

Il lettore troverà (forse le ha già lette) due introduzioni a questo libro

La prima, dell'autore, è una breve guida alla lettura di questa collezione di suoi scritti su tematiche legate ai fondamenti della meccanica quantistica. I lavori della raccolta sono catalogati sulla base degli argomenti trattati e lettori con maggiore o minor grado di conoscenza del formalismo quantistico vengono indirizzati lungo percorsi alternativi attraverso il testo.

La seconda introduzione contiene un inquadramento storico alla "disuguaglianza (o teorema) di Bell" e al ruolo che tale risultato ha avuto negli sviluppi recenti della ricerca teorica e nelle applicazioni della meccanica quantistica. È redatta da Alain Aspect che è stato ideatore ed esecutore di uno degli esperimenti chiave suggeriti dall'analisi di Bell della causalità locale in meccanica quantistica. Aspect, nel far risalire al lavoro di Bell l'inizio della cosiddetta seconda rivoluzione quantistica, sottolinea un aspetto singolare nella storia dello sviluppo della ricerca in meccanica quantistica. L'esigenza di chiarire aspetti di fondamento della teoria, "testardamente" perseguita da Bell, ha aperto, imprevedibilmente, la strada a rapidi sviluppi sperimentali e tecnologici ("filosofia sperimentale" secondo una recente definizione).

Questo peculiare esito del dibattito sulla causalità locale ha finito per mettere in ombra altre idee-forza che hanno guidato la ricerca di Bell sui fondamenti e che percorrono tutti gli scritti raccolti in questo libro. Ancora in articoli della fine degli anni '80, di poco precedenti la sua morte improvvisa, Bell ribadì la convinzione che la meccanica quantistica non avesse ancora lo status di una teoria fisica priva di ambiguità, pur giudicandola una fantastica macchina per il calcolo delle proprietà della materia a livello microscopico.

Il lettore troverà negli scritti contenuti in questo libro analisi quantitative e punti di vista epistemologici e filosofici su vari aspetti della descrizione quantistica della realtà.

In particolare troverà analisi critiche di alcune idee che stanno alla base dell'interpretazione della meccanica quantistica comunemente accettata dalla comunità degli scienziati così come di altre rimaste invece al di fuori del "main stream". Tra le altre:

- l'idea che i sistemi microscopici ("indicibili") acquistino realtà "dicibile" solo quando misuratori macroscopici leggono la loro presenza;
- la proposta che la coscienza dell'osservatore possa avere un qualche ruolo nel definire la realtà dei sistemi microscopici;
- la diffusa convinzione, qualche volta paradossalmente basata sui risultati di Bell, che sia impossibile completare la meccanica quantistica con una descrizione spaziale dell'evoluzione dei sistemi microscopici.

Bell e la meccanica quantistica

I biografici di Bell (vedi ad esempio <http://physicsworld.com/cws/article/print/1332>, oppure *Biographical Memoirs of Fellows of the Royal Society*, Vol. 45, (Nov., 1999), pp. 3-17 The Royal Society) fanno risalire il

suo interesse a questioni di fondamento della teoria quantistica ai primi anni di studio universitario, alla fine degli anni '40. Fu però solo agli inizi degli anni '60, dopo il suo trasferimento al CERN di Ginevra, che Bell decise di intervenire da protagonista nel dibattito sulla completezza della meccanica quantistica e sul possibile completamento della teoria attraverso l'introduzione di "variabili nascoste".

I suoi punti di riferimento furono A. Einstein e D. Bohm e l'idea guida quella di re-introdurre elementi di "realismo" nel quadro interpretativo. Bell ripercorse il dibattito Einstein-Bohr sulla adeguatezza della descrizione del mondo microscopico data dalla meccanica quantistica. La sua adesione al punto di vista di Einstein fu totale: "Io sentivo che la superiorità intellettuale di Einstein su Bohr, in questo frangente, era enorme: un grande golfo tra l'uomo che aveva capito ciò che era necessario capire e l'oscurantismo" []. Negli articoli di Bohm del 1952 trovò una possibile realizzazione di un punto di vista realista sul mondo microscopico: "Ma nel 1952 vidi l'impossibile realizzato" (in "Sull'impossibilità dell'onda pilota").

L'articolo "Sei possibili mondi della meccanica quantistica" di questa raccolta è una magnifica introduzione divulgativa alle interpretazioni dello "strano" comportamento (particella e/o onda?) degli elettroni ed è fortemente consigliata come prima lettura per i non esperti. Nell'articolo Bell analizza i classici esperimenti di "interferenza di onde materiali".

Elettroni prodotti e accelerati, in maniera sperimentalmente indistinguibile, verso una superficie metallica con due piccole fenditure vengono rilevati su uno schermo a valle delle due fenditure. Sullo schermo si osservano scintillazioni che vengono interpretate come impatti localizzati degli elettroni. L'osservazione ripetuta molte volte rivela una fenomenologia difficilmente armonizzabile con una descrizione classica del moto, intesa nel "senso comune" di una descrizione spazio-temporale delle posizioni di un corpo in movimento:

- malgrado l'identica preparazione iniziale gli impatti sono distribuiti su una vasta regione dello schermo. Delle posizioni degli impatti può quindi solo darsi una descrizione statistica;
- la statistica degli impatti differisce qualitativamente e quantitativamente da quella osservata quando una o l'altra delle due fenditure risultano chiuse e certamente differisce dalla somma delle due ;
- i punti di impatto di elettroni, prodotti e accelerati in successione, formano sullo schermo la figura caratteristica dei punti raggiunti da un'onda che si infrange sulla lastra, emerge dalle due fenditure e forma tra lastra e schermo il tipico schema di interferenza tra onde emesse da due sorgenti (vedi figure a pagina.....).

(Si noti che già negli anni '70 l'esperimento è stato effettuato con impulsi costituiti da un singolo elettrone []).

È nota la prima sintesi teorica che di questa fenomenologia fu data:

- lo "stato" dell'elettrone, in cui si sintetizza tutto ciò che è possibile (nel dibattito qualche volta sostituito da "lecito") conoscere dell'elettrone, è codificato nei valori (complessi) di un'onda la cui evoluzione è regolata dall'equazione di Schrödinger. La conoscenza dello stato (i valori dell'onda in ogni punto dello spazio) permette di descrivere e prevedere la statistica dei possibili risultati della misura (gli impatti con lo schermo);
- l'onda non descrive l'evoluzione di proprietà fisiche dell'elettrone, ma porta con sé, tutte e sole, le informazioni su ciò che potrebbe essere osservato nel processo di misura. Non ha alcun senso operativo dunque associare una posizione all'elettrone ad un qualunque istante precedente alla sua interazione con lo schermo.
- L'apparato macroscopico di misura, in questo caso la superficie sensibile dello schermo, ha, al contrario dell'elettrone, caratteristiche descrivibili in maniera completamente classica. In particolare ha perfettamente senso parlare delle posizioni in cui si osservano le scintillazioni.
- Nel processo fisico di interazione tra sistema microscopico e apparato di misura solo una delle possibilità statistiche, codificate nello stato dell'elettrone (l'onda), si attualizza nella forma dell'indicazione dello strumento di misura (processo cosiddetto di riduzione o collasso dello stato del sistema microscopico).

Colpiscono l'alto grado di astrazione nella descrizione del sistema microscopico e la netta separazione tra sistema microscopico e apparato di misura, quest'ultimo descritto in maniera classica. L'affermazione più classicamente contro-intuitiva è che in generale non è lecito tradurre la conoscenza dello stato dell'elettrone, a un qualche istante, in alcuna affermazione su parametri fisici attribuibili all'elettrone a quello stesso istante. Fanno eccezione le quantità fisiche, relative all'elettrone, per le quali lo stato prevede un solo valore possibile in una misura (certezza statistica). Solo tali quantità (e solo relativamente a tale stato) verranno accettate come "elementi di realtà".

Contrariamente al caso delle onde nei mezzi materiali e delle onde elettromagnetiche, qui è un'onda matematica che evolve, portando con sé le informazioni su possibili risultati di misure: "Nel caso di onde nell'acqua è la superficie dell'acqua che ondeggia. Nel caso delle onde sonore è la pressione dell'aria che oscilla.....Nel caso delle onde della meccanica quantistica non abbiamo idea di cosa ondeggi... e non facciamo domande (ancora in "Sei possibili mondi della meccanica quantistica").

Chiamiamole "onde di possibilità" perché codificano le più accurate informazioni a nostra disposizione sulla statistica dei risultati di una qualunque misura sull'elettrone. In accordo con l'interpretazione "ortodossa", descritta precedentemente, non è possibile associare tali possibilità a proprietà effettivamente possedute dall'elettrone, fino a che la misura non venga effettuata. Ad esempio, nel caso appena discusso, l'onda di possibilità, passando per le fenditure, prende la forma della somma di due onde, ciascuna uscente da una delle fenditure. Non è lecito però interpretare questo stato come "somma delle possibilità" codificate in ciascuna delle due onde. Le due onde, al contrario, non hanno esistenza indipendente, possono successivamente sovrapporsi, interferire e creare scenari di possibili risultati di misure incompatibili con la semplice "somma delle possibilità". Sono le onde di possibilità a sommarsi, non le possibilità. Il divario tra descrizione classica e descrizione quantistica della natura e dell'evoluzione dei sistemi fisici si rivela inconfondibilmente in questi "stati somma" (stati di sovrapposizione).

Il divario si manifesta con ancora più evidenza in particolari stati di sovrapposizione di "onde di possibilità" riguardanti sistemi di più particelle. Supponiamo che un elettrone, oltre che a spostarsi spazialmente, possa esistere in due stati che, per semplicità, chiameremo nero e bianco (in molti articoli della raccolta il lettore troverà una descrizione più rigorosa riferita a situazioni microscopiche reali). Supponiamo inoltre che i due elettroni possono essere preparati in maniera che si allontanino uno dall'altro, avendo con certezza colore opposto. Questa relazione stretta tra i loro colori lega l'evoluzione dei due elettroni (stato entangled), a qualunque distanza essi si separino, fino a che l'interazione con l'ambiente non intervenga a modificarla. L'essere di colore opposto sarebbe in questo caso un elemento di realtà (ogni misura verificherebbe che se uno è bianco l'altro è nero e viceversa). Il colore di ciascuno di loro, al contrario, non sarebbe una proprietà a loro ascrivibile. Lo stato infatti non definisce con certezza il colore di ciascun elettrone, che può essere nero o bianco. Ogni misura di colore fatta su un elettrone della coppia cambierebbe il suo stato a volte in nero a volte in bianco (collasso), secondo una statistica prevedibile, e cambierebbe contemporaneamente lo stato dell'altro elettrone in quello di colore opposto. Se fosse fisicamente possibile mantenere lo stato di sovrapposizione mentre le particelle evolvono separandosi, il cambiamento di stato indotto dal processo di misura su una di esse avrebbe un contemporaneo effetto sullo stato del sistema anche in punti prossimi all'altra, comunque distante essa si trovi.

In "Ci sono salti quantici" (e con una differente analogia in "L'esperimento di Einstein, Podolsky e Rosen") Bell sottolinea in maniera divertente la differenza con una presunta analoga situazione nel mondo macroscopico. Se, uscendo di casa, qualcuno dimentica uno dei suoi guanti e si accorge successivamente di avere con sé il guanto sinistro, potrà istantaneamente inferire che è il guanto destro che è rimasto a casa. Nessuno riconoscerebbe aspetti paradossali in questo caso. Infatti abbiamo buone ragioni per credere che la proprietà "essere un guanto sinistro" sia sempre stata posseduta dal guanto sinistro, indipendentemente dal fatto che qualcuno lo abbia verificato (o almeno così la pensiamo!). Non è stato l'atto di accorgersene che ha attualizzato la proprietà di essere guanto sinistro (o destro).

La situazione descritta precedentemente schematizza quello che in letteratura è noto come "paradosso EPR", dai nomi di A. Einstein, B. Podolsky e N. Rosen e costituisce il centro attorno a cui ruotano molti degli argomenti trattati nel libro. I tre autori lo presentarono nel 1935 [], sotto forma di esperimento ideale, e ne dedussero che la meccanica quantistica doveva necessariamente essere una descrizione incompleta del mondo fisico, a meno di non ammettere la possibilità che sistemi distanti potessero interferire tra loro in maniera istantanea. Per gli autori la possibilità della "non-località" delle interazioni tra sistemi fisici non era seriamente contemplabile e completare la teoria significava individuare altre proprietà "nascoste" dei due elettroni che specificassero in maniera non ambigua il loro stato (come essere guanto destro o sinistro) fin dall'inizio dell'esperimento. La realtà degli elettroni non doveva aspettare il processo di misura per manifestarsi. Per Einstein e i suoi collaboratori questo implicava inoltre la necessità/speranza di formulare una teoria potenzialmente non statistica dell'evoluzione quantistica ("Dio non gioca a dadi")

Come accennato precedentemente Bell rilegge, nel dopoguerra, il dibattito sui fondamenti seguito alla V Conferenza di Solvay "Neutroni e Fotoni", dove la Meccanica Quantistica ebbe una prima sistemazione

teorica (non è possibile non menzionare che è disponibile il magnifico libro di G. Bacciagaluppi e A. Valentini "Quantum Theory at the Crossroad- Reconsidering the 1927 Solvay Conference" arXiv:quantum-ph/0609184v2 24 Oct 2009). In particolare focalizza la sua attenzione sulla disputa intorno al possibile completamento della Meccanica Quantistica, nata dopo la pubblicazione dell'articolo di Einstein, Podolsky e Rosen. La questione al centro della controversia è la seguente: è possibile aggiungere allo stato di un sistema microscopico, caratterizzato dall'onda di possibilità, altre variabili che garantiscano una descrizione potenzialmente non statistica delle proprietà del sistema e riaffermino la località delle azioni mutue tra sistemi e la realtà delle proprietà possedute da ciascun sistema ad ogni istante ?

Alcune prove di impossibilità di un tale progetto (il lettore le troverà elencate e discusse in dettaglio in "Sul problema delle variabili nascoste in meccanica quantistica") vengono proposte nei trent'anni precedenti il 1964, anno del primo fondamentale intervento di Bell nel dibattito. D'altra parte nel 1952 D. Bohm, elaborando l'idea dell'onda pilota, esposta durante la V conferenza di Solvay da L. De Broglie, presenta una specifica proposta di completamento della Meccanica Quantistica di una particella utilizzando, come variabile "nascosta", la più classica delle variabili dinamiche: la sua posizione nello spazio. Nella teoria di Bohm l'onda matematica non codifica solo informazione sui possibili risultati di una misura di posizione ma "pilota" la particella verso le possibili posizioni in cui essa potrà trovarsi. La teoria è introdotta con differente dettaglio in molti articoli che compongono questa raccolta. In particolare nell'articolo "de Broglie-Bohm, l'esperimento della doppia fenditura ritardato, e la matrice densità" Bell fornisce una lettura dell'esperimento della doppia fenditura, accennato precedentemente, in "linguaggio Bohmiano".

Bell affronta la questione in questa fase contraddittoria del dibattito. Un completamento della teoria, attraverso l'introduzione di variabili nascoste, non può essere allo stesso tempo impossibile e avere una realizzazione pratica in un caso specifico!! L'inattesa risoluzione di questa contraddizione costituisce il principale contributo di Bell al dibattito, ancora attuale, sui fondamenti della meccanica quantistica. Nei primi due articoli della raccolta sono sintetizzati i risultati sostanziali della sua investigazione. Inizialmente estende al caso di variabili quantistiche discrete (come il bianco e il nero dell'esempio precedente) possibili modelli di variabili nascoste; quindi analizza le principali prove di impossibilità di teorie quantistiche a variabili nascoste e ne prova l'inadeguatezza alla dimostrazione della tesi, mostrando come tutte si basino su richieste arbitrarie sulle nuove variabili, alle quali vengono imposte restrizioni che vanno molto al di là della irrinunciabile domanda di compatibilità con le predizioni statistiche della meccanica quantistica.

Bell affronta quindi il tema della località/non-località della meccanica quantistica. È utile ricordare che Bell trova motivazioni per analizzare l'apparente "azione a distanza" in esperimenti ideali di tipo EPR proprio nella formulazione di Bohm, che presenta espliciti caratteri di non-località. Nel caso di più particelle infatti l'onda di possibilità congiunta, che le pilota, si propaga nello spazio astratto i cui punti sono identificati dall'insieme delle coordinate di tutte le particelle che costituiscono il sistema. Se tale onda descrive uno stato entangled, la traiettoria di ciascuna di esse dipende in maniera complessa e istantanea dalla traiettoria delle altre (Bell lo mostra in "Sul problema delle variabili nascoste in meccanica quantistica"). La domanda a cui Bell vuole dare una risposta è allora la seguente: esiste un'estensione della Meccanica Quantistica tramite variabili nascoste locali, che non possano cioè influenzarsi tramite alcun tipo di azione a distanza? L'esistenza di una teoria di questo tipo avrebbe costituito un primo passo lungo la direzione

auspicata da Einstein. In ragione della località le variabili nascoste non avrebbero potuto assumere, in conseguenza di eventi lontani, valori che non avessero già posseduto in precedenza.

I risultati della sua investigazione sono sintetizzati nell'ormai famosa disuguaglianza di Bell, trattata in molti degli articoli che seguono. Al lettore non esperto si consiglia di accostarsi al problema leggendo inizialmente "I calzini di Bertlmann e la natura della realtà" e/o "Gli esperimenti di Einstein, Podolsky e Rosen". Bell analizza esperimenti di tipo EPR e studia la statistica congiunta (correlazioni) di misure su due elettroni prodotti in stati entangled. Le misure riguardano le componenti dello spin degli elettroni lungo differenti direzioni, variabili fisiche che il lettore riconoscerà come simili ai "colori" introdotti precedentemente a scopo di esempio. La disuguaglianza pone un limite superiore che le correlazioni devono soddisfare in qualunque teoria che ipotizzi l'aggiunta di variabili nascoste locali.

Le correlazioni previste dalla meccanica quantistica possono però, in principio, eccedere il limite fissato dalla disuguaglianza di Bell. Qualunque esperimento in cui si osservino correlazioni che violano tale limite dovrà quindi interpretarsi come impossibilità che una teoria di variabili nascoste locali possa descrivere il mondo microscopico. Nell'arco temporale in cui Bell scrive gli articoli della raccolta si collocano molti degli esperimenti che confermano la violazione dei limiti posti dalla disuguaglianza di Bell.

Una descrizione incisiva di questo risultato si trova nelle conclusioni di "Sul paradosso di Einstein, Podolsky e Rosen" (effettivamente il primo articolo in ordine cronologico della raccolta): "in una teoria in cui vengano aggiunti nuovi parametri alla meccanica quantistica, allo scopo di determinare con certezza i risultati di singole misure, senza cambiare le predizioni statistiche, deve essere presente un meccanismo tramite il quale uno strumento di misura possa influenzare la lettura di un altro strumento di misura comunque lontano".

A distanza di quasi mezzo secolo si disputa ancora su quali siano le "reali" implicazioni della disuguaglianza di Bell. Inaspettatamente o fortunatamente, a seconda delle opinioni, alle tematiche specificamente tecniche sembrano sovrapporsi tracce delle divisioni filosofiche che caratterizzarono le prime fasi del dibattito.

La disuguaglianza di Bell e altro, secondo Bell

Questa raccolta di scritti contiene, in presentazioni più o meno tecniche, le analisi di Bell sulle conseguenze della "sua" disuguaglianza e su vari aspetti epistemologici, filosofici e pedagogici della meccanica quantistica.

Evitando ogni tentativo esegetico di individuazione della "interpretazione autentica" del pensiero di Bell, vogliamo elencare alcuni temi ricorrenti che il lettore incontrerà nel libro, temi che vengono talvolta messi in ombra dal fondamentale contributo dell'autore sulla causalità locale e dalle nuove forme assunte dal dibattito sui fondamenti della meccanica quantistica.

Località: "È stato dimostrato (controllare la traduzione) che la meccanica quantistica non obbedisce alla causalità locale e che non può essere completata all'interno di una teoria localmente causale." Questa è la sintesi che Bell, all'inizio di "Variabili libere e causalità locale", propone come conseguenza delle prove sperimentali indicanti l'incompatibilità delle previsioni statistiche della meccanica quantistica con la località (violazione della disuguaglianza di Bell). L'indagine di Bell individua dunque fundamentalmente un contrasto tra la meccanica quantistica, o un qualunque suo completamento, e la teoria della relatività ristretta. Questa affermazione, in principio lineare, è stata spesso interpretata in maniera parziale, ad esempio riferendola solo ai possibili completamenti della teoria e non alla meccanica quantistica tout court. È naturalmente fondamentale precisare il senso della non località della meccanica quantistica (vedi [Norsen] per un'analisi recente). Bell sottolinea da una parte che la prova della non località non si applica alla sola meccanica quantistica non relativistica poiché "...dipende solamente dall'esistenza di sistemi separati altamente correlati.." (in "Introduzione alla questione delle variabili nascoste"). Dall'altra fornisce argomentazioni che indicano che non è possibile usare questa forma di non località per inviare informazioni a velocità superiori a quella della luce. Invece di essere analizzata e ulteriormente precisata nell'ambito del dibattito successivo, la disuguaglianza di Bell ha subito riletture contrastanti, centrate su nuovi concetti di difficile interpretazione (quali ad esempio quelli del "realismo locale e non locale", che, se da un lato non hanno contribuito a chiarire il problema, dall'altro continuano a produrre profonde incomprensioni tra differenti scuole di pensiero [Norsen! , Legget, Zeilinger, Maudlin, Laudisa etc. ]).

Esseribili (le beable nel testo): la meccanica quantistica (come ogni teoria fisica) si fonda su un modello matematico di straordinario rigore ed efficacia e su un vocabolario che associa gli oggetti astratti del modello a elementi della realtà osservabile. D'altra parte, quale che sia la "realtà" dei sistemi microscopici, essa richiede, per diventare osservabile, un apparato che ne amplifichi gli effetti fino a una scala macroscopicamente rilevabile.

La meccanica quantistica, nella sua interpretazione ortodossa, nega che esista una realtà del sistema microscopico diversa dalla matematica che ne descrive l'evoluzione; solo l'apparato di misura, che ha una natura differente e non evolve secondo la stessa matematica, ha una realtà che viene descritta classicamente (ad es. la posizione dell'indice sulla scala). La traduzione modello-realtà è dunque necessariamente rimandata al momento dell'interazione con l'apparato di misura e viene assiomaticamente postulata tramite il postulato del collasso dello stato. Solo allora gli "osservabili" matematici diventano realtà macroscopica.

Questa negazione di una qualunque realtà dei sistemi quantistici è sottolineata da Bell in "I calzini di Bertlmann e la natura della realtà" dove le affermazioni più radicali di Bohr, Heisenberg e Jordan, su questo tema, vengono raccolte in successione (con un raffinato senso teatrale della drammatizzazione).

La domanda che Bell si pone è allora "... come si deve dividere esattamente il mondo in un apparato dicibile (speakable) ..di cui si può parlare.. e in un indicibile (unspeakable) sistema quantistico di cui non è lecito parlare?" (in "Dicibile e indicibile in meccanica quantistica"). Una teoria basata su questa divisione dai confini imprecisati tra sistema e misuratore, confini al limite dei quali le equazioni di evoluzione cessano di valere è, secondo Bell, una teoria ambigua e approssimata. La sua proposta è "... è necessario liberarsi della nozione di 'osservabile' in favore di quella di 'esseribile'. Gli esseribili della teoria sono quegli elementi che possono corrispondere a elementi di realtà, a cose che esistono. La loro esistenza non

dipende dall' "osservazione". In effetti osservazione e osservatore devono essere fatti di esseribili" (in "Esseribili in teoria quantistica dei campi").

Bell puntualizza inoltre: "La terminologia, esser-ibili opposti a osserv-abili, non intende spaventare con la meta-fisica gli addetti alla vera-fisica" (in "La teoria degli esseribili locali"). Il lettore troverà in molti degli articoli della raccolta auto-difese, a volte preventive, dell'autore contro accuse a lui rivolte di "fare della filosofia". Bell, proveniente da studi di "hard Physics" (analisi di fasci di particelle negli acceleratori), sembra particolarmente sensibile a critiche di questo tipo. Forse per questo non usa mai termini come "Ontologia primitiva" che, in una forma "sospetta", definirebbero bene le caratteristiche che Bell richiede a una teoria fisica: che tratti e ragioni su cose che "esistono" (Bibliografia sull'ontologia della meccanica bohmlana).

La teoria di de Broglie-Bohm: in vari articoli del libro viene presentata e discussa la teoria dell'onda pilota o di de Broglie-Bohm (più recentemente denominata "meccanica bohmlana"). Come accennato in precedenza si tratta di uno specifico completamento (naturalmente non locale) della meccanica quantistica, ottenuto aggiungendo allo stato del sistema le variabili ("nascoste") posizione delle particelle che lo costituiscono. In questa descrizione l'onda di possibilità "guida" le particelle lungo traiettorie univocamente definite dalla posizione iniziale. La casualità della variabile posizione appare, in questo schema, conseguenza della sola, inevitabile, casualità delle condizioni iniziali, codificata nello stato iniziale. La teoria riproduce ad ogni istante successivo la statistica prevista dalla meccanica quantistica per una misura di posizione.

Alle posizioni dunque, e sostanzialmente solo alle posizioni (contestualità della teoria di Bohm. []), viene quindi garantito lo status di proprietà posseduta dalle particelle e pre-esistente al processo di misura (delle posizioni). Si noti che Bell argomenta in molti suoi scritti come praticamente ogni misura su un sistema microscopico sia sostanzialmente una misura di posizione.

Bell analizza vari aspetti tecnici ed epistemologici della "meccanica bohmlana" negli articoli della raccolta. Ciò che risulta evidente dalle sue argomentazioni è la sua sintonia con questa descrizione e la sua delusione per il suo rimanere ampiamente minoritaria. "Ancora la descrizione di de Broglie-Bohm rimane generalmente ignorata, e non insegnata agli studenti. Credo che questo costituisca una grossa occasione perduta. Infatti quella descrizione stimola la mente in una maniera molto salutare". (Bibliografia bohmlana moderna)

È chiaro che sono gli aspetti di intuitività, concretezza e semplicità della descrizione bohmlana a risultare decisivi e rilevanti per Bell. Questa sua attitudine si conferma nel solo articolo della raccolta che non tratta di fondamenti della meccanica quantistica. In "Come insegnare la relatività speciale" Bell sostiene l'importanza di fare avvicinare alla relatività ristretta lo studente attraverso l'approccio di Lorentz (in effetti Bell nomina la linea di pensiero di Fitzgerald, Larmor, Lorentz e Poincaré). È sua opinione infatti che le capacità di indagine critica vengano rafforzate dall'uso di descrizioni della realtà che utilizzino un linguaggio più intuitivo e meno formalizzato. Ancora una volta Bell sostiene la sua tesi facendo uso di un semplice test, basato su un esperimento ideale, la cui soluzione risulta più diretta se "si pensa alla Lorentz" e più complicata se si usa la forma assiomatica, in senso operativista, della relatività ristretta.

Collasso e divisione soggetto-oggetto: Gli atti, editi da E. Caianiello, della conferenza "Nuove strade in teoria quantistica e relatività generale", organizzata dall'Istituto Italiano di Studi Filosofici ad Amalfi nel maggio del 1984, ospitano due interventi di Bell. Il primo contiene le considerazioni preliminari alla Conferenza ed è contenuto in questo testo con il titolo dell'intera raccolta.

Il secondo contiene una versione preliminare dell'articolo riportato qui come "Esseribili in teoria quantistica dei campi" intitolata "Teoria dei campi senza osservatori". Nell'introduzione è contenuta una frase- "manifesto" del programma di ricerca di Bell "Il titolo completo di questo seminario è "Teoria dei campi senza osservatori, o osservabili, o misurazioni, o sistemi, o apparati, o collassi della funzione d'onda, o cose simili". Da questo potreste sospettare che io mi occupi di filosofia (ancora! nota aggiunta). Ma in effetti mi occupo di un problema strettamente professionale. A me sembra che un fisico teorico professionale dovrebbe essere capace di formulare la teoria dei campi quantici in una maniera più pulita di quanto è stato fatto finora."

In molti degli articoli Bell asserisce che la principale fonte di disagio che lui, e molti altri fisici, provano verso la meccanica quantistica deriva dal fatto di essere formulata interamente in termini di risultati di misure, cioè di ciò che accade quando il sistema sotto investigazione "incontra" l'apparato di misura, che non fa parte del sistema e non evolve come il sistema. Si sancisce in questo modo una divisione tra il mondo microscopico del sistema quantistico e il mondo macroscopico, a cui appartiene il misuratore, che diventa, per postulato, non riducibile al primo. Agli indeterminati confini tra questi mondi l'equazione di Schrödinger non descrive più l'evoluzione dell'onda di possibilità che collassa in una nuova onda determinata in maniera complicata dall'onda originaria e dall'apparato. In effetti la misura " ..produce il minimo danno allo stato originale compatibile con la richiesta che un'immediata ripetizione della misura dia lo stesso risultato" (in "L'aspetto morale della meccanica quantistica"). Bell analizza casi realistici dove la prescrizione sembra essere difficilmente applicabile o dare risultati erranei. Arriva alla conclusione che sia praticamente impossibile marcare il limite oltre il quale all'analisi dell'evoluzione dello specifico sistema in esame debba sostituirsi la prescrizione assiomatica.

Bell sottolinea come la situazione si complichino ulteriormente se, inseguendo una plausibile frontiera dove il collasso possa alla fine operare, si prova a inglobare nel sistema parti sempre più grandi dell' "ambiente di misura": la parte sensibile dello strumento, l'intero apparato, l'occhio dell'osservatore, il suo cervello, la sua mente l'intero universo. In "L'aspetto morale della meccanica quantistica" (1966) Bell rifiuta l'idea di cercare nella mente (o nell'intero universo) il limite invalicabile della riducibilità alla meccanica quantistica e quindi il luogo del collasso: " .. chi scrive condivide con la maggioranza dei fisici un certo grado di imbarazzo al fatto che la coscienza sia coinvolta nella fisica, e condivide l'usuale sensazione che considerare l'universo come un tutto sia almeno immodesto se non blasfemo". In "Dicibile e indicibile in meccanica quantistica" (1984), pur concedendo che la mente possa avere un ruolo centrale nella natura profonda della realtà, sostiene che la fisica attuale dovrebbe ancora ricercare l'apparente necessità di descrizioni "classiche" del mondo nella specificità degli oggetti macroscopici e non nella mente.

Per questo motivo mostra estremo interesse per il lavoro di G.C. Ghirardi, A. Rimini e T. Weber, che viene analizzato con qualche dettaglio nell'ultimo articolo della raccolta. La teoria GRW propone uno specifico meccanismo di collasso casuale e spontaneo formalmente ottenuto con l'aggiunta di un termine non lineare ( e stocastico) all'equazione di Schrödinger. Il contributo del termine non lineare alla dinamica dei sistemi microscopici isolati appare trascurabile mentre risulta estremamente efficace nel cancellare sovrapposizioni di stati di sistemi formati da un numero elevato di componenti microscopiche. Nel processo

di interazione sistema-misuratore il risultato è quello di rendere non trascurabile solo una delle componenti dell'onda di possibilità che corrisponderà al risultato della misura.

I salti quantici: presentando la teoria GRW in "Ci sono salti quantici?", ultimo articolo della raccolta, Bell si diverte a interpretare quanto sostegno tale teoria avrebbe avuto da parte di Schrödinger. La centralità assegnata nella proposta GRW all'equazione d'onda, che descrive senza interruzioni la dinamica dei sistemi quantici, e l'assenza di ogni accenno a particelle e/o a "dualità" onda-corpuscolo vengono annoverate da Bell come le caratteristiche che sarebbero plausibilmente piaciute a Schrödinger senza riserve. D'altra parte "Avrebbe potuto (Sch.) non apprezzare i salti GRW, ma gli sarebbero piaciuti comunque di più dei vecchi salti quantici dei suoi tempi". In effetti i "salti quantici" sono sopravvissuti alla vecchia teoria dei quanti, sostenuti da una lettura dell'evoluzione quantistica in termini di "processi virtuali elementari" tipici del linguaggio della teoria delle perturbazioni. Anche nell'introduzione a questo libro, dove Aspect si diverte a interpretare Bell, appaiono i salti quantici: "Mi piace pensare che a lui (Bell) sarebbero piaciuti gli orologi atomici basati sui salti quantici.....".

La frase di Schrödinger, con la quale Bell sottotitola l'articolo, non sembra andare nella direzione auspicata da Aspect "Se dobbiamo continuare con questi maledetti salti quantici allora mi dispiace averci avuto qualcosa a che fare".

Bell dimostra sempre grande considerazione per l'opinione di Schrödinger, che riconosce come una tra le poche voci critiche sulla interpretazione ortodossa della meccanica quantistica e unico tra i "padri fondatori" della teoria a comprendere la centralità dei problemi posti dall'articolo di Einstein, Podolky e Rosen.