusi da lunghe affermazioni tipo “Alice spinge il suo joystick a sinistra e osserva il risultato 0”. Gli permette inoltre di portare avanti addizioni e moltiplicazioni, e vedremo come queste possano essere usate per sintetizzare la nozione di non località in una equazione estremamente semplice.” (ibid., p.13)

Si procede quindi con la ricostruzione del gioco attraverso la codifica numerica (cfr. Fig. 3.5). Focalizzandosi sul caso di Alice, viene proposto agli studenti di indicare con x la sua scelta e con a il risultato ottenuto sullo schermo. In particolare:

- $x = 0$ corrisponde all'affermazione “Alice ha scelto di spostare il joystick a sinistra”;
- $x = 1$ corrisponde all'affermazione “Alice ha scelto di spostare il joystick a destra”;
- $a = 0$ corrisponde all'affermazione “Alice osserva il risultato 0”;
- $a = 1$ corrisponde all'affermazione “Alice osserva il risultato 1”.

In questo modo, sia la scelta sia il risultato di Alice vengono rappresentati tramite variabili binarie. In modo analogo, si codificano con y la scelta di Bob e con b l'esito visualizzato sullo schermo. In particolare:

- $y = 0$ corrisponde all'affermazione "Bob ha scelto di spostare il joystick a sinistra";
- $y = 1$ corrisponde all'affermazione "Bob ha scelto di spostare il joystick a destra";
- $b = 0$ corrisponde all'affermazione "Bob osserva il risultato 0";
- $b = 1$ corrisponde all'affermazione "Bob osserva il risultato 1".

La codifica avviene dunque attraverso le coppie di variabili (x,a) per Alice e (y,b) per Bob.

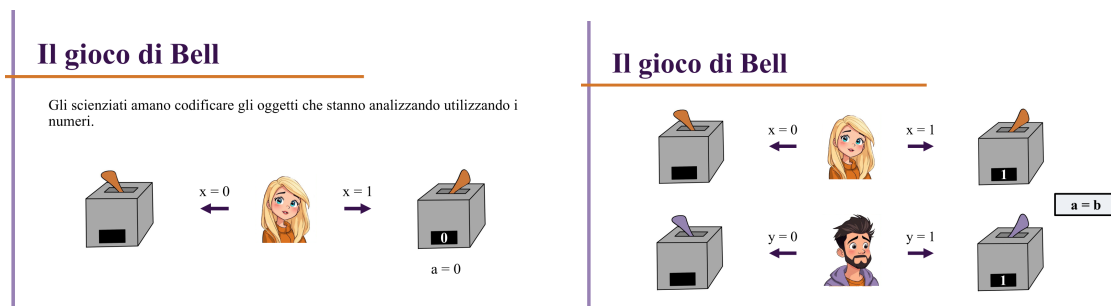


Figura 3.5: Slide utilizzate durante il corso PLS per visualizzare le diverse combinazioni di variabili. A sinistra: codifichiamo le scelte di Alice tramite la variabile x , che può avere due valori (0 e 1), mentre codifichiamo il risultato prodotto sullo schermo con la variabile a , che può avere due valori (0 e 1). A destra: analogamente, per Bob scegliamo la coppia di variabili y, b .

Per descrivere in maniera efficace e sintetica tutte le possibili combinazioni tra le variabili di Alice e di Bob, possiamo costruire la Tabella 3.3, che rappresenta le condizioni in cui viene assegnato un punto ai due giocatori. Ad esempio, quando Alice sposta il joystick a destra (ovvero $x=1$) e da Bob a sinistra (ovvero $y=0$), la tabella mostra che il punto viene ottenuto solo se i risultati visualizzati coincidono (ovvero $a=b$).

Tabella 3.3: Tabella utilizzata per codificare tutte le possibili condizioni per ottenere un punto durante il gioco di Bell. Con x e b si indicano, rispettivamente, le strategie e dei risultati di Alice, mentre con y e b si indicano le strategie e dei risultati di Bob.

		ALICE	
		$x=0$	$x=1$
BOB	$y=0$	$a = b$	$a = b$
	$y=1$	$a = b$	$a \neq b$

Ancora più sinteticamente, possiamo racchiudere tutti i casi presenti in tabella per ottenere un punto in una sola condizione. Come fa notare Gisin:

Allora, facendo un po' di aritmetica elementare, tanto per divertirci, si scopre che possiamo riassumere il gioco di Bell, con Alice e Bob ciascuno in possesso della propria scatola, ben lontani l'uno dall'altra per evitare qualsiasi possibilità di copiarsi, ciascuno libero di fare le proprie scelte e di annotare i risultati, sotto forma di un'equazione piuttosto elegante:

$$a + b = x \times y$$

Viene quindi verificata insieme agli studenti la validità di quanto riportato attraverso due esempi (cfr. Fig. 3.6):

- Nel caso della coppia $(x, y) = (1, 1)$, siccome $x \times y = 1$ vale la condizione $a + b = 1$. Poiché a e b sono variabili binarie, se $a = 1$ allora si dovrà avere $b = 0$ e, viceversa, se $a = 0$ allora si dovrà avere $b = 1$. Non esistono altre possibilità. Di conseguenza, affinché venga assegnato un punto in questo caso deve essere soddisfatta la regola

$$a \neq b$$

- Nel caso delle coppie $(x, y) = (0, 0), (0, 1), (1, 0)$, siccome $x \times y = 0$ vale la condizione $a + b = 0$. Poiché a e b sono variabili binarie, se $a = 0$ allora si

dovrà avere $b = 0$ e, viceversa, se $a = 1$ allora si dovrà avere $b = 1$ (somma modulo 2). Non esistono altre possibilità. Di conseguenza, affinché venga assegnato un punto in questo caso deve essere soddisfatta la regola

$$a = b$$

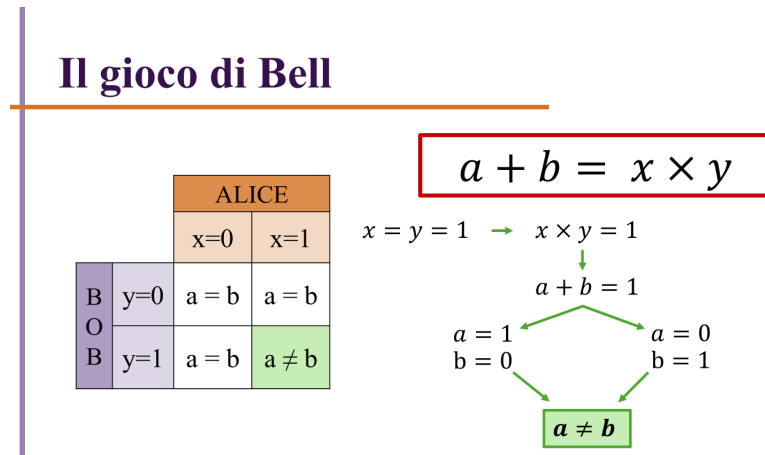


Figura 3.6: Slide utilizzata durante il corso PLS. Vediamo qui, a sinistra, la tabella come strumento per la codifica delle strategie e dei risultati di Alice e di Bob attraverso le variabili (x,a) per Alice e (y,b) per Bob. A destra, la formula che racchiude tutti i casi presenti in tabella. In verde è riportato un esempio nel quale, osservando il caso in cui il prodotto delle scelte sia 1, si ricava la condizione per ottenere il punto (ovvero a diverso da b).

Attraverso le parole di Gisin, si può osservare come l'utilizzo dell'equazione implichi una specifica assunzione:

In conclusione, la bella equazione $a + b = x \times y$ riassume perfettamente il gioco di Bell. Tutte le volte che è soddisfatto, Alice e Bob ricevono un punto. E così possiamo vedere che la rivoluzione quantistica può essere svelata con una matematica molto semplice. Questa equazione esprime il fenomeno della non località. Per vincere il gioco di Bell in maniera sistematica, le scatole devono calcolare il prodotto $x \times y$. Ma se la scelta di x è disponibile solo per la scatola di Alice e la scelta di y è disponibile solo per la scatola di Bob, questo calcolo non può essere fatto localmente. Al meglio, possono scommettere su $x \times y = 0$ ed avranno ragione 3 volte su 4, da dove otterranno un punteggio di 3. Ma qualsiasi punteggio più grande di 3 esige un

calcolo ‘non locale’ di $x \times y$, perché i due fattori nel prodotto esistono solamente in posti che sono molto distanti l’uno dall’altro. (ibid., p.14)

Tornando al modello della scatole, viene quindi proposto agli studenti di ragionare su quali strategie potrebbero garantire la vittoria (“cosa potrebbero fare o come potrebbero essere progettate le due scatole per assicurarsi che Alice e Bob ottengano un buon punteggio?”)

Il primo caso preso in esame è quello in cui Alice e Bob possono comunicare fra loro. Questa spiegazione rientra nella tipologia che prima abbiamo definito con il termine ‘influenza diretta’. Tuttavia, considerando il caso limite nel quale i due partecipanti si trovano a distanza intergalattica, qualunque influenza reciproca risulta esclusa. Infatti, se la separazione tra Alice e Bob è più grande della distanza fra la Terra e la Luna (circa 300.000 km), allora un eventuale segnale luminoso utilizzato per comunicare non riesce a percorrere la distanza in meno di un secondo e, nel caso estremo di due galassie, il tempo di percorrenza può arrivare fino all’ordine di milioni di anni! Questa enorme distanza rende di fatto impossibile qualsiasi comunicazione tra i due dispositivi nei tempi rilevanti del gioco. Nuovamente, possiamo vedere come la spiegazione ‘influenza diretta’ viene “falsificata”. Diventa quindi necessario cercare una spiegazione alternativa che non faccia ricorso a segnali trasmessi da un partecipante all’altro.

Il secondo caso esaminato prende in considerazione la produzione di un risultato predeterminato, che rientra nella tipologia di spiegazioni che prima abbiamo definito con il termine ‘causa comune’. Ad esempio, si può immaginare che le due scatole siano dispositivi identici costruiti da uno stesso costruttore e dotati di:

- un piccolo computer con una memoria interna molto grande;
- un orologio;
- un programma che legge i dati in memoria ad intervalli regolari (nel nostro caso 1 minuto).

In questo caso Alice e Bob non comunicano durante il gioco, ma le loro scatole risultano correlate perché condividono qualcosa nel passato. Considerando questa impostazione, si può immaginare che la sequenza dei risultati riportati sullo schermo sia stata generata in anticipo e poi registrata nella memoria dei due dispositivi dal costruttore al momento della costruzione. In altre parole, prima che le scatole vengano separate, qualcuno potrebbe aver

inserito al loro interno la stessa lista di istruzioni, insieme a un orologio interno sincronizzato. In questo modo, allo scoccare di ogni minuto, ciascuna scatola legge la riga corrispondente e restituisce l'esito previsto. La perfetta correlazione tra le risposte può quindi essere osservata a grandissime distanze. La spiegazione è locale poiché il risultato dipende solo da ciò che è stato deciso nel passato (la programmazione iniziale) e da processi interni.

Per svolgere il gioco di Bell in maniera significativa, sarebbe necessario raccogliere un numero molto elevato di prove. A titolo di esempio, per arrivare a circa 400 casi, con una prova al minuto, servirebbero diverse ore di attività, un impegno incompatibile con il tempo a disposizione nel corso. Dunque, piuttosto che giocare, viene proposto un ragionamento alternativo che va ad esaminare in modo sistematico tutte le possibili combinazioni di esiti valutando le diverse tipologie di casi che possono verificarsi. Come scrive Gisin:

A seconda del programma, il risultato può essere indipendente dalla posizione del joystick oppure può dipendere da essa. Ma quali programmi sono in esecuzione nelle scatole di Alice e Bob? Non ce ne sono forse infiniti, o almeno un numero molto grande di programmi possibili? In realtà no, perché la semplificazione che abbiamo introdotto nel nostro approccio scientifico, attenendoci a scelte e risultati binari, limita il numero di programmi possibili a 4 per scatola. Infatti, il programma deve solo fornire un risultato tra 2 possibili per ciascuna delle 2 scelte possibili. (ibid., p.16)

Vengono quindi introdotti i possibili programmi che implementano le scatole di entrambi i giocatori. Nel caso di Alice:

1. Il risultato è sempre $a = 0$, qualsiasi sia la scelta di x ;
2. Il risultato è sempre $a = 1$, qualsiasi sia la scelta di x ;
3. Il risultato è identico alla scelta, ovvero $a = x$;
4. Il risultato è sempre diverso dalla scelta, ovvero $a = 1 - x$.

Allo stesso modo, vi saranno 4 possibili programmi per la scatola di Bob:

1. Il risultato è sempre $b = 0$, qualsiasi sia la scelta di y ;
2. Il risultato è sempre $b = 1$, qualsiasi sia la scelta di y ;
3. Il risultato è identico alla scelta, ovvero $b = y$;
4. Il risultato è sempre diverso dalla scelta, ovvero $b = 1 - y$.

Si fa quindi notare agli studenti che, considerando quattro possibili programmi per ciascuno lato, le combinazioni complessive risultano essere $4 \times 4 = 16$. Certamente i programmi possono variare tra un minuto e l'altro ma, ogni volta verrà utilizzato un programma tra i quattro disponibili a determinare da un lato l'esito a di Alice e dall'altro l'esito b di Bob.

A questo punto, viene proposto agli studenti di esaminare tutte e 16 le combinazioni possibili e di calcolare i punteggi corrispondenti. Si procede quindi completando la tabella, riportata nella sua interezza in appendice 3 di cui si riportano in Fig. 3.6 i primi due casi.

x	y	a	b	$x \times y$	$a + b$	$x \times y = a + b?$	Score	Total score	Programmi
0	0	0	0	0	0	sì	1	3	A=1 B=1
0	1	0	0	0	0	sì	1		
1	0	0	0	0	0	sì	1		
1	1	0	0	1	0	no	0		
0	0	0	1	0	1	no	0	0	A=1 B=2
0	1	0	1	0	1	no	0		
1	0	0	1	0	1	no	0		
1	1	0	1	1	1	sì	1		

Figura 3.6: Tabella utilizzata durante l'attività. Nell'immagine si possono vedere i primi tre programmi. Ad esempio, nella prima combinazione sia Alice che Bob scelgono il programma 1, mentre nella combinazione 2 Alice sceglie il programma 1 e Bob sceglie il programma 2.

Infine, viene chiesto loro di rispondere alla domanda:

Possiamo vincere al gioco di Bell con una spiegazione di tipo locale?

Dopo aver fornito agli studenti il tempo un po' di tempo si discute come sia impossibile costruire delle scatole che, utilizzando le strategie locali, ci facciano ottenere un punteggio maggiore di 3. Nelle parole di Gisin:

“Per riassumere, qualsiasi sia la strategia locale del costruttore delle scatole, e qualsiasi sia di conseguenza la combinazione dei programmi, Alice e Bob non possono mai ottenere un punteggio finale al gioco di Bell più alto di 3! Ai fisici piace esprimere questo risultato nella forma di una disuguaglianza, ovvero la disuguaglianza di Bell.” (ibid., p.17-18)

Si arriva così alla disuguaglianza di Bell, che viene presentata nella forma seguente:

$$P(a = b|0, 0) + P(a = b|0, 1) + P(a = b|1, 0) + P(a \neq b|1, 1) \leq 3$$

dove $P(a = b|0, 0)$ è la probabilità che a sia uguale a b nel caso in cui sia fatta la scelta $x = y = 0$, analogamente per gli altri termini. Viene inoltre precisato che la disuguaglianza di Bell può essere espressa in forme diverse a seconda delle variabili scelte. Tuttavia, tutte le formulazioni prevedono un limite superiore, che in questo caso è 3. Gisin aggiunge:

“Perciò, per le correlazioni locali, la disuguaglianza di Bell è sempre soddisfatta. [...] In conclusione, nessuna strategia locale può essere utilizzata per vincere il gioco di Bell più di 3 volte su 4. I fisici direbbero che nessuna correlazione locale può violare la disuguaglianza di Bell. Detto in un altro modo, se Alice e Bob, ciononostante, riuscissero a vincere il gioco di Bell più di 3 volte su 4, non ci sarebbero spiegazioni locali per questo fenomeno.” (ibid., p.18-19)

In conclusione, viene chiesto agli studenti di pensare a che altro tipo di correlazione può esistere che permetta di vincere il gioco. La risposta viene presentata come legata a ciò che si trova “aprendo la scatola”: l’elemento decisivo è l’entanglement.

3.4. Dal percorso PLS alla progettazione del Tutorial

A seguito del percorso svolto all’interno del PLS “*Le due Rivoluzioni Quantistiche*”, si è voluto progettare un Tutorial che ricostruisce il filo concettuale, epistemologico e metodologico proposto all’interno del corso. La sua progettazione si ispira ai Tutorial sviluppati nella ricerca in Didattica della Fisica e si configura come uno strumento diagnostico volto a supportare gli studenti nella ricostruzione del ragionamento durante le interviste, che saranno discusse nel Capitolo 4. Al momento, però, il Tutorial non è pensato come un percorso autonomo e autosufficiente.

I *Tutorial* sono strumenti didattici sviluppati nell’ambito della ricerca in didattica della fisica per sostenere la costruzione e la riorganizzazione dei concetti fisici a partire dalle difficoltà sistematicamente documentate nei ragionamenti degli studenti (McDermott, 2001). La loro progettazione è centrata su nodi concettuali specifici, individuati attraverso studi empirici come particolarmente critici per la comprensione disciplinare (McDermott & Shaffer, 2002). I Tutorial si strutturano come attività di indagine guidata, nelle quali gli studenti sono chiamati a esplicitare, discutere e ristrutturare progressivamente i propri schemi concettuali, favorendo il coordinamento tra formalismo matematico e interpretazione fisica (Redish,

2003). I materiali vengono sviluppati e progressivamente raffinati attraverso cicli iterativi di progettazione, sperimentazione e analisi delle risposte degli studenti, secondo una metodologia research-based (Cobb et al., 2003).

McDermott (2001) afferma che ogni Tutorial è composto dalla stessa sequenza, che consiste in un pre-test, un foglio di lavoro, compiti a casa ed un post-test. I pre-test aiutano gli studenti a riconoscere ciò che ci si aspetta che comprendano e forniscono una base di riferimento per il docente. Successivamente, la parte principale consiste in sessioni di lavoro a piccoli gruppi (3-4 persone), in cui gli studenti vengono guidati nella costruzione un ragionamento qualitativo riguardo un concetto chiave. Durante le sessioni di Tutorial, gli studenti collaborano su fogli di lavoro che, tramite domande accuratamente strutturate, li guidano nel ragionamento necessario per raggiungere la comprensione funzionale. Le schede fornite agli studenti mettono l'accento sulla costruzione dei concetti e sul ragionamento qualitativo, facendo ricorso al conflitto cognitivo e al *bridging* (ovvero la costruzione di ponti concettuali), sfruttando la presenza di facilitatori formati per aiutare gli studenti a chiarire autonomamente le proprie confusioni. (Redish, 2003) Secondo Redish (2003) il ruolo del facilitatore è fondamentale in quanto monitora i progressi dei gruppi e pone domande guida in un dialogo *semi-socratico*, per aiutarli ad attraversare le difficoltà presenti nel loro stesso ragionamento. Anche la disposizione dell'aula riflette il diverso tipo di comportamento e di attenzione atteso in un Tutorial rispetto a una lezione, ad esempio, l'attenzione dello studente dovrebbe essere rivolta al lavoro e all'interazione con gli altri membri del gruppo. Infine, i compiti a casa aiutano a rinforzare l'apprendimento ed infine, la valutazione avviene tramite i post-test. Come si può quindi vedere, nei Tutorial l'esercitazione tradizionale viene sostituita da un'attività di apprendimento attivo.

Uno dei lavori più celebri per quanto riguarda la realizzazione di Tutorials nella Didattica della Fisica è "*Tutorials in Introductory Physics*" (McDermott, 2002), sviluppato da Lillian C. McDermott, Peter Shaffer e dal *University of Washington Physics Education Group* (UWPEG). Due sono i motivi principali: per prima cosa, i materiali trattati da questo gruppo di ricerca coprono una vastissima gamma di argomenti, ed in secondo luogo i contenuti sono raffinati da tantissimi anni di attività, venendo continuamente collaudati e perfezionati. Un altro esempio di Tutorial è quello di Kautz (2005), che indaga l'apprendimento rispetto alla legge dei gas perfetti. Sheer e colleghi (2002) hanno costruito un Tutorial sulla relatività della simultaneità, i cui risultati mostrano come questi strumenti possano accompagnare gli

studenti nell'affrontare conflitti concettuali profondi e resistenti, tipicamente non risolti dall'istruzione tradizionale. I Tutorial appena citati sono un esempio di come, anche con un tempo limitato, un curriculum basato sulla ricerca possa contribuire a:

- rendere la fisica significativa per gli studenti;
- fornire una base per la risoluzione quantitativa di problemi;
- sviluppare le capacità di ragionamento scientifico (Redish, 2003).

Negli ultimi decenni, l'approccio *tutorial-based* è stato adottato anche alla meccanica quantistica. Il Physics Education Group dell'Università di Washington (UW) ha sviluppato "*Tutorials in Physics: Quantum Mechanics*", una raccolta di materiali ispirata a *Tutorials in Introductory Physics* e pensata per integrare i corsi di meccanica quantistica a livello universitario (Passante, 2014). Accanto ai Tutorials in senso stretto (fogli di lavoro sequenziati e facilitatori), la letteratura in didattica della fisica include anche altre risorse complementari all'apprendimento, quali Tutorial interattivi supportati da simulazioni e simulazioni guidate con attività strutturate. Per quanto riguarda l'entanglement, si può citare il *Quantum Interactive Learning Tutorial* (QuILT) che sfrutta la Quantum Key Distribution come contesto autentico per consolidare i concetti fondamentali della meccanica quantistica in un sistema a due stati (DeVore & Singh, 2016). È in questo contesto di crescente sviluppo riguardante la ricerca nella Didattica della Meccanica Quantistica che si inserisce il Tutorial pensato, sviluppato e sperimentato all'interno di questa ricerca.

Il Tutorial "Il gioco di Bell" (cfr. appendice 4) si divide in quattro parti principali, ciascuna con un ruolo specifico:

- 1) Prima parte: Località, Correlazione e Spiegazione;
- 2) Seconda parte: Influenza e Causa comune alla prova;
- 3) Terza parte: Il passaggio al modello e alla logica binaria;
- 4) Quarta parte: La violazione della disuguaglianza di Bell.

In Figura 3.7 se ne riporta la struttura. Questo schema ha lo scopo di presentare e guidare nell'osservazione della struttura, ma si è consci del fatto che l'apprendimento non è un processo lineare. Il Tutorial è costituito da domande aperte, spazi per argomentare o disegnare ed una tabella di calcolo dei casi, tutti elementi che accompagnano gli studenti in

un percorso graduale: dalle loro idee intuitive di località e correlazione fino alla formalizzazione del gioco di Bell e alla messa in crisi dell'assunto di località.

Il Tutorial è per ora stato somministrato nella forma di un'intervista semi-strutturata ed integrato da domande delle intervistatrici al fine di indagare quale tipo di risorse attivano gli studenti durante il ragionamento proposto. Alla luce dei risultati che presenteremo nel capitolo 4, il Tutorial verrà affinato per poterlo proporre anche in altri contesti e in altre modalità.

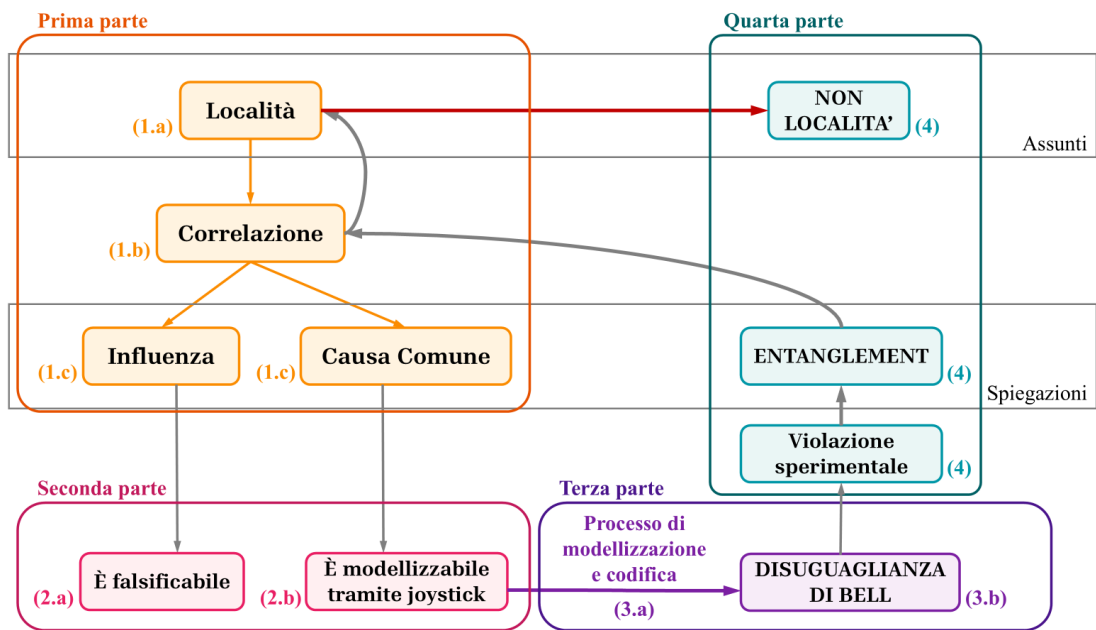


Figura 3.7: Schema che illustra la costruzione del Tutorial.

Capitolo 4

Metodologia di Analisi

4.1. Materiali raccolti e Metodologia

Il corso PLS “*Le due Rivoluzioni Quantistiche*”, svolto nei mesi di gennaio, febbraio e marzo 2025 presso il Dipartimento di Fisica e Astronomia dell’Università di Bologna, ha coinvolto 29 studenti (8 femmine, 21 maschi) appartenenti al terzo (2), quarto (16) e quinto anno (11) di scuola secondaria di secondo grado, principalmente licei scientifici o istituti tecnici, provenienti da diversi comuni della regione. Essendo il PLS un’attività extra-curricolare, il corso attrae studenti e studentesse motivate, con un forte interesse verso la disciplina; in particolare, hanno partecipato, su base volontaria, sia ad attività condotte durante il corso sia alle interviste finali.

Gli studenti del gruppo, essendo di terza, quarta e quinta superiore, non avevano ancora studiato la fisica quantistica a scuola. Alcuni di loro avevano condiviso di essersi avvicinati spontaneamente a questi argomenti, in particolare mediante letture divulgative o la fruizione di contenuti video su piattaforme come YouTube. Inoltre, in buona parte ha affermato di essere orientata verso carriere STEM.

Il corso è articolato in sei incontri in presenza, a cadenza settimanale, della durata di tre ore ciascuno. A questi è stato aggiunto un settimo incontro, nel quale è stato possibile partecipare alla Passeggiata Quantistica (cfr. appendice 5). Diversi dati sono stati raccolti durante tutta la durata del corso e le loro forme variano a seconda della tipologia di attività svolta. La tipologia di dati raccolti, organizzata per incontro, è riportata in Tab. 4.1.

Alla fine del percorso è stato chiesto agli studenti chi fosse disponibile per essere intervistato nelle settimane seguenti.

Tabella 4.1: Numero dell’incontro (N.), Breve descrizione e Materiali raccolti all’interno delle diverse giornate del PLS “*Le due Rivoluzioni Quantistiche*” 2025.

N.	Incontri	Materiali
----	----------	-----------

1°	La prima rivoluzione quantistica, sfide concettuali, epistemologiche e sperimentali	Scheda di lavoro, completata in piccoli gruppi da 3-4 persone: è stato chiesto agli studenti di cercare di predire quale sarebbe stato il risultato dopo il passaggio attraverso l'apparato quando vengono combinati di più apparati di Stern-Gerlach con orientazioni differenti del campo magnetico. Registrazione audio: raccolta, discussione e formalizzazione dei risultati
2°	La seconda rivoluzione quantistica, sfide concettuali, epistemologiche e sperimentali. Il gioco di Bell	Scheda di lavoro, completata in piccoli gruppi da 3-4 persone: è stato chiesto agli studenti di proporre alcuni possibili scenari (e di motivarli) quale meccanismo potrebbe produrre la perfetta correlazione tra le cene di Alice e Bob. Registrazione audio: durante il lavoro a piccoli gruppi sulla scheda Registrazione audio: raccolta e discussione dei risultati Scheda di lavoro, completata in piccoli gruppi da 3-4 persone: partendo dall'esperimento mentale di Alice e Bob, possiamo immaginare un nuovo contesto in cui queste due spiegazioni non sono ammissibili? Registrazione audio: durante il lavoro a piccoli gruppi sulla scheda Registrazione audio: raccolta, discussione e formalizzazione dei risultati
3°	La seconda rivoluzione quantistica, sfide concettuali, epistemologiche e sperimentali. Il gioco di Bell	Griglie di lavoro, completate singolarmente: strumento per verificare il punteggio massimo per ogni combinazione di programmi possibile. Registrazione audio: raccolta, discussione e formalizzazione dei risultati
4°	La portata della seconda rivoluzione quantistica e il protocollo crittografico	//
5°	Il protocollo del teletrasporto + Sfide e impatto delle tecnologie quantistiche	Poster: poster creato attraverso domande guida, realizzato in piccoli gruppi da 3-4
6°	Sfide e impatto delle tecnologie quantistiche	Poster:

		poster creato attraverso domande guida, realizzato in piccoli gruppi da 3-4 Registrazione audio: durante il lavoro a piccoli gruppi
7°	Passeggiata Quantistica	//

Successivamente al corso, è stato sviluppato il Tutorial (cfr. Sez. 3.4), strumento che ha permesso di osservare, e successivamente analizzare, il ragionamento degli studenti nell'affrontare il gioco di Bell. A partire dalle domande del Tutorial, sono state eseguite delle interviste semi-strutturate condotte da due intervistatrici, Sara Satanassi, ricercatrice in didattica della fisica, e Giulia Belardinelli, aggiungendo domande di chiarimento o di ampliamento rispetto ai contenuti. Sono state condotte due interviste semi-strutturate a distanza di due mesi dalla conclusione del corso. Tale scelta metodologica è stata motivata dall'esigenza di evitare che le studentesse e gli studenti intervistati avessero ancora pienamente presente il ragionamento sviluppato durante il PLS. Le interviste sono state audio-registrate da entrambe le intervistatrici, una individuale (Ivan) e un focus group (Ester, Francesco e Bianca). I nomi sono inventati.

4.1.2. Scelta del campione

I 4 studenti che rappresentano il caso studio della presente tesi sono stati selezionati sulla base di quattro criteri. In primo luogo, è stata considerata la frequenza di partecipazione al percorso didattico. I quattro studenti/esse selezionati, provenienti da due istituti differenti, hanno preso parte a tutti gli incontri del corso e a tutte le attività proposte, seguendo quindi l'intero sviluppo dell'esperienza formativa. In secondo luogo, è stato considerato il forte interesse dimostrato nei confronti degli argomenti trattati durante il corso. I/le quattro studenti/studentesse selezionati/e hanno evidenziato una partecipazione costantemente attiva, caratterizzata da interventi frequenti e qualitativamente approfonditi, nonché da un coinvolgimento significativo nelle discussioni collettive. In terzo luogo, si è tenuto conto della capacità di rielaborazione critica dei contenuti, emersa sia negli scambi in aula sia nelle attività proposte, che ha permesso di cogliere un livello di riflessione particolarmente articolato. Infine, è stata considerata la disponibilità al confronto e alla riflessività, ritenute elementi rilevanti ai fini di un'intervista approfondita e consapevole.

In fase di analisi è emerso che l'intervista di Bianca non presentava un livello di esplicitazione del ragionamento sufficiente rispetto ai criteri analitici definiti e alle domande di ricerca. In particolare, il materiale raccolto non consentiva una ricostruzione adeguata e

coerente dei processi argomentativi oggetto di indagine, né la stesura di un profilo analitico sufficientemente articolato e fondato sui dati. Per tale ragione, l'analisi presentata in seguito si concentra sui tre restanti casi (Ester, Francesco e Ivan).

4.1.3. Fasi metodologiche

Il lavoro si è articolato nelle seguenti fasi.

La prima fase è consistita nella trascrizione dell'intervista audio-registrata e nella sua anonimizzazione. La seconda fase è consistita nella costruzione dei profili di ciascun partecipante, con lo scopo di ricostruire nel dettaglio il ragionamento che ha condotto durante l'intervista. La terza fase è consistita in un'analisi esplorativa preliminare delle trascrizioni e dei profili, finalizzata a orientare le scelte analitiche successive. Adottando un approccio *bottom-up*, i dati sono stati esplorati con l'obiettivo di individuare quali dimensioni del discorso risultassero maggiormente rilevanti e di definire, conseguentemente, il livello e l'unità di analisi più appropriati. L'analisi esplorativa è stata svolta congiuntamente dalle due intervistatrici ed il confronto sistematico tra le rispettive interpretazioni ha consentito di definire in modo condiviso i criteri analitici e il focus dell'indagine successiva.

La quarta fase è consistita nell'individuazione della lente di analisi. Nella fase di triangolazione con un terzo esperto, la prof.ssa Olivia Levrini, si è scelto di focalizzare l'analisi sul cambiamento concettuale e, in particolare, si è scelta come lente la *teoria delle classi di coordinazione* (descritta nella sezione successiva). È stato dunque adottato un approccio integrato *top-down* e *bottom-up*. Le ipotesi interpretative emerse nella fase esplorativa sono state sottoposte a una verifica sistematica mediante un'analisi fine-grained, per individuare con maggiore precisione i passaggi del ragionamento in cui la comprensione della località si riorganizza o si ridefinisce.

I risultati dell'analisi sono stati successivamente discussi e messi a confronto tra le due intervistatrici, al fine di verificare la coerenza delle interpretazioni proposte e di interpretare in maniera affidabile i risultati.

Durante l'intero percorso metodologico è stata adottata la triangolazione, strategia ampiamente riconosciuta nell'ambito della ricerca qualitativa come procedura volta a rafforzare la credibilità e la solidità delle interpretazioni (Carter, 2014). In particolare, il confronto sistematico tra esperte è stato utilizzato come forma di controllo intersoggettivo del processo interpretativo, in linea con quanto discusso nella letteratura metodologica (Patton,

1999). Tale scelta ha contribuito a rendere più trasparente la costruzione dell'analisi e a consolidarne la coerenza interna.

4.2. Teoria delle Classi di Coordinazione

La *Coordination Class Theory* è stata sviluppata da diSessa e Sherin (1998), nell'ambito della ricerca sui modelli cognitivi di apprendimento di cambiamento concettuale. Il cambiamento concettuale si delinea come un processo graduale di riorganizzazione epistemica, in cui non è soltanto il contenuto delle idee a mutare, ma anche il modo in cui esse vengono mobilitate per interpretare l'esperienza.

La *Coordination Class Theory* è stata elaborata per affrontare direttamente alcune questioni che, nella ricerca in didattica della fisica, vengono spesso date per scontate:

1. Che cosa significa 'possedere un concetto'? Spesso nella letteratura questo termine risulta vago: in che modo è possibile rendere questo termine più preciso e più utile nella ricerca in didattica?
2. Che cosa si intende per 'cambiamento concettuale'? In altre parole, che cosa cambia nella mente degli studenti e in quale modo avviene il cambiamento concettuale? (Levrini & diSessa, 2008, p. 3)

Una *coordination class* nasce in relazione all'apprendimento della Fisica e delinea le caratteristiche che deve rispettare il processo di apprendimento per considerare un concetto come "ben formato" da un punto di vista disciplinare (Levrini & diSessa, 2008). Possedere un concetto, come quello di forza o di tempo proprio, ben formato significa, nel linguaggio delle classi di coordinazione, possedere readout strategies e una struttura inferenziale efficaci per estrarre informazioni dal mondo e attivare ragionamenti che diano loro un senso. Questi due elementi rappresentano l'architettura di una classe di coordinazione, descritta più in dettaglio qui di seguito.

4.2.1. L'architettura interna degli elementi della Teoria delle Classi di Coordinazione

All'interno del mondo fenomenologico che ci viene messo davanti ogni giorno, ogni individuo è chiamato a selezionare informazioni a partire da ciò che ci circonda in modo opportuno rispetto al quesito che specifico al quale sta cercando di rispondere (Levrini &

diSessa, 2008). La formazione di un concetto è un processo per cui si sviluppano strategie per ‘osservare’ e ‘integrare’ le osservazioni al fine di ottenere l’informazione necessaria. Queste strategie si articolano attraverso due componenti strutturali principali:

- 1) L’insieme delle *readout strategies*, ovvero le modalità e le strategie con cui un individuo riesce a leggere una determinata situazione ed estrarne informazioni. In generale, possedere più strategie per osservare lo stesso fenomeno in contesti diversi e l’abilità di valutare l’affidabilità di ciascuna a seconda della situazione presuppongono la padronanza di strategie di coordinazione. Quando si parla di *readout*, la coordinazione assume due sfaccettature fondamentali (diSessa & Sherin, 1998; Levrini & diSessa, 2008):

- a) *Integration*: nell’analizzare una determinata situazione è spesso necessario raccogliere, selezionare o mettere in relazione più osservazioni o aspetti per ricavare l’informazione richiesta. Perciò, a partire dalle informazioni osservabili, l’integrazione consente di raccogliere dati, selezionarli e combinare osservazioni al fine di fornire spiegazioni o previsioni sui fenomeni studiati.
- b) *Invariance*: attraverso casi ed esperienze diverse, la conoscenza che permette l’estrazione dell’informazione deve portare, in modo affidabile, alla stessa conclusione. In altre parole, l’invarianza si occupa di come le osservazioni in condizioni diverse ci permettano di determinare le stesse informazioni. Senza questo elemento, si rischia di interpretare il concetto come confuso o incoerente.

Dunque, *integrazione* e *invarianza* sono le due principali specifiche tecniche che definiscono la prestazione di una *coordination class* e permettono di descrivere la coordinazione all’interno di una stessa situazione (*integration*) e attraverso diverse situazioni (*invariance*).

- 2) La *causal net* (o *inferential net*) è l’insieme delle conoscenze, strategie di ragionamento ed inferenze che, a partire dalle informazioni osservabili, consentono di stabilire quando e come alcune osservazioni siano rilevanti rispetto all’informazione che si vuole determinare, così da fornire spiegazioni o fare previsioni sui fenomeni studiati. Questa rete (*net*) dev’essere abbastanza ampia da chiamare in causa un numero di conoscenze rilevante. In molti casi, la rete causale corrisponde approssimativamente a ciò che le persone si aspettano intuitivamente dalla causalità,

soprattutto nelle analisi empiriche. La causalità svolge quindi un ruolo fondamentale nel nostro modo di valutare ciò che ci circonda.

La relazione che connette le *readout strategies* e la *causal net* è molto profonda. Ad esempio, per determinare una certa quantità, cerchiamo aspetti e strategie che risultano collegati tra loro attraverso la rete causale. In generale, le *readout strategies* e la *causal net* dovrebbero coevolvere man mano che avviene l'apprendimento, portando a episodi di '*conceptual bootstrapping*', in cui le assunzioni causali guidano l'apprendimento di nuove strategie di lettura. Viceversa, in altre occasioni alcuni accorgimenti, o talvolta intuizioni, possono spingere a riformulare la rete causale. In generale, le caratteristiche di una di queste due componenti avranno effetti importanti su come l'altra funziona e si sviluppa. (diSessa & Sherin, 1998, p. 1177)

L'essenza delle classi di coordinazione risiede proprio qui: applicare un insieme di strategie sistematicamente connesse per ottenere una classe di informazioni. Se uno sostiene di aver identificato una *coordination class*, sia le *readout strategies* sia la *causal net* devono essere specificate. Dunque, l'appropriazione di un concetto non si riduce alla conoscenza della definizione corretta, ma implica il saper coordinare in modo robusto le osservazioni e le inferenze prodotte nei diversi contesti, e ciò richiede di disporre di una *classe di coordinazione* sufficientemente sviluppata.

4.2.2. Processi attraverso i quali una coordination class viene costruita

La teoria delle *coordination class* è inquadrata in una prospettiva più ampia, ovvero la "*complex knowledge system*". In questa visione, i concetti sono sistemi ampi e finemente organizzati, che *coordinano* in modo efficace l'attivazione e l'uso di numerosi elementi specifici in funzione del contesto. L'apprendimento di un concetto è visto come un processo di selezione e di "*coordinamento di un gran numero di elementi in molti modi diversi*" (Levrini & diSessa, 2008, p.3). Da un lato, poiché i concetti sono sistemi che si manifestano parzialmente in un determinato contesto, la loro valutazione risulta più difficile. Tuttavia, tale difficoltà è un vincolo con cui è necessario confrontarsi, piuttosto che qualcosa che possa essere facilmente superato o un problema intrinseco della teoria. Uno dei vantaggi di una visione basata sui sistemi complessi, affermano gli autori, è che l'apprendimento può essere tracciato con un livello di granularità fine usando dati di processo, piuttosto che dati istantanei di tipo "prima e dopo" (ibid., p.3). Nella prospettiva costruttivista, di cui le classi di

coordinazione fanno parte, è importante indagare il legame fra le *coordination class* e le concezioni intuitive nel momento in cui si introducono concetti fisici durante l'insegnamento scolastico. Assumendo come riferimento principale il framework della *Knowledge in Pieces* (KiP) sviluppato da diSessa (1993), che descrive il ricco sistema di conoscenze implicite alla base della comprensione ingenua del mondo fisico analizzato attraverso elementi quali i *sense of mechanism* e i *p-prims*, gli autori (diSessa & Sherin, 1998) formulano specifiche aspettative empiriche sulle concezioni intuitive. La prima è che le strategie percettive, definite come *low-level readout strategies*, nel momento in cui ci si immerge nella conoscenza fisica, devono essere riorganizzate e, in parte, estese. Ciononostante, questa non è la difficoltà principale nel conseguire un cambiamento concettuale. Prima dell'istruzione è già presente il *naive sense of mechanism* (diSessa, 1993), una causalità ingenua ricca e flessibile composta da molti elementi relativamente semplici, ovvero i *p-prims*, e solo debolmente organizzati. Perciò, nel momento in cui uno studente si affaccia allo studio di un problema di fisica, non emerge una carenza specifica nel riconoscere aspetti fisicamente rilevanti della situazione. Il framework delle *Coordination Class* assume qui il ruolo di estensione naturale del lavoro di diSessa (1993), in quanto il *sense of mechanism*, nelle sue fasi iniziali, funziona come una *causal net* con cui i discenti fanno *bootstrapping* verso i concetti appresi durante l'insegnamento della fisica: gli studenti iniziano a utilizzare il concetto in alcuni contesti, ma possono non essere ancora in grado di farlo funzionare correttamente in altri (Levrini & diSessa, 2008). Dunque, la difficoltà principale sta nel costruire, ampliare e riorganizzare la *causal net*. Infatti, poiché la causalità intuitiva è molto ricca, si incorre nel rischio che vengano considerati rilevanti troppi elementi o quelli non corretti. I problemi principali, perciò, si manifestano come mancanza di *integration*, ma soprattutto come mancanza di *invariance*, perché lo studente può preferire l'utilizzo di p-prims diversi in contesti diversi. Tali p-prims, essendo piccoli e isolati, non possono essere trattati singolarmente come delle *coordination classes* ma possono essere parte della costruzione di una *naive coordination class*. I p-prims si coordinano fra loro e vanno a definire una prima *causal net*, la quale coincide in larga misura con il *naive sense of mechanism*, inteso come l'insieme dei p-prims disponibili allo studente che vengono attivati a seconda del problema.

Sebbene la teoria delle *coordination class* ammetta che, nella costruzione di un nuovo concetto, possano essere creati elementi completamente nuovi, è importante comprendere in che modo le conoscenze pregresse contribuiscano o ostacolino la costruzione di una

coordination class (Levrini & di Sessa, 2008). Nel momento in cui discutiamo l'interazione con le conoscenze pregresse, il processo di costruzione di una *classe di coordinazione* coinvolge due processi molto generali:

1. *Incorporation*: Consiste nel selezionare alcuni elementi della concettualizzazione preesistente all'interno di una codifica parziale del nuovo concetto, dove il termine 'parziale' sottolinea che tali elementi verranno impiegati solamente in alcune circostanze;
2. *Displacement*: Consiste nella rimozione di alcuni elementi della concettualizzazione pregressa che, nelle fasi iniziali, possono prendere il controllo in modo inappropriato del funzionamento della *coordination class* in specifiche situazioni. Un esempio tipico è l'inferenza: “*se c'è movimento, allora deve esserci una forza*”, spesso utilizzata dai principianti per stabilire presenza e intensità di una forza. Poiché questa relazione è scorretta, essa deve essere spostata (almeno) dal contesto del moto uniforme, in cui non è necessaria una forza risultante. (ibid. p., 8)

4.2.3. Elementi problematici nella creazione di una nuova Classe di Coordinazione

La teoria delle classi di coordinazione prevede che gli studenti, nell'apprendere un concetto, possano incontrare due difficoltà tipiche:

1. Il problema dello *span*: “consiste nel disporre di risorse concettuali adeguate per applicare il concetto in un'ampia varietà di contesti pertinenti. Ad esempio, si è in grado di determinare le forze sia nella situazione di un oggetto lanciato, sia in quella di un libro appoggiato su un tavolo? L'estensione equivale ad avere, o a essere in grado di produrre, proiezioni concettuali in una gamma sufficientemente ampia di circostanze.” (Levrini & diSessa, 2008, p.4)
2. Il problema dell'*alignement*: “consiste nella capacità di determinare la stessa informazione caratteristica del concetto attraverso circostanze diverse. Si tratta di un principio di buona formazione o di coerenza, secondo cui “ciò che si vede” non dovrebbe variare quando si utilizzano metodi diversi per vederlo. In termini di proiezioni concettuali, l'allineamento implica che ciascuna proiezione concettuale conduca agli stessi risultati. Gli studenti spesso ritengono di essere in grado di determinare le forze in situazioni diverse; tuttavia, per ragioni legate alla specificità delle situazioni, possono fallire. Uno studente può riconoscere adeguatamente le forze

in situazioni di movimento, ma non riuscire a identificarle correttamente in situazioni statiche. Ad esempio, uno studente può ragionare, nel caso particolare della pressione dell'aria, che essa agisce ugualmente in tutte le direzioni e che, di conseguenza, il suo valore risultante è sempre nullo. In questo caso specifico, lo studente ha appreso che la pressione agisce ugualmente in tutte le direzioni e conclude erroneamente che la pressione dell'aria debba essere sempre zero; in altri casi, lo stesso studente potrebbe invece determinare le forze in modo più conforme al modello normativo.” (Levrini & diSessa, 2008, p.4)

Nel loro insieme, queste due definizioni mostrano che i problemi di *span* e di *alignment* riguardano l'uso operativo del concetto in una pluralità di contesti. In questa prospettiva, per conoscere un concetto non basta sapere la definizione, ma occorre possedere la capacità di attivare conoscenze differenti a seconda della situazione che si sta osservando. L'*alignment* riguarda il grado di coerenza e coordinazione tra queste proiezioni. Chiamiamo *concept projection* l'insieme delle risorse attivate in una specifica applicazione del concetto è definito. Dunque, la teoria delle *Coordination Class* è una teoria “bootstrapping”, in cui gli studenti iniziano a usare il concetto in alcuni contesti ma potrebbero non riuscire a farlo funzionare correttamente in altri. Molti aspetti del concetto, specifici del contesto, rimangono nelle diverse “proiezioni” del concetto che considerate nel loro insieme, danno luogo alla competenza. (Levrini & diSessa, 2008, p. 4). Di conseguenza, i contesti specifici hanno un ruolo centrale all'interno della teoria sotto due diversi aspetti. Da un lato, sono i luoghi in cui si svolge il *bootstrapping*, attraverso cui si amplia lo *span* e si rafforza l'*invarianza* del concetto stesso. Dall'altro, sono anche i luoghi in cui prendono forma e si stabilizzano proiezioni diverse che continuano a far parte del concetto anche a livelli di competenza avanzata.

Nella Tabella 4.2, si riportano gli elementi principali della teoria che operativamente hanno fatto parte dell'analisi proposta nel seguente capitolo.

Tabella 4.2: Organizzazione dei concetti all'interno della teoria delle classi di coordinazione.

Architettura	<i>Readout strategies</i> : insieme di modalità e strategie con cui un individuo riesce a leggere una determinata situazione ed estrarne informazioni. Possedere più strategie per osservare lo stesso fenomeno in contesti diversi e l'abilità	Coordinazione come <i>Integration</i> : a partire dalle informazioni osservabili, forma di coordinazione che consente di raccogliere dati, selezionarli e combinare osservazioni al fine di fornire spiegazioni o previsioni sui fenomeni studiati.
---------------------	---	---

	di valutare l'affidabilità di ciascuna a seconda della situazione presuppongono la padronanza delle strategie di coordinazione.	Coordinazione come <i>Invariance</i> : forma di coordinazione per cui, a partire da osservazioni condotte in condizioni diverse, l'estrazione dell'informazione conduce in modo affidabile alla stessa conclusione, garantendo coerenza nell'interpretazione del concetto.
	<i>Causal net</i> : l'insieme delle conoscenze, strategie di ragionamento e inferenze che, a partire dalle informazioni osservabili, consentono di stabilire quando e come alcune osservazioni siano rilevanti rispetto all'informazione che si intende determinare, così da fornire spiegazioni o fare previsioni sui fenomeni studiati.	
Costruzione della classe di coordinazione	Focus di ricerca: comprendere in che modo le conoscenze pregresse contribuiscano o ne ostacolino la costruzione.	Processo di costruzione <i>Incorporation</i> : selezionare alcuni elementi della concettualizzazione preesistente all'interno di una codifica parziale del nuovo concetto.
		Processo di costruzione <i>Displacement</i> : rimozione di alcuni elementi della concettualizzazione pregressa che, nelle fasi iniziali, possono, inappropriatamente, prendere il controllo del funzionamento della coordination class in specifiche situazioni.
Elementi problematici	Nella costruzione di una coordination class, si incontrano due possibili problemi che riguardano quali risorse si attivano e come in una specifica applicazione del concetto è definito (<i>concept projection</i>).	Il <i>problema dello span</i> : consiste nel disporre di risorse concettuali adeguate per applicare il concetto in un'ampia varietà di contesti pertinenti.
		Il problema dell' <i>alignement</i> : consiste nella capacità di determinare la stessa informazione caratteristica del concetto attraverso circostanze diverse. In termini di proiezioni concettuali, l'allineamento implica che ciascuna proiezione concettuale conduca a risultati identici.

4.3. La ricerca in didattica della fisica e Classi di Coordinazione

In questo studio, il framework delle *Coordination Class* riveste un ruolo teorico centrale nell'analisi dei processi di costruzione concettuale degli studenti. Esso risulta particolarmente pertinente in quanto consente di interpretare le difficoltà che emergono quando gli studenti si confrontano con i limiti della classe di coordinazione della località. Nella vita quotidiana e durante il percorso scolastico, numerosi fenomeni fisici vengono interpretati e spiegati attraverso catene causali che si propagano nello spazio e nel tempo secondo schemi locali e

deterministici. Tale modalità interpretativa, generalmente funzionale nel dominio della fisica classica, costituisce una risorsa cognitiva stabile e largamente consolidata. Tuttavia, l'introduzione dell'entanglement quantistico mette in crisi questa classe di coordinazione: l'assunto di località non consente più di rendere conto di specifici contesti empirici, che, nel percorso didattico da noi proposto, sono rappresentati dalle evidenze sperimentali relative alla violazione della disuguaglianza di Bell. Durante la fase di analisi è emerso che i ragionamenti degli studenti seguivano particolarmente bene una dinamica di *span* e *alignment* nella costruzione del modello di spiegazione quantistica e, per questo motivo, si è deciso di utilizzare questo framework per l'analisi dei dati. L'ipotesi è che tale percorso possa favorire una ristrutturazione della rete esplicativa degli studenti, conducendoli a considerare l'entanglement non come un'anomalia, bensì come una risorsa concettuale necessaria per interpretare in modo coerente il fenomeno osservato. Dunque, si esplora la possibilità che i processi di riorganizzazione dell'*inferential net*, mobilitata dagli studenti attraverso trasformazioni delle *readout strategies*, della *causal net* e del principio regolativo che ne sostiene l'allineamento, conducano fino alla messa in crisi dell'assunto di località. In questa prospettiva, la località può essere intesa come una classe di coordinazione che media la transizione tra un assetto interpretativo di tipo classico e uno di tipo quantistico. La caratterizzazione operativa di tali processi e delle loro eventuali traiettorie costituirà oggetto dell'analisi dei dati.

Alla luce di tali considerazioni, l'analisi dei dati è stata condotta per rispondere alla seguente domanda:

In che modo gli studenti coordinano e trasformano le proprie classi di coordinazione nel corso del Tutorial sui correlati di Bell, quando la località viene progressivamente messa sotto pressione dai diversi vincoli introdotti nel percorso?

Capitolo 5

Analisi e Discussione dei Risultati

5.1. Analisi dei Dati

5.1.1. Il caso di Ivan

Come si vedrà nell'analisi che segue, nel corso dell'intervista Ivan ricostruisce i concetti “a partire da ciò che ricorda”, collegando per associazione i nodi del percorso (entanglement, interazione, causa comune) e mostrando fin da subito un atteggiamento esplorativo più che definitorio. Nelle prime fasi, quando ripercorre il ragionamento, attinge a risorse del pensiero classico, ma fatica a tenere fermo che cosa sia davvero rilevante: passa da esempi intuitivi (vicinanza, comunicazione, “stesso ambiente” come Bologna/supermercato) a tentativi di spiegazione e spesso ha bisogno delle domande dell'intervistatrice per non perdere il filo.

Quando lo scenario si complica e aumentano le combinazioni possibili (ad esempio due supermercati “destra/sinistra” o la distanza tra galassie), emerge un punto di rottura: le spiegazioni classiche che funzionavano nei casi semplici (influenza con un segnale che “viaggia” oppure causa comune tipo menù/programma) non riescono più a rendere conto di tutti i risultati. Nella fase di modellizzazione, invece, Ivan si orienta con chiarezza seguendo il vincolo $S \leq 3$ come regola decisiva: se c'è solo un “programma” condiviso tra le scatole, il punteggio non può superare quella soglia.

Infine, di fronte alla violazione sperimentale, individua nettamente che cosa impedisce di vincere (la programmazione come causa comune) e motiva il passaggio a una spiegazione quantistica, richiamando l'entanglement come ciò che consente di superare il vincolo. Il passaggio dal pensiero classico a quello quantistico avviene dunque attraverso il ruolo, forse, della modellizzazione.

In seguito, mostriamo la dinamica del ragionamento usando come lente la dinamica delle classi di coordinazione.

Prima parte: Località, Correlazione e Spiegazione

L'intervista si apre chiedendo allo studente di parlare del concetto di 'località' (1.a). Nelle parole di Ivan:

Va bene, allora, faccio un po' fatica con i nomi e con le definizioni, però mi ricordo sicuramente che era legato al problema dell'entanglement in sé, e quindi capire il concetto dell'interazione reciproca, potremmo dire, oppure... della causa comune... La località mi pare che fosse legata appunto all'interazione reciproca, se non mi sbaglio, perché proprio il nome in sé non mi ricordo a cosa si riferisce... proprio come nome intendo... però concettualmente se non mi sbaglio era legato a questo.

Fin da subito si nota il posizionamento che Ivan assume rispetto al compito proposto. Le espressioni “*faccio un po' fatica con i nomi e con le definizioni*”, “*se non sbaglio*” e “*non mi ricordo*” suggeriscono come lo studente non sta tentando di richiamare una definizione formale o scolastica del termine, spesso presente nel contratto didattico tra alunno e docente²¹. Al contrario, esplora la definizione di località collegandola ad altri elementi visti nel corso (“*era legato al problema dell'entanglement*”, “*capire il concetto dell'interazione reciproca... oppure... della causa comune...*”, “*mi pare che fosse legata all'interazione reciproca*”). Questo suggerisce che sia in corso una ricostruzione personale del concetto, guidata da associazioni e connessioni che lo studente attiva in modo autonomo.

Parlando del concetto di località nel caso classico, questo viene inizialmente introdotto attraverso gli elementi del corso precedentemente citati, che tuttavia non vengono esplicitamente messi in relazione tra loro.

La situazione evolve quando viene chiesto a Ivan di chiarire cosa intenda per 'località' nel caso classico. Lo studente risponde ricorrendo a immagini di carattere intuitivo, come la “*vicinanza*”, “*un'interazione con delle onde*” e le “*telecomunicazioni*”. Nelle sue parole:

Classicamente c'è una relazione data dalla vicinanza. Per esempio, un'interazione con delle onde... non so... qualcosa del genere, come le telecomunicazioni immagino!

²¹ Baccaglini-Frank et al. (2017) parlano di contratto didattico come l'insieme delle reciproche aspettative (sistema di diritti e doveri reciproci) che insegnante e studenti accettano e rispettano, per lo più in modo implicito, riguardo al sapere matematico in gioco nell'attività in classe. Nel nostro caso parliamo di sapere scientifico più in generale.

In questa risposta emergono primi elementi che possono essere letti come possibili *readout strategies di basso livello*. Ivan sembra selezionare aspetti intuitivamente salienti, come la vicinanza spaziale e l'idea di “un'interazione [mediata da] onde”, per rendere riconoscibile il concetto di località nel mondo fisico. Nell'esempio delle “telecomunicazioni” si intravede un primo nucleo inferenziale: l'interazione tra elementi spazialmente separati non è concepita come immediata, bensì mediata da qualcosa che si muove nello spazio. Tuttavia, questa struttura non è ancora articolata in modo esplicito e rimane a livello di esempio evocativo.

Dunque, questo primo intervento suggerisce che “vicinanza” e “interazione” svolgano un ruolo centrale nella prima formulazione che Ivan offre del concetto di località. Le *readout strategies* attivate orientano l'attenzione verso configurazioni in cui la relazione tra elementi è resa possibile dalla prossimità spaziale o dalla presenza di un mezzo fisico.

Viene poi chiesto allo studente che cosa si intenda per ‘correlazione’ (1.b). Ivan richiama alcuni degli elementi visti durante il corso e, in particolare, collega la correlazione alla spiegazione causa comune. Nelle parole dello studente:

*Ah beh, la correlazione era l'altro aspetto che dicevamo! Era la **causa comune**... se non mi sbaglio... cioè... [...] si, è qualcosa che non dipende direttamente dalla relazione tra A e B, ma è legato all'ambiente... a qualcosa di esterno e circostante, che influenza A e B. Ad esempio, avevamo detto, sempre prendendo l'esempio dei due [Alice e Bob] che vivono a Bologna, che vanno entrambi nello stesso supermercato perché offre un solo prodotto.*

La correlazione viene introdotta come “l'altro aspetto” e sovrapposta in maniera esplicita alla spiegazione di tipo causa comune.

Questo è ancor più evidente quando Ivan la definisce come “qualcosa che non dipende direttamente dalla relazione tra A e B, ma è legato all'ambiente... a qualcosa di esterno e circostante che influenza A e B”. La correlazione viene dunque tematizzata autonomamente senza riferimento esplicito alla località. Le *readout strategies* attivate presentano alcune analogie con quelle precedentemente mobilitate, ma assumono qui una configurazione distinta: non si tratta semplicemente di prossimità spaziale, bensì di condivisione di un contesto ambientale. Espressioni come “vivono a Bologna” e “vanno nello stesso supermercato” orientano l'attenzione verso un ambiente comune che funge da elemento esplicativo della correlazione.

La struttura inferenziale che emerge è coerente con la spiegazione causa comune: la correlazione tra A e B deriva dall'influenza di un fattore esterno condiviso. Solo successivamente, i termini astratti A e B vengono istanziati nell'esempio concreto di Alice e Bob, rendendo più esplicita la configurazione relazionale descritta in precedenza.

Nel confronto con quanto emerso in precedenza sulla località, si osserva che i due concetti (località e correlazione) vengono inizialmente tematizzati come distinti tra loro. Tuttavia, in entrambi i casi Ivan mobilita una risorsa di selezione centrata sulla configurazione spaziale: per la località attraverso la prossimità o l'interazione mediata, per la correlazione attraverso la condivisione di un ambiente. In entrambi i casi, Ivan seleziona informazioni in base alla configurazione spaziale dei sistemi coinvolti, sebbene le strutture esplicative che ne derivano siano differenti.

Successivamente, viene chiesto ad Ivan di fare un esempio pensando a due eventi correlati in fisica o anche in un contesto più generale. Nelle sue parole:

La correlazione, detta in modo banale, sarebbero due cose che sono in relazione... e quindi cioè... ehm... l'inflazione e l'aumento dei prezzi per esempio... lì c'è una correlazione. [...] Diciamo che c'è un rapporto causale. [...] C'è una determinata causa, quindi un riconoscibile effetto.

In questo passaggio, la correlazione viene inizialmente formulata come “due cose che sono in relazione” e successivamente utilizzata in un esempio specifico (“l'inflazione e l'aumento dei prezzi, per esempio”). L'espressione “detta in modo banale” suggerisce che Ivan è consapevole di ricorrere a una formulazione percepita come intuitiva o non specialistica. L'esempio dell'inflazione e dell'aumento dei prezzi può essere letto come una *readout strategy*: Ivan seleziona una coppia di fenomeni socialmente noti e percepiti come connessi per rendere osservabile la correlazione in un contesto familiare.

Contestualmente, la *causal net* si esplicita con maggiore chiarezza rispetto agli interventi precedenti. Ivan parla infatti di “rapporto causale”, di “determinata causa” e di “riconoscibile effetto”, rendendo esplicita una struttura inferenziale in cui la correlazione è spiegata attraverso una relazione di causa-effetto. La causalità non è più soltanto implicita o legata a un ambiente condiviso, ma diventa il criterio esplicito per rendere intelligibile la correlazione.

Una volta richiamati i concetti di ‘località’ e ‘correlazione’, viene introdotto l’esperimento mentale sulla perfetta correlazione tra i pasti di Alice e Bob, che abitano entrambi a Bologna e sono vicini di casa (1.c). Viene quindi chiesto a Ivan che cosa significhi e perché, secondo lui, sia importante ‘assumere la località’ in questo contesto specifico. Egli risponde:

Ok... ehm... assumendo la località, quindi, abbiamo che c’è l’influenza dell’uno sull’altro. [...] vivono entrambi a Bologna, quindi siccome sono nello stesso ambiente c’è una probabile località appunto. In due case vicine addirittura, quindi, lo fa presupporre ancora di più. [...] ricordo alcuni degli esempi che avevamo fatto... sono amici, si dicono cosa mangiano, e quindi prima compra uno e poi l’altro compra la stessa cosa, per esempio.

Ivan inizialmente riprende il linguaggio della domanda posta (“*assumendo la località*”); tuttavia, non tratta la località come un principio formale. Piuttosto, la mobilita come risorsa per giustificare la perfetta correlazione fra i pasti di Alice e Bob.

Nelle parole di Ivan si osserva una chiara attivazione di *readout strategies* incentrate sulla configurazione spaziale e relazionale: “*vivono entrambi a Bologna*”, “*sono nello stesso ambiente*”, “*in due case vicine*”, “*sono amici*”. Tali elementi selezionano informazioni ambientali e relazionali che rendono plausibile un’interazione tra i due sistemi. La *causal net* si struttura esplicitamente in termini di ‘influenza diretta’: “*abbiamo che c’è l’influenza dell’uno sull’altro*”. La correlazione viene spiegata attraverso possibili canali di interazione — ambiente condiviso, vicinanza fisica, comunicazione — che configurano una relazione causale tra Alice e Bob. La coordinazione del concetto risulta qui efficace nel caso di sistemi spazialmente prossimi e comunicanti, ma appare limitata a configurazioni di influenza diretta. Ciò suggerisce che lo *span* della località, in questa fase, sia limitato a contesti in cui l’interazione tra i sistemi è resa osservabile attraverso canali concreti di contatto o comunicazione.

A questo punto, Ivan è invitato a riorganizzare le possibili spiegazioni della perfetta correlazione tra le cene di Alice e Bob. Alla richiesta di “*schematizzazione*”, egli risponde

Si cioè, lo avevamo detto prima, qualcosa parte da A e porta un effetto in B... ehm... però c’è un passaggio di tempo in mezzo... cioè, non c’è un effetto immediato sul secondo.

In questo primo momento, Ivan riattiva esplicitamente la struttura inferenziale dell'influenza diretta: un processo che parte da A, produce un effetto in B (*"qualcosa parte da A e porta un effetto in B"*) e implica una non istantaneità (*"c'è un passaggio di tempo in mezzo... cioè, non c'è un effetto immediato sul secondo"*). La *causal net* risulta articolata in termini di relazione causa–effetto mediata nel tempo.

Sollecitato a richiamare un'ulteriore tipologia di spiegazione, Ivan aggiunge:

[Durante il corso l'abbiamo chiamata 'influenza'... c'è un altro tipo di spiegazione che hai citato prima, quale?] *Si che è quella del supermercato per esempio. [...] il concetto che c'era dietro è che c'è un motivo... un terzo motivo, che non dipende né da Alice né da Bob, appunto... per cui entrambi scelgono quel determinato cibo, quindi entrambi fanno quella determinata cosa.* [Ok, questo tipo di spiegazione si chiamava 'causa comune']

In questo passaggio viene esplicitamente introdotta la spiegazione di tipo causa comune: la correlazione non è più ricondotta a un'interazione tra A e B, ma a un *"terzo motivo"* esterno che determina entrambe le scelte. La rete causale si riorganizza quindi attorno a una diversa spiegazione, nella quale l'origine della correlazione è attribuita a un fattore indipendente dai due sistemi.

In questa fase si osserva un processo di *incorporation*: la spiegazione causa comune viene esplicitamente organizzata accanto a quella di influenza diretta come seconda configurazione inferenziale possibile per spiegare la correlazione. L'operazione di *"schematizzazione"* richiesta dall'intervistatrice porta Ivan a distinguere e stabilizzare due reti causali alternative, una in cui *"qualcosa parte da A e porta un effetto in B"*, e una in cui interviene *"un terzo motivo, che non dipende né da Alice né da Bob"*. Le *readout strategies* restano ancorate agli elementi contestuali già mobilitati (Bologna, la vicinanza, il supermercato), ma vengono ora coordinate con strutture inferenziali differenti: nel primo caso orientano verso una relazione diretta tra A e B, nel secondo verso un fattore esterno comune che agisce su entrambi. In questo processo, la località continua a svolgere un ruolo organizzatore nell'orientare la selezione delle informazioni rilevanti nel contesto; al tempo stesso, l'esplicitazione delle due configurazioni causali amplia e articolazione della rete inferenziale attraverso cui Ivan interpreta la correlazione nel caso proposto.

Seconda parte: Influenza e Causa comune alla prova

Nel momento in cui si modifica il contesto in cui vivono Alice e Bob (2.a), collocandoli “*su due galassie separate*”, si introduce un nuovo scenario che può essere letto come un test dello span della località. Alla richiesta di argomentare se le tipologie di spiegazione ‘influenza’ e ‘causa comune’ siano ancora valide, Ivan afferma::

Ok, beh prima avevo già detto in realtà che, mettendoli su due galassie separate, già entra in gioco il problema della località, per cui diventa praticamente impossibile dare una spiegazione di carattere locale. Per cui... ehm... adesso questa è più una reminiscenza, però mi ricordo che mettevamo in dubbio più che altro la causa comune, in realtà... perché potrebbe esserci ancora potenzialmente qualcosa che lega questi due eventi.

Ivan osserva che la distanza intergalattica rende “*praticamente impossibile*” una “*spiegazione di carattere locale*”. L’espressione “*entra in gioco il problema della località*” suggerisce che la località non operi più come risorsa esplicativa efficace, ma come vincolo che limita le spiegazioni disponibili. La configurazione inferenziale fondata sull’influenza diretta, che nel caso precedente risultava coerente con la vicinanza spaziale, non è più proiettabile quando tale vicinanza viene radicalmente meno. Di fronte a questo vincolo, Ivan tenta di richiamare la spiegazione causa comune, ma lo fa con esitazione (“*adesso questa è più una reminiscenza*”). Il riferimento al fatto che “*mettevamo in dubbio più che altro la causa comune*” e l’ipotesi che “*potrebbe esserci ancora potenzialmente qualcosa che lega questi due eventi*” indicano che la configurazione alternativa non è immediatamente articolata in una rete causale stabile nel nuovo contesto. L’idea di “*qualcosa che lega*” rimane indeterminata e non viene sviluppata in una struttura inferenziale esplicita.

Dunque, in questo passaggio non si osserva l’attivazione di una nuova spiegazione coerente, ma una difficoltà nella coordinazione delle risorse disponibili. Il cambiamento di contesto mette così alla prova lo *span* della località: la coordinazione, così come era stata finora articolata, non riesce a sostenere stabilmente il ragionamento quando vengono meno le condizioni di prossimità spaziale. Parallelamente, l’incertezza nel riorganizzare la causa comune suggerisce una tensione tra le configurazioni inferenziali disponibili, che può essere letta come un possibile *disallineamento* interno alla rete.

A partire da questa riflessione, l'intervistatrice ha aggiunto una domanda per indagare la relazione tra 'causa comune' e 'località'. Viene quindi chiesto ad Ivan se causa comune e località sono concetti connessi tra loro:

Cioè, allora, penso io... intuitivamente... mi verrebbe da dire di no. Però, ragionandoci, effettivamente... Quindi effettivamente un po' di località ci dovrà essere comunque. [...] cioè... entrambi vanno nello stesso ristorante, però chiaramente se loro non sono entrambi vicini al ristorante non ci vanno entrambi... quindi un minimo dovranno avere qualcosa in comune a livello spaziale, a livello locale... se no appunto questa regola logica non sussiste.

In un primo momento, "intuitivamente", Ivan non riconosce una connessione tra causa comune e località, segnalando che le due configurazioni esplicative precedentemente attivate non sono ancora coordinate in modo esplicito nel suo quadro concettuale. La svolta avviene quando, "ragionandoci", analizza la struttura della spiegazione causa comune: "se c'è una causa comune dovrà esserci qualcosa che li mette in comune ovviamente questi due eventi". Qui Ivan esplicita la *causal net* tipica della causa comune.

A partire da questa struttura causale, egli rilegge il "qualcosa che li mette in comune" in termini spaziali: "entrambi vanno nello stesso ristorante... se loro non sono entrambi vicini al ristorante non ci vanno entrambi... quindi un minimo dovranno avere qualcosa in comune a livello spaziale, a livello locale". La risorsa "ristorante" consente di proiettare in questo contesto specifico la readout che attiva la ricerca di un terzo motivo: al contempo, la configurazione causale viene riorganizzata, incorporando un vincolo di località. La *causal net* della spiegazione causa comune non viene modificata nella sua struttura, ma viene coordinata con l'idea che tale fattore terzo debba operare entro una configurazione spaziale condivisa.

Dal punto di vista della *Coordination Class Theory*, questo segmento mostra quindi una riorganizzazione della *rete inferenziale*: la spiegazione causa comune viene integrata con il principio di località, che assume il ruolo di condizione strutturale della *causal net*. Le *readout strategies* (ristorante, vicinanza) e la rete causale vengono così progressivamente allineate, nel tentativo di stabilizzare una relazione coerente tra causa comune e località.

A questo punto l'intervistatrice insiste, chiedendo ancora una volta ad Ivan di provare a spiegare il legame tra 'causa comune' e 'località'. Nelle parole di Ivan:

[Perché la causa comune dovrebbe avere caratteristiche locali?] Più che altro lo associo al fatto che entrambi vanno nel negozio di sinistra... ed è quel preciso negozio magari. Vabbè che sono su due galassie separate, però nell'immaginazione questo non implica nulla. [...] Eh [la località] sta appunto nel fatto che è lo stesso negozio, quindi appunto su quello che propone il negozio. [...] Ah beh, se lo stesso negozio propone la stessa cosa [stesso piatto] è come lo stesso luogo, in un certo senso... o comunque ci doveva essere una comunicazione perché si sappia che è la stessa cosa. [...] Eh... il punto è che [il testo] dice che [la scelta del pasto] avviene nello stesso istante, quindi effettivamente [i due supermercati] dovrebbero essere in comunicazione. [...] [C'è un'idea di località sotto forma]... di una programmazione.

In un primo momento, Ivan continua ad associare la località alla *readout strategy* della vicinanza spaziale (“entrambi vanno nel negozio di sinistra... ed è quel preciso negozio”), mantenendo come riferimento la coincidenza di luogo. L'espressione “nell'immaginazione questo non implica nulla” introduce però un passaggio significativo: la distanza intergalattica viene momentaneamente messa tra parentesi, e l'attenzione si sposta su ciò che rende il caso rilevante dal punto di vista esplicativo. Quando Ivan afferma che “se lo stesso negozio propone la stessa cosa è come lo stesso luogo”, costruisce un'equivalenza funzionale tra “stesso luogo” e “stessa cosa [stesso piatto]”. La località non è più legata soltanto alla coincidenza spaziale, ma viene riletta in termini di identità di ciò che viene proposto: è locale ciò che consente ai due eventi di condividere “la stessa cosa”, indipendentemente dalla distanza intergalattica.

In questo passaggio si osserva un processo di *alignment*: le *readout strategies* basate sul luogo e quelle basate sull'identità della scelta vengono coordinate all'interno della stessa struttura esplicativa. La spiegazione causa comune (un fattore C che agisce su A e su B) viene mantenuta, ma il modo in cui C è concepito viene riorganizzato alla luce della località così reinterpretata. Si osserva una riorganizzazione della *causal net*. Le *readout strategies* si trasformano (preciso negozio → stessa cosa → comunicazione → programmazione) e vengono coordinate con la stessa struttura causale della spiegazione causa comune. Lo *span* della località viene così messo alla prova nel nuovo scenario e ristrutturato: la località non coincide più soltanto con un riferimento spaziale diretto, ma con l'insieme di condizioni che rendono possibile che due eventi producano lo stesso risultato.

Il punto di crisi si manifesta quando Ivan, nel momento in cui sia Alice che Bob possono scegliere tra due supermercati (uno sulla destra ed uno sulla sinistra delle loro case), si domanda se valgono ancora le spiegazioni ‘influenza’ e ‘causa comune’ (2.b). Egli commenta:

[...] L'elemento problematico che avevo pensato anche durante la lezione è questo: com'è possibile che, se [nel supermercato di] destra e [in quello di] sinistra propongono lo stesso menù, [i supermercati a] destra e destra non lo propongono che in teoria sono lo stesso [la stessa catena di supermercati]. Cioè... almeno... da questo punto di vista... mi pare che non valga più nessuna delle due spiegazioni... proprio per questa ragione qua. Se presupponiamo ancora che ci sia una stessa lista [facendo riferimento a menù prestabiliti], comunque non si capisce come sia possibile che entrambi quelli di destra [sempre riferendosi ai supermercati] non la diano, invece a destra-sinistra [facendo riferimento al supermercato che per Alice si trova a destra e per Bob si trova a sinistra] e sinistra-destra sì [viceversa].

Ivan identifica esplicitamente un “*elemento problematico*”. Il punto critico riguarda la combinazione “*destra-destra*”: se Alice e Bob mangiano la stessa cosa quando vanno nei supermercati di “*destra-sinistra*” e “*sinistra-destra*”, non comprende perché “*destra-destra*” non produca la stessa perfetta correlazione dei pasti di Alice e Bob.

In questo passaggio Ivan tenta di proiettare nel nuovo scenario le strategie precedentemente stabilizzate (“*se presupponiamo ancora che ci sia una stessa lista*”), cioè la configurazione della spiegazione causa comune fondata su un fattore condiviso. Tuttavia, la proiezione non riesce: la stessa struttura causale ($C \rightarrow A$; $C \rightarrow B$) non è più sufficiente a rendere conto delle nuove combinazioni possibili. Per questo conclude che “*non valga più nessuna delle due spiegazioni*”.

Dal punto di vista della coordination class theory, questo momento segnala un fallimento di proiezione della classe nel nuovo contesto. Le *readout strategies* precedentemente attivate (stesso negozio, stessa lista, comunicazione, programmazione) non consentono più di organizzare una *causal net* coerente con l'insieme dei risultati possibili. Lo span della coordinazione della località viene qui messo radicalmente alla prova: la configurazione che funzionava negli scenari precedenti non riesce a coprire la nuova distribuzione dei casi. Non si tratta semplicemente di scegliere tra ‘influenza’ e ‘causa comune’, ma del riconoscimento che entrambe le spiegazioni, così come erano state

coordinate con la località, non sono più efficaci. Questo costituisce un vero momento di rottura e la *rete inferenziale* entra in una fase di riorganizzazione.

Terza parte: Il passaggio al modello e alla logica binaria

Nel passaggio alla modellizzazione tramite l'utilizzo delle scatole e dei joystick (3.a), Ivan commenta:

Il passaggio successivo era stato introdurre appunto il gioco di Bell per dimostrare la disequazione di Bell che dimostra che non c'è una correlazione legata alla causa comune appunto. [...] se non mi sbaglio... c'era a quel punto la tabella. Erano stati assegnati i vari punteggi, poi adesso non mi ricordo bene quali erano 0 e 1, ma comunque in generale il punto qual era... che in base ai punteggi ottenuti, per vincere, bisognava ottenere più di 3.

Ivan richiama immediatamente la “*disequazione di Bell*” come elemento decisivo. Non ne ricostruisce il funzionamento operativo, ma ne esplicita la funzione inferenziale: “*dimostra che non c'è una correlazione legata alla causa comune*”. La disequazione viene così integrata nella *causal net* come vincolo strutturale: se la spiegazione è di tipo causa comune, il punteggio non può superare 3; se supera 3, la spiegazione di tipo causa comune deve essere esclusa.

Si osserva qui un cambiamento significativo rispetto ai passaggi precedenti. Prima la riorganizzazione della rete avveniva attraverso la trasformazione delle *readout strategies* (luogo, stessa cosa, comunicazione, programmazione). In questo caso, invece, la ristrutturazione è guidata da un elemento formale introdotto dal modello: la disequazione opera come nodo inferenziale che ridefinisce la struttura delle inferenze possibili.

Anche le *readout strategies* cambiano: l'attenzione non è più rivolta alla configurazione spaziale o strutturale della situazione, ma all'esito numerico del gioco (“*bisognava ottenere più di 3*”). Il punteggio diventa il dato rilevante, mentre la tabella è richiamata solo come supporto procedurale (“*non mi ricordo bene*”), suggerendo che per Ivan ciò che conta è la regola inferenziale complessiva.

In questo senso, la disequazione non mette in crisi la coordinazione per difficoltà di proiezione in un nuovo contesto (come accadeva nel caso delle combinazioni destra-destra), ma introduce un vincolo formale che riorganizza la *causal net* associata alla spiegazione causa comune, escludendola in presenza di determinati risultati sperimentali.

Conclusi i passaggi matematici ed ottenuta la formula per il punteggio finale, Ivan riconosce la “*predeterminazione*” nell’ipotesi in cui le scatole di Alice e Bob, create dallo stesso produttore, possono implementare solo 4 programmi, si chiede ad Ivan perché questo modo di costruire il joystick racchiude la spiegazione ‘causa comune’. Nelle parole dello studente:

Ah beh sì, perché c'è una predeterminazione. Qui c'è una causa effetto evidente, c'è il programma per cui se uno gira per esempio a destra esce un numero e nell'altra esce predeterminato un altro numero.

In questo passaggio, Ivan rende esplicita la struttura della spiegazione per causa comune. Il “*programma*” viene identificato come fattore antecedente che determina sistematicamente gli esiti delle due scatole. La *causal net* assume una configurazione chiara: un elemento comune C agisce su entrambe le istanze producendo risultati correlati ($C \rightarrow A$; $C \rightarrow B$). La “*predeterminazione*” costituisce il principio esplicativo che garantisce la correlazione.

Sul piano delle *readout strategies*, l’attenzione si concentra sull’esistenza di un meccanismo interno condiviso che precede l’azione sul joystick e assegna gli esiti. Il dato rilevante non è più la configurazione spaziale o relazionale del contesto, ma la presenza di una struttura antecedente che fissa le risposte possibili.

Si osserva dunque un’invarianza nella coordinazione della spiegazione causa comune: pur variando il contesto (dal racconto dei supermercati alla modellizzazione con scatole e joystick), la rete inferenziale mantiene la medesima organizzazione.

Successivamente, ottenuti tutti i risultati possibili nel caso in cui il costruttore delle scatole vi abbia inserito all’interno dei computer, viene chiesto ad Ivan di esprimere sinteticamente i risultati in tabella:

Ah ok, in questo caso la somma delle probabilità è minore di 3. [Minore?] Minore uguale.

$$\frac{N_{SS}}{100} + \frac{N_{SD}}{100} + \frac{N_{DS}}{100} + \frac{N_{DD}}{100} \leq 3$$

Ivan riporta correttamente la formulazione della disuguaglianza di Bell, esplicitando il limite imposto dall’ipotesi di spiegazione causa comune. La formula viene così integrata nella struttura inferenziale come vincolo formale che collega l’ipotesi esplicativa (programma comune) a un risultato quantitativo (punteggio ≤ 3).

In questo estratto, Ivan applica correttamente la regola inferenziale già stabilita: la disuguaglianza funge da nodo formale della rete.

Quarta parte: La violazione della disuguaglianza di Bell

Nella fase conclusiva dell'intervista (4), dopo aver scritto la disuguaglianza di Bell, viene chiesto ad Ivan di commentare cosa succede nella Storia della Fisica dopo la scoperta di tale risultato. Egli afferma:

Che abbiamo visto che è stata violata questa disuguaglianza, sperimentalmente.

Gli viene quindi chiesto di ripensare al tutorial e a quali elementi bisogna cambiare per vincere al Gioco di Bell. Nelle parole dello studente:

Ah, cioè... l'elemento che non permette di superare il gioco è appunto la programmazione dei computer all'interno. Quindi bisognerebbe eliminare quello [la programmazione dei computer] e introdurre l'elemento quantistico, che presenta l'entanglement e che appunto viola la disuguaglianza di Bell.

Ivan identifica la “programmazione dei computer” come il meccanismo che vincola il punteggio al limite imposto dalla disuguaglianza (“l'elemento che non permette di superare il gioco”). La programmazione, in precedenza coordinata come spiegazione causa comune, viene ora esplicitamente indicata come l'elemento da eliminare per superare la soglia richiesta dal gioco. Questo passaggio suggerisce l'abbandono della configurazione causale fondata su un fattore comune antecedente che predetermina gli esiti. La *causal net* associata alla spiegazione causa comune, già formalizzata attraverso la disuguaglianza, viene riconosciuta come incompatibile con il superamento del limite.

L'introduzione dell’“elemento quantistico” e dell’“entanglement” è presentata come condizione per la violazione della disuguaglianza. L'entanglement entra nel ragionamento come nuovo principio esplicativo, capace di collegare l'ipotesi adottata al superamento del limite formale. L'operazione compiuta da Ivan riguarda la sostituzione dell'ipotesi che organizza la *causal net*: al posto della programmazione, come fattore comune antecedente, viene evocato l'entanglement.

Si osserva dunque una riorganizzazione della struttura inferenziale. Le *readout strategies* non vengono ulteriormente articolate; il cambiamento riguarda il principio che connette l'ipotesi esplicativa al risultato quantitativo.

In seguito, invitato a ripensare complessivamente al tutorial attraverso una domanda dell'intervistatrice, Ivan rende esplicito quale assunzione debba essere rimossa per vincere il gioco. Egli afferma:

[La tua è una risposta giusta, però c'è qualcosa di più forte.] *A me verrebbe da dire che... diciamo, la spiegazione è appunto abbandonare l'idea di località, cioè quindi dire che c'è... che non è vero che non c'è un'influenza immediata di A su B ma che invece c'è un'influenza immediata di A su B. [...] Quindi bisogna abbandonare il concetto di località espresso da Einstein, in questo caso ed in generale [nel caso della fisica quantistica].*

In questo passaggio la località viene tematizzata esplicitamente come assunzione teorica. Fino a questo momento, essa aveva operato come vincolo strutturale implicito nell'organizzazione delle spiegazioni: aveva guidato la selezione delle *readout strategies* e delimitato la forma della causal net. Qui, invece, diventa oggetto di riflessione e di possibile rimozione. L'affermazione “*abbandonare l'idea di località*” introduce una discontinuità nella coordinazione precedentemente stabilizzata. L’“*influenza immediata di A su B*” viene formulata come condizione necessaria per superare il limite imposto dalla disuguaglianza di Bell, e comporta una riorganizzazione della struttura inferenziale: la connessione tra A e B non è più vincolata a una mediazione, a l'influenza o a un fattore terzo comune antecedente, ma può essere concepita come diretta e immediata.

Questo estratto mostra una riorganizzazione della *inferential net*, in cui la località non opera più come principio organizzatore implicito; viene riconosciuto come assunzione modificabile ed esplicitamente dislocato. La *causal net* associata alle spiegazioni locali classiche viene sostituita da una configurazione che ammette una connessione immediata tra gli eventi (*non c'è un'influenza immediata di A su B ma che invece c'è un'influenza immediata di A su B*).

Sintetizzando, nel complesso del percorso analizzato, la località ha operato come elemento regolativo della coordinazione, stabilizzando la forma delle spiegazioni disponibili. In questa fase finale, la sua messa in discussione segna una ristrutturazione della coordinazione stessa: non si tratta di un semplice raffinamento interno della rete inferenziale, ma del riconoscimento che l'assunzione che la sosteneva può essere rimossa.

5.1.2. Il caso di Ester

Come vi vedrà nell'analisi, Ester mostra fin dall'inizio un ragionamento molto ordinato: usa criteri concreti (distanza tra i sistemi, ambiente condiviso, abitudini e possibilità di comunicare) per decidere quando ha senso parlare di località e per spiegare una correlazione come effetto di qualche meccanismo causale. Il suo percorso è guidato da un'idea stabile: se osserviamo una correlazione, “dovrebbe” esserci una spiegazione che colleghi condizioni ed esiti in modo coerente con le ipotesi di partenza e con i limiti del modello.

Quando però lo scenario si complica (più alternative possibili, meno “determinismo” della causa comune), Ester avverte una tensione: la correlazione non viene più trattata come qualcosa di necessario, ma come qualcosa che può anche non verificarsi. In questo passaggio introduce anche l'idea di casualità per rendere conto dell'esito. Nonostante ciò, Ester non arriva da sola a mettere in discussione il sistema di inferenze. Nell'ultima parte, infatti, riconosce che c'è una “falla” solo quando il gruppo esplicita la necessità di rinunciare alla località, senza formulare autonomamente quali passaggi del ragionamento vadano modificati.

In seguito, mostriamo la dinamica del ragionamento usando come lente la dinamica delle classi di coordinazione.

Prima parte: Località, Correlazione e Spiegazione

Nella prima parte dell'intervista viene chiesto ad Ester cosa si intende parlando del concetto di ‘località’ (1.a). Nelle sue parole:

Del concetto di località... quindi il fatto che poi per far sì che l'esperimento funzionasse effettivamente bisognava collocare Alice e Bob in due pianeti, in due galassie diverse perché appunto andava eliminata la parte della località, ovvero il fatto che loro due potessero influenzarsi in qualche modo... dall'ambiente in cui vivevano che era lo stesso o comunque... vicino. [...] [Anche quando] loro due [Alice e Bob] non si parlavano e non interagivano in maniera diretta... ma il fatto di frequentare gli stessi luoghi e avere le stesse abitudini... in qualche modo influenzava le loro scelte [di Alice e Bob] indirettamente. Quindi era più probabile che potessero fare una scelta uguale senza magari confrontarsi direttamente tra di loro.

Fin dall'inizio, la località viene introdotta in riferimento alla configurazione dell'esperimento mentale di Alice e Bob ed è descritta come un elemento da eliminare “per far sì che

l'esperimento funzionasse". Il modo in cui Ester seleziona gli aspetti rilevanti del contesto mostra con chiarezza la prima *readout strategy* che mette in gioco: l'attenzione è rivolta a elementi di vicinanza o lontananza spaziale, "*due pianeti*", "*due galassie diverse*", "*vicino*", che vengono usati per decidere se la "*parte della località*" sia attiva o esclusa. Questa *readout strategy* consiste nel rilevare la presenza di località grazie alla possibilità che Alice e Bob condividano lo stesso ambiente spaziale.

Quando Ester precisa che la località è "*il fatto che loro due potessero influenzarsi in qualche modo... dall'ambiente in cui vivevano che era lo stesso o comunque... vicino*", rende esplicito il funzionamento della sua rete inferenziale. La presenza di uno "*stesso ambiente*" o di ambienti "*vicini*" viene messa in relazione sistematica con la possibilità di influenza; tale possibilità costituisce, all'interno della sua spiegazione, la condizione che rende intelligibile l'accordo fra le scelte. In questo senso, la rete inferenziale associa stabilmente l'ambiente condiviso e la spiegazione della correlazione: l'ambiente fornisce l'elemento che legittima una lettura locale della correlazione.

Nel seguito dell'intervento, l'idea di ambiente condiviso viene ripresa e specificata. Ester osserva che "[anche quando] *loro due non si parlavano e non interagivano in maniera diretta*", il "*frequentare gli stessi luoghi*" e l'"*avere le stesse abitudini*" "*in qualche modo influenzava le loro scelte indirettamente*". Qui si attiva una seconda *readout strategy*, ancora centrata sull'ambiente, ma orientata alla ricerca di tracce di causa comune: gli indizi non sono più soltanto la vicinanza fisica immediata, bensì il fatto di condividere "*luoghi*" e "*abitudini*". Gli indizi rilevanti non sono più soltanto la prossimità spaziale immediata, bensì la condivisione di luoghi e pratiche nel tempo. La rete inferenziale collega tali condizioni condivise alla formazione di orientamenti simili e, attraverso questo passaggio, alla maggiore probabilità che Alice e Bob "*possano fare una scelta uguale*" senza confrontarsi.

Le due *readout strategies* così delineate non introducono oggetti concettuali distinti, ma operano all'interno della stessa coordination class della località. In entrambi i casi, Ester utilizza informazioni correlate: la configurazione spaziale nel primo passaggio e la condivisione di luoghi e abitudini nel secondo, per determinare se si verifica una condizione di ambiente condiviso. La *causal net* rimane invariata: la presenza di tale condizione viene sistematicamente collegata alla possibilità di rendere intelligibile la correlazione tra le scelte. L'introduzione delle "*stesse abitudini*" non modifica la struttura inferenziale già in atto, ma amplia l'insieme di elementi che possono essere letti come pertinenti alla determinazione della località.

Nel discutere la nozione di ‘correlazione’ classica (1.b), Ester si muove in continuità con quanto emerso in precedenza. Nelle sue parole:

Due eventi correlati, che quindi in qualche modo sono o uno la causa dell'altro o comunque sono legati da qualcosa... penso all'attrazione [gravitazionale]... Se la fisica classica si basa tutta su un sistema di causa-effetto, da qualsiasi causa poi viene ricavato un evento correlato che, in qualche modo... è determinato, cioè noi lo sappiamo che succederà perché appunto c'è una sola via di azione partendo da uno stesso evento.

Per la studentessa, due eventi sono correlati quando “sono o uno la causa dell'altro o comunque sono legati da qualcosa”. La definizione viene rapidamente ancorata a un esempio (“penso all’attrazione [gravitazionale]”), che però non viene ulteriormente sviluppato. Già in questa formulazione si individua una prima struttura di *readout strategies*: per riconoscere una correlazione classica, Ester cerca o una relazione causa-effetto diretta (“sono o uno la causa dell'altro”, “da qualsiasi causa poi viene ricavato un evento correlato”) o un elemento mediatore (“comunque sono legati da qualcosa”) che svolge il ruolo di vincolo comune. Questi elementi linguistici funzionano come informazioni correlate: non costituiscono ancora la correlazione in sé, ma sono i dati che Ester tratta come rilevanti per stabilire se due eventi siano effettivamente correlati.

La prosecuzione dell’intervento esplicita la struttura del *causal net* associato a queste letture: “la fisica classica si basa tutta su un sistema di causa-effetto”, “da qualsiasi causa poi viene ricavato un evento correlato... determinato”, “c'è una sola via di azione partendo da uno stesso evento”. La correlazione viene coordinata attraverso una rete di inferenze in cui a ogni causa corrisponde un unico effetto possibile, noto in anticipo. La correlazione classica è quindi trattata come manifestazione di una struttura causale deterministica, dove la “sola via di azione” esclude biforcazioni o esiti multipli compatibili con la stessa causa.

In questo quadro, le due modalità con cui Ester parla di eventi correlati, “uno la causa dell'altro” e “legati da qualcosa”, rendono più esplicita la struttura di *readout* e di *causal net* osservata precedentemente sulla località. Nel primo caso, la *readout strategy* privilegia l’individuazione di un nesso causa-effetto diretto; nel secondo, la ricerca di un vincolo comune che colleghi gli eventi. Si tratta delle stesse due modalità esplicative già mobilitate in precedenza, ora tematizzate in modo generale come criteri per riconoscere una correlazione.

L'elemento nuovo riguarda la caratterizzazione esplicita della rete inferenziale: Ester descrive la fisica classica come un sistema di causa-effetto deterministico. La correlazione viene così coordinata all'interno di una *causal net* che collega stabilmente l'identificazione di una causa (o di un vincolo comune) alla previsione univoca dell'esito. Dunque, la spiegabilità della correlazione dipende dalla possibilità di collocare gli eventi all'interno di una struttura causale che ne garantisce la determinatezza.

Successivamente si discute la perfetta correlazione tra i pasti di Alice e di Bob, entrambi residenti a Bologna (1.c). Ester, nel discutere cosa significhi e perché sia importante 'assumere la località', si concentra sulla spiegazione 'causa comune':

Come anche dicevo prima, magari [Alice e Bob] non si parlano direttamente, non si mettono d'accordo, però ci sono fattori che, in qualche modo, possono condurre entrambi nella stessa direzione. Per esempio, avevamo fatto anche durante il corso l'esempio dei supermercati: se abitano vicini vanno sempre nello stesso supermercato che gli propone le stesse offerte, gli stessi piatti tutti i giorni e quindi loro tutti i giorni prendono sempre le stesse cose.

L'apertura, "come anche dicevo prima", suggerisce una continuità esplicita con la coordinazione già attivata nei segmenti precedenti. Anche qui, la presenza o l'assenza di comunicazione diretta ("non si parlano direttamente, non si mettono d'accordo") non è l'informazione decisiva; ciò che viene ricercato come informazione correlata sono "fattori" comuni che possano "condurre entrambi nella stessa direzione". La *readout strategy* rimane incentrata sull'individuazione di condizioni condivise che precedono la scelta. L'esempio del supermercato rende operativa questa strategia: "abitano vicini", "stesso supermercato", "stesse offerte", "stessi piatti" costituiscono gli indizi con cui Ester determina la presenza di un ambiente comune. Tali elementi funzionano come informazioni correlate che la rete inferenziale collega in modo sistematico all'esito osservato ("quindi... prendono sempre le stesse cose"). La struttura inferenziale mantiene il carattere deterministico già esplicitato.

In questo passaggio si osserva una proiezione coerente della stessa coordination class della località su un contesto, scelto da lei, più concreto. La spiegazione di causa comune viene articolata con maggiore dettaglio narrativo, ma resta organizzata dallo stesso nesso stabile tra condizioni ambientali condivise e correlazione degli esiti. La coordinazione appare

allineata: le informazioni lette come pertinenti (“fattori”, “stesso supermercato”) si integrano nella rete inferenziale deterministica già delineata.

In questo momento l’intervistatrice chiede ad Ester di ricordare quale fosse il nome utilizzato durante il corso per questa tipologia di spiegazione. Nelle sue parole:

[Ti ricordi come si chiamava questo tipo di spiegazione?] *Sì, mi ricordo che era entrata in gioco anche la temporalità, cioè il fatto che loro andassero lì [nel supermercato] in due momenti diversi: quindi c’è un luogo comune, però non in contemporanea... quindi senza vedersi faccia a faccia ma... il nome specifico non me lo ricordo però sì, c’è una sorta di luogo comune un qualcosa che appunto... fa parte di entrambi...*

Pur non ricordando il nome specifico, Ester esplicita un elemento strutturale della spiegazione di causa comune: la non contemporaneità delle azioni non compromette la correlazione, purché sia presente un “luogo comune”. La temporalità viene qui tematizzata come vincolo della spiegazione: Alice e Bob possono agire “in due momenti diversi” e “senza vedersi faccia a faccia”, e tuttavia la presenza di un ambiente condiviso resta sufficiente a rendere intelligibile la perfetta correlazione delle loro scelte.

Anche in questo caso, rimane centrale l’individuazione di un ambiente comune (“c’è un luogo comune”, “una sorta di luogo comune”, “qualcosa che... fa parte di entrambi”) come informazione correlata pertinente. Ciò che si raffina è piuttosto la rete inferenziale: la relazione tra condizione condivisa e correlazione viene ora coordinata esplicitando che la simultaneità non è richiesta. La causa comune opera attraverso una struttura che può essere distribuita nel tempo, mantenendo stabile il nesso tra fattore condiviso ed esito concorde.

Anche in questo estratto, si osserva dunque un allineamento tra *readout strategies* e *causal net*. Le variazioni contestuali, le azioni non contemporanee e l'assenza di interazione diretta vengono integrate nella stessa organizzazione inferenziale già delineata, senza tensioni. La coordination class della località continua a funzionare come struttura stabile per determinare quando una correlazione possa essere spiegata attraverso condizioni ambientali condivise, ora articolate anche lungo una dimensione temporale.

Seconda parte: Influenza e Causa comune alla prova

Ester commenta lo scenario in cui Alice e Bob si trovano a distanza intergalattica (2.a). Nel chiedersi se le spiegazioni ‘influenza’ e ‘causa comune’ siano ancora valide, osserva che la seconda sembra essere la più soddisfacente. Nelle sue parole:

Si, qua [il testo del tutorial] proprio specifica: ‘quando decidono di fare la spesa nel negozio sulla sinistra, finiscono sempre con il mangiare la stessa cosa’. Quindi hanno una scelta e se casualmente fanno la stessa scelta... come mangiare su quello della sinistra... può essere che magari sia la stessa catena di supermercati e quindi offrono le stesse cose e ancora una volta [si ha lo scenario descritto in precedenza].

Riprendendo il testo del tutorial, Ester introduce un nuovo elemento, “la stessa catena di supermercati”, che le consente di mantenere attiva la spiegazione di causa comune anche nel contesto di distanza intergalattica. Pur non essendoci più condivisione di uno stesso luogo fisico, la *readout strategy* centrata sull’individuazione di condizioni comuni rimane operativa: la “stessa catena” funziona come informazione correlata che segnala l’esistenza di un vincolo condiviso capace di produrre esiti concordi.

Si osserva qui un ampliamento dello span della coordination class della località. L’ambiente condiviso non è più identificato con un luogo o con abitudini spazialmente situate, ma con una struttura organizzativa più astratta che collega contesti fisicamente separati. La rete inferenziale resta invariata: dato un fattore comune (“stessa catena”), l’accordo nelle scelte viene coordinato come esito coerente di tale fattore (“quindi offrono le stesse cose” e dunque mangiano la stessa cosa). La spiegazione di causa comune viene così proiettata in un dominio in cui la prossimità spaziale immediata non è più disponibile.

L’espressione “ancora una volta” segnala esplicitamente questa continuità: il nuovo scenario è trattato come strutturalmente analogo ai precedenti. In questo passaggio si osserva un forte alignment tra *readout strategies* e *causal net*: la variazione contestuale (distanza intergalattica) non produce una ristrutturazione della coordination class, ma ne sollecita un’estensione coerente, mantenendo stabile il principio regolativo secondo cui una correlazione è spiegabile quando può essere ricondotta a condizioni comuni.

Successivamente, quando Ester si trova davanti allo scenario in cui Alice e Bob hanno ciascuno due supermercati sotto casa (2.b), compare una perfetta anticorrelazione nel caso in cui entrambi vadano nel supermercato sulla destra. La studentessa si chiede dunque se le spiegazioni ‘influenza’ e ‘causa comune’ siano ancora valide. Nelle sue parole:

[...] i due [Alice e Bob] non hanno un'influenza diretta l'uno sull'altro ad una determinata distanza poiché si trovano lontani. Il fatto che siano ancora su due galassie diverse sicuramente rimuove la spiegazione per influenza.

La spiegazione influenza viene esclusa in modo netto attraverso la stessa *readout strategy* già osservata: la distanza intergalattica elimina la possibilità di interazione diretta. La coordination class della località continua qui a funzionare in modo stabile.

Ester poi aggiunge:

Beh, loro non sanno cosa sceglie l'altro, quindi in un certo senso non si possono mettere d'accordo per non scegliere destra-destra e quindi non mangiare qualcosa di uguale. Il fatto che loro scelgano casualmente... avevamo anche letto... secondo il principio che non si faccia sempre la stessa scelta, ma quindi proprio... a volte una a volte l'altra, magari ripetuta un paio di volte, alla fine quando insieme scelgono la destra ed è vero che non mangeranno mai la stessa cosa... mmh... in qualche modo può essere che si tolga un po' la causa comune perché comunque hanno quattro possibilità diverse... ehm... sommando comunque le scelte di entrambi e... quindi in qualche modo c'è una possibilità che non mangino più la stessa cosa. Può succedere ma non sanno quando determinarla a loro piacimento, cioè non possono decidere loro.

In questo passaggio si osserva una tensione interna alla causal net. La presenza di più alternative (“*quattro possibilità diverse*”) e l'introduzione della scelta “casuale” (“*Il fatto che loro scelgano casualmente*”) mettono in discussione la determinatezza dell'esito. Se nei segmenti precedenti la causa comune garantiva un accordo prevedibile, qui la correlazione non è più coordinata come esito necessario, ma come possibilità: “*c'è una possibilità che non mangino più la stessa cosa*”. L'espressione “*può essere che si tolga un po' la causa comune*” indica un indebolimento della sua portata deterministica. La struttura inferenziale resta formalmente invariata, si continua a ricercare un fattore comune, ma l'informazione correlata letta come pertinente non è più sufficiente a stabilizzare l'informazione caratteristica attesa: l'esito non viene più coordinato come necessario, bensì come contingente.

Nelle parole di Ester si osserva dunque un primo segnale di possibile misalignment interno alla coordination class: le *readout strategies* rimangono invariate, ma la *causal net* deterministica non riesce più a coordinare la correlazione come esito necessario. Tuttavia,

Ester non propone una ristrutturazione della classe né introduce un nuovo principio esplicativo; la spiegazione di causa comune resta invariata, seppur con una portata attenuata.

Successivamente, interrogandosi sulle possibili spiegazioni, la studentessa propone una risorsa alternativa. Nelle sue parole:

Io direi quasi casualità, cioè qualcosa che avviene casualmente dalle scelte di uno che poi non va a influenzare la scelta dell'altro, ma in qualche modo danno un risultato comune.

L'introduzione della “casualità” interviene a livello della rete inferenziale. La correlazione viene coordinata come esito che può emergere da scelte indipendenti, senza che sia necessario identificare un fattore comune. La spiegazione si sposta così dalla ricerca di condizioni condivise alla considerazione di una dinamica contingente in cui esiti concordi possono prodursi “in qualche modo” a partire da decisioni autonome (“avviene casualmente dalle scelte di uno”). La rete inferenziale assume qui una configurazione diversa rispetto ai passaggi precedenti: l'esito non è più trattato come conseguenza determinata, ma come risultato possibile di processi indipendenti. La correlazione resta da rendere intelligibile, ma la modalità con cui viene coordinata cambia: il nesso esplicativo non è più stabilizzato da un fattore condiviso, bensì dalla possibilità di convergenza casuale (in qualche modo danno un risultato comune).

In questo estratto si osserva quindi una riorganizzazione interna del causal net. Le *readout strategies* precedentemente mobilitate non vengono tematizzate; l'attenzione si concentra sulla dinamica dell'esito. La coordination class della località continua a operare come cornice di interpretazione, ma la spiegazione della correlazione viene articolata in termini di contingenza (“qualcosa che avviene casualmente”).

Terza parte: Il passaggio al modello e alla logica binaria

Dopo aver sottolineato la difficoltà nel trovare una spiegazione per la perfetta correlazione all'interno del nuovo scenario, è necessario passare alla modellizzazione tramite l'utilizzo di scatole introdotte durante il corso, entrambe formate da un joystick e uno schermo (3.a). Nelle parole di Ester:

Sì, noi pensiamo a due soggetti: Alice e Bob, ad esempio A e B, che hanno due scelte a disposizione, destra o sinistra. [...] Mi ricordo anche che c'era in questa scatola uno schermo che dava come risultato o uno zero o un uno. Quindi, se Alice...

casualmente... sceglie di girare il joystick verso destra, può uscirle [sullo schermo] o uno o zero. E allo stesso modo a Bob può uscire o uno o zero. Confrontando questi risultati poi possiamo capire quando i risultati sono gli stessi anche partendo dalla scelta iniziale che hanno fatto, quindi se [hanno spostato il joystick] a destra o a sinistra. [...] muovere il joystick a destra o a sinistra rappresentava l'andare al ristorante di destra o quello di sinistra. E poi diciamo, quello zero ed uno erano un po' quello che mi capitava di mangiare.

Nel descrivere il modello, Ester orienta l'attenzione sulla struttura operativa del dispositivo, su due scelte binarie e su due possibili risultati, esplicitando la corrispondenza tra il dominio narrativo (dell'esperimento mentale) e quello formalizzato. Dunque le *readout strategies* si orientano ora verso l'identificazione di input (destra/sinistra) e output (0/1), e verso il confronto sistematico dei risultati. Ester ricostruisce la corrispondenza tra modello e scenario narrativo: il movimento del joystick (“*sceglie di girare il joystick verso*”) rappresentava la scelta del ristorante, mentre “zero ed uno” indicavano ciò che veniva mangiato. Questo passaggio mostra un allineamento tra i due domini: la coordination class della località viene proiettata su una struttura formalizzata, mantenendo il riferimento esplicito alla relazione tra scelta iniziale e risultato ottenuto. La correlazione viene ora individuata nel confronto tra i risultati visualizzati sullo schermo (0/1), che permettono di stabilire quando gli esiti coincidono (“*possiamo capire quando i risultati sono gli stessi*”). Il passaggio alla rappresentazione binaria non è, in questo segmento, accompagnato da una rielaborazione esplicita della spiegazione della correlazione, bensì da una trasposizione del problema in un nuovo registro rappresentazionale. In questo segmento si osserva una proiezione coerente della coordination class della località nel dominio del modello: la correlazione viene individuata attraverso il confronto dei risultati, senza che emergano tensioni tra le informazioni selezionate e la rete inferenziale precedentemente delineata.

Attraverso i calcoli, Ester arriva ad imporre delle limitazioni sul punteggio finale:

S deve essere tra 0 e 4 e si vince se S è maggiore di 3!

In questo passaggio la studentessa opera all'interno della struttura matematica del gioco, rendendo espliciti i limiti quantitativi del punteggio. Il focus è sui vincoli formali del sistema, senza che venga articolata una riflessione esplicita sul loro significato rispetto alla spiegazione della correlazione.

Successivamente viene introdotta l'ipotesi secondo cui le scatole, costruite dallo stesso produttore, contengono un orologio, una memoria e un computer capace di eseguire soltanto quattro programmi possibili. Tale configurazione incorpora strutturalmente una spiegazione di causa comune: le due scatole possono condividere un programma preimpostato dal costruttore. Alla richiesta di chiarire questo punto, Ester non interviene. Interviene invece quando vengono esplicitate le quattro opzioni disponibili, per determinare il numero massimo di combinazioni possibili:

*C'è noi abbiamo due computer e quattro opzioni ciascuno... quindi non lo so! [Ride]
[...] Son 16. Quattro alla seconda.*

L'informazione trattata, considerata pertinente, è qui di natura combinatoria: due dispositivi con quattro opzioni ciascuno producono 16 configurazioni possibili. La readout strategy si orienta al calcolo delle possibilità, più che all'interpretazione del meccanismo di causa comune incorporato nel programma condiviso. La rete inferenziale rimane sul piano quantitativo, senza che venga esplicitamente coordinata la relazione tra la struttura del programma e la correlazione dei risultati.

In questo estratto, si osserva quindi una focalizzazione sullo spazio delle combinazioni possibili, mentre la spiegazione di causa comune strutturata nella costruzione dei computer non viene esplorata. La coordination class precedentemente mobilitata non viene ristrutturata; semplicemente, l'attenzione si concentra su un diverso tipo di informazione, il numero delle configurazioni, che non viene ancora integrato in un'articolazione esplicativa della correlazione.

Quarta parte: La violazione della disuguaglianza di Bell

Nel momento in cui viene chiesto di ripensare al tutorial e a quali elementi cambiare per riuscire a vincere il gioco di Bell (4), Ester mostra qualche incertezza:

Boh io mi ricordavo... boh non lo so... adesso ci penso...

In questa fase non emerge una rielaborazione autonoma della struttura precedentemente costruita. La coordination class della località, così come era stata mobilitata nei segmenti precedenti, non viene messa in discussione attraverso un'argomentazione interna.

Solo dopo che la necessità di rinunciare all'assunto di località viene resa esplicita dal gruppo, Ester riconosce l'incoerenza del quadro precedente e reagisce con un'esclamazione netta:

C'è una falla!

Il riconoscimento della “falla” avviene quindi in seguito all'introduzione esplicita di un elemento esterno che rende problematica la struttura precedente. L'espressione segnala il riconoscimento di un'incoerenza nel quadro fino a quel momento utilizzato; tuttavia, non è accompagnata da una riformulazione argomentata del meccanismo che avrebbe generato tale incoerenza. Non vengono esplicitati quali passaggi della rete inferenziale debbano essere modificati né quale principio debba essere abbandonato.

In termini di coordination class, si osserva il riconoscimento di una tensione strutturale, ma non di una ristrutturazione del causal net. La studentessa prende atto della necessità di rivedere l'assunto di località, ma tale revisione non è articolata attraverso nuove readout strategies né mediante un nuovo principio regolativo esplicitamente formulato. La classe precedentemente mobilitata risulta insufficiente rispetto al nuovo vincolo introdotto, senza che emerga una riorganizzazione autonoma della sua architettura interna.

Nei commenti finali, Ester parla della località come un “*presupposto*” chiaro a cui è complicato rinunciare:

Si perché comunque alla fine si richiede, in qualche modo, di lasciar perdere un presupposto che era stato messo in chiaro dall'inizio... ed è un po' complicato questo passaggio, diciamo. Cioè, secondo me, se si parte da determinati presupposti, noi ci aspettiamo che comunque il finale rimanga in di quei limiti lì.

L'abbandono della località viene tematizzato come un passaggio problematico perché implica la revisione di un insieme di presupposti iniziali (“*alla fine si richiede, in qualche modo, di lasciar perdere un presupposto che era stato messo in chiaro dall'inizio*”) che, secondo Ester, delimitavano lo spazio delle possibili conclusioni. L'espressione “*noi ci aspettiamo che comunque il finale rimanga in quei limiti lì*” rende esplicita una struttura di aspettativa: date certe assunzioni di partenza, l'esito dovrebbe rimanere coerente con esse.

In termini di coordination class, ciò che viene qui messo in luce è la stabilità del principio regolativo che ha organizzato l'intero percorso. Fin dai primi interventi di Ester, la correlazione è stata coordinata come spiegabile attraverso una struttura causale che collega condizioni (influenza diretta, causa comune, successivamente anche casualità) ed esiti entro limiti determinati. Anche quando la *causal net* ha mostrato tensioni interne, la studentessa ha mantenuto l'aspettativa che l'esito rimanesse compatibile con i presupposti iniziali.

L'idea che "il finale rimanga in quei limiti" indica dunque la persistenza di una regola di coerenza interna tra gli assunti e i risultati. La difficoltà nel "lasciar perdere un presupposto" non riguarda soltanto un singolo elemento della spiegazione, ma anche la necessità di rivedere l'intera struttura di coordinazione che, fin dall'inizio, ha garantito l'intelligibilità della correlazione.

In questo senso, il caso di Ester mostra una coordination class della località fortemente allineata e progressivamente ampliata nei suoi domini di applicazione, che tuttavia non va incontro a una ristrutturazione autonoma del principio regolativo quando tale principio risulta incompatibile con l'esito del gioco di Bell.

5.1.3. Il caso di Francesco

Come mostrerà l'analisi, Francesco avvia il ragionamento con un'idea molto concreta: per lui la località coincide con la possibilità di influenzarsi quando si è "nello stesso spazio", e la distanza diventa subito il criterio pratico per dire se un'interazione è plausibile oppure no. Dentro questa cornice, distingue via via due modi "classici" di spiegare una correlazione: influenza diretta (qualcosa passa da A a B, con un certo tempo di propagazione) e causa comune (un evento esterno o un fattore condiviso che fa ottenere lo stesso risultato a entrambi, anche senza contatto).

Man mano che lo scenario si sposta su contesti più estremi (per esempio la distanza intergalattica), Francesco riesce comunque a tenere in piedi una spiegazione "locale" appoggiandosi alla causa comune: se non possono comunicare, allora dev'esserci qualcosa di comune "a monte" che li mette d'accordo. Quando però aumentano le combinazioni possibili e non tutto torna, emergono esitazioni: oscilla tra "non è influenza diretta" e "forse non è nemmeno causa comune", segno che le sue spiegazioni abituali non riescono più a coprire tutti i casi senza contraddirsi.

Nella fase finale, la violazione della disuguaglianza produce un salto qualitativo: Francesco smette di trattare la località come sfondo ovvio e la pone esplicitamente sul tavolo come un'assunzione che si può (o si deve) abbandonare. Arriva così a formulare che, se si può "vincere" anche a distanza infinita, allora la località non può essere vera in quel contesto. L'entanglement entra qui come l'idea che rompe la regola intuitiva "più distanza = meno legame": non è un dettaglio in più, ma un diverso tipo di connessione che costringe a riorganizzare il principio con cui stava leggendo tutta la situazione.

In seguito, mostriamo la dinamica del ragionamento utilizzando la dinamica delle classi di coordinazione come lente.

Prima parte: Località, Correlazione e Spiegazione.

All'inizio dell'intervista, viene chiesto a Francesco che cosa si intende per 'località' (1.a). Nelle sue parole:

... ehm... diciamo che nel nostro esperimento si elimina la località giusto? Quindi la località è la possibilità di influenzarsi a vicenda essendo nello stesso spazio, direi. [...] Cioè si ipotizza paradossalmente che, essendo [Alice e Bob] infinitamente lontani, si elimini la possibilità che interagiscano.

Francesco introduce la località, richiamando esplicitamente il contesto dell'esperimento svolto durante il corso, e la caratterizza come "possibilità di influenzarsi a vicenda essendo nello stesso spazio". La *readout strategy* che emerge è centrata sulla configurazione spaziale: la presenza nello "stesso spazio" viene trattata come informazione correlata pertinente per determinare quando la località è attiva.

L'allontanamento a distanza "*infinitamente lontana*" è descritto come una procedura che "*elimina la possibilità che interagiscano*". La distanza funziona quindi come indicatore operativo per stabilire l'assenza della località. La coordination class della località appare qui organizzata attorno a un nesso stabile tra co-presenza spaziale e possibilità di influenza reciproca: la vicinanza segnala l'attivazione della località, la distanza ne segnala la rimozione.

Proseguendo nell'intervista, Francesco prova a definire che cos'è una 'correlazione' (1.b) e la descrive attraverso alcuni esempi. Lo studente afferma:

Cioè, [la correlazione è] qualsiasi legame che fa sì che ciò che accade ad uno si ripercuote anche sull'altro o è rintracciabile anche in ciò che accade all'altro. [...] Per esempio, il principio di azione-reazione: quando il corpo [1] esercita una forza su un altro corpo [2], il corpo [2] risponde con una forza uguale e contraria. Questo è un esempio di correlazione perché dalla forza che esercita uno ne deriva la forza che esercita l'altro. [...] Poi l'entanglement, che forse è una correlazione un po' più astratta che abbiamo visto nel corso che è forse la correlazione più alta perché

appunto viene eliminata la località, ogni possibile interazione diretta, ma comunque si mantiene lo stato, l'informazione... cioè la non informazione.

Francesco definisce la correlazione come un “*legame*” per cui ciò che accade a un sistema “*si ripercuote*” sull’altro oppure è “*rintracciabile*” anche nell’altro (“*legame che fa sì che ciò che accade ad uno si ripercuote anche sull’altro o è rintracciabile anche in ciò che accade all’altro*”). La *readout strategy* implicita consiste nel cercare una relazione sistematica tra eventi: un evento in un sistema deve avere una controparte identificabile nell’altro. L’esempio del principio di azione-reazione esplicita la configurazione del *causal net*: a un’azione esercitata dal corpo [1] segue una risposta determinata del corpo [2]. La correlazione viene coordinata come relazione causale in cui un evento produce l’altro secondo una regola precisa (“forza uguale e contraria”). La rete inferenziale è qui deterministica: l’evento nel primo sistema determina l’evento nel secondo.

Quando introduce l’entanglement, Francesco lo qualifica come “*correlazione un po’ più astratta*” e “*correlazione più alta*” perché “*viene eliminata la località, ogni possibile interazione diretta*”. La località entra dunque come criterio di classificazione delle correlazioni: nel caso classico, la dipendenza è mediata dall’interazione diretta; nel caso dell’entanglement, la correlazione persiste anche in assenza di tale interazione. La *readout strategy* relativa alla località resta coerente con quanto finora emerso: la possibilità di “interazione diretta” costituisce l’indicatore della sua presenza.

È rilevante che, anche parlando di entanglement, Francesco mantenga il lessico del “*legame*” e della “*informazione*” condivisa. La correlazione quantistica viene coordinata come forma di dipendenza tra stati, pur in assenza di località. In questo segmento la correlazione viene coordinata all’interno della stessa struttura inferenziale che organizza la località: nel caso classico attraverso una rete causale deterministica mediata da interazione diretta; nel caso dell’entanglement come mantenimento di un legame anche in assenza di località. Non emergono ancora segnali di ristrutturazione del principio regolativo della coordination class della località: anche quando l’entanglement viene descritto come un caso in cui “*viene eliminata la località*”, la dipendenza tra gli eventi continua a essere coordinata come legame strutturato, e l’assenza di interazione diretta non produce una riconfigurazione della rete inferenziale.

Successivamente, parlando della perfetta correlazione fra i pasti di Alice e Bob quando vivono a Bologna (1.c) e domandandosi cosa significhi e perché sia importante ‘assumere la località’ in questa particolare situazione narrativa, Francesco interviene dicendo:

Sostanzialmente la vicinanza spaziale permette l'un l'altro di avere, di esercitare un'influenza diretta. Quindi ancora siamo lontani dal passaggio finale... del ragionamento.

In questo contesto, la readout strategy attivata è nuovamente incentrata sulla configurazione spaziale: la “vicinanza spaziale” è trattata come informazione pertinente per determinare la presenza della località. Tale vicinanza è direttamente collegata alla possibilità di “*esercitare un'influenza diretta*”, esplicitando il funzionamento del causal net: co-presenza spaziale → possibilità di interazione → spiegazione della correlazione.

La *coordination class* della località opera qui in continuità con quanto emerso precedentemente. La correlazione viene resa intelligibile attraverso un nesso causale diretto tra i due soggetti, e la località funziona come condizione che legittima tale nesso. Non vengono introdotte, in questo segmento, configurazioni alternative della spiegazione (ad esempio in termini di causa comune); la spiegazione mobilitata è quella dell’influenza diretta mediata dalla vicinanza.

L’espressione “*siamo lontani dal passaggio finale... del ragionamento*” introduce un elemento metaconcettuale: Francesco segnala che la configurazione attuale non rappresenta l’esito conclusivo dell’analisi. Tuttavia, tale consapevolezza non è accompagnata da una riformulazione della rete inferenziale né da un ampliamento esplicito dello span della coordination class. La località continua a essere coordinata attraverso la relazione tra prossimità spaziale e interazione diretta.

Interviene quindi l’intervistatrice, che chiede a Francesco se volesse aggiungere qualcosa rispetto alla classificazione delle spiegazione possibili. Nelle parole dello studente:

[Volevi aggiungere qualcosa?] *Mi sembra che i due casi fossero: uno in cui si influenzano l'un l'altro, l'altro in cui un evento esterno influenza entrambi, quindi un evento comune... però non mi ricordo come si chiama.*

Francesco esplicita due configurazioni causali distinte: nel primo caso, i due soggetti “*si influenzano l’un l’altro*”; nel secondo, “*un evento esterno influenza entrambi*”. Si osserva qui

un'articolazione più completa della *causal net*. La località continua a essere coordinata come condizione che rende possibile una relazione tra eventi; tale relazione può assumere la forma di un'interazione reciproca oppure di una dipendenza mediata da un fattore comune. Le *readout strategies* implicate consistono nella ricerca di segnali di interazione diretta oppure nell'individuazione di un elemento condiviso che agisca su entrambi i sistemi.

Non emergono segnali di ristrutturazione del principio regolativo. La correlazione rimane coordinata come effetto di una struttura causale, sia essa diretta o mediata. Rispetto al segmento precedente, si osserva un ampliamento interno delle configurazioni causali esplicitamente disponibili, ma non una modifica della regola che organizza la spiegazione.

Seconda parte: Influenza e Causa comune alla prova

Definite le due tipologie di spiegazione e richiamati i termini utilizzati durante il corso per descriverle, ovvero 'influenza' e 'causa comune', viene chiesto a Francesco se queste valgano ancora nel momento in cui Alice e Bob si trovano ad una distanza intergalattica (2.a). Nelle parole dello studente:

Io direi che l'influenza è eliminata perché sono distanti infinitamente, sono in due galassie differenti. Rimane la causa comune che è determinata dal fatto che hanno solo una scelta possibile e non dipende da loro questa scelta.

La distanza “in due galassie differenti” viene trattata come informazione pertinente per escludere l'influenza diretta. La *readout strategy* centrata sulla configurazione spaziale opera qui in modo selettivo: l'assenza di vicinanza segnala l'impossibilità di interazione diretta e, di conseguenza, “l'influenza è eliminata”. Allo stesso tempo, Francesco individua un'altra informazione rilevante: il fatto che Alice e Bob abbiano “una sola scelta possibile” e che tale scelta “non dipende da loro”. Questa condizione viene coordinata come indicatore della presenza di un fattore che agisce su entrambi, rendendo disponibile la configurazione causale della causa comune. In questo passaggio Francesco seleziona due tipi di informazione come pertinenti. La distanza intergalattica è letta come indicatore dell'impossibilità di influenza diretta; la presenza di “una sola scelta possibile” che “non dipende da loro” è letta come segnale di una determinazione comune. Le due informazioni attivano configurazioni causali diverse all'interno della stessa *coordination class* della località. La rete inferenziale rimane organizzata secondo lo stesso principio regolativo: la correlazione deve essere resa intelligibile attraverso una struttura causale che colleghi le condizioni agli esiti. Non emergono segnali di ristrutturazione. Si osserva piuttosto un ampliamento dello *span*

applicativo della *coordination class*: anche in assenza di vicinanza spaziale, Francesco riesce a coordinare la località attraverso la configurazione della causa comune.

Successivamente, nel commentare se le due tipologie di spiegazione ‘influenza’ e ‘causa comune’ valgano ancora nel caso in cui Alice e Bob abbiano a disposizione due supermercati ciascuno, uno sulla destra ed uno sulla sinistra delle loro case (2.b), il ragionamento di Francesco entra in una fase di esitazione e riformulazione. Nelle sue parole:

Qua è un po' più complicato... direi che ora c'è l'influenza... in qualche modo... o no? Cioè... [c'è l']influenza perché comunque rimane una correlazione se uno sceglie sinistra e l'altro sceglie destra. No, in realtà non è influenza diretta [...] però c'è comunque un legame prestabilito. Non so se c'è ancora una causa comune... [...] Non per forza [è presente la causa comune] perché [Alice e Bob] hanno due possibilità, possono scegliere una destra [il ristorante di destra] uno sinistra [il ristorante di sinistra], una sinistra uno destra e così via, però rimane una correlazione... non possono scegliere destra o sinistra mi sembra. [Possono sceglierlo, ma non mangiano mai la stessa cosa.]... forse non c'è neppure la causa comune.

Qui si osserva una tensione interna alla *coordination class* della località. Francesco tenta inizialmente di ricondurre la situazione alla categoria di “influenza”, ma subito precisa che “non è influenza diretta”. L’uso oscillante del termine indica che la configurazione causale precedentemente stabilizzata (interazione diretta mediata dalla vicinanza) non è più applicabile direttamente. La presenza di più possibilità (“hanno due possibilità”) viene trattata come informazione rilevante e incide sul funzionamento del *causal net*. La molteplicità delle combinazioni rende meno immediata l’attribuzione della correlazione a una causa comune determinata (“non so se c’è ancora una causa comune”, “forse non c’è neppure la causa comune”).

Dunque, le due configurazioni causali precedentemente disponibili (influenza diretta e causa comune) vengono entrambe richiamate, ma nessuna si stabilizza come spiegazione soddisfacente. La correlazione continua a essere coordinata come “legame prestabilito” (“però c’è comunque un legame prestabilito”), ma la struttura inferenziale che dovrebbe sostenerlo non si ricompone in modo coerente. Questo è interpretabile come un momento di *misalignment* locale: le *readout strategies* disponibili vengono attivate, ma la rete causale deterministica che aveva funzionato nei segmenti precedenti non riesce a integrare in modo stabile la nuova configurazione di alternative.

A questo punto, gli viene chiesto quale sia la possibile spiegazione in questo scenario. Francesco fa due proposte. Nelle sue parole:

*Ce lo spieghiamo dal punto di visto probabilistico... e se non è come ci si aspetta...
[introduciamo] l'entanglement!*

Alla richiesta di proporre spiegazioni alternative per la perfetta correlazione, Francesco introduce un “*punto di vista probabilistico*”. La correlazione viene ora trattata come esito valutabile rispetto alla distribuzione delle possibilità disponibili, in un contesto in cui Alice e Bob “*hanno due possibilità*”. La probabilità non sostituisce le configurazioni causali precedentemente mobilitate, ma viene proposta come nuova risorsa esplicativa per rendere conto dell’accordo tra gli esiti.

Tuttavia, questa proposta resta regolata da un criterio di aspettativa: “*se non è come ci si aspetta*”. L’aspettativa continua a fungere da riferimento implicito che orienta la valutazione del risultato. L’entanglement viene evocato in forma condizionata, come spiegazione alternativa nel caso in cui la lettura probabilistica non risulti adeguata.

Si osserva un ampliamento delle risorse disponibili: alla struttura causale si affianca una lettura probabilistica della correlazione. Non emerge ancora una ristrutturazione del principio regolativo; la probabilità e l’entanglement vengono introdotti come opzioni subordinate alla verifica di coerenza con ciò che “*ci si aspetta*”.

Terza parte: Il passaggio al modello e alla logica binaria

Dopo aver esplorato i diversi contesti narrativi, si passa alla fase di modellizzazione (3.a), in cui vengono introdotte le due scatole con joystick e schermo per giocare al gioco di Bell. Alla richiesta di commentare la costruzione del modello, Francesco richiama principalmente la tabella utilizzata durante il corso:

Si, poi dopo avevamo composto una tabella. [...] C’era una tabella con tutte le possibilità che si potevano avere... [non questa griglia, era] più lunga. [Prima ragioniamo sulle possibili casistiche, come possiamo rappresentare tutti i casi dell’esperimento mentale dei menù?] Avevamo assegnato il valore di 0... quando siamo... Quando sono opposti invece [Alice va a sinistra e Bob va a destra, o viceversa] era in un caso sempre zero e nell’altro sempre uno...quando scelgono uno destra e l’altro sinistra. [...] Eh...qua la memoria inizia a vacillare!

Nel passaggio alla modellizzazione, l'attenzione di Francesco si concentra sulla rappresentazione sistematica delle “*possibilità*”. La tabella viene richiamata come strumento per elencare tutte le configurazioni dell'esperimento mentale. La *readout strategy* si orienta alla completezza delle casistiche: ciò che è trattato come informazione pertinente è l'insieme delle combinazioni possibili tra le scelte di Alice e di Bob.

L'assegnazione dei valori 0 e 1 è ricordata come parte della costruzione del modello, ma non è accompagnata da un'esplicitazione del loro ruolo inferenziale. La correlazione non viene ancora rielaborata in termini del modello, che è descritto come organizzazione delle possibilità, piuttosto che come reinterpretazione del meccanismo esplicativo della perfetta correlazione. L'espressione “*la memoria inizia a vacillare*” segnala una difficoltà a richiamare con precisione la struttura completa del modello, ma non indica ancora una tensione concettuale nella coordination class della località. In questo segmento si osserva uno spostamento del focus: dalla spiegazione narrativa della correlazione alla sua rappresentazione formale attraverso l'elenco sistematico dei casi.

Durante l'esecuzione dei calcoli, Francesco mostra incertezza nel ricostruire il punteggio finale::

Il numero di punti che otterrebbero... [...] Un... un sedicesimo? [...] Mi sono bloccato... E' che prima stavo pensando ad un numero preciso, ma in effetti non si può... [...] L'avevamo fatto, mi sembra, con un singolo caso per ogni possibilità su quella scheda [si riferisce alla tabella] ed avevamo trovato un numero. [Ora ci arriviamo, ti piace quella scheda!] Si, mi è rimasta impressa!

L'attenzione torna ripetutamente alla tabella utilizzata durante il corso. La tabella funziona come riferimento strutturale per organizzare le possibilità e stabilizzare il calcolo. La *readout strategy* è orientata alla rappresentazione sistematica dei casi: l'informazione pertinente consiste nella corrispondenza tra le configurazioni possibili e i risultati associati.

Successivamente viene introdotta l'ipotesi del costruttore comune delle scatole, dotate di memoria e programma interno. Alla richiesta di esplicitare come questa configurazione incorpori la spiegazione di causa comune, Francesco risponde:

Non è determinato dalle scelte, ma il risultato è pre-determinato, quindi è una causa comune, pre-stabilita.

In questo passaggio la causa comune viene coordinata attraverso la nozione di predeterminazione. Il risultato non dipende dalle scelte effettuate durante l'interazione, ma da una struttura precedente condivisa. La *causal net* si articola ora in modo esplicito: programma comune → esiti predeterminati → correlazione osservata.

La predeterminazione non introduce una nuova configurazione esplicativa, ma formalizza in modo più preciso la causa comune già disponibile precedentemente. Si osserva un raffinamento interno della rete inferenziale: la causa comune non è più soltanto “*evento esterno che influenza entrambi*”, ma struttura pre-stabilita incorporata nel dispositivo.

In termini di *coordination class* della località, questo passaggio mostra un ampliamento dello *span* applicativo: la spiegazione causa comune viene ora proiettata nel modello e integrata nella struttura formale del gioco. Il principio regolativo rimane invariato: la correlazione deve essere resa intelligibile attraverso una determinazione condivisa che precede le scelte.

Una volta completata la tabella nel caso in cui le scatole contengano i computer programmati dal costruttore, Francesco sintetizza il risultato attraverso la disuguaglianza di Bell:

[Il punteggio finale] *S minore o uguale a tre.*

La disuguaglianza viene qui richiamata come esito formale del calcolo effettuato sulla base delle configurazioni possibili. “*S minore o uguale 3*” rappresenta il vincolo quantitativo associato alla struttura pre-determinata del modello. La formula viene enunciata senza ulteriori commenti interpretativi. Non viene ancora esplicitato il significato del limite rispetto alla spiegazione della correlazione, né viene tematizzata la relazione tra tale vincolo e l'assunzione di località. La disuguaglianza entra nel discorso come risultato del procedimento combinatorio, ma non è ancora integrata in una riorganizzazione della rete inferenziale.

Dal punto di vista della *coordination class* della località, non si osserva in questo momento una trasformazione strutturale. Il limite $S \leq 3$ è coerente con la configurazione di causa comune pre-determinata precedentemente formalizzata.

Quarta parte: La violazione della disuguaglianza di Bell

Nella parte conclusiva dell'intervista si discutono gli esperimenti degli anni Settanta che hanno mostrato la violazione sperimentale della disuguaglianza di Bell (4). Alla domanda sulle implicazioni di tale violazione, Francesco afferma:

Quindi non vale più l'aspetto probabilistico in pratica? [...] Cioè, la probabilità impone che una legge sia rispettata e se questo non avviene significa che... entra in gioco qualcos'altro oltre a quello che per ora si sa.

La violazione viene interpretata come fallimento della configurazione probabilistica precedentemente mobilitata. La probabilità, che aveva funzionato come criterio per valutare la coerenza tra possibilità e risultato, è descritta come ciò che “*impone che una legge sia rispettata*”. Se il limite $S \leq 3$ non viene rispettato, la struttura probabilistica che lo giustificava non è più sufficiente. In questo passaggio si osserva il riconoscimento di una tensione strutturale: la configurazione causale pre-determinata e la sua articolazione probabilistica non riescono a rendere conto del risultato sperimentale. L'espressione “*entra in gioco qualcos'altro*” suggerisce la percezione di un elemento mancante, ma tale elemento non viene esplicitato né integrato in una nuova rete inferenziale.

Dal punto di vista della coordination class della località, non si osserva ancora una ristrutturazione del principio regolativo. Francesco riconosce l'insufficienza delle risorse disponibili, ma non articola quale assunzione debba essere modificata né quale nuova struttura debba sostituire quella precedente. Si registra quindi un momento di instabilità riconosciuta, senza che emerga una riconfigurazione autonoma della classe.

Alla richiesta di ripercorrere l'intero percorso e indicare quali modifiche introdurre per rendere possibile la vittoria, Francesco afferma:

[Bisogna modificare] L'inizio... cioè la scelta [...] Deve aggiungersi qualcosa che fa sì che ci sia una correlazione ulteriore nelle loro scelte. Dopo il resto...deriva tutto dal punteggio iniziale, quindi non puoi cambiarlo. [...] Cioè, il sistema di calcolo del punteggio, della probabilità e tutto... cioè la matematica... quindi rimane così. L'unica cosa che può cambiare sono le condizioni per cui inizialmente uno sceglie qualcosa ed uno sceglie l'altro.

Francesco afferma dunque che “[bisogna modificare] *l'inizio... cioè la scelta*” e che “*il sistema di calcolo del punteggio, della probabilità e tutto... cioè la matematica... quindi rimane così*”. La distinzione è netta: la struttura matematica che conduce al limite “*S minore o uguale a 3*” non viene messa in discussione; ciò che può cambiare sono “*le condizioni per cui inizialmente uno sceglie qualcosa ed uno sceglie l'altro*”.

In questo segmento Francesco mantiene stabile l'architettura formale costruita nella fase di modellizzazione e individua nelle condizioni iniziali delle scelte il punto critico del ragionamento. La correlazione deve essere modificata a monte, non nel calcolo che la rende esplicita. Dal punto di vista della coordination class della località, non si osserva ancora una riorganizzazione della *struttura inferenziale*, che resta coerente con il vincolo precedente.

In questo quadro, lo studente afferma:

Deve esserci una correlazione in più. [...] C'è ci dev'essere comunque un'influenza... forse?... Cioè non l'influenza di cui parlavamo noi. ... Arriviamo sempre lì, ci dev'essere un'influenza sotto forma di entanglement. Ci dev'essere qualcosa che fa sì che le loro scelte seguano la stessa logica. [...] Cioè, diciamo che il gioco al quale sto giocando fino a quando arriviamo al punto $S \leq 3$ spiegherebbe il mondo razionale per come lo si pensava prima. Se questo non avviene significa che c'è qualcosa che non sappiamo spiegarci.

L'espressione “*Deve esserci una correlazione in più*” suggerisce che la configurazione precedente non è sufficiente. L'uso esitante del termine “*influenza*”, seguito dalla precisazione “*non l'influenza di cui parlavamo noi*”, indica che Francesco sta distinguendo questa nuova forma di connessione dall'influenza locale legata alla vicinanza spaziale. L'entanglement viene nominato come la forma di influenza capace di produrre tale correlazione aggiuntiva, descritta come qualcosa che fa sì che le scelte “*seguano la stessa logica*”. In questo passaggio, la coordination class della località entra in tensione: la regola che legava possibilità di influenza e prossimità spaziale non è più sufficiente. L'introduzione dell'entanglement implica che una forma di connessione possa persistere anche oltre i vincoli che avevano organizzato fin lì la rete inferenziale. Il riferimento al “*mondo razionale per come lo si pensava prima*” mostra che Francesco riconosce l'esistenza di un quadro coerente precedente e, al tempo stesso, la necessità di oltrepassarlo.

Qui non si osserva soltanto un ampliamento dello *span*: l'idea stessa di influenza viene riformulata. L'entanglement non viene aggiunto come semplice caso ulteriore, ma come forma di connessione che non rientra nella configurazione locale precedente. In questo senso, la *coordination class* della località non viene solo estesa; viene messa in “cortocircuito” dall'introduzione di una correlazione che eccede il vincolo spaziale.

Il passaggio diventa esplicito quando afferma:

[...] Assunta la NON località, tipo? [...] Cade l'assunto che se sono in due galassie diverse non si influenzano, non c'è una correlazione, in realtà c'è. [...] Perché anche ponendo [tra Alice e Bob] la distanza infinita vediamo che, nonostante ciò, comunque si ottiene un punteggio maggiore di tre e quindi emerge una proprietà in più...per vincerlo. [...] Quindi cioè... tradotto sarebbe: assumendo la località, ovvero che si influenzano se sono vicini spazialmente e se possono interagire l'un l'altro, se li pongo a distanze infinite, allora non è possibile vincere. Ma, sebbene questo sia vero e posso comunque vincere il gioco, necessariamente deve... non essere vera questa località.

Qui la località viene esplicitamente nominata come “assunto”. Francesco ricostruisce in modo lineare il nesso che aveva organizzato il suo ragionamento: se la località vale, allora a distanza infinita non può esserci influenza; se non c'è influenza, non si può superare il limite $S \leq 3$. Il fatto che, “nonostante” la distanza infinita, si ottenga un punteggio maggiore di tre rende incompatibile questo schema.

Dal punto di vista della coordination class della località, il cambiamento è strutturale. Fino a questo momento la vicinanza spaziale funzionava come criterio per stabilire la possibilità di influenza; ora Francesco afferma che anche a distanza infinita “in realtà c'è [correlazione]”. La regola che legava distanza e assenza di connessione viene dichiarata non più valida. La località non opera più come principio che organizza le inferenze, ma come ipotesi che può essere negata.

In questo senso, l'introduzione della “NON località” non è un semplice ampliamento dello span della classe: non si aggiunge un nuovo caso alla struttura precedente. Viene invece rimosso il vincolo che aveva fin dall'inizio regolato la coordinazione tra distanza, influenza e correlazione. L'entanglement, già introdotto come “influenza sotto forma di entanglement”, diventa qui la configurazione necessaria per rendere intelligibile una correlazione che persiste anche in assenza di vicinanza spaziale.

In conclusione, la configurazione causale locale mantiene coerenza interna finché il limite $S \leq 3$ è rispettato. La violazione sperimentale rende incompatibile tale configurazione con l'esito osservato. In questo momento l'entanglement non viene introdotto come semplice caso ulteriore, ma come necessità esplicativa che comporta l'abbandono dell'assunto di località (“necessariamente deve... non essere vera questa località”). La località, da vincolo operativo

implicito, viene qui tematizzata come assunto e dichiarata non più valida; in questo senso si assiste a una riorganizzazione del principio che regolava la coordinazione.

5.2. Discussione dei risultati

In questa sezione vengono discussi i risultati emersi dall'analisi dei tre casi studio (Ivan, Francesco ed Ester), interpretati alla luce della teoria delle *coordination classes*, utilizzata come lente analitica per descrivere come la classe di coordinazione della località venga attivata e messa alla prova nel corso del ragionamento degli studenti.

Nella prima parte dell'attività, l'analisi della perfetta correlazione nel caso dei “*pasti di Alice e Bob*” rende esplicite le *readout strategies* attraverso cui gli studenti selezionano gli elementi rilevanti della situazione. Le spiegazioni proposte si articolano attorno alle due principali risorse causali discusse durante il corso: influenza diretta e causa comune, che costituiscono i nodi principali della *causal net* associata alla località.

Nei tre casi analizzati, queste risorse vengono mobilitate in modo diverso. Ester richiama fin dalle prime fasi una spiegazione riconducibile alla causa comune, interpretando la perfetta correlazione attraverso fattori condivisi che orientano le scelte di Alice e Bob (come nel caso delle “*stesse offerte*” o della “*stessa catena di supermercati*”). Ivan, invece, incontra inizialmente maggiori difficoltà nell'individuare gli elementi rilevanti della situazione e necessita di un accompagnamento nel ragionamento per attivare strategie di lettura funzionali. Francesco esplora ulteriori possibilità interpretative e mantiene aperte diverse spiegazioni compatibili con la località. In questa fase iniziale emerge quindi una *coordination class* della località che presenta gradi diversi di stabilità, in cui le correlazioni osservate vengono interpretate attraverso una *causal net* che include spiegazioni basate su influenza diretta o su fattori comuni preesistenti.

L'attività procede e tali spiegazioni vengono progressivamente messe alla prova mediante l'introduzione di uno scenario più articolato. Alice e Bob dispongono ora di due possibili scelte, rappresentate dai due supermercati situati a sinistra e a destra. In questa configurazione la perfetta correlazione osservata inizialmente non si mantiene in tutte le combinazioni (caso destra-destra).

Nei tre casi analizzati, le *readout strategies* si differenziano soprattutto per ciò che viene considerato “dato rilevante”. In questo passaggio, Ivan tende a mettere a fuoco l’eccezione del caso destra–destra e la difficoltà di ricondurla, insieme alle altre combinazioni, a una spiegazione unica coerente; Ester continua a interpretare la situazione attraverso la configurazione causale della causa comune, pur riconoscendo che la presenza di più possibilità di scelta rende meno immediata questa spiegazione. Francesco, invece, entra in una fase di riformulazione del problema, richiamando alternativamente le configurazioni di influenza e di causa comune, senza riuscire a stabilizzarne una come interpretazione soddisfacente. Nonostante queste differenze nelle strategie di lettura, nei tre casi emerge un effetto comune: la *causal net* associata alla località non riesce più a stabilizzarsi attorno a una configurazione esplicativa univoca. Le strutture causali che avevano funzionato nel caso di perfetta correlazione vengono entrambe richiamate, ma non riescono più a integrare in modo coerente tutte le configurazioni possibili dello scenario. La *inferential net* della località entra così in una fase di tensione, in cui le risorse disponibili rimangono attive ma non riescono più a ricomporsi in una spiegazione stabile delle correlazioni osservate. Nei tre studenti questa tensione si manifesta in modi differenti: come difficoltà logica nel mantenere una struttura di assegnazione coerente (Ivan), come oscillazione tra configurazioni causali alternative (Francesco), o come tentativo di mantenere attiva la spiegazione di causa comune pur riconoscendone i limiti (Ester). In questa prospettiva, il Tutorial potrà essere ulteriormente raffinato per aumentarne l’autonomia rispetto alla conduzione delle intervistatrici, rendendo più espliciti i passaggi chiave e inserendo supporti che guidino il ragionamento in modo stabile. Saranno necessari ulteriori studi e nuove sperimentazioni per valutarne l’efficacia su campioni più ampi.

Il passaggio alla costruzione della disuguaglianza di Bell rappresenta un momento particolarmente significativo nel processo di coordinazione delle risorse. In questa fase, il problema viene progressivamente riformulato attraverso il modello: le correlazioni osservate devono essere descritte mediante una struttura formale che renda espliciti i vincoli imposti da una spiegazione locale. Tutti e tre gli studenti arrivano alla formulazione del vincolo imposto dalla disuguaglianza e riconoscono il ruolo della relazione matematica che ne deriva.

Tuttavia, nei tre casi, questo passaggio viene integrato nella coordination class della località mediante risorse diverse. Ivan mobilita la disequazione come vincolo esplicito della spiegazione di causa comune: la relazione matematica diventa, per lui, la formalizzazione del limite imposto da una programmazione condivisa delle scatole. Francesco organizza invece il

ragionamento attraverso la costruzione della tabella delle probabilità, utilizzata come strumento per coordinare le diverse configurazioni possibili e per verificare in modo sistematico il punteggio massimo ottenibile. Ester, pur riconoscendo il ruolo del vincolo matematico, sviluppa il ragionamento principalmente attraverso un'analisi operativa delle configurazioni del modello. In quest'ultimo caso, il lavoro matematico rimane soprattutto a livello procedurale e non produce una riorganizzazione esplicita della *rete inferenziale* associata alla località. In termini di coordination classes, questo passaggio mostra come la stessa relazione matematica possa essere integrata nella *causal net* attraverso percorsi differenti: come vincolo esplicito della spiegazione (Ivan), come strumento di organizzazione sistematica dei casi possibili (Francesco), o come analisi combinatoria delle possibilità del modello (Ester). Questo risultato suggerisce che il punto cruciale del ragionamento non risieda nello strumento matematico impiegato, bensì nelle assunzioni interpretative che sostengono la spiegazione delle correlazioni. In questo senso risulta significativa l'osservazione di Francesco quando, nel discutere possibili strategie per vincere al gioco di Bell, afferma che “*la matematica... rimane così*”. Con questa affermazione lo studente riconosce che il vincolo matematico non è il luogo del problema: la disuguaglianza rappresenta piuttosto il limite strutturale imposto da una spiegazione locale delle correlazioni.

Nella fase finale dell'attività, l'introduzione della violazione della disuguaglianza di Bell mette in tensione la coordination class della località che aveva sostenuto l'interpretazione delle correlazioni nelle fasi precedenti. Nei tre casi analizzati, questa situazione porta gli studenti a confrontarsi con i limiti delle risorse interpretative finora impiegate.

Nei casi di Ivan e Francesco, il ragionamento si riorganizza progressivamente attorno all'assunto di località che aveva strutturato la *causal net* utilizzata per interpretare le correlazioni. Entrambi gli studenti riconoscono esplicitamente che il vincolo matematico espresso dalla disuguaglianza non può essere modificato e che il problema non riguarda quindi il calcolo o la struttura della relazione matematica. Di conseguenza, l'attenzione si sposta sulle assunzioni interpretative che sostenevano il modello. In questo passaggio, la località viene progressivamente trattata come un elemento del modello che può essere messo in discussione. Nei loro ragionamenti emerge quindi la necessità di introdurre una forma di correlazione tra i due sistemi che non sia riconducibile alle risorse causali precedentemente mobilitate nella causal net della località. In questo contesto, l'entanglement viene evocato come possibile risorsa interpretativa per rendere conto delle correlazioni osservate. Il caso di Ester mostra invece una traiettoria diversa. Pur riconoscendo la violazione della

disuguaglianza, la studentessa non procede alla riorganizzazione della *causal net*. Le *readout strategies* mobilitate nelle fasi precedenti non portano all'introduzione di nuove risorse interpretative e la *inferential net* associata alla località viene stabilizzata introducendo risorse interpretative alternative, come il ricorso alla casualità, che consentono di preservare l'assunto di località senza metterlo esplicitamente in discussione. Il confronto tra i tre casi mostra quindi modalità differenti di gestione della tensione interna alla coordination class della località. Nei casi di Ivan e Francesco, tale tensione conduce a una riorganizzazione della causal net che implica il riconoscimento dei limiti dell'assunto di località. Nel caso di Ester, invece, la coordination class rimane stabile e il processo di riorganizzazione non si completa.

Alla luce dei risultati, proponiamo di caratterizzare una forma di *quantum thinking* come ristrutturazione della *inferential net* della località.

Nei tre casi analizzati, gli studenti interpretano inizialmente le correlazioni mobilitando una coordination class della località già parzialmente strutturata, in cui le correlazioni tra i risultati vengono spiegate attraverso due principali risorse causali: l'influenza diretta tra i sistemi oppure la presenza di una causa comune. In questa fase, la località opera come principio organizzatore implicito della rete inferenziale: le correlazioni osservate vengono interpretate come il risultato di meccanismi causali riconducibili a una struttura di influenza locale o a fattori comuni preesistenti. Tuttavia, con l'introduzione dello scenario che include la configurazione destra-destra emerge una prima tensione nella *rete inferenziale* utilizzata per interpretare le correlazioni. Questa tensione viene successivamente esplicitata quando il problema viene formalizzato attraverso la disuguaglianza di Bell, che rende visibile il vincolo imposto da una spiegazione locale. Nei tre casi analizzati, gli studenti riconoscono e trattano questo vincolo come stabile. Il punto cruciale emerge però quando si introduce la violazione della disuguaglianza: in questa situazione, le *readout strategies* continuano a individuare correttamente le correlazioni osservate, mentre la *causal net* locale non riesce più a coordinare tali configurazioni in una spiegazione coerente. Nei casi di Ivan e Francesco, l'assunto di località viene progressivamente trattato come ipotesi del modello con un dominio di validità limitato. In questo passaggio la *causal net* viene riorganizzata attraverso l'introduzione di una nuova risorsa interpretativa, l'entanglement, che consente di coordinare le correlazioni osservate senza ricondurle esclusivamente a strutture causali locali. Il quantum thinking emerge quindi nel momento in cui la località viene esplicitata come elemento del modello e i suoi limiti di validità vengono riconosciuti nella spiegazione delle correlazioni. Il

caso di Ester mostra invece una traiettoria differente dello stesso processo. Anche per lei la violazione della disuguaglianza rende evidente il limite delle spiegazioni precedentemente mobilitate; tuttavia, questo riconoscimento non conduce a una riorganizzazione della rete inferenziale. La *coordination class* della località rimane quindi priva di una nuova configurazione esplicativa e il ragionamento si arresta in una condizione di sospensione interpretativa.

Concludendo, interpretati attraverso la teoria delle classi di coordinazione, questi risultati suggeriscono che il *quantum thinking* può essere inteso come una proprietà emergente del processo per cui l'*inferential net* della classe di coordinazione località non riesce più a integrare le informazioni fornite dalle readout strategies.

Conclusioni

Questa tesi si inserisce nel contesto di ricerca in Didattica della Fisica dell'Università di Bologna e contribuisce alla progettazione e sperimentazione di un percorso PLS sulle due Rivoluzioni Quantistiche, con un focus specifico sull'entanglement. La scelta di lavorare attraverso il gioco di Bell, nella formulazione proposta da Nicolas Gisin in *Quantum Chance*, ha permesso di costruire un filo di ragionamento che conduce studenti e studentesse a mettere in discussione l'assunto alla base del ragionamento classico, la località. Inserito nel corso, questo approccio ha sostenuto l'acquisizione di conoscenze di base di fisica quantistica ed una riflessione sulle implicazioni scientifiche, sociali e culturali delle tecnologie quantistiche.

A seguito del percorso svolto, si è progettato un Tutorial che ricostruisce il filo concettuale, epistemologico e metodologico proposto nel corso. La sua progettazione si è ispirata ai Tutorial sviluppati nella ricerca in Didattica della Fisica dal gruppo di Seattle (Università di Washington) ed è stato sviluppato come strumento per sostenere gli studenti nella ricostruzione del ragionamento durante interviste semistrutturate. L'analisi, condotta adottando il framework delle classi di coordinazione, ha permesso di descrivere la il ragionamento degli studenti lungo le fasi del percorso come una riorganizzazione progressiva della *rete inferenziale* e della sua attivazione in contesti differenti. In particolare, gli elementi che caratterizzano una forma di pensiero quantistico emersi dall'analisi delle interviste sono:

1. Disporre di alternative classiche e di *readout strategies* funzionali per estrarre informazioni rilevanti anche quando il contesto le mette alla prova. Al crescere del numero degli elementi in gioco, mettere alla prova le spiegazioni assume la forma di un ciclo di coordinazione progressiva;
2. Essere disposti a mettere in discussione la *rete inferenziale* quando il Tutorial conduce al vincolo (disuguaglianza) e alla tensione introdotta dalla violazione;
3. Accettare la negoziabilità dell'assunto di località, trattandolo come ipotesi rivedibile e non come presupposto intoccabile.

Nel complesso, la tesi mostra che un percorso incentrato sul gioco di Bell può sostenere un passaggio dalle spiegazioni basate su intuizioni locali a forme di ragionamento più vincolate e coerenti con il dominio quantistico. Allo stesso tempo, parlare di transizione richiede cautela: i dati supportano l'osservazione di spostamenti nel ragionamento, non

necessariamente una stabilizzazione completa delle nuove interpretazioni. In questa prospettiva, il Tutorial potrà essere ulteriormente raffinato per aumentarne l'autonomia rispetto alla conduzione delle intervistatrici, rendendo più espliciti i passaggi chiave e inserendo supporti che guidino il ragionamento in modo stabile. Saranno necessari ulteriori studi e nuove sperimentazioni per valutarne l'efficacia su campioni più ampi.

Bibliografia

- Aspect, A. (1976). Proposed experiment to test the nonseparability of quantum mechanics. *Physical Review D*, 14(8), 1944–1951. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.14.1944>
- Aspect, A., Dalibard, J., & Roger, G. (1982b). Experimental test of Bell's inequalities using time-varying analyzers. *Physical Review Letters*, 49(25), 1804–1807. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.49.1804>
- Aspect, A., Grangier, P., & Roger, G. (1981). Experimental tests of realistic local theories via Bell's theorem. *Physical Review Letters*, 47(7), 460–463. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.47.460>
- Aspect, A., Grangier, P., & Roger, G. (1982a). Experimental realization of Einstein–Podolsky–Rosen–Bohm gedankenexperiment: A new violation of Bell's inequalities. *Physical Review Letters*, 49(2), 91–94. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.49.91>
- Bacciagaluppi, G., & Crull, E. (2024). *The Einstein paradox: The debate on nonlocality and incompleteness in 1935*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781139028493.003>
- Bacciagaluppi, G., & Valentini, A. (2009). *Quantum theory at the crossroads: Reconsidering the 1927 Solvay conference*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139194983>
- Bell, J. S. (1964). On the Einstein Podolsky Rosen paradox. *Physics*, 1(3), 195–200. <https://doi.org/10.1103/PhysicsPhysiqueFizika.1.195>
- Bell, J. S. (1966). On the problem of hidden variables in quantum mechanics. *Reviews of Modern Physics*, 38(3), 447–452. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.38.447>
- Bell, J. S. (2004). *Speakable and unspeakable in quantum mechanics: Collected papers on quantum philosophy* (Rev. ed.). Cambridge University Press.
- Beller, M. (1999). *Quantum dialogue: The making of a revolution*. University of Chicago Press.
- BIG Bell Test Collaboration. (2018). Challenging local realism with human choices. *Nature*, 557(7704), 212–216. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0085-3>
- Bohm, D. (1952). A suggested interpretation of the quantum theory in terms of “hidden” variables. I. *Physical Review*, 85(2), 166–179. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.85.166> II. *Physical Review*, 85(2), 180–193. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.85.180>
- Bohm, D., & Aharonov, Y. (1957). Discussion of experimental proof for the paradox of Einstein, Rosen, and Podolsky. *Physical Review*, 108(4), 1070–1076. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.108.1070>
- Bohm, D., & Hiley, B. J. (1993). *The undivided universe: An ontological interpretation of quantum theory*. Routledge.

- Bohr, N. (1935a). Quantum mechanics and physical reality. *Nature*, 136(3428), 65.
<https://doi.org/10.1038/136065a0>
- Bohr, N. (1935b). Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete? *Physical Review*, 48(8), 696–702. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.48.696>
- Bohr, N. (1987). Discussion with Einstein on epistemological problems in atomic physics. In N. Bohr, *The philosophical writings of Niels Bohr* (Vol. 2, Essays 1932–1957 on atomic physics and human knowledge, pp. 32–66). Ox Bow Press. (Original work published 1949)
- Bokulich, A. (2006). Heisenberg meets Kuhn: Closed theories and paradigms. *Philosophy of Science*, 73(1), 90–107. <https://doi.org/10.1086/510176>
- Bondani, M., Chiofalo, M. L., Ercolessi, E., Macchiavello, C., Malgieri, M., Michelini, M., Mishina, O., Onorato, P., Pallotta, F., Satanassi, S., Stefanel, A., Sutrin, C., Testa, I., & Zuccarini, G. (2022). Introducing quantum technologies at secondary school level: Challenges and potential impact of an online extracurricular course. *Physics*, 4(4), 1150–1167. <https://doi.org/10.3390/physics4040075>
- Bondani, M., Caprara, S., Chiarello, F., Dabbicco, M., Hamma, A., Malgieri, M., Marzoli, I., Nazzaro, M., & Paladino, E. (2024). QTris: a quantum game. In F. Baboux, V. D’Auria, & T. Bienaimé (Eds.), *Quantum Technologies 2024* (Proceedings of SPIE, Vol. 12993, 129930O). SPIE.
<https://doi.org/10.1117/12.3029532>
- Born, M. (Ed.). (1971). *The Born–Einstein letters: Correspondence between Albert Einstein and Max and Hedwig Born from 1916–1955, with commentaries by Max Born*. Macmillan.
- Chiofalo, M. L., Foti, C., Michelini, M., Santi, L., & Stefanel, A. (2022). Games for teaching/learning quantum mechanics: A pilot study with high-school students. *Education Sciences*, 12(7), 446.
<https://doi.org/10.3390/educsci12070446>
- Chiofalo, M. L., Foti, C., Lazzeroni, C., Maniscalco, S., Seskir, Z. C., Sherson, J., Weidner, C. A., & Michelini, M. (2024). Games for quantum physics education. *Journal of Physics: Conference Series*, 2727, 012010. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2727/1/012010>
- Clauser, J. F. (1976). Experimental investigation of a polarization correlation anomaly. *Physical Review Letters*, 36(21), 1223–1226. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.36.1223>
- Clauser, J. F., & Freedman, S. J. (1972). Experimental test of local hidden-variable theories. *Physical Review Letters*, 28(14), 938–941. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.28.938>
- Clauser, J. F., & Horne, M. A. (1974). Experimental consequences of objective local theories. *Physical Review D*, 10(2), 526–535. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.10.526>
- Clauser, J. F., Horne, M. A., Shimony, A., & Holt, R. A. (1969). Proposed experiment to test local hidden-variable theories. *Physical Review Letters*, 23(15), 880–884.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.23.880>

- Cleve, R., Høyer, P., Toner, B., & Watrous, J. (2004). Consequences and limits of nonlocal strategies (arXiv:quant-ph/0404076) [Preprint]. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.quant-ph/0404076>
- Commissione europea. (2021, March 9). Comunicazione della Commissione al Parlamento europeo, al Consiglio, al Comitato economico e sociale europeo e al Comitato delle regioni. Bussola per il digitale 2030: Il modello europeo per il decennio digitale (COM(2021) 118 final). EUR-Lex. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/HTML/?uri=CELEX:52021DC0118>
- Christensen, B. G., McCusker, K. T., Altepeter, J. B., Calkins, B., Gerrits, T., Lita, A. E., Miller, A., Shalm, L. K., Zhang, Y., Nam, S. W., Brunner, N., Lim, C. C. W., Gisin, N., & Kwiat, P. G. (2013). Detection-loophole-free test of quantum nonlocality, and applications. *Physical Review Letters*, 111(13), 130406. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.111.130406>
- De Renzi, V., Paris, M. G. A., & Bondani, M. (2025). From staging to insight: An educational path to understanding Bell's inequalities. *EPJ Quantum Technology*, 12, 122. <https://doi.org/10.1140/epjqt/s40507-025-00415-5>
- de Touzalin, A., Marcus, C., Heijman, F., Cirac, I., Murray, R., & Calarco, T. (2016). Quantum manifesto: A new era of technology. https://qt.eu/media/pdf/93056_Quantum-Manifesto_WEB.pdf
- Deutsch, D. (1985). Quantum theory, the Church–Turing principle and the universal quantum computer. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 400(1818), 97–117. <https://doi.org/10.1098/rspa.1985.0070>
- DeVore, S., & Singh, C. (2020). An interactive learning tutorial on quantum key distribution. *Physical Review Physics Education Research*, 16(1), 010126. <https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.16.010126>
- Dirac, P. A. M. (1981). *The principles of quantum mechanics*. Oxford University Press.
- diSessa, A. A., & Sherin, B. L. (1998). What changes in conceptual change? *International Journal of Science Education*, 20(10), 1155–1191. <https://doi.org/10.1080/0950069980201002>
- Dowling, J. P., & Milburn, G. J. (2003). Quantum technology: The second quantum revolution. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 361(1809), 1655–1674. <https://doi.org/10.1098/rsta.2003.1227>
- d’Espagnat, B. (1979). The quantum theory and reality. *Scientific American*, 241(5), 158–181. <https://doi.org/10.1038/scientificamerican1179-158>
- Einstein, A. (1948). Quanten-Mechanik und Wirklichkeit. *Dialectica*, 2(3–4), 320–324. <https://doi.org/10.1111/j.1746-8361.1948.tb00704.x>
- Einstein, A., Podolsky, B., & Rosen, N. (1935). Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete? *Physical Review*, 47(10), 777–780. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.47.777>

European Commission. (2023, December 6). European declaration on quantum technologies. Shaping Europe's Digital Future.

<https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/library/european-declaration-quantum-technologies>

European Quantum Flagship. (2024, February). Strategic research and industry agenda 2030.

<https://qt.eu/media/pdf/Strategic-Research-and-Industry-Agenda-2030.pdf>

Fabris, M. (2024). Il gioco di Bell. Aspetti concettuali e didattici [Tesi magistrale, Università di Bologna]. AMS Laurea. <https://amslaurea.unibo.it/id/eprint/32199/>

Fano, V., & Macchia, G. (2016). La disuguaglianza di Bell. *APhEx*, (14), 1–27.

Folkers, B., van Rossum, A., Brinkman, A., & Stadermann, H. K. E. (2025). Visualising quantum entanglement using interactive electronic quantum dice (arXiv:2510.04931) [Preprint]. arXiv.

<https://doi.org/10.48550/arXiv.2510.04931>

Förster, M., & Pospiech, G. (2025). Bridging the theory - practice gap: A university course on quantum information science and transfer to career-oriented physics teaching. *EPJ Quantum Technology*, 12, Article 127. doi:10.1140/epjqt/s40507-025-00441-3

Foti, C., Coppo, A., Barni, G., Cuccoli, A., & Verrucchi, P. (2021). Time and classical equations of motion from quantum entanglement via the Page and Wootters mechanism with generalized coherent states. *Nature Communications*, 12, Article 1787. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-21782-4>

Freire, O., Jr. (2006). Philosophy enters the optics laboratory: Bell's theorem and its first experimental tests (1965–1982). *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 37(4), 577–616.

<https://doi.org/10.1016/j.shpsb.2005.12.003>

Fry, E. S., & Thompson, R. C. (1976). Experimental test of local hidden-variable theories. *Physical Review Letters*, 37(8), 465–468. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.37.465>

Ghirardi, G. C. (1997). Un'occhiata alle carte di Dio: Gli interrogativi che la scienza moderna pone all'uomo. *Il Saggiatore*.

Gisin, N. (2014). *Quantum chance: Nonlocality, teleportation and other quantum marvels*. Springer.

<https://doi.org/10.1007/978-3-319-05473-5>

Giustina, M., Mech, A., Ramelow, S., Wittmann, B., Kofler, J., Beyer, J., Lita, A., Calkins, B., Gerrits, T., Nam, S. W., Ursin, R., & Zeilinger, A. (2013). Bell violation using entangled photons without the fair-sampling assumption. *Nature*, 497(7448), 227–230. <https://doi.org/10.1038/nature12012>

Goorney, S., Foti, C., Santi, L., Sherson, J., Yago Malo, J., & Chiofalo, M. L. (2022). Culturo-scientific storytelling. *Education Sciences*, 12(7), 474. doi:10.3390/educsci12070474

Handsteiner, J., Friedman, A. S., Rauch, D., Gallicchio, J., Liu, B., Hosp, H., Kofler, J., Bricher, D., Fink, M., Leung, C., Mark, A., Nguyen, H. T., Sanders, I., Steinlechner, F., Ursin, R., Wengerowsky, S., Guth, A. H., Kaiser, D. I., Scheidl, T., & Zeilinger, A. (2016). Cosmic Bell test: Measurement

- settings from Milky Way stars (arXiv:1611.06985) [Preprint]. arXiv.
<https://doi.org/10.48550/arXiv.1611.06985>
- Hill, H. M. (2022). Physics Nobel honors foundational quantum entanglement experiments. *Physics Today*, 75(12), 14–17. <https://doi.org/10.1063/PT.3.5133>
- Howard, D. (1985). Einstein on locality and separability. *Studies in History and Philosophy of Science Part A*, 16(3), 171–201. [https://doi.org/10.1016/0039-3681\(85\)90002-2](https://doi.org/10.1016/0039-3681(85)90002-2)
- Jammer, M. (1966). *The conceptual development of quantum mechanics*. McGraw-Hill.
- Jammer, M. (1974). *The philosophy of quantum mechanics: The interpretations of quantum mechanics in historical perspective*. John Wiley & Sons.
- Kaiser, D. I. (2020). Tackling loopholes in experimental tests of Bell’s inequality (arXiv:2011.09296) [Preprint]. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2011.09296>
- Kocher, C. A., & Commins, E. D. (1967). Polarization correlation of photons emitted in an atomic cascade. *Physical Review Letters*, 18(15), 575–577. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.18.575>
- Levrini, O., & diSessa, A. A. (2008). How students learn from multiple contexts and definitions: Proper time as a coordination class. *Physical Review Special Topics – Physics Education Research*, 4, 010107. <https://doi.org/10.1103/PhysRevSTPER.4.010107>
- Levrini, O., & Fantini, P. (2013). Encountering productive forms of complexity in learning modern physics. *Science & Education*, 22(8), 1895–1910. <https://doi.org/10.1007/s11191-013-9587-4>
- Levrini, O., Bertozzi, E., Gagliardi, M., Grimellini Tomasini, N., Pecori, B., Tasquier, G., & Galili, I. (2014). Meeting the Discipline-Culture Framework of Physics Knowledge: A teaching experience in Italian secondary school. *Science & Education*, 23(9), 1701–1731. <https://doi.org/10.1007/s11191-014-9692-z>
- Levrini, O., Fantini, P., Tasquier, G., Pecori, B., & Levin, M. (2015). Defining and operationalizing appropriation for science learning. *Journal of the Learning Sciences*, 24(1), 93–136. <https://doi.org/10.1080/10508406.2014.928215>
- Loviseti, L., Melli, E., & Giliberti, M. (2024). “The Elegance of Quantum Mechanics”: A didactic path for high school. *Journal of Physics: Conference Series*, 2750(1), 012022. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2750/1/012022>
- Malgieri, M., Onorato, P., & De Ambrosis, A. (2015). Insegnare la fisica quantistica a scuola: Un percorso basato sul metodo dei cammini di Feynman. *Giornale di Fisica*, 56(1), 45–70. <https://doi.org/10.1393/gdf/i2015-10214-y>
- Maudlin, T. (2011). *Quantum non-locality and relativity* (3rd ed.). Wiley-Blackwell.

- Maudlin, T. (2014). What Bell did. *Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical*, 47(42), 424010. <https://doi.org/10.1088/1751-8113/47/42/424010>
- McDermott, L. C. (2001). Oersted Medal Lecture 2001: Physics education research—The key to student learning. *American Journal of Physics*, 69(11), 1127–1137. <https://doi.org/10.1119/1.1389280>
- Mehra, J., & Rechenberg, H. (2000). *The historical development of quantum theory* (Vol. 1). Springer.
- Merli, P. G., Missiroli, G. F., & Pozzi, G. (1976). On the statistical aspect of electron interference phenomena. *American Journal of Physics*, 44(3), 306–307. <https://doi.org/10.1119/1.10184>
- Mermin, N. D. (1989). What's wrong with this pillow? *Physics Today*, 42(4), 9–11. <https://doi.org/10.1063/1.2810963>
- Mendoza, L., Akhobadze, K., & Kurkcuoglu, D. (2025). Introducing quantum entanglement and superposition to secondary school students using portable, hands-on exhibits. *The Physics Teacher*, 63(7), 557–562. <https://doi.org/10.1119/5.0226407>
- Michellini, M., & Stefanel, A. (Eds.). (2004). *Avvicinarsi alla teoria della fisica quantistica: Una proposta per la didattica*. Forum.
- Michellini, M., Ragazzon, R., Santi, L., & Stefanel, A. (2004). Discussion of a didactic proposal on quantum mechanics with secondary school students. *Il Nuovo Cimento C*, 27(5), 555–567. <https://doi.org/10.1393/ncc/i2005-10027-3>
- Ministero dell'Istruzione e del Merito. (n.d.). *Scuole 4.0: Nuove aule didattiche e laboratori. FUTURA – PNRR Istruzione*. Retrieved October 2, 2025, from <https://pnrr.istruzione.it/avviso/scuole-4-0-scuole-innovative-e-laboratori/>
- Ministero dell'Istruzione, dell'Università e della Ricerca. (2010). *Indicazioni nazionali riguardanti gli obiettivi specifici di apprendimento concernenti le attività e gli insegnamenti compresi nei piani degli studi previsti per i percorsi liceali* (D.M. 7 ottobre 2010, n. 211).
- Ministero dell'Istruzione. (2022). *Piano Scuola 4.0 [Versione grafica]*. https://pnrr.istruzione.it/wp-content/uploads/2022/07/PIANO_SCUOLA_4.0_VERSIONE_GRAFICA.pdf
- Ministero dell'Università e della Ricerca. (2025, September 5). *Strategia italiana per le tecnologie quantistiche*. <https://www.mur.gov.it/it/strategia-italiana-le-tecnologie-quantistiche>
- Montagnani, S., Stefanel, A., Chiofalo, M. L. M., Santi, L., & Michellini, M. (2023). An experiential program on the foundations of quantum mechanics for final-year high-school students. *Physics Education*, 58(3), 035003. <https://doi.org/10.1088/1361-6552/acb5da>
- Nobel Prize Outreach. (2012). *The Nobel Prize in Physics 2012 [Summary]*. NobelPrize.org. Retrieved March 3, 2026, from <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2012/summary/>

- Nobel Prize Outreach. (2022). The Nobel Prize in Physics 2022 [Summary]. NobelPrize.org. Retrieved March 3, 2026, from <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2022/summary/>
- Nobel Prize Outreach. (2025). The Nobel Prize in Physics 2025 [Summary]. NobelPrize.org. Retrieved March 3, 2026, from <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2025/summary/>
- Nobel Prize. (2022, October 4). Announcement of the 2022 Nobel Prize in Physics [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=O0sLYBeaaAM>
- Pallotta, F., Parola, A., & Bondani, M. (2022). Quantum physics at high school: A collaboration between physics researchers and teachers to design teaching–learning sequences. *Journal of Physics: Conference Series*, 2297(1), 012019. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2297/1/012019>
- Passante, G., Emigh, P. J., & Shaffer, P. S. (2014, July 30–31). Testing Tutorials in upper-division: An example from quantum mechanics. In 2014 Physics Education Research Conference Proceedings (pp. 199–202). <https://doi.org/10.1119/perc.2014.pr.046>
- Pospiech, G. (2001). Experiences with a modern course in quantum physics. In H. Behrendt, H. Dahncke, R. Duit, W. Gräber, M. Komorek, A. Kross, & P. Reiska (Eds.), *Research in science education: Past, present, and future* (pp. 89–94). Springer. https://doi.org/10.1007/0-306-47639-8_10 (link.springer.com)
- Pospiech, G. (2019). Pre-service teachers’ views on the use of metaphors for describing the concepts of uncertainty and entanglement in teaching quantum physics. *International Journal of Physics and Chemistry Education*, 11(1), 1–5. <https://doi.org/10.12973/ijpce/16113>
- Pospiech, G. (2021). Quantum cryptography as an approach for teaching quantum physics. In B. Jarosievitz & C. Sükösd (Eds.), *Teaching-learning contemporary physics: From research to practice* (pp. 19–31). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-78720-2_2
- Rauch, D., Handsteiner, J., Hochtner, A., Gallicchio, J., Friedman, A. S., Leung, C., Liu, B., Bulla, L., Ecker, S., Steinlechner, F., Ursin, R., Hu, B., Leon, D., Benn, C., Ghedina, A., Cecconi, M., Guth, A. H., Kaiser, D. I., Scheidl, T., & Zeilinger, A. (2018). Cosmic Bell test using random measurement settings from high-redshift quasars. *Physical Review Letters*, 121(8), 080403. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.121.080403> (link.aps.org)
- Ravaioli, G. (2016). *Learning and accepting quantum physics: Re-analysis of a teaching proposal* [Tesi magistrale, Università di Bologna]. AMS Laurea. <https://amslaurea.unibo.it/id/eprint/11220/>
- Renn, J. (2020). The Anthropocene and the history of science. In G. Dürbeck & P. Hüpkes (Eds.), *The Anthropocenic turn: The interplay between disciplinary and interdisciplinary responses to a new age* (pp. 37–58). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781003037620-4>
- Renn, J. (2020). *The evolution of knowledge: Rethinking science for the Anthropocene*. Princeton University Press.
- Satanassi, S. (2023). *Investigating the learning potential of the Second Quantum Revolution: Development of an approach for secondary school students* [Doctoral dissertation, Alma Mater

Studiorum – Università di Bologna]. AMS Dottorato (AlmaDL).
doi:10.48676/unibo/amsdottorato/10716

Satanassi, S. (2020). The challenge of Quantum Manifesto for science education: Designing a teaching module on quantum computers for secondary school students. *Il Nuovo Cimento C*, 43, 130.
<https://doi.org/10.1393/ncc/i2020-20130-4>

Satanassi, S., & Levrini, O. (2025). Second quantum revolution: The progressive design of an approach to value its cultural and conceptual scope. *Physical Review Physics Education Research*, 21(1), 010112. <https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.21.010112>

Satanassi, S., Ercolessi, E., & Levrini, O. (2022). Designing and implementing materials on quantum computing for secondary school students: The case of teleportation. *Physical Review Physics Education Research*, 18(1), 010122. <https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.18.010122>

Satanassi, S., Ercolessi, E., & Levrini, O. (2024a). An approach to the Second Quantum Revolution for secondary school students: The case of the random walk algorithm. *Journal of Physics: Conference Series*, 2750, 012024. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2750/1/012024>

Satanassi, S., Ercolessi, E., & Levrini, O. (2024b). A comparison between the First and the Second Quantum Revolutions: Development of a teaching course for secondary school students. *Il Nuovo Cimento C*, 47, 341. <https://doi.org/10.1393/ncc/i2024-24341-3>

Schrödinger, E. (1935b). Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik. *Die Naturwissenschaften*, 23, 807–812, 823–828, 844–849. <https://doi.org/10.1007/BF01491914>

Schrödinger, E. (1935a). Discussion of probability relations between separated systems. *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, 31(4), 555–563.
<https://doi.org/10.1017/S0305004100013554>

Stefanel, A. (2007). La meccanica quantistica nella scuola secondaria per formare al pensiero teoretico. In *Il mondo dei quanti*. Enciclopedia Italiana Treccani.
http://www.treccani.it/site/Scuola/nella%20scuola/area_fisica/index.htm

Sutrini, C., Malgieri, M., & Macchiavello, C. (2022). Quantum technologies: A course for teacher professional development. *Journal of Physics: Conference Series*, 2297(1), 012018.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/2297/1/012018>

Weihs, G., Jennewein, T., Simon, C., Weinfurter, H., & Zeilinger, A. (1998). Violation of Bell's inequality under strict Einstein locality conditions. *Physical Review Letters*, 81(23), 5039–5043.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.81.5039>

Zuccarini, G., Sutrini, C., Bondani, M., Macchiavello, C., & Malgieri, M. (2024). Teaching quantum information science to secondary school students with photon polarization and which-path encoding. *EPJ Quantum Technology*, 11(1), 74. <https://doi.org/10.1140/epjqt/s40507-024-00287-1>

Appendice 1

GRUPPO: _____

ESPERIMENTO MENTALE E CORRELAZIONI CULINARIE

Alice, Bob e le loro Cene identiche

Fase 1) Alice e Bob, due vicini di casa particolari

Alice e Bob vivono entrambi nella storica ed accogliente città di Bologna, dove le vie lastricate ed i portici raccontano storie di secoli passati. Sono vicini di casa, le loro abitazioni separate solo da una stretta viuzza del centro, via Piella, famosa per la celebre finestrella che affaccia su quella che da tutti è definita *la piccola Venezia*.



La vita di questi due ragazzi sembra essere assolutamente normale, se non che, ogni sera, come fosse per puro caso, comprano lo stesso identico pasto. È come se le loro vite fossero legate attraverso un filo invisibile che li conduce verso le stesse scelte culinarie. Le pietanze che mangiano possono variare tra cena e cena (un giorno una profumatissima pizza margherita, un altro una cremosa carbonara, e così via...), ma **ogni singolo giorno mangiano esattamente la stessa cosa**.

In altre parole, potremmo dire che le loro cene sono **perfettamente correlate**: che vadano nel supermercato sotto casa oppure in quello leggermente più lontano, Alice e Bob scelgono sempre lo stesso pasto e dalle finestre delle loro cucine si possono sentir uscire sempre gli stessi profumi. Un osservatore poco attento potrebbe pensare che sia una pura coincidenza, ma se è un gruppo di fisici a notare questa perfetta correlazione questi penseranno che ci sia qualcosa di più profondo e misterioso che unisce le cene dei due amici e decideranno quindi di domandarsi il perché accade questo strano fatto. I fisici, per mettersi nella migliore condizione per studiare il problema, utilizzano diverse pratiche tra cui la modellizzazione: una descrizione della situazione nella quale ne vengono considerati solo alcuni aspetti fondamentali al fine di poterla studiare in maniera più efficace e riuscire così a rispondere alla domanda che i ricercatori si erano fatti.

Come possiamo spiegare questa perfetta correlazione?

Spiegazione 1:

Motivazione:

Spiegazione 2:

Motivazione:

Spiegazione 3:

Motivazione:

Fase 2) Alice e Bob, un legame indissolubile

Un giorno però Alice, dopo aver vissuto molti anni nella bellissima Bologna, sente il bisogno di cambiare aria e decide quindi di trasferirsi nella dinamica e moderna città di New York. Le sue giornate sono piene di nuove scoperte, entusiasmanti avventure e ora la sua vita sembra molto diversa da quella alla quale era abituata. Una cosa però rimane esattamente uguale rispetto a quando viveva in quella piccola viuzza: ogni sera va al supermercato, compra un nuovo pasto e quando rientra a casa, pur trovandosi a 6660 km di distanza da Bologna, **la sua cena rimane esattamente uguale a quella di Bob**, che invece abita ancora in via Piella.

Tutte le sere, senza mancare un appuntamento, i due amici comprano lo stesso pasto, si siedono ciascuno alla sua tavola e mangiano sorprendentemente la stessa identica cosa, quasi come se quel filo invisibile li tenesse ancora uniti nonostante tutti quei chilometri che si trovano in mezzo a loro. Anche se le loro vite li hanno portati in direzioni diverse, le loro cene rimangono **perfettamente correlate**. Una connessione speciale che incuriosisce gli osservatori esperti. Rimettiamoci quindi nei panni dei fisici che nuovamente vogliono cercare di rispondere alla domanda:

Come possiamo spiegare questa perfetta correlazione?

Spiegazione 1:

Motivazione:

Spiegazione 2:

Motivazione:

Spiegazione 3:

Motivazione:

Appendice 2

GRUPPO: _____

ESPERIMENTI MENTALI E CREATIVITÀ

Alla ricerca di nuovi scenari

Cari colleghi*,

vi metto davanti ad un dubbio che mi affascina particolarmente. Di recente ho scoperto che, se consideriamo il problema delle cene perfettamente correlate di Alice e Bob esposto dal nostro collega Nicolas Gisin, si possono trovare solo due tipi di spiegazioni. Anni ed anni di ricerca e menti illustri impiegate a scoprire i misteri più profondi dell'universo...ed il risultato sono solo due spiegazioni? Con tutto il rispetto, mi trovo un po' restio a credere che il problema si chiuda così. D'altronde, la ricerca all'interno della nostra disciplina non è mai stata statica e le spiegazioni che produciamo non sono scolpite nella pietra; direi piuttosto il contrario, il nostro lavoro è come un insieme di piccole scintille in un ciclo infinito di scoperta e riscoperta, dove ogni risposta data porta ad interrogarsi su nuove domande. E voi, giovani ricercatori e ricercatrici del dipartimento di Bologna, siete chiamati oggi ad essere protagonisti di questa avventura scientifica senza fine. Ho osservato il vostro lavoro e se le spiegazioni che fino ad ora avete creato possono già essere considerate opere artistiche di una mente scientifica, vi chiedo però ora di fare un ulteriore passo creativo...siamo sicuri che queste siano le uniche due cause possibili? Possiamo creare uno scenario che ci tolga questo dubbio?

Mi spiego meglio, partendo dall'esperimento mentale di Alice, Bob e la strana ma perfetta correlazione che lega le loro cene, **possiamo immaginare un nuovo contesto in cui queste due spiegazioni non sono ammissibili? Provate a creare due scenari che mettano in discussione la qualità delle spiegazioni precedentemente trovate.** Riusciamo a pensare ad un esperimento che testi l'influenza? Riusciamo a pensare ad un esperimento che testi la causa comune? Lavoriamo cercando di trovare uno o più scenari in cui far risuonare queste domande, ovvero dove non vengono rispettati i criteri di una buona spiegazione (accuratezza, narrazione, falsificabilità). Attenzione: ora il punto **non** è capire perché mangiano tutte le sere la stessa cosa, ma è provare a **costruire una possibile situazione** in cui le due spiegazioni utilizzate fino ad ora non ci soddisfano o non sono più applicabili.

E così, mentre ci mettiamo alla ricerca di nuove situazioni che sfidino le nostre attuali spiegazioni, ricordiamo che il cuore della scienza non è avere tutte le risposte, ma continuare a cercarle.

Un caro saluto e buon lavoro,

Dr. Quantum

This image shows a single sheet of white paper with horizontal ruling lines. The lines are evenly spaced and run across the width of the page. There are no margins, text, or other markings on the paper.

This image shows a single sheet of white paper with horizontal ruling lines. The lines are evenly spaced and run across the width of the page. There are no margins, text, or other markings on the paper.

Possiamo vincere al gioco di Bell con una spiegazione di tipo locale?

x	y	a	b	$x \times y$	$a + b$	$x \times y = a + b?$	Score	Total score	Programmi
0	0	0	0						A=1 B=1
0	1	0	0						
1	0	0	0						
1	1	0	0						
0	0	0	1						A=1 B=2
0	1	0	1						
1	0	0	1						
1	1	0	1						
0	0	0	0						A=1 B=3
0	1	0	1						
1	0	0	0						
1	1	0	1						
0	0	0	1						A=1 B=4
0	1	0	0						
1	0	0	1						
1	1	0	0						
0	0	1	0						A=2 B=1
0	1	1	0						
1	0	1	0						
1	1	1	0						
0	0	1	1						A=2 B=2
0	1	1	1						
1	0	1	1						
1	1	1	1						
0	0	1	0						A=2 B=3
0	1	1	1						
1	0	1	0						
1	1	1	1						
0	0	1	1						A=2 B=4
0	1	1	0						
1	0	1	1						
1	1	1	0						
0	0	0	0						A=3 B=1
0	1	0	0						
1	0	1	0						
1	1	1	0						
0	0	0	1						A=3 B=2
0	1	0	1						
1	0	1	1						
1	1	1	1						

0	0	0	0						A=3 B=3
0	1	0	1						
1	0	1	0						
1	1	1	1						
0	0	0	1						A=3 B=4
0	1	0	0						
1	0	1	1						
1	1	1	0						
0	0	1	0						A=4 B=1
0	1	1	0						
1	0	0	0						
1	1	0	0						
0	0	1	1						A=4 B=2
0	1	1	1						
1	0	0	1						
1	1	0	1						
0	0	1	0						A=4 B=3
0	1	1	1						
1	0	0	0						
1	1	0	1						
0	0	1	1						A=4 B=4
0	1	1	0						
1	0	0	1						
1	1	0	0						

Appendice 4

Tutorial il gioco di Bell

Parte 1: Località, Correlazione e Spiegazione

Parte 1.a: Località

Che cosa si intende per località?

Einstein definiva la località nel seguente modo:

“La seguente idea caratterizza l'indipendenza relativa di oggetti distanti nello spazio: un'influenza esterna su A non ha effetto immediato su B; questo è noto come principio di località.” (Albert Einstein: Philosopher-Scientist, Open Court Publishing, 1949)

Parte 1.b: Correlazione

a. Cosa si intende per correlazione?

b. Vi viene in mente qualche esempio di eventi/oggetti correlati e non correlati?

Parte 1.c: Spiegazioni

Leggete il seguente problema e rispondete alle domande.

Alice e Bob vivono a Bologna, in due case vicine. Ogni sera, senza accordarsi, comprano e mangiano esattamente lo stesso pasto. A volte pizza, a volte pasta, ma sempre lo stesso piatto.

Questa coincidenza si ripete ogni giorno. Un gruppo di fisici nota il fenomeno e decide di studiarlo.

Assunta la località

- a. Che cosa significa “assumere la località? Perché è importante? Quali sono gli elementi nel testo del problema che ce la fanno assumere?

- b. Come possiamo spiegare questa perfetta correlazione?

Parte 2: Influenza e Causa comune alla prova

Parte 2.a: Testare la spiegazione “influenza”

Riformuliamo il problema nel seguente modo:

Alice e Bob si trovano su due galassie diverse. Immaginiamo che vi siano due supermercati vicino a casa di Alice, uno sulla sinistra e uno sulla destra rispetto all'uscita di casa sua. Allo stesso modo, vi sono due supermercati vicino a casa di Bob, uno sulla sinistra e uno sulla destra. Ma immaginiamo che, ogni volta che entrambi scelgono, del tutto casualmente e nello stesso istante, di fare la spesa nel negozio sulla sinistra, finiscono sempre con il mangiare la stessa cosa.

I due tipi di spiegazione di prima valgono ancora? Quali e perchè? Spiegate

Parte 2.b: Testare la spiegazione “causa comune”

L'unica spiegazione locale per questa correlazione è che i supermercati sulla sinistra condividono una lista che, sera dopo sera, determina l'unico menù disponibile. Per questi supermercati, la situazione è esattamente la stessa di prima. Il fatto che vi siano diversi supermercati vicini ad Alice e Bob (ancora su due galassie diverse) suggerisce la possibilità di una varietà di correlazioni diverse (tra i loro pasti). Per esempio, se Alice sceglie il supermercato di sinistra e Bob quello di destra, possiamo immaginare che entrambi finiscano per mangiare la stessa cosa. Similmente,

possiamo immaginare che accada lo stesso se Alice sceglie il ristorante di destra e Bob quello di sinistra. Possiamo quindi concludere che l'unica spiegazione locale per queste tre correlazioni — sinistra-sinistra, sinistra-destra e destra-sinistra — sia ancora che questi quattro negozi condividano la stessa lista di pasti. Immaginiamo però ora che, quando Alice e Bob scelgono entrambi il supermercato di destra, non mangino mai la stessa cosa.

I due tipi di spiegazione di prima valgono ancora? Quali e perchè? Spiegate

Parte 3: Il passaggio al modello e alla logica binaria

Parte 3.a: Modellizzazione attraverso le scatole

- a. Come possiamo modellizzare la situazione di Alice e Bob e dei quattro ristoranti?

Spazio per scrivere/disegnare

Parte 3.b: Il gioco di Bell

Regole del gioco: Alice e Bob ottengono un punto quando si verifica l'equazione precedente $(a + b = x \times y)$, ovvero:

- Ogni volta che Alice spinge il joystick a sinistra, o Bob spinge il suo joystick a sinistra, o entrambi spingono il loro joystick a sinistra, ottengono un punto se il loro risultato è lo stesso (ovvero o entrambi $a = b = 0$ o $a = b = 1$);
- Ogni volta che sia Alice che Bob scelgono di spingere i loro joystick a destra, ottengono un punto se i loro risultati sono differenti (ovvero quando $a \neq b$)

- a. Come possiamo rappresentare sinteticamente quando Alice e Bob ottengono un punto, ovvero, nell'esperimento mentale dei menù, mangiano lo stesso piatto?

		ALICE	
		0	1
BOB	0		
	1		

- b. Come si possono racchiudere tutti i casi di vittoria in un'unica relazione?

Spazio per scrivere/disegnare

Giochiamo! Supponiamo che Alice e Bob, esattamente alle 9 del mattino, e successivamente per ogni minuto, fino alle 16, entrambi spingono il joystick da un lato o dall'altro in maniera completamente indipendente ed ottengono 400 casi:

- 100 casi SS
- 100 casi SD
- 100 casi DS
- 100 casi DD

- a. Come si può calcolare il punteggio finale?

Spazio per scrivere/disegnare

Condizione per la vittoria: Il gioco si vince se e solo se S è maggiore di 3.

Possiamo immaginare che il produttore abbia costruito le scatole con all'interno un piccolo computer con una memoria molto grande che, ogni minuto, produce un risultato predeterminato, un orologio e un programma che legge i dati in memoria.

- b. In che senso questo modo di costruire il joystick racchiude la spiegazione “causa comune”? Spiegate.

Le scatole di Alice e Bob, create dallo stesso produttore, possono implementare solo 4 programmi che sono i seguenti.

Nella scatola di Alice i 4 programmi sono:

1. Il risultato è sempre $a = 0$, qualsiasi sia la scelta di x
2. Il risultato è sempre $a = 1$, qualsiasi sia la scelta di x
3. Il risultato è identico alla scelta, ovvero $a = x$
4. Il risultato è sempre diverso dalla scelta, ovvero $a = 1 - x$

Analogamente possiamo pensare i programmi all'interno del joystick di Bob (dove il risultato è b e la scelta è y).

Quante possibili combinazioni di programmi possono esserci?

Spazio per scrivere/disegnare

Proviamo ora a giocare al gioco di Bell. Costruiamo la seguente tabella in cui nella prima colonna di sinistra (*Programmi*) vi sono i programmi implementati dai due computer contenuti nelle scatole; nella seconda e terza colonna (x,y) vi sono le scelte di Alice e Bob; nella quarta e quinta vi sono i risultati che compaiono rispettivamente nello schermo di Alice (a), e nello schermo di Bob (b). Lo score è assegnato se si verifica la relazione ricavata nel punto b.

Programmi	x	y	a	b	$x \times y$	$a + b$	$x \times y = a + b?$	Score	Total score
A=1 B=1	0	0	0	0					
	0	1	0	0					
	1	0	0	0					
	1	1	0	0					
A=1 B=2	0	0	0	1					
	0	1	0	1					
	1	0	0	1					
	1	1	0	1					
A=1 B=3	0	0	0	0					
	0	1	0	1					
	1	0	0	0					
	1	1	0	1					
A=1 B=4	0	0	0	1					
	0	1	0	0					
	1	0	0	1					
	1	1	0	0					

- c. Pensando a come avete precedentemente espresso il punteggio finale, come si possono esprimere sinteticamente i risultati ottenuti in tabella?

Spazio per scrivere/disegnare

Parte 4

John Stewart Bell fu il primo a costruire sotto forma di disuguaglianza il risultato ottenuto dal vostro gruppo. Lo fece nel 1964, nel celebre articolo *On the Einstein Podolsky Rosen paradox*. A partire dagli anni Settanta (e con esperimenti sempre più raffinati nei decenni successivi), ricercatori come Clauser, Aspect e Zeilinger hanno effettivamente osservato sperimentalmente violazioni delle disuguaglianze di Bell con sistemi entangled, un risultato riconosciuto con il Premio Nobel per la Fisica 2022. Queste evidenze hanno aperto la strada alla moderna informazione quantistica (comunicazione e crittografia quantistica, e anche calcolo quantistico).

- a. Ripercorrete l'intera scheda. Nel ragionamento proposto non c'è la possibilità di vincere il gioco di Bell, ovvero di ottenere un punteggio maggiore di 3. Ripensando complessivamente al ragionamento, cosa cambiereste per vincere il gioco? Spiegate

- b. Quando si parla di entanglement, di che cosa si tratta?

- c. Come trovate il ragionamento nel suo complesso? Lo trovate convincente? Spiegate

Appendice 5

Prima Giornata

La prima giornata è stata dedicata alla presentazione del progetto e alla prima rivoluzione quantistica. Dopo questo primo momento introduttivo, sono state introdotte la prima e la seconda rivoluzione quantistica, entrambe originate dai dibattiti sui fondamenti della disciplina sviluppatasi nel corso del XX secolo e riconducibili a due grandi “misteri” della fisica quantistica: complementarità ed entanglement, schematizzati in Fig. 1.

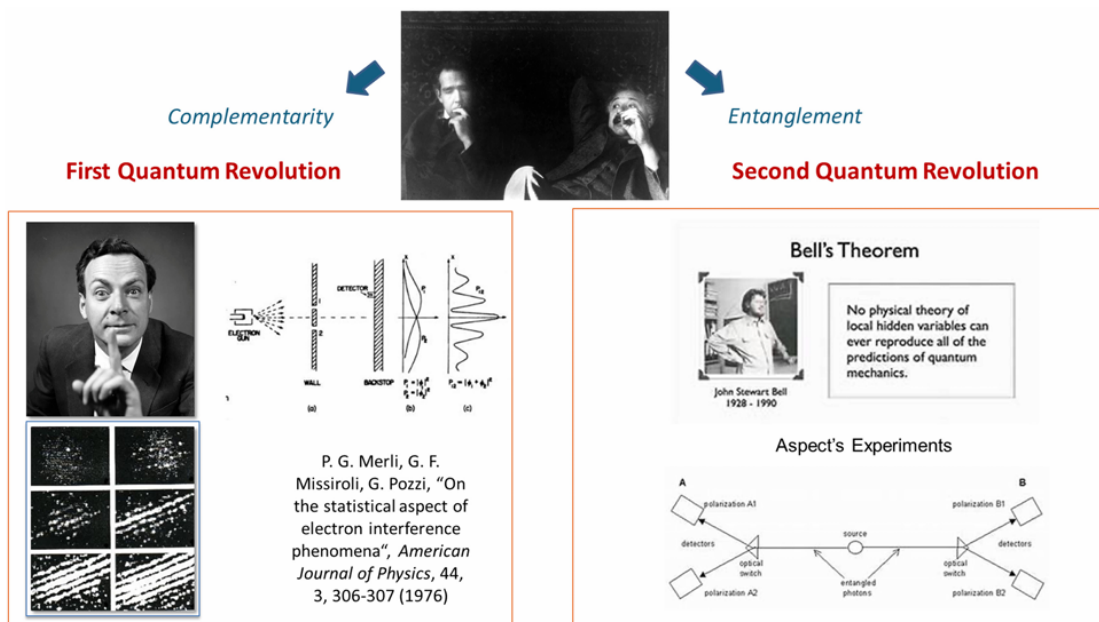


Figura 1: Primo e secondo mistero, slide utilizzata durante il corso. N.B. Questa lezione si concentrerà sul primo mistero quantistico e le sfide concettuali, epistemologiche e tecnologiche che lo riguardano.

Il principio di complementarità, formulato da Niels Bohr alla fine degli anni Venti, è stato introdotto agli studenti attraverso una ricostruzione storica che vede come evento centrale il V Congresso di Solvay del 1927, al cui centro vi erano elettroni, fotoni ed una grande domanda: che cosa rivelava la nuova fisica in merito alla natura della realtà? Il grande problema riguardante il dualismo onda-particella, ricostruito a partire dal dibattito Bohr-Einstein e l'esperimento mentale di interferenza di singola particella proposto da quest'ultimo (cfr. Fig. 2). Per tantissimi anni si è creduto che questo esperimento fosse possibile solo nella sua forma mentale, tant'è che anche Richard Feynman ne riteneva impossibile la costruzione:

"The apparatus would have to be built on an impossibly small scale to show the effects we are interested in" (Feynman et al., 1965)

In particolare, la visualizzazione delle frange di interferenza richiede dimensioni e separazioni delle fenditure confrontabili con la lunghezza d'onda degli elettroni ($\sim 10^{-11} - 10^{-12} \text{ m}$), estremamente difficili da ottenere in laboratorio, nonché distanze sorgente-rivelatore dell'ordine di decine di metri, incompatibili con le dimensioni di un microscopio elettronico. A queste si aggiunge la necessità di disporre di una sorgente coerente in grado di generare due fasci elettronici, condizione indispensabile per ottenere un pattern di interferenza stabile. (Pierpaoli, 2023)

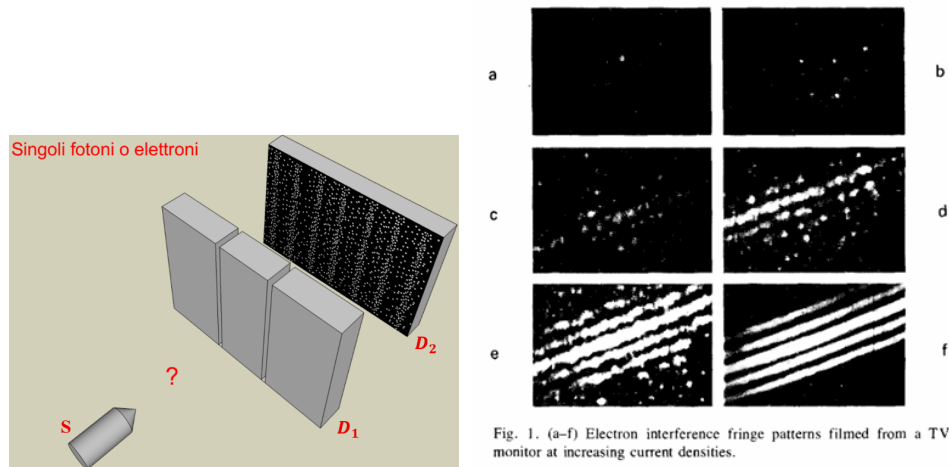


Fig. 1. (a-f) Electron interference fringe patterns filmed from a TV monitor at increasing current densities.

Figura 2: A sinistra, la slide, utilizzata durante il corso, rappresenta l'esperimento mentale di interferenza di singola particella, proposto da Einstein durante la Conferenza di Solvay del 1927. L'apparato è formato da tre parti principali: una sorgente S, che permette di sparare un elettrone alla volta, uno schermo D_1 dotato di una doppia fenditura di dimensioni opportune ed uno schermo D_2 per la rivelazione finale. A destra: Utilizzando un microscopio elettronico modificato, gli autori impiegano un biprisma elettronico per dividere e successivamente far ricombinare il fascio di elettroni. L'elemento cruciale è il forte abbattimento dell'intensità del fascio, tale da garantire che, statisticamente, solo un elettrone alla volta attraversi l'apparato. La figura di interferenza generata, consente di mostrare che il pattern di interferenza non emerge istantaneamente, ma si costruisce gradualmente dal conteggio puntuale degli arrivi sullo schermo, evento dopo evento. Ogni elettrone viene sempre rivelato come una particella localizzata, ma l'insieme degli impatti rivela una distribuzione tipica dell'interferenza ondulatoria.

Per presentare agli studenti la sfida epistemologica e tecnologica posta attraverso l'esperimento mentale della doppia fenditura degli elettroni, viene presentato l'esperimento nato nel Laboratorio di Interferometria Microscopica del Dipartimento di Fisica e Astronomia di Bologna dal lavoro di Merli, Missiroli e Pozzi (1976), che osserva l'interferenza elettronica nel regime di singola particella. Il risultato fornisce un'evidenza particolarmente chiara della natura intrinsecamente probabilistica del fenomeno e della necessità della

descrizione quantistica. La presentazione di quello che verrà poi definito come “*l’esperimento più bello della fisica*”¹. A partire da questa sfida tecnologica che la prima rivoluzione quantistica ci mette davanti, viene introdotto il problema riguardante la comprensione e rappresentazione dell’oggetto quantistico, che in evidenza come la natura della materia non possa essere compresa all’interno dei modelli classici di onda e particella e impone agli studenti la ricerca di nuovi strumenti per spiegarci cosa sta succedendo. Si affronta quindi il problema del dualismo onda-particella. In particolare, è stata presentata la posizione di Bohr nell’interpretazione del comportamento duale della materia, nella quale egli mette in discussione un principio fondamentale della logica della fisica classica, ossia il principio di non contraddizione, proponendo il superamento delle interpretazioni dualistiche attraverso il concetto di complementarità. Ci si è quindi soffermati sul notevole impatto dato dalla sfida epistemologica che comprende la definizione dell’oggetto quantistico e la descrizione delle due proprietà con un linguaggio adeguato. Sebbene il problema del dualismo sia stato ormai superato, i fisici continuano anche oggi ad interrogarsi su quale sia la descrizione del mondo più appropriata e questo interrogativo porta anche oggi a rivedere questi interrogativi, anche attraverso la creazione di un nuovo termine, come il *quantone* definito da Lévy-Leblond (Lévy-Leblond, 2003).

L’aspetto del linguaggio ha rappresentato un punto chiave per introdurre agli studenti la necessità di una nuova logica, di un nuovo linguaggio e di un nuovo modo di descrivere il mondo quantistico. Si viene quindi a delineare sempre di più il limite della logica classica binaria, che non permette di spiegare il comportamento degli oggetti quantistici, e l’esigenza sempre più forte di una logica nuova, la logica quantistica, che ci guida nella transizione verso un nuovo modo di ragionare. Da qui si sviluppa l’ultima parte dell’incontro, dedicata all’introduzione dei concetti base della logica quantistica: ‘stato quantistico’, ‘principio di sovrapposizione’, ‘variabili compatibili e incompatibili’, ‘preparazione dello stato’, ‘trasformazione di uno’ e ‘misura quantistica’, formulata attraverso un approccio a due stati (versione semplificata dello *spin-first approach*). A tal fine, è stato presentato agli studenti l’esperimento di Stern e Gerlach (cfr. Fig.3 a), realizzato dagli scienziati da cui prende il

¹ Nel numero maggio-settembre 2002, la rivista Physics World ha dedicato un numero speciale a “*The most beautiful experiment*”, raccogliendo contributi e opinioni della comunità scientifica su quale fosse l’esperimento più bello di tutta la fisica. In questa occasione, l’esperimento della doppia fenditura di Young applicato a singoli elettroni è stato indicato come l’**esperimento più bello della fisica**, per la sua capacità di rendere evidente l’interferenza quantistica a livello di singola particella e di sintetizzare, in un unico apparato, uno dei problemi concettuali fondamentali della meccanica quantistica. L’esperimento di Merli, Missiroli e Pozzi rappresenta la realizzazione sperimentale concreta di questo schema concettuale, trasformando un classico esperimento mentale in un risultato osservabile.

nome. Questo esperimento permette di introdurre la variabile quantistica ‘spin’, che non ha eguali in fisica classica. Come sottolineato da Lévy-Leblond (2003), lo spin quantistico non dovrebbe essere compreso attraverso analogie meccaniche classiche, come la rotazione spaziale, ma piuttosto come una proprietà intrinseca dei *quantoni*, introducendo una categoria concettuale genuinamente nuova senza una controparte classica.

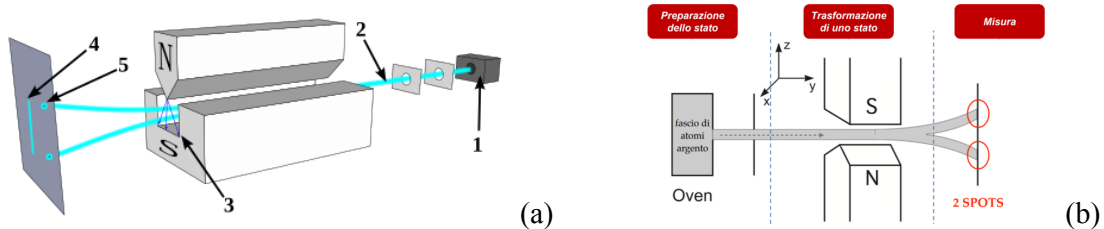


Figura 3: A sinistra, l’esperimento di Stern–Gerlach è stato ideato nel 1921 da Otto Stern ed è stato eseguito per la prima volta nel 1922 da lui e Walther Gerlach a Frankfurt. L’esperimento consisteva nel far attraversare a un fascio di atomi di argento, prodotto tramite effusione di vapore metallico da una fornace scaldata a 1000°C e collimato attraverso due fenditure ampie 0.03mm, attraverso un magnete che genera un campo magnetico non omogeneo orientato verticalmente.. In foto, una schematizzazione dell’apparato, nella quale atomi d’argento che viaggiano attraverso un campo magnetico disomogeneo e vengono deviati verso l’alto o verso il basso a seconda del loro spin; (1) fornace, (2) fascio di atomi d’argento, (3) campo magnetico disomogeneo, (4) risultato classicamente atteso, (5) risultato osservato. Fonte: https://en.wikipedia.org/wiki/Stern%E2%80%93Gerlach_experiment. A destra: immagine presa dalle slide del corso grazie alla quale si sono presentate le 3 parti: preparazione dello stato, trasformazione dello stato e misura. Sullo schermo di rivelazione, posto davanti al magnete, la previsione classica ci porta ad aspettarci una distribuzione continua su un’ampiezza corrispondente all’intervallo di orientamento del momento magnetico. Al contrario, Stern e Gerlach notarono che il fascio si separava in due tracce distinte, dimostrando come gli atomi individuali si manifestino equiprobabilmente per due sole orientazioni distinte del momento magnetico, spin up e spin down.

Inoltre, nel percorso proposto, l’esperimento di Stern–Gerlach è stato impiegato per mettere in evidenza le tre fasi fondamentali che caratterizzano ogni esperimento quantistico: la preparazione dello stato, la sua manipolazione e la misura (Fig. 3 b). Sono stati quindi proposti diversi esempi costruiti combinando più apparati sperimentali con orientazioni differenti del campo magnetico ed è stato chiesto agli studenti di lavorare in gruppo, cercando di predire quale sarebbe stato il risultato dopo il passaggio attraverso l’apparato. Infine, è stato formalizzato il ragionamento attraverso gli esperimenti. i) Le misure effettuate suggeriscono che lo spin può avere due valori indipendenti e definendo successivamente gli stati up e down. ii) gli esperimenti svolti suggeriscono che entrambi gli stati up e down di x sono sovrapposizioni di uguale peso dei due stati di spin. iii) le misure effettuate negli esperimenti suggeriscono che lo spin lungo z e lo spin lungo x non hanno simultaneamente

un valore ben definito, quando uno è esattamente definito l'altro è completamente indeterminato, ovvero sono variabili incompatibili. Al contrario, se tra l'apparato x e l'apparato z non vi fosse una misura, i casi finali sarebbero 500 up e 0 down in quanto lo stato prodotto dal primo apparato non è stato alterato.

In questo modo, gli studenti sono stati guidati a confrontare la logica classica e le modalità con le quali si calcolano le probabilità classiche con la prospettiva propriamente quantistica, mettendo in evidenza dove e come quest'ultima modifica le intuizioni tradizionali (Pierpaoli, 2023). Attraverso questa attività gli studenti arrivano quindi a definire cos'è lo stato di un oggetto quantistico e come questo possa essere scritto come combinazione lineare del tipo

$$|\varphi\rangle = a|\uparrow\rangle + b|\downarrow\rangle$$

Si introduce anche come lo stato possa evolversi nel tempo ed essere trasformato attraverso gli strumenti sperimentali e viene anche introdotto il tema della misura quantistica e come questa sia probabilistica e distruttiva. Per una lettura più approfondita si consiglia Satanassi (2023).

Seconda Giornata

Nella seconda giornata sono state prese in considerazione le principali fasi che caratterizzano gli esperimenti fondamentali, già introdotte nella precedente lezione:

- 1) preparazione dello stato;
- 2) trasformazione/evoluzione dello stato;
- 3) misura.

E' stato fatto un esempio classico, estrapolando il significato di ogni fase (Fig. 4a). È stata quindi enfatizzata la differenza tra la misura classica deterministica, che rivela lo stato di un sistema, e la misura quantistica probabilistica e distruttiva, che provoca il collasso del sistema in uno dei due possibili stati classici.

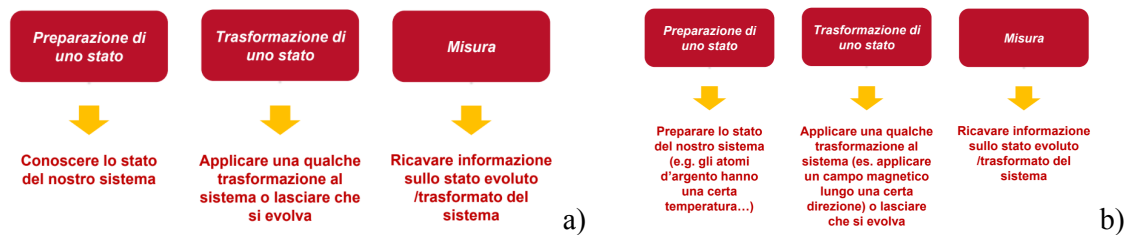


Figura 4: A sinistra: slide contenente le fasi classiche che caratterizzano l'esperimento. A destra: slide contenente le fasi quantistiche che caratterizzano l'esperimento

Nel fare il passaggio dalla fisica quantistica come descrizione dei fenomeni naturali alla fisica quantistica, con le sue leggi e regole, come strumento per manipolare l'informazione, è necessaria la riconcettualizzazione delle principali fasi che caratterizzano gli esperimenti fondamentali in termini di informazione:

- 1) informazione in ingresso;
- 2) elaborazione dell'informazione;
- 3) informazione in uscita.

Una figura schematica del confronto è riportata in Fig.5. Questa struttura è stata utilizzata sia nell'introduzione al calcolo classico sia nel caso quantistico. Nell'introdurre il calcolo classico, è stata illustrata l'architettura di Von Neumann degli elaboratori digitali e gli studenti sono stati invitati a riflettere sul fatto che, nonostante i grandi sviluppi tecnologici dagli inizi dell'informatica, la logica con cui funzionano i dispositivi moderni è ancora quella classica, cioè la logica binaria. Questa logica affonda le sue radici nella logica aristotelica dei predicati, in cui i valori possibili dei predicati sono soltanto "Vero" o "Falso" e vale il principio del "*tertium non datur*", per il quale le operazioni possibili con due predicati A e B sono la negazione (NOT, $\neg A$), la disgiunzione (OR, $A \vee B$) e la congiunzione (AND, $A \wedge B$). È stato mostrato che il calcolo classico incarna questa logica binaria, che ammette due valori chiamati 1 e 0. È stata quindi introdotta l'unità di informazione, il "bit", seguita dalla sua codifica (assegnazione del bit ad uno dei possibili stati del sistema, 0 o 1) e dalla sua elaborazione in termini di porte logiche e circuiti di un elaboratore (applicazione di sequenze di passi chiari ed elementari, detti algoritmi, per manipolare l'input e ottenere un determinato risultato in uscita), enfatizzandone sia la dimensione fisica (rappresenta lo stato fisico di un circuito) sia quella logica. Le porte logiche e le rispettive tabelle di verità sono state presentate come implementazione delle operazioni logiche di base (AND, OR, NOT), insieme alle rappresentazioni circuitali. È stata poi proposta una breve panoramica sull'evoluzione dei computer, mostrando come, anche se hardware e software sono cambiati

molto rapidamente con lo sviluppo della tecnologia (in termini di spazio occupato, velocità di calcolo, quantità di informazioni memorizzate ...), la logica alla base del loro funzionamento è sempre la stessa. Si arriva dunque alla presentazione dei computer quantistici.

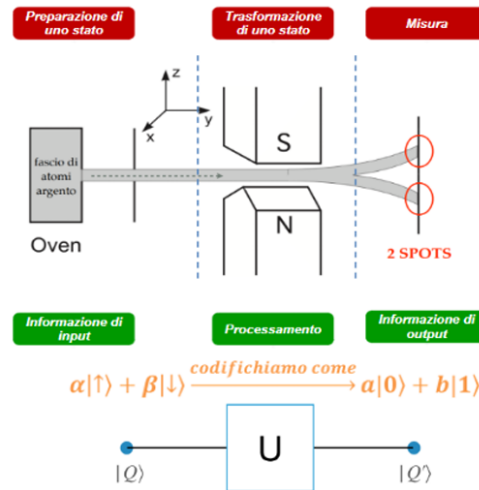


Figura 5: Riconcettualizzazione che porta dalle fasi dell'esperimento alle fasi computazionali. A destra: slide che illustra la lettura dell'elaborazione dell'informazione da parte di un computer quantistico come un esperimento in cui il qubit in ingresso $|Q\rangle$ viene processato e l'esito dell'esperimento è un qubit $|Q'\rangle$.

Il passo successivo è stato considerare che la distribuzione degli atomi dell'esperimento di Stern e Gerlach non può essere spiegata seguendo la logica classica. Emerge quindi la necessità di una nuova logica, ossia la logica quantistica. È stato quindi introdotto il 'qubit' come nuova unità di base del computer quantistico. Il qubit è stato descritto matematicamente come una combinazione lineare degli stati classici con coefficienti complessi

$$|Q\rangle = a|0\rangle + b|1\rangle$$

con $a^2 + b^2 = 1$ e si è sottolineato che l'informazione non è fornita direttamente dallo 0 o dall'1, ma dalla coppia di coefficienti normalizzati della combinazione lineare. A partire quanto detto fino ad ora e successivamente da tre esempi di sistema quantistico a due livelli, è stata introdotta la codifica dell'informazione fisica in termini computazionali. Inoltre, sono stati definiti i corrispettivi computazionali di stato quantistico, manipolazione dello stato e misura:

- il "qubit" come nuova unità di base del computer quantistico;
- la porta logica quantistica;

- la misura quantistica.

elettroni con spin $+\hbar/2$ o $-\hbar/2$, luce con polarizzazione orizzontale o verticale, un elettrone nel suo stato fondamentale o eccitato. È stata inoltre sottolineata la differenza nell'informazione in input tra *bit* e *qubit*, spiegando che la seguente definizione di un qubit $|Q\rangle$ può descrivere infinite possibili configurazioni di un sistema quantistico. L'informazione quantistica in ingresso, la sua elaborazione e l'informazione in uscita sono state riconcettualizzate attraverso tre postulati quantistici:

- Postulato 1: A qualsiasi sistema fisico isolato è associato uno spazio vettoriale complesso con un prodotto interno (cioè uno spazio di Hilbert) noto come spazio degli stati del sistema. Il sistema è completamente descritto dal suo vettore di stato, che è un vettore unitario nello spazio degli stati del sistema;
- Postulato 2: L'evoluzione di un sistema quantistico chiuso è descritta da una trasformazione unitaria. Cioè, lo stato $|\varphi\rangle$ del sistema all'istante t_1 è correlato allo stato $|\varphi'\rangle$ del sistema all'istante t_2 da un operatore unitario U che dipende solo dai tempi t_1 e t_2 , $|\varphi'\rangle = U|\varphi\rangle$;
- Postulato 3: le misurazioni quantistiche sono descritte da un insieme $\{M_m\}$ di operatori di misurazione. Sono operatori che agiscono sullo spazio degli stati del sistema misurato. L'indice m si riferisce ai risultati della misurazione che possono verificarsi nell'esperimento. Se lo stato del sistema quantistico è $|\varphi\rangle$ immediatamente prima della misurazione allora la probabilità che si verifichi il risultato m è data da $p(m) = \langle M_m^\dagger M_m |\varphi\rangle$ (ovvero il quadrato dei coefficienti) e lo stato dopo la misura è:

$$\frac{M_m |\varphi\rangle}{\sqrt{\langle M_m^\dagger M_m |\varphi\rangle}}$$

Nel presentare questi postulati, sono stati forniti alcuni esempi di trasformazioni su un *qubit*, quali la porta quantistica X (trasformazione NOT), la porta Y (nella sfera di Bloch, rotazione di π attorno all'asse y), la porta Z (nella sfera di Bloch, rotazione di π attorno all'asse z) e la porta di Hadamard (sovrapposizione quantistica di due stati a partire da uno stato), insieme alle rispettive tabelle di verità. Per concludere, è stato proposto un paragone tra logica classica e quantistica, presente in Fig. 6, dove è chiaramente visibile l'analogia nei passi tra

caso classico e quantistico, ma è evidente il cambiamento della logica sottostante, che non è più deterministica.

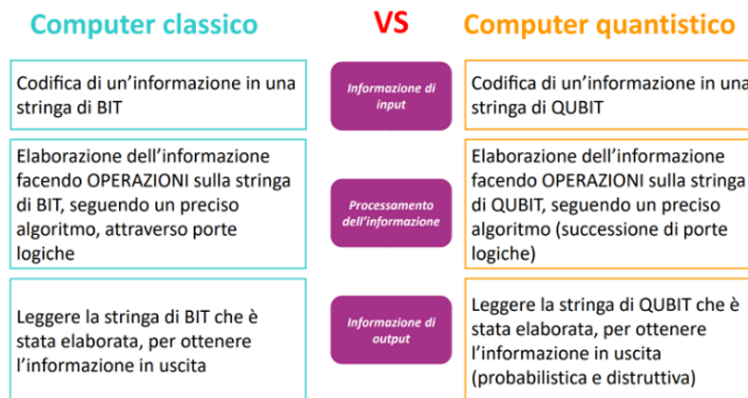


Figura 6: Paragone tra computer classici e quantistici.

Come ultimo argomento della giornata, è stato introdotto il secondo mistero quantistico, ovvero l'entanglement. Questo fenomeno è stato introdotto come una proprietà, esclusiva degli oggetti quantistici, condivisa da due o più oggetti quantistici e si è sottolineato come metta in discussione i concetti e i modelli di interazione, di realismo e il principio di non-località.

Come per la prima rivoluzione quantistica, anche il secondo mistero è stato introdotto attraverso una ricostruzione storica, in questo caso il dibattito tra Bohr ed Einstein, che si svolgeva sempre sullo sfondo di un esperimento mentale. L'esperimento mentale, formulato nel paradosso di Einstein-Podolsky-Rosen (EPR) del 1935, mirava a fare luce sulla completezza, sulla non-località e sulla causalità della teoria della fisica quantistica, esplorando la correlazione tra eventi lontani (nello spazio). Agli studenti non sono stati presentati i dettagli dell'esperimento mentale, ma sono stati guidati a riconoscere come l'entanglement sia stato utilizzato per approfondire possibili contraddizioni interne alla teoria. In particolare, ci si è concentrati sull'idea che variabili incompatibili di due oggetti quantistici entangled sembrano possedere una realtà fisica simultanea, una situazione esclusa dal principio di indeterminazione. Einstein, Podolsky e Rosen conclusero quindi che fosse necessario modificare le assunzioni di partenza: accettare o che la teoria quantistica non sia completa, oppure che non sia locale. È stata poi introdotta agli studenti, come possibile soluzione ipotetica a questi problemi, la teoria delle variabili nascoste, in cui i valori di aspettazione quantistici sono concepiti come medie su una distribuzione di probabilità di variabili ignote. Per mettere alla prova il paradosso EPR, Bell formulò le cosiddette

disuguaglianze di Bell, che esprimono una relazione matematica tra proprietà di due particelle entangled: egli sostenne che, se la teoria della fisica quantistica fosse corretta, tali disuguaglianze dovrebbero risultare false. Analogamente a quanto avvenuto per la prima rivoluzione, questo esperimento mentale fu, alcuni anni più tardi, realizzato sperimentalmente da Aspect, Clauser e Zeilinger, stabilendo la violazione delle disuguaglianze di Bell e aprendo la strada alla scienza dell'informazione quantistica (Premio Nobel 2022).

Terza Giornata

Il secondo intervento è stato tenuto da Maria Bondani, che ha reintrodotta gli stati entangled attraverso il celebre esperimento mentale di Einstein (Gedankenexperiment) dell'articolo del 1935. È stato ricordato che il dibattito nato dall'articolo EPR, all'interno della comunità dei fisici (e anche dei filosofi), ha avuto sviluppi rilevanti nel tempo, alimentando divisioni sull'interpretazione del formalismo della Meccanica Quantistica e ha portato alla formazione di vere e proprie scuole di pensiero, tra cui la più influente è la cosiddetta Scuola di Copenhagen, associata all'interpretazione definita "ortodossa". Si è poi osservato che, nel tentativo di affrontare il paradosso EPR, sono state esplorate anche teorie alternative alla Meccanica Quantistica che mirassero a essere realmente "complete". Tra queste è stata menzionata la teoria a variabili nascoste, che costituisce il presupposto del ragionamento che condusse alla formulazione delle disuguaglianze di Bell: criteri matematici verificabili sperimentalmente, pensati per testare se le ipotesi alla base del paradosso EPR potessero valere nel quadro della Meccanica Quantistica. È stato poi sottolineato che, a prescindere dai paradossi che possono emergere sul piano interpretativo, la Meccanica Quantistica resta una teoria fisica il cui formalismo consente di descrivere correttamente i dati sperimentali e di formulare previsioni affidabili. Inoltre, si è fatto notare che quegli stati quantistici spesso percepiti come "paradossali", come la sovrapposizione e l'entanglement, vengono effettivamente prodotti e impiegati in applicazioni tecnologiche.

È stato dunque introdotto l'esempio del gatto di Schrödinger per mostrare che, sul piano concettuale, si possono immaginare situazioni in cui un sistema fisico macroscopico venga preparato in uno stato di sovrapposizione ed entangled con un altro sistema. In particolare, si è richiamato l'esperimento mentale proposto da Schrödinger nel 1935: un gatto è chiuso in una scatola insieme a un atomo in stato eccitato; l'emissione di un fotone da parte dell'atomo attiva un meccanismo che rompe una fiala di veleno e può portare alla morte del gatto. Si è

formalizzato l'esperimento del gatto mettendo in evidenza che il sistema atomo + gatto può essere descritto tramite due stati macroscopicamente distinguibili, ad esempio $|e\rangle|vivo\rangle$ e $|g\rangle|morto\rangle$. Poiché il decadimento dell'atomo è un processo quantistico, si è assunto che lo stato dell'atomo, prima dell'interazione con il meccanismo, possa trovarsi in sovrapposizione:

$$|\phi\rangle = a|g\rangle + b|e\rangle$$

con a, b coefficienti complessi (normalizzati). Da qui si è mostrato che l'evoluzione porta lo stato complessivo a diventare una sovrapposizione correlata (cioè entangled) tra lo stato dell'atomo e lo stato del gatto, del tipo:

$$|\Psi\rangle = a|e\rangle|vivo\rangle + b|g\rangle|morto\rangle$$

sottolineando che non si tratta più di una semplice sovrapposizione “dell'atomo” o “del gatto” separatamente, ma di uno stato del sistema composto in cui i due sottosistemi risultano inseparabili. Si infine evidenziato che, per oggetti macroscopici come un gatto, è praticamente impossibile mantenere uno stato di sovrapposizione: l'interazione con l'ambiente porta rapidamente alla perdita di coerenza e, di fatto, ciò che si osserva sono solo le due alternative $|e\rangle|vivo\rangle$ oppure $|g\rangle|morto\rangle$. A questo punto è stato sottolineato che le tecnologie quantistiche attuali, pur non consentendo di mantenere in pratica una sovrapposizione per un “gatto” nel senso letterale, permettono però di realizzare stati entangled che coinvolgono molti atomi o molecole e quindi sistemi macroscopici: in questo senso, tali sistemi costituiscono una realizzazione moderna dell'idea alla base del gatto di Schrödinger (cfr. Fig.7).

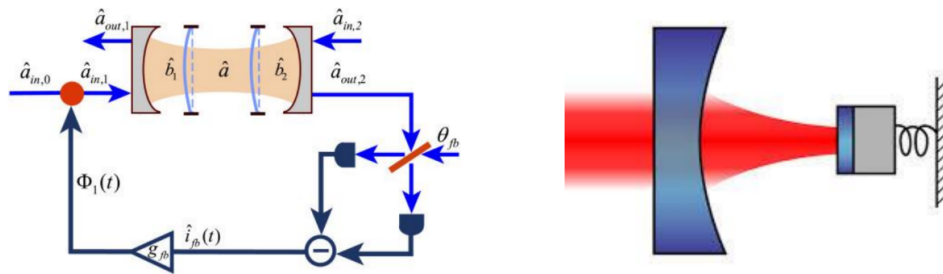


Figura 7: Due rappresentazioni di un sistema optomeccanico: a destra, lo schema fisico di una cavità ottica con specchio su molla, in cui la luce interagisce con il moto meccanico tramite pressione di radiazione; a sinistra, la descrizione input-output del dispositivo, con il modo intracavità (a) accoppiato ai modi meccanici (b_1) e (b_2), misura e possibile feedback per

controllare la dinamica. Questi sistemi sono rilevanti perché mostrano come le tecnologie quantistiche attuali permettano di preparare e manipolare stati non classici ed entangled che coinvolgono molti atomi o molecole, quindi su scala (almeno) mesoscopica/macro-effettiva: una realizzazione moderna, in senso operativo, dell'idea alla base del gatto di Schrödinger.

Dopo l'esempio del gatto di Schrodinger, sono stati discussi alcuni elementi fondamentali da introdurre prima del Gioco di Bell. È stato presentato il realismo nel senso proposto da EPR: se è possibile predire con certezza l'esito di una misura su un sistema senza interagire con esso, allora tale misura deve corrispondere a una proprietà reale del sistema. È stato inoltre chiarito il principio di località: l'informazione ottenuta da una misura su uno dei due sistemi isolati non può produrre un cambiamento reale nell'altro, ovvero le misure effettuate da B non possono dipendere da quelle effettuate da A quando la distanza tra i due è sufficientemente grande. A partire da questi principi, è stato ripreso il paradosso EPR: nell'esperimento, una volta effettuata la misura in A, lo spin in B risulta prevedibile senza interagire con B, e quindi lo spin di B — pur non misurato direttamente — dovrebbe essere considerato “reale”. Si è osservato che ciò vale anche per misure di spin lungo direzioni diverse tra loro incompatibili, portando all'idea che più componenti di spin debbano possedere simultaneamente realtà fisica, in contrasto con quanto consentito dalla Meccanica Quantistica. Da qui sono state esplicitate tre possibili conclusioni:

- il realismo non vale, cioè non esistono “elementi di realtà” preesistenti alla misura;
- la località non vale, nel senso che la misura su una parte di uno stato entangled comporta istantaneamente un aggiornamento dello stato dell'altra;
- la Meccanica Quantistica è incompleta.

Infine, si è introdotto il contributo di John Bell, mostrando che, assumendo realismo e località, egli derivò le disuguaglianze di Bell, relazioni matematiche generali che devono essere soddisfatte da tutti i sistemi che rispettano tali principi. Si è sottolineato che queste disuguaglianze sono formulabili in modo rigoroso e possono essere sottoposte sia a verifica matematica sia sperimentale, ponendo quindi la questione se le previsioni della Meccanica Quantistica le soddisfino oppure no.

Maria Bondani ha introdotto la disuguaglianza di Bell agli studenti a partire da un adattamento dell'approccio insiemistico di Bernard d'Espagnat (d'Espagnat, 1979). Supponiamo di avere un certo numero di coppie di gemelli, separati in due gruppi, che abbia tre proprietà misurabili. Le tre proprietà che consideriamo sono:

- A : essere alti più di 1.70 m (e la rispettiva $\bar{A}$: non essere alti più di 1.70 m);
- O : avere gli occhi azzurri (e la rispettiva $\bar{O}$: non avere gli occhi azzurri);
- C : avere i capelli rossi (e la rispettiva $\bar{C}$: non avere i capelli rossi).

Prendiamo il primo gruppo. Possiamo dividere l'insieme delle persone considerate fra chi possiede la proprietà P e chi non la possiede $\bar{P}$. Suddividiamo il primo gruppo per ognuna delle tre proprietà, ottenendo tre diversi sottogruppi (cfr. Fig. 8a). Ipotizzando che i gemelli condividano le stesse proprietà, la suddivisione nel primo e nel secondo gruppo sarà la stessa ed otterremo perciò le stesse suddivisioni. Usando proprietà degli insiemi e della logica, d'Espagnat propose di considerare le persone che soddisfano simultaneamente più di una proprietà. Indicando con $(N(X,Y))$ il numero di persone che soddisfano la coppia di proprietà $((X,Y))$ in un gruppo di (N) individui, è stato mostrato agli studenti (come in Fig. 8b) come si può ottenere la seguente disuguaglianza:

$$N(A, \neg B, C) + N(A, \neg B, \neg C) = N(A, \neg B) \leq N(\neg B, C) + N(A, \neg C)$$

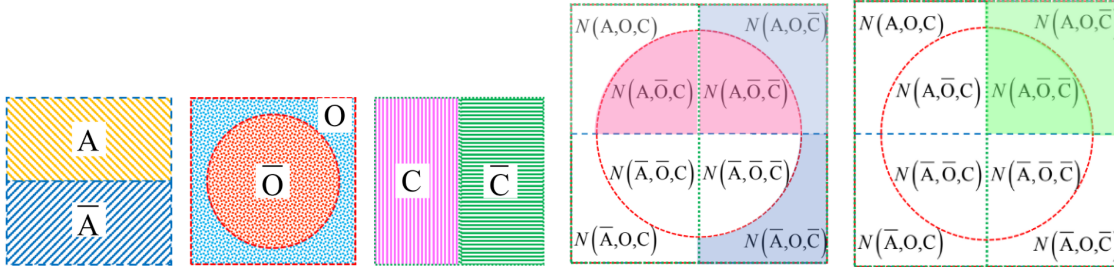


Figura 8a

Figura 8b

Per quanto riguarda le persone del primo gruppo, la disuguaglianza prende la forma:

$$N(A_1, \neg B_1) \leq N(\neg B_1, C_1) + N(A_1, \neg C_1)$$

Poiché ogni persona del gruppo 1 ha le stesse proprietà del proprio gemello nel gruppo 2, si può effettuare la seguente sostituzione:

$$N(A_1, \neg B_2) \leq N(\neg B_1, C_2) + N(A_1, \neg C_2)$$

Se consideriamo un numero molto elevato di persone, possiamo riscrivere la formula in termini di probabilità:

$$P(A_1, \neg B_2) \leq P(\neg B_1, C_2) + P(A_1, \neg C_2)$$

A questo punto viene proposta agli studenti un'analogia tra l'impostazione precedente e un contesto sperimentale pensato per verificare la disuguaglianza: al posto delle persone, si considerarono particelle quantistiche, nello specifico fotoni con la loro polarizzazione. La proprietà A è collegata alla probabilità di trasmissione del fotone attraverso un polarizzatore orientato con angolo (a), e analogamente per B e C. La disuguaglianza da verificare sperimentalmente diventa quindi:

$$P(a_1, \neg b_2) \leq P(\neg b_1, c_2) + P(a_1, \neg c_2)$$

Considerando due fotoni in uno stato di Bell, la Meccanica Quantistica predice che, per una certa scelta degli orientamenti (a), (b) e (c), la disuguaglianza viene violata. Viene quindi sottolineato come, nei contesti appartenenti alla fisica classica e per gran parte delle situazioni trattate nella fisica quantistica, le disuguaglianze di Bell risultano valide. Tuttavia, le particelle entangled sono un'eccezione. È stato quindi sottolineato come, nel caso di coppie di particelle entangled, la violazione delle disuguaglianze di Bell mostri un'incompatibilità quantitativa tra una visione del mondo realista locale e le previsioni quantistiche.

Vengono quindi introdotti i numerosi tentativi sperimentali che a partire dalla fine degli anni Sessanta vennero avviati con l'obiettivo di testarle. In particolare, è presentata sia sotto forma di disuguaglianza che graficamente la disuguaglianza di CHSH. Dopo aver ricostruito la disuguaglianza attraverso le formule trigonometriche, è stato mostrato agli studenti che, per scelte particolari degli orientamenti, la previsione quantistica del valore medio diventa

$$S(22, 5^\circ) = 2\sqrt{2} > 2$$

e la disuguaglianza CHSH risulta violata. Come visto all'interno del capitolo 2, l'esperimento di Alain Aspect confermò questa previsione teorica. Questi risultati hanno aiutato a mostrare agli studenti come gli esperimenti abbiano fornito una risposta alle sfide epistemologiche sollevate da Albert Einstein e dal paradosso EPR, confermando la completezza e la non-località della teoria quantistica. (Pierpaoli, 2023)

L'ingegnoso esperimento di Alain Aspect è stato presentato insieme ai successivi miglioramenti per trasmettere agli studenti la percezione dei grandi traguardi della fisica sperimentale: la possibilità di manipolare un singolo oggetto quantistico in laboratorio, la capacità di testare interpretazioni astratte della realtà e il conseguente sviluppo di nuove tecnologie legate all'entanglement. Infine si è fatto notare che la solidità dei test sulle disuguaglianze di Bell dipende in modo cruciale dall'efficienza di misura e dal controllo delle

principali fonti di errore, storicamente conosciuti come *loopholes*. Occorre perciò garantire che il campione di eventi rivelati sia rappresentativo (senza affidarsi a ipotesi aggiuntive come il *fair sampling*), che i due apparati siano effettivamente separati in modo da escludere comunicazioni durante misura e scelta delle impostazioni, che la selezione delle coincidenze non introduca correlazioni spurie, e che imperfezioni strumentali (sorgente, polarizzatori, rivelatori, stabilità delle impostazioni) o dipendenze tra prove successive non falsino l'analisi statistica. Si è quindi richiamato che nel 2015 sono stati realizzati test *loophole-free*: uno di essi ha escluso il realismo locale con un livello di confidenza intorno al 96% ($p \approx 0,039$), mentre altri esperimenti coevi hanno raggiunto significatività statistiche più alte (p -value molto più piccoli). Inoltre, si è aggiunta una nota sul Big Bell Test, un'iniziativa svolta nel 2016 (The BIG Bell Test Collaboration, 2018) che ha utilizzato bit generati da volontari umani per scegliere in tempo reale le impostazioni di misura, con l'obiettivo di rendere più trasparente l'assunzione di "libera scelta"/indipendenza delle impostazioni, ottenendo comunque violazioni delle disuguaglianze in diversi esperimenti.

Quarta Giornata

La quarta giornata si apre con la conclusione del lavoro sul Gioco di Bell nella versione elaborata nella progettazione discussa in questa tesi, che verrà riportata nella prossima sezione. Nella seconda parte della giornata, la Dott.ssa Satanassi ha introdotto le tecnologie quantistiche come parte cruciale nella Seconda Rivoluzione Quantistica, sottolineando il grande impatto su diverse dimensioni nella nostra società, come quelle della ricerca, della politica, dell'economia, dell'etica e dell'istruzione.

Come prima cosa, viene presentata una linea del tempo che parte dal 1980, anno in cui Benioff propone il primo modello di computer basato sulla teoria quantistica, dimostrando che un computer quantistico è teoricamente possibile. La linea arriva fino al presente, in questi anni IBM ha lanciato il suo primo computer quantistico per scopi scientifici e commerciali, GOOGLE annuncia la quantum supremacy del suo processore e molte altre aziende stanno investendo sulle tecnologie quantistiche. Questa linea temporale e la serie di articoli di giornale presentata successivamente, vuole evidenziare il ritmo del cambiamento, in continua accelerazione, la crescente rilevanza del tema e la sua multidimensionalità. In

particolare, viene introdotto il Manifesto Quantistico² (deTouzalin, 2016) come documento ufficiale europeo che ha contribuito a mettere in luce la crescente, nonché strategica, importanza delle tecnologie quantistiche. In particolare, la *comunicazione*, il *calcolo*, la *simulazione* e il *sensing quantistici* sono stati introdotti come i pilastri al centro della ricerca e dello sviluppo, così come l'importanza di ampliare la comunità di esperti che se ne occupano, coinvolgendo in futuro anche, ad esempio, ingegneri, informatici ed altre figure professionali attive nei settori dell'ingegneria, del software e dell'educazione. Infine, vengono introdotti i computer quantistici come macchine utilizzate per risolvere problemi computazionali particolarmente difficili, come attività di ottimizzazione, ricerche su database, apprendimento automatico e riconoscimento delle immagini. Sfruttando la nuova unità di base (QUBIT) e altre proprietà quantistiche come l'entanglement, un computer quantistico agisce come un enorme dispositivo in grado di gestire grandi quantità di dati e di performare un numero esponenzialmente elevato di calcoli contemporaneamente.

La terza ed ultima parte della quarta giornata è stata curata da Elisa Ercolessi, che ha presentato i sistemi a più qubit. Richiamando il confronto tra circuito ed esperimento (Fig.8), ha introdotto i concetti di sistema a due qubit, la loro manipolazione, misura e l'entanglement, enfatizzando il confronto tra sistemi a 1 qubit e sistemi a 2 qubit. In particolare, gli studenti sono stati introdotti ai sistemi quantistici a due qubit, descritti come la sovrapposizione di tutte le possibili configurazioni classiche e sono stati invitati a cogliere le differenze tra il caso classico e la quantità di informazione fornita dagli infiniti possibili valori dei coefficienti nella sovrapposizione che descrive ($|Q_0Q_1\rangle$) e descritto matematica come di sotto:

$$|Q_0Q_1\rangle = a_{00} |00\rangle + a_{01} |01\rangle + a_{10} |10\rangle + a_{11} |11\rangle \quad \text{where} \quad |a_{00}|^2 + |a_{01}|^2 + |a_{10}|^2 + |a_{11}|^2 = 1$$

Gli studenti sono stati dunque guidati alla lettura della rappresentazione circuitale. Dato in input a un circuito uno stato generico ($|Q_1Q_2\rangle$), è stato mostrato che lo stato in uscita dal circuito può essere considerato come il risultato di una misura dello stato quantistico mediante un dispositivo quantistico. È stato mostrato come calcolare la probabilità di trovare lo stato in uno dei quattro stati base del sistema (cfr. Fig.9).

² Il *Quantum Manifesto* (2016) è un documento che lancia un'iniziativa europea ambiziosa per guidare la "seconda rivoluzione quantistica", chiedendo a Commissione e Stati membri di avviare una flagship su larga scala (con obiettivi e azioni suggerite). Più recentemente è stata pubblicata anche la *Quantum Europe Strategy* (2025), un documento operativo con lo scopo di accelerare il passaggio ad applicazioni e mercato.

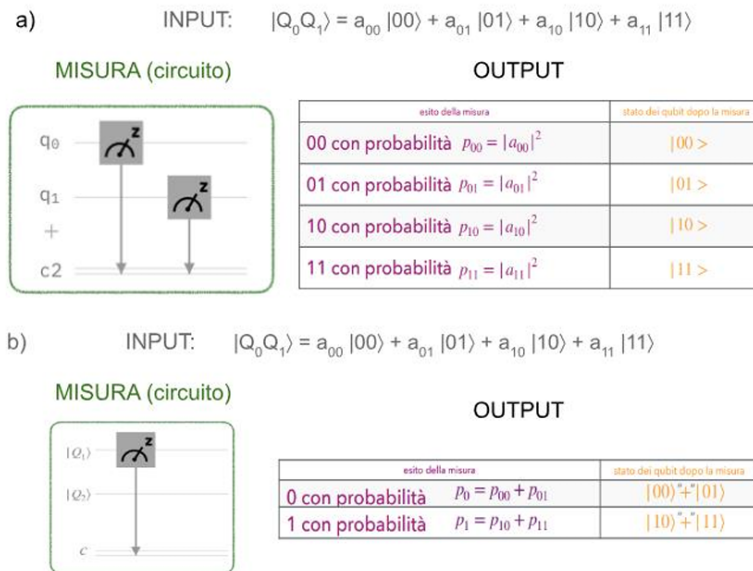


Fig.1.25 a) the state measurement on a generic two qubit system $|Q_0Q_1\rangle$;
b) the measurement of the state of only one qubit Q_0 of a generic two qubit system $|Q_0Q_1\rangle$

Figura 9: Slide utilizzata durante il corso che rappresenta il circuito quantistico corrispondente alla misura dei due qubit di uno stato quantistico composto. a) Misura di entrambi i qubit (nella base computazionale) b) Misura di un singolo qubit (nella base computazionale)

Successivamente, sono state introdotte le porte logiche a due qubit ed è stata presentata la porta CNOT, insieme alla sua tabella di verità, come esempio rilevante di porta logica a due qubit (Fig. 12 a). Sono stati poi mostrati alcuni esempi di circuiti, come lo SWAP, che consiste nella successione di 3 CNOT per generare in uscita uno stato con i qubit scambiati rispetto allo stato di ingresso. Successivamente, i quattro stati di Bell sono stati introdotti come i sistemi a due qubit massimamente entangled ed è stato inoltre mostrato come realizzarli $|\phi^+\rangle$ manipolando lo stato di input $|00\rangle$ con le porte logiche Hadamard e CNOT (Fig. 10b).



Fig. 1.31: Alice and Bob get one qubit each of the entangled anticorrelated state $|Q_0Q_1\rangle = 1/\sqrt{2}(|\uparrow\downarrow\rangle - |\downarrow\uparrow\rangle)$, and they carry out separately several measurements choosing randomly the x or z axis. They take notes of the basis used each time and finally, they share the sequence of the basis used, keeping only the values related to the simultaneous use of the same base: Alice's final sequence is the key and Bob can get it inverting each of his outcomes.

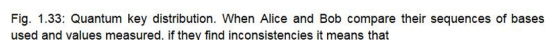


Figura 11: Simulazione Quantum Key Distribution a sinistra semplice, a destra con eavesdropper. Fonte: Satanassi (2003)

Come in Fig.11, si considerino due amici, Alice e Bob, che effettuano misure attraverso due apparati di Stern e Gerlach. Considerando una sorgente che produce coppie nello stato entangled

$$|Q_0 Q_1\rangle = (|\uparrow\downarrow\rangle - |\downarrow\uparrow\rangle)/2$$

una dopo l'altra, ipotizziamo che le misure sul primo qubit vengono effettuate da Alice, mentre le misure sul secondo qubit vengono effettuate da Bob. La chiave crittografica

consiste quindi nella sequenza di bit ottenuta da Alice dopo una serie di misure. L'obiettivo è condividere questa chiave con Bob in modo sicuro applicando il protocollo crittografico. Per il fenomeno dell'entanglement sappiamo che qualunque direzione scelga Alice per la misura sul primo qubit ($|Q1\rangle$), la misura effettuata da Bob in direzione analoga sul secondo qubit ($|Q1\rangle$) darà risultato opposto. Di conseguenza, per ottenere la chiave Bob deve semplicemente invertire i propri esiti. Si può usare un protocollo più sicuro grazie al fatto che Alice e Bob sono indipendentemente liberi di scegliere l'orientazione spaziale dell'apparato, cioè l'asse lungo cui effettuare la misura. È stato quindi ricostruito ed analizzato con gli il caso in cui Alice e Bob orientano casualmente i loro apparati lungo gli assi x o z effettuando misure indipendenti tra loro. Gli esiti ottenuti usando la stessa base risultano correlati e quelli ottenuti usando basi diverse sono completamente non correlati e inutilizzabili. Se Alice e Bob prendono nota di ciascun esito e della corrispondente orientazione dell'apparato, possono comunicare su un canale pubblico le orientazioni di ciascuna misura, mantenendo segreti gli esiti. Selezionando solamente gli 0 e gli 1 relativi alle coppie per cui hanno usato la stessa orientazione, Alice e Bob otterranno una chiave sicura perché Bob, grazie all'anticorrelazione, può ricondursi alla chiave di Alice invertendo ciascun valore della sequenza che ha ottenuto.

Gli studenti sono stati infine introdotti al caso delle eavesdropper (Fig.11). Nel protocollo BBM92, che prevede la sequenza delle basi, se l'intercettatrice Eve riesce a intercettare la particella inviata a Bob, invierà a Bob una particella con il valore di spin da lei misurato. Tuttavia, Eve non possiede alcuna informazione sulla base che Alice e Bob utilizzano per la misura, quindi nelle sue misure usa una base scelta casualmente. La particella che Bob riceve, inviata da Eve, può risultare correlata a quella di Alice se Eve ha scelto la stessa base di Alice, ma sarà non correlata se Eve ha utilizzato un'altra base. Alla fine, dopo un gran numero di misure, quando Alice e Bob confrontano le loro sequenze delle basi utilizzate e le sequenze dei valori ottenuti, se trovano delle contraddizioni, significa che Eve ha intercettato la chiave e non possono più usarla come chiave sicura, come nell'esempio in Fig.13 (b). (Pierpaoli, 2023)

Quinta Giornata

L'attività svolta presenta il protocollo del teletrasporto attraverso l'esperimento realizzato dal gruppo di ricerca di Zeilinger (2004) a Vienna. L'esperimento viene introdotto grazie alla sua

struttura narrativa, Alice e Bob si conoscono da tanto tempo ed insieme hanno progettato di rapinare una banca. Al termine del colpo, per salvarsi, si sono dovuti separare e si trovano ora sulle due sponde opposte del Danubio. Sono separati da un canale classico, 600 m d'aria, e collegati da un canale quantistico, 800 m di fibra ottica sotterranea. Prima di scappare però, si sono scambiati una coppia di fotoni entangled e, dopo diversi anni, Alice decide di mettersi in contatto con Bob condividendo lo stato di un ulteriore fotone che si è procurata. La rappresentazione schematica dell'esperimento è riportata in Fig.12.

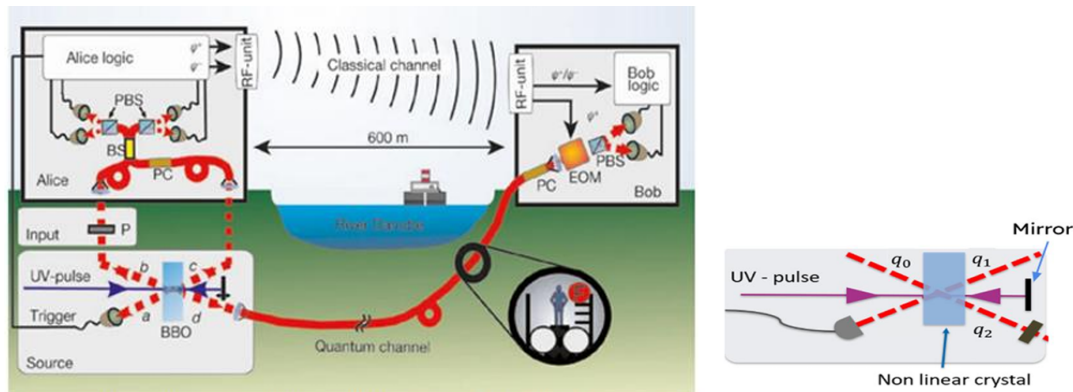


Figura 12: Slide contenente il teletrasporto quantistico a lunga distanza attraverso il fiume Danubio. Fonte: Satanassi (2003)

Nell'esperimento in Fig.12, il canale quantistico (fibra F) si trova in un tunnel fognario sotto il fiume a Vienna, mentre il canale classico a microonde passa al di sopra. Un laser pulsato (lunghezza d'onda 394 nm; frequenza 76 MHz) viene usato per pompare un cristallo di borato di bario (BBO), che genera la coppia di fotoni entangled (c e d) ed i fotoni (a e b) di lunghezza d'onda 788 nm tramite parametric down conversion effettuata verso il basso. Lo stato del fotone 'b', dopo il passaggio attraverso il polarizzatore P, è l'input del teletrasporto, mentre a funge da trigger. I fotoni b e c vengono guidati in uno splitter a fibra ottica monomodale (BS) collegato a splitter di fascio polarizzanti (PBS) per la misura dello stato di Bell. La rotazione della polarizzazione nelle fibre viene corretta da controllori di polarizzazione (PC) prima di ogni serie di misure. L'elettronica logica identifica lo stato di Bell come $|\psi\rangle_{bc}$ oppure $|\psi\rangle_{bc}$ e trasmette il risultato attraverso il canale a microonde (unità RF) al modulatore elettro-ottico (EOM) di Bob, per trasformare il fotone d nello stato di ingresso del fotone b. (Satanassi, 2003) Sulla destra di Fig. 12, è presente uno zoom del cristallo non lineare che genera le coppie di fotoni entangled.

Innanzitutto, Agli studenti è stato mostrato come le coppie di fotoni entangled, chiamate q_1 – q_2 e a – q_0 (come in Fig.14a), vengano create attraverso il processo di conversione parametrica di frequenza (parametric down-conversion): un laser pulsato ad alta energia, attraversando un cristallo non lineare di borato di bario (BBO), interagisce con esso e, con una certa probabilità, produce la coppia di fotoni entangled. Il fotone q_1 (o c in Fig. 12 a destra) viene inviato ad Alice, mentre il fotone q_2 (o d in Fig.12 a destra) viene inviato a Bob tramite il canale quantistico sotterraneo. La luce pulsata viene riflessa da uno specchio e, tornando indietro, attraversa nuovamente il cristallo, producendo un'altra coppia di fotoni entangled, a – q_0 . Il fotone q_0 (b in Fig.14 a) passa attraverso un polarizzatore P che inizializza lo stato di q_0 come input della teleportazione (ad esempio, $|q_0\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$), e poi q_0 viene inviato ad Alice. Il fotone a agisce da trigger affinché Alice avvii il processo di proiezione in uno stato di Bell degli altri due fotoni da lei ricevuti (q_1 con q_0). (Pierpaoli, 2023)

Sara Satanassi ha illustrato agli studenti come un insieme di strumenti sperimentali può permettere ad Alice di creare una condizione di entanglement tra i due fotoni. Se la relazione viene creata correttamente, allora i due fotoni vengono rivelati simultaneamente, in coincidenza temporale, dai rivelatori. A questo punto abbiamo due coppie di fotoni entangled: il doppio entanglement q_0 – q_1 e q_1 – q_2 collega lo stato di q_0 allo stato di q_2 . Alice utilizza dei rivelatori per misurare in quale stato di Bell si trovino i fotoni entangled q_0 – q_1 , con la conseguente distruzione dei fotoni, e comunica i risultati a Bob tramite il canale classico (*Classical channel* in Fig. 12 a destra). Il teletrasporto avviene perché Bob riceve l'informazione da Alice prima dell'arrivo di q_2 dal canale quantistico e ha tempo sufficiente per predisporre i suoi strumenti sperimentali (EOM) al fine di trasformare lo stato di q_2 e ottenere lo stato di q_0 : questa è il teletrasporto dello stato di q_0 in q_2 . Inoltre, è stato sottolineato agli studenti che, in questo processo, il teletrasporto riguarda l'informazione contenuta nello stato q_0 , che, a differenza della computazione classica, non è semplicemente il valore di un bit, cioè $|0\rangle$ o $|1\rangle$, ma i valori dei coefficienti della combinazione lineare che rappresenta lo stato del sistema a due stati $|q_1q_2\rangle$.

Una volta presentato l'esperimento, gli studenti sono stati coinvolti nel ragionare sul confronto tra l'esperimento ed il circuito (Fig.13). In particolare, hanno osservato come il sistema venga manipolato attraverso porte logiche quantistiche, trasformando algebricamente lo stato del sistema durante le diverse fasi del teletrasporto. Gli studenti sono stati quindi coinvolti nell'esplorazione di ciascuna parte del circuito, analizzando l'azione di ciascuna

porta quantistica sullo stato del sistema $q_0q_1q_2$, attraverso la logica e l'algebra implementate nelle porte quantistiche. Inoltre, sono stati guidati passo dopo passo a riconoscere la corrispondenza tra sequenze di porte logiche e strumenti sperimentali, come in Fig.15, dove ciascuna sezione dell'esperimento è stata mappata rispetto alla sua corrispondente parte del circuito.

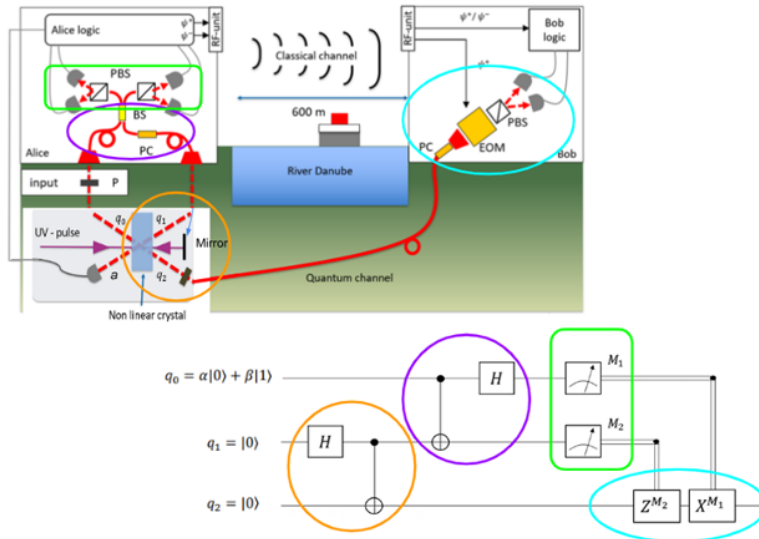


Figura 13: Il circuito equivalente all'esperimento di Zeilinger mostrato agli studenti è stato mappato uno a uno con le sezioni corrispondenti dell'esperimento (Satanassi, 2023)

La seconda parte della quinta giornata è stata dedicata ai lavori di gruppo. Infatti, sempre più le tecnologie quantistiche entrano nella nostra quotidianità. Nascono quindi l'esigenza ma anche la voglia di conoscere queste nuove tecnologie. A partire dal teletrasporto, perciò, è sembrato opportuno dedicare una giornata e mezzo ad una riflessione totale sul corso e sulle tecnologie quantistiche, che verrà riportata nella prossima sezione.

Sesta Giornata

Nella seconda metà della quinta giornata e per l'intera sesta giornata, si è continuato a trattare il tema delle tecnologie quantistiche e sulla loro crescente rilevanza scientifica. A partire dal tema del teletrasporto quantistico, si è scelto di dedicare un giorno e mezzo a un lavoro di sintesi e di approfondimento che aiutasse gli studenti a collegare i concetti affrontati alle applicazioni che stanno rapidamente assumendo un ruolo centrale nella ricerca e, in prospettiva, in diversi settori della società. L'obiettivo dell'attività era riflettere sulle

implicazioni scientifiche, sociali e culturali delle tecnologie quantistiche al fine di cogliere le potenzialità di queste nuove tecnologie e sviluppare un pensiero critico che possa guidare gli studenti ad orientarsi all'interno di questa rivoluzione tecnologica ormai sempre più prorompente.

La classe è stata suddivisa in quattro gruppi, ciascuno impegnato nella realizzazione di un poster, strumento scelto per aiutare gli studenti a rappresentare che cosa intendessero, alla luce del percorso, per “tecnologie quantistiche” e quali ambiti ne risultassero maggiormente trasformati. Per sostenere il lavoro, sono stati forniti materiali strutturati e complementari:

- 1) un file con domande guida organizzate in quattro sezioni, utile per orientare l'indagine e per articolare una presa di posizione sul valore e sulle implicazioni delle tecnologie quantistiche;
- 2) 58 fonti tra divulgazione e contributi più tecnici, distribuite su ambiti differenti (ricerca scientifico-tecnologica, industria, ambiente, etica, geopolitica e comunicazione), da cui ciascun gruppo poteva selezionare i filoni di maggiore interesse- Questa selezione di articoli, non è stata pensata per essere esaurita integralmente, ma per consentire agli studenti un'esplorazione differenziata;
- 3) un Quantum Dictionary con definizioni essenziali dei termini ricorrenti nel settore, già introdotti in precedenza da Sara Satanassi, utilizzato come riferimento condiviso per mantenere coerenza e precisione nel lessico;
- 4) un poster su cui organizzare in forma visiva i risultati del lavoro.

La sesta giornata si è conclusa con la presentazione dei poster, visibili in Fig.\poster. Ogni gruppo ha condiviso ciò che aveva individuato come più significativo, mettendo in evidenza sia le conoscenze costruite sia gli aspetti che avevano suscitato maggiore interesse o sorpresa, restituendo una visione personale della rilevanza delle tecnologie quantistiche nel mondo contemporaneo.

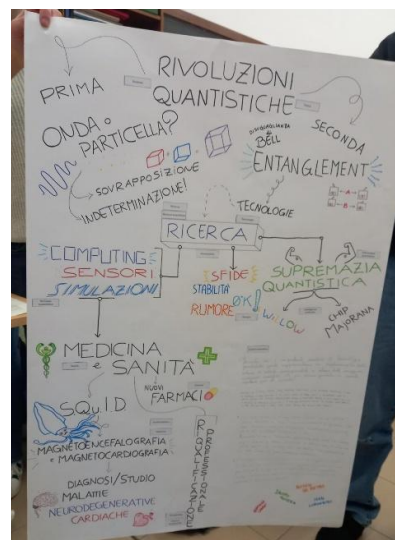
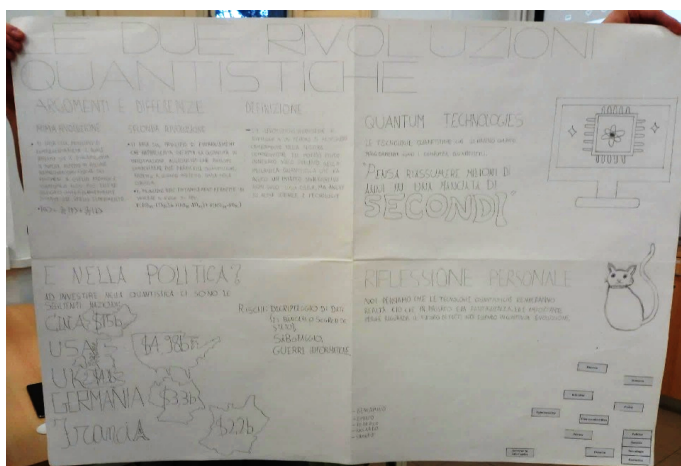
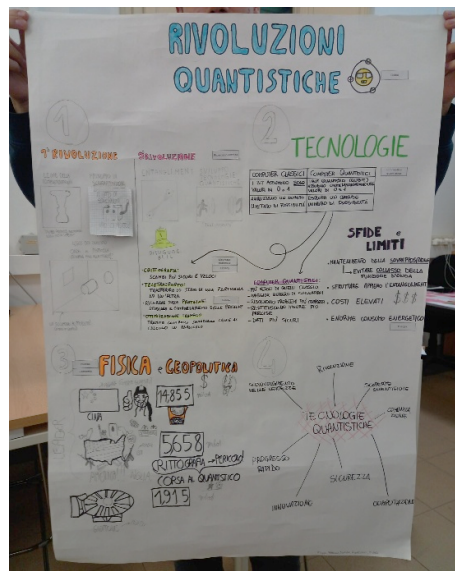
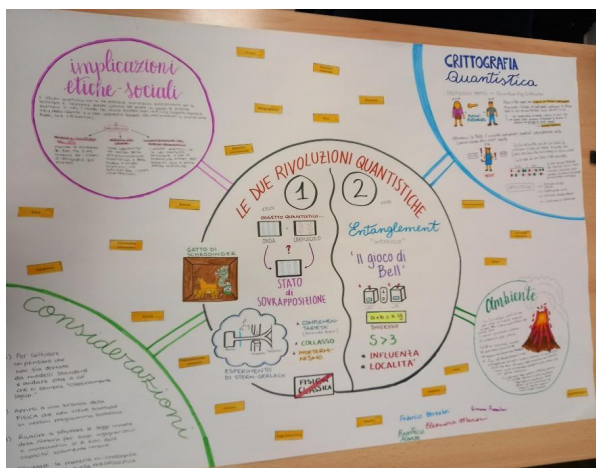


Figura 13: Lavori di gruppo finali degli studenti.

Settimana Giornata

Il 18 marzo 2025 si è svolto presso i laboratori del Dipartimento di Fisica e Astronomia dell'Università di Bologna l'incontro *"Passeggiata quantistica: Itinerario nel mondo dei quanti tra teoria ed esperimenti"*. L'attività, della durata di circa due ore, rientra in un ciclo di iniziative promosse dai Dipartimenti di Matematica, Fisica e Astronomia nell'ambito del progetto delle passeggiate scientifiche. Inizialmente dedicate al turismo matematico, queste passeggiate offrono itinerari tematici per le strade di Bologna, ideati da docenti e studenti,

che permettono di scoprire la città attraverso chiavi di lettura scientifiche. Le passeggiate sono rivolte a un ampio pubblico, quale insegnanti, studenti, cittadini, turisti e appassionati di scienza, con l'obiettivo di offrire uno sguardo inedito sui luoghi del territorio.

Alla luce di ciò, l'obiettivo principale della Passeggiata quantistica era introdurre alcuni dei principali temi trattati dai gruppi di ricerca all'interno del dipartimento, teorici e sperimentali, che caratterizzano la prima e la seconda rivoluzione quantistica, mettendo in evidenza il legame fra le scoperte scientifiche e le tecnologie che caratterizzano la prima e seconda rivoluzione quantistica. La prima parte dell'evento si è aperta con un inquadramento della seconda rivoluzione quantistica e dell'impegno del Dipartimento di Fisica ed Astronomia rispetto a questi temi. Inoltre, sono stati anticipati alcuni concetti utili per interpretare i fenomeni che sono stati presentati successivamente in laboratorio. Terminata la parte introduttiva, i partecipanti si sono divisi in piccoli gruppi e hanno visitato tre laboratori:

- Nel primo laboratorio, tramite una camera a nebbia, studenti e docenti hanno osservato le tracce lasciate da particelle ionizzanti ed hanno collegato queste evidenze sperimentali ad alcuni elementi della fisica delle particelle, fino alla presentazione del Modello Standard e dell'entanglement;
- Nel secondo laboratorio, dedicato a materiali e fenomeni quantistici, è stata mostrata la superconduttività attraverso il noto esempio della levitazione magnetica, che permette di rendere visibili proprietà macroscopiche interpretabili solo attraverso gli elementi quantistici;
- Nel terzo laboratorio, ovvero il laboratorio di ottica quantistica, i partecipanti hanno potuto osservare la formazione di una nube di atomi ultrafreddi in una trappola magneto-ottica, passaggio chiave per ottenere una sorgente controllata di atomi su cui si basano sensori quantistici ultraprecisi.