



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BERGAMO

Scuola di Alta formazione Dottorale

Corso di Dottorato in Studi Umanistici Interculturali

Ciclo XXIX

Settore scientifico disciplinare: Logica, Storia e Filosofia della Scienza

TITOLO

Alla Ricerca del Reale: la Meccanica Quantistica

Supervisore:

Chiar.mo Prof./Chiar.mo Enrico Giannetto

Tesi di Dottorato

Michele CAPONIGRO

Matricola n. 1004473

Anno Accademico 2015/16

Not only does God play dice, but he plays with nonlocal dice.

N. Gisin

Sappiamo oggi come si possa dimostrare che la luna non è là quando nessuno la guarda.

D. Mermin

*Physics has a word for the cause of these non-local correlations: entanglement.
But physics offers no story in space and time to explain or describe how these correlations happen.
Hence, somehow, non- local correlations emerge from outside space-time.*

La meccanica quantistica soffre di una fondamentale ambiguità che deriva dal fatto che nessuno sa esattamente cosa essa dica circa qualsiasi specifica situazione, perchè nessuno sa esattamente dove debba collocarsi il confine tra il vago mondo quantistico e il mondo preciso degli eventi specifici.

Questo per me è il vero problema della teoria.

Da un punto di vista pratico non c'è problema, in pratica siamo sempre in grado di scegliere questo confine giudiziosamente in modo che piccoli spostamenti in un verso o nell'altro non importino molto. Ma ogni volta che introduciamo questo confine, e dobbiamo collocarlo da qualche parte, noi stiamo dividendo arbitrariamente il mondo in due parti e usando due descrizioni del tutto diverse, una per una parte e l'altra per l'altra.

John S. Bell

Acknowledgments

Ringrazio in primo luogo il Prof. Enrico Giannetto per i consigli e la piena fiducia che mi ha accordato in questa ricerca di dottorato, mia moglie Elena Balocco per la pazienza culturale.

0. Pubblicazioni

La ricerca descritta nella tesi ha portato alle seguenti pubblicazioni:

1-Epistemic vs Ontic Classification of quantum entangled states?
Michele Caponigro, Enrico Giannetto
preprint:arXiv:1206.2916

Publicato su International Journal of Quantum Foundation,
14 december 2015: <http://www.ijqf.org/archives/3200>

2-"Quantum Entanglement: Can We "See" the Implicate Order?
Philosophical
Speculations" Michele Caponigro, Xiaojiang Jiang, Ravi Prakash, Ram
Vimal Prakash, Neuroquantology Journal Vol 8, No 3 (2010)

3-"Interpretations of Quantum Mechanics: A Critical Survey" M. Caponigro,
Prespacetime Journal (August 2010) Vol. 1 | Issue 5 | pp. 745-760.

4-Can Information be Sorted Out from Quantum Mechanics?
Michele Caponigro, Stefano Mancini
NeuroQuantology: DOI: 10.14704/nq.2009.7.4.249

5-"Approach to Physical Reality: a note on Poincare Group and the
philosophy of Nagarjuna"
M.Caponigro, P. Tandan,<http://arxiv.org/abs/0704.1665> (Cornell University
Library) 2008

6-"Tomograms and the quest for single particle nonlocality" M. A.
Anisimov,
M. Caponigro, S. Mancini, V. I. Man'ko Journal of Physics: Conference
Series 70, 012002 (2006).

Indice

0	Struttura della Tesi.....	pag. 9
1	Introduzione e problematiche nella Meccanica Quantistica.....	pag. 13
2	Fondamenti della Meccanica Quantistica : un sondaggio.....	pag. 47
3	Teoria Quantistica dell'informazione e la fenomenologia di Husserl (T. Bilban)....	pag. 53
4	Le interpretazioni della Meccanica Quantistica: un breve saggio critico.....	pag 58
5	Possono le informazioni (quantistiche) essere separate dalla MQ?	pag 76
6	La classificazione degli stati entangled è ontica o epistemica?.....	pag 85
	Domande ammissibili ed inammissibili in MQ.....	pag 90

Abstract

Questo lavoro di tesi partendo da un saggio critico sulle interpretazioni della meccanica quantistica si sofferma in particolare sulla interpretazione informazionale. In tale contesto viene considerato un approccio fenomenologico all'informazione quantistica portato avanti da T. Bilban. L'idea secondo la quale l'informazione sia da ritenersi "oggetto" primario per spiegare i fondamenti della meccanica quantistica, è secondo noi, messa in discussione dalla natura peculiare e controintuitiva dell'entanglement. Nell'ultima parte della tesi dopo aver analizzato tali peculiarità, si conclude che: 1) esiste una relazione intrinseca ed oggettiva tra le particelle, tale relazione è inoltre indipendente dall'osservatore, 2) tutte particelle sono da considerarsi in stati oggettivi che sono entangled.

Keywords: interpretazioni meccanica quantistica, entanglement quantistico, ontologia, fenomenologia, fisica moderna.

Starting from a critical essay on interpretations of quantum mechanics, this thesis will focus on informational approach to quantum foundations. In the second part of thesis, in order to explain the nature of quantum physics, we argue about the assumption that information can be considered the primitive "object". We retain instead that, at the deeper level, the counterintuitive nature of entanglement play a fundamental role. In the last section we argue that all quantum states exhibit a uniquely objective nature: all particles are in entangled states.

Keywords: quantum interpretations, quantum entanglement, ontology, modern physics, phenomenology.

0 La struttura della tesi.

La meccanica quantistica ha dimostrato che la struttura della realtà è molto più complessa di quanto immaginato, la comprensione e la spiegazione di nuovi fenomeni empirico-osservativi richiede un nuovo concetto della realtà. La funzione d'onda è l'elemento più importante nella teoria quantistica, i lunghi dibattiti che si sono avuti e che sono tuttora aperti sono stati incentrati sulla interpretazione di questa entità complessa. Alcuni scienziati ritengono che la funzione d'onda non è nient'altro che un utile strumento per predire le osservazioni (posizione strumentalista) altri sostengono che la funzione d'onda possa rappresentare un elemento della realtà fisica (posizione realista), il recente teorema **PBR** è un esempio realista che ha fatto molto discutere (Pusey, Barrett, Rudolph: On the reality of quantum state, Nature physics 8 (475-478, 2012)).

In ogni caso, la funzione d'onda è anche responsabile delle caratteristiche non locali e statistiche della fisica quantistica, che ha aperto ed aprirà nuovi ed inediti scenari sulla concezione della realtà. Non è più possibile interpretare la matematica della fisica moderna come descrizione delle particelle materiali che si muovono nel spazio-tempo. La fisica moderna ha dimostrato che la visione ontologica a lungo sostenuta riguardo i fondamenti della realtà, non è valida, questa constatazione non risolve il problema in quanto non vengono al momento offerti nuovi modelli ontologici che soddisfano le condizioni dettate dalle nuove teorie quantistiche, la questione rimane dunque aperta.

Quello che ci chiediamo è se possibile aprire nuove strade "ontologiche", una tale ricerca anche se portasse a risultati negativi confermerebbe quanto meno il suo contrario e cioè l'esistenza di una realtà epistemica, una realtà probabilmente informazionale, tesi sostenuta da Zeilinger (Zeilinger, la realtà come bit di informazione), da Caves e Fuchs (una realtà come conoscenza soggettiva, Bayesianismo o QBism)

Un altro importante fenomeno tipicamente quantistico sono i sistemi entangled. Questi particolari sistemi, anche se separati spazialmente, mostrano delle correlazioni cosiddette non locali, la conferma sperimentale definitiva è avvenuta nel 1982 (A. Aspect). La non-località non richiede una revisione della teoria della relatività poiché tra i sistemi entangled non avvengono scambi di informazione. La convivenza pacifica tra le due teorie fisiche è momentaneamente garantita dalla nascita di un recente concetto in fisica: la non-separabilità o inseparabilità dei sistemi quantistici. Nello stesso tempo però la non-separabilità, ci costringe, non solo a ricercare nuovi modelli interpretativi dei fenomeni quantistici, ma pone il seguente fondamentale problema: in che modo si separa o si partiziona un dato sistema quantistico? Allo stato attuale delle conoscenze, tale separazione resta arbitraria, quindi soggettiva, ma gli stati entangled eventualmente trovati hanno un carattere oggettivo solo se riferiti a quella separazione o partizione. Questo punto è sviluppato nell'ultimo capitolo della presente tesi e crediamo rappresenti un contributo originale alla discussione (capitolo 6, pubblicato su: International Journal of Quantum Foundation, dicembre 2015, Epistemic vs Ontic Classification of quantum entangled states?) della seguente tesi.

Altri recenti lavori indicano che l'entanglement è un fenomeno che fa da sfondo a tutti i sistemi quantistici in quanto l'universo è in continua interazione (Torre,2010). I risultati sperimentali recenti, dimostrano dunque che la natura a livello microscopico, non è più pensabile come composta da oggetti separati e separabili dal proprio contesto.

Vi sono inoltre altri approcci recenti (Antonio Suarez et altri 2007) nei quali si sostiene che il fenomeno dell'entanglement avviene al di fuori dello spazio-tempo.

I lavori di Suarez assumono una rilevanza ancor maggiore se comparati con quelli ottenuti sperimentalmente nel 2004 da Brukner e Vedral. Secondo questi autori, anche il tempo può essere messo in condizioni di entanglement. Il tempo viene trattato come semplice osservabile, come se fosse lo spin o la polarizzazione di una particella. L'istante di tempo precedente e l'istante di tempo successivo sarebbero sullo stesso piano.

Crediamo che la metodologia scientifica per sfuggire a visioni parziali e talvolta persino fuorvianti, dovrebbe tener conto di questi nuovi elementi in campo.

Crediamo inoltre che l'inseparabilità non abbia legami con l'olismo; sarebbe come affermare che l'inseparabilità nel suo complesso è maggiore della somma delle sue parti inseparabili. La contraddizione non solo semantica nei termini utilizzati ci sembra evidente. E' la nozione stessa di somma algebrica che perde di significato, secondo l'entanglement quantistico (EQ) infatti 2 è diverso da 1 più 1 . Non si tratta dunque di sommare oggetti, ma di diverse identità. Per concludere vi sono inoltre difficoltà nello stabilire una ontologia sull'esistenza delle particelle in generale in quanto, sia a livello locale (porzioni di universo), sia a livello globale risulta impossibile stabilire quante particelle siano presenti, poiché questo dipende dal sistema di riferimento adottato (Teorema di Haag).

Struttura dei Capitoli ed obiettivo della tesi:

La seguente tesi, introduce nel primo capitolo, le problematiche generali presenti nei fondamenti della meccanica quantistica. Il secondo capitolo è un interessante sondaggio effettuato recentemente a margine di una conferenza sui fondamenti della MQ (2013 Zeilinger, Kofler e Schlosshauer) che cerca di darci un'idea sul "sentiment" dei fisici riguardo queste problematiche fondazionali.

Il terzo capitolo riguarda un approccio alla Teoria quantistica dell'informazione e la fenomenologia di Husserl, tale approccio è stato elaborato da T. Bilban (Univ. di Vienna), secondo tale approccio la realtà informazionale è l'unica fenomenologia possibile. Il quarto capitolo è un breve saggio critico sulle interpretazioni della meccanica quantistica. Nel quinto capitolo si discute della possibilità di far emergere l'informazione (di un sistema quantistico) una volta fissati come elementi primari la materia e la legge fisica. Nell'ultimo capitolo si pone l'attenzione sulla classificazione degli stati entangled, ci chiediamo se tale classificazione è di natura ontica o epistemica? Se è possibile inoltre distinguere stati entangled da stati non entangled? Sappiamo che la scelta su come ripartire un dato sistema quantistico (che è poi una porzione di mondo) è sempre una scelta arbitraria, crediamo che queste premesse siano sufficienti a concludere (cap.6) che tutti gli stati esibiscono un solo tipo di oggettività, quello dello stato entangled, le particelle sono in fin dei conti tutte correlate tra di loro. Che è anche la considerazione finale e la conclusione di questo lavoro di tesi.

Un altro obbiettivo secondario di questa tesi è quello di mettere anche in evidenza quello che la maggior parte degli studiosi quasi non contesta: l'esistenza di questioni filosofiche ed epistemologiche fondamentali nel cuore della fisica moderna.

Una indicazione operativa: la bibliografia e le citazioni sono interne ad ogni capitolo e non in calce alla tesi.

1

Introduzione e problematiche nella MQ

1.0.1 La MQ: Fapp

Un recente lavoro bibliografico che raccoglie buona parte degli studi sui fondamenti della meccanica Quantistica (MQ) non relativistica (Cabello,2004) riporta un numero impressionante di voci: circa 11000 riferimenti. E' una situazione forse unica e dopo quasi 90 anni dalla nascita della teoria, è lecito chiedersi se sia necessario discutere ancora o se tutto è stato già detto. La MQ da un punto di vista sperimentale è una teoria di grande successo ed accuratezza. Le rilevanti questioni nascono dall'interpretazione del suo formalismo. Parafrasando Bell, non possiamo accontentarci delle sole procedure FAPP (For All Practical Purposes)¹. Bell chiarisce in qualche modo l'acronimo con la seguente affermazione:

I am a quantum engineer, but on Sundays I have principles.

In un qualsiasi lavoro scientifico, e non solo, sono proprio le assunzioni filosofiche (hidden assumptions) di base che necessitano una accurata analisi. Tuttavia sappi-

¹Secondo Bell la procedura FAPP sul problema della misura in MQ lascia comunque aperto un problema di principio: individuare in modo preciso il confine tra ciò che deve descritto per mezzo di stati quantistici ondulatori da una parte, e per mezzo di termini "classici" nel senso di Bohr dall'altra. L'eliminazione, secondo Bell, di questo confine sfuggente ha sempre costituito l'attrattiva principale della descrizione in termini di "onda pilota". Il riferimento alla MQ proposta da Bohm è evidente.

amo che non è stato mai semplice rispondere alla seguente domanda: è possibile per il pensiero umano fare totalmente a meno dell'apriori? A causa della sterminata letteratura scientifica sui fondamenti della MQ preferiamo sin da subito specificare gli ambiti di ricerca a cui questo lavoro non si rivolgerà:

- Non verrà proposta una nuova interpretazione della MQ.
- Non simpatizziamo, in modo particolare, per nessuna delle interpretazioni della MQ finora avanzate.
- Non ci addentreremo su questioni meramente epistemologiche riguardanti l'evoluzione storica della MQ, a parte una breve (e dovuta) introduzione iniziale, necessaria a contestualizzare la teoria fisica.

Il lavoro di tesi si concentrerà sul fenomeno fisico dell'Entanglement (EQ) e delle sue possibili implicazioni fisiche e filosofiche.

L'entanglement è una delle caratteristiche più affascinanti della MQ. Esso non ha un corrispettivo nel mondo classico. L'entanglement è anche una vera e propria spina nel fianco della fisica moderna, e nello stesso tempo una importante risorsa applicativa e tecnologica (i.e. computazione quantistica, teletrasporto). Crediamo che il fenomeno dell'entanglement come fenomeno fisico (ormai accertato ed accettato), ci dica qualcosa di molto più profondo rispetto all'interpretazione della teoria quantistica.

Nella struttura della tesi schematizzata a pag.15, assumeremo l'EQ come uno degli elementi primari nella descrizione della possibile sottostante realtà fisica. Tale assunzione di base ci condurrà ad indagare concetti fondamentali quali la non-separabilità, la non-località. La figura 1.1 nella pagina successiva riporta alcune delle possibili implicazioni.

1.0.2 I due problemi in campo: l'Entanglement ed il processo di Misura

Anticipiamo qui brevemente, i due grandi problemi presenti nella MQ:

- l'entanglement
- il processo di misura.

Il seguente esempio mostra il primo dei problemi. Supponiamo di avere due particelle che interagiscono ad un istante di tempo t_1 . Ora portiamo le particelle lontane

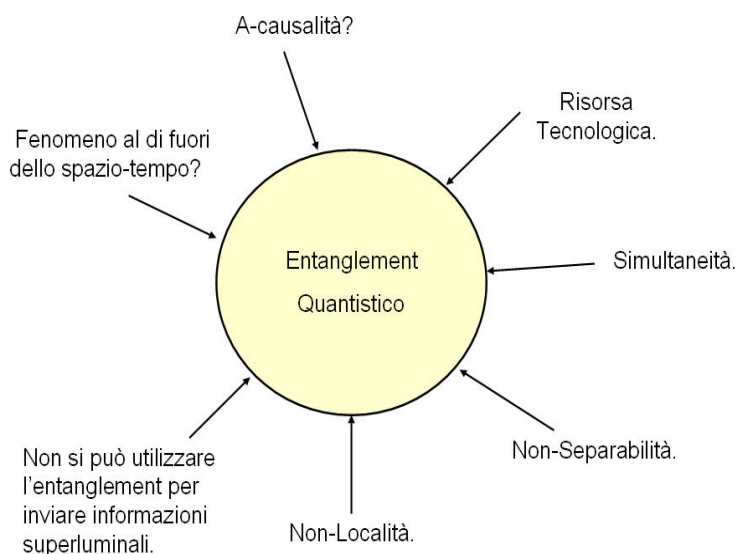


Figure 1.1: Alcune delle implicazioni fisiche e filosofiche dell'EQ.

(si intende spazialmente) dal punto in cui avevano interagito. Ad un successivo istante t_2 , effettuando una misura, troviamo che le due particelle dimostrano una correlazione molto forte: cioè quello che accade ad una è correlato a quello che accade all'altra². Su queste imbarazzanti conclusioni ci poniamo una serie di domande.

La prima domanda è: questa correlazione ha le sue radici nell'istante t_1 , cioè è stabilita quando le due particelle erano vicine? I dati sperimentali ci dicono di no. Essi confermano che le due particelle sono invece legate fra di loro all'istante tempo t_2 . Un legame che non diminuisce di intensità con l'aumentare della distanza esso è inoltre istantaneo.

La seconda domanda è: tale fenomeno deriva in qualche modo da una "errata" divisione del mondo operata dalla teoria MQ? Qui le cose iniziano a complicarsi.

²Il fenomeno dell'entanglement associato al processo di misura **non consente** di utilizzare queste strette correlazioni tra gli esiti di misure sui costituenti di sistemi composti **per comunicare a velocità superiore a quella della luce**. Per questo motivo si parla di una coesistenza pacifica della non località (NL) della MQ e la relatività ristretta. Infatti nell'ipotesi di due particelle di spin $1/2$ spazialmente separate nello stato di singoletto, supponiamo che un osservatore che detiene la particella A voglia mandare un messaggio a quello che detiene la particella B mediante il processo di misura dello spin. L'osservatore A non sarà in grado di farlo. Sono le leggi della MQ che impediscono questo, infatti l'osservatore A non può controllare l'esito della misura essendo quest'ultima completamente casuale. L'osservatore A potrà inviare segnali all'osservatore B, ma questi saranno completamente casuali (sarebbe come non inviarli). In poche parole, le leggi della MQ non consentono di inviare **informazione** a velocità superiore a quella della luce.

Infatti questo problema rimane tuttora aperto. Ci ritroviamo il misterioso caso in cui l'eventuale correlazione trovata a seguito di una (possibile) suddivisione del mondo, sia legata e dipendente proprio da quel tipo di suddivisione (meglio Partizione)(Zandardi, 2001). Entrano qui in gioco in modo preponderante elementi fortemente epistemici i quali ci inducono ad indagare sul concetto stesso del fenomeno "entanglement".

L'ultima domanda è: esiste uno sconosciuto legame tra l'entanglement e le osservabili?³ Proprio quelle osservabili scelte per definire lo stato entangled?

In pratica, ci chiediamo se il fenomeno dipenda non dalla natura degli oggetti correlati ma dal modo in cui sono teoricamente correlate le due variabili (scelte). Dunque una correlazione di variabili scelte non di oggetti. Evidentemente quest'ultima domanda ammette implicitamente una differenza di base tra proprietà (in questo caso l'osservabile⁴) ed il possibile oggetto quantistico sottostante. Su quest'ultimo punto ci sono alcune interpretazioni della MQ dette informazionali le quali sostengono che non esiste una tale differenza tra realtà ed informazione (Zeilinger, Fuchs). Esse coincidono⁵. Una semplice obiezione filosofica porterebbe ad affermare che si confonde l'epistemico con l'ontico. Il fatto che in MQ un oggetto è caratterizzato solo da alcune proprietà determinate e da altre che vengono ascritte sulla base di una distribuzione di probabilità⁶ ci conduce ad alcune considerazioni di natura ontologica su tali oggetti:

- Esiste un problema epistemico, in realtà siamo solo noi che ignoriamo quelle

³Ricordiamo il forte imbarazzo di Bell riguardo il concetto di osservabile, egli infatti contrappose il concetto di esseribili. Vedere la nota successiva.

⁴Bell sul concetto di osservabile osserva: nei libri di MQ si parla molto di osservabili. E da alcune presentazioni divulgative il pubblico generico potrebbe avere l'impressione che l'esistenza stessa del cosmo dipenda dal nostro essere qui a osservare le osservabili [...]Penso che non sia giusto raccontare al pubblico che nella fisica moderna faccia parte integrante, con un ruolo centrale, la mente cosciente. O che l'"informazione" rappresenti il vero oggetto di una teoria fisica. [...] Il solo osservatore che è essenziale nella MQ pratica e ortodossa è l'apparato inanimato che amplifica gli eventi microscopici a livello di conseguenze macroscopiche.

⁵In generale ci si aspetta che lo stato di un certo oggetto fisico sia definito dall'insieme delle sue proprietà. Questa ipotesi seppure forte potrebbe non essere sufficiente a definire l'oggetto fisico, poiché si ammetterebbe che la somma delle sue proprietà sia l'oggetto. Infatti la domanda conseguente è: conoscendo le sue proprietà conosciamo l'oggetto fisico? Se questo problema, comunque irrisolto anche nella fisica classica, diviene ancor più problematico in MQ. Tutto questo richiama la cosiddetta metafisica del realismo il quale riteneva possibile inglobare una totalità definita di tutti gli oggetti e una totalità definita di tutte le proprietà.

⁶Infatti sappiamo che un oggetto quantistico è caratterizzato da diverse variabili (osservabili), le quali non possono essere determinate tutte simultaneamente, solo quanto andiamo a misurarle, troviamo un valore determinato anche per le variabili che nel sistema preparato erano indeterminate.

proprietà. Quelle proprietà avevano un valore determinato fin dall'inizio, solo che a noi era inaccessibile. Queste sono le interpretazioni a variabili nascoste, come quella di Bohm (problemi della non-località e della contestualità che sono fortemente controintuitivi).

- La MQ come le altre teorie della fisica in generale è in grado di descrivere adeguatamente solo ciò che è strettamente misurabile. Tutti i termini teorici sono dei semplici strumenti di calcolo che si introducono per comodità (FAPP). Le proprietà indeterminate sono solo realtà possibili⁷.
- Punto di vista standard, secondo il quale per qualche ragione a noi sconosciuta dobbiamo descrivere gli oggetti macroscopici con la fisica classica e quelli microscopici con la teoria quantistica.

Per il secondo problema il **processo di misura** vi sono stati molti tentativi di soluzione:

- 1) Introduzione di variabili nascoste che trasformano la sovrapposizione in una miscela statistica classica.
- 2) La coscienza dell'osservatore interviene fisicamente a favorire il collasso. Questa è l'idea di London e Bauer, Wigner (Wigner, 1989), von Neumann.
- 3) Si modifica la dinamica. Questa è la soluzione di Ghirardi, Rimini e Weber (Ghirardi, 2005). Ma la loro diversa equazione è servita solo a risolvere questo problema. Non ha portato altre conseguenze empiricamente interessanti.
- 4) Si afferma che in realtà il collasso non è mai avvenuto. E allora il problema è quello di spiegare perché a noi risulta empiricamente. A questo punto ci sono diverse strade (MWI)⁸.

⁷Questa è la posizione di van Fraassen il quale professa agnosticismo sulla realtà di tutto ciò che non è direttamente misurabile. Naturalmente viene da chiedersi, se entità matematiche ma non empiricamente osservabili esistono? Infine si potrebbe sostenere che il mondo quantistico è caratterizzato da entità inosservabili descrivibili solo in modo matematico, completamente avulse dalle nostre capacità intuitive. Questo è il punto di vista di molti fisici, che però dà origine al cosiddetto problema della misurazione, che consiste proprio nel dare una spiegazione del rapporto fra questi oggetti non intuitivi e quelli che invece percepiamo normalmente.

⁸E' l'indirizzo di ricerca inaugurato da Everett, che però non fornisce nessuna buona ragione per spiegarci perché noi abbiamo accesso solo a uno dei valori della variabile. In pratica noi non vediamo la sovrapposizione per qualche misteriosa e sconosciuta ragione, Zurek sostiene questo su base evolucionistica, egli sostiene che che noi non vediamo la sovrapposizione o coerenza o interferenza, perché è biologicamente inutile, il quantum darwinism

- 5) La decoerenza: i nostri strumenti di misura sono sistemi aperti in contatto con l'ambiente nel quale si disperde la sovrapposizione⁹.
- 6) Oppure stabiliamo un confine arbitrario fra micro e macro e diciamo che il macro nel suo rapporto con il micro è caratterizzato dalla master equation e allora ricadiamo nei problemi della visione ortodossa.
- 7) La MQ, pur essendo una teoria straordinaria, per la sua eleganza e per le sue capacità predittive, non è teoria definitiva, essa verrà superata solo da un cambiamento rivoluzionario.

1.0.3 Il fenomeno dell'Entanglement

Come appare ora chiaro da queste prime fasi, i sistemi quantistici entangled, se separati spazialmente, mostrano delle correlazioni cosiddette non locali¹⁰. La non-località non richiede una revisione della teoria della relatività poiché tra i sistemi entangled non avvengono scambi di informazione. La convivenza pacifica fra le due teorie fisiche è attualmente garantita dalla nascita di un recente concetto in fisica: la non-separabilità o inseparabilità dei sistemi quantistici.

La non-separabilità, nello stesso tempo, ci costringe, non solo a ricercare nuovi modelli interpretativi dei fenomeni quantistici, ma ripropone nuovamente il seguente dilemma: in che modo si separa o si partiziona un dato sistema quantistico? Allo stato attuale delle conoscenze, tale separazione resta arbitraria (Zanardi 2001, L. Viola 2010), quindi soggettiva, ma gli stati entangled eventualmente trovati hanno un carattere oggettivo solo se riferiti a quella separazione o partizione. Il problema è ancora irrisolto.

Recenti lavori indicano che l'entanglement è un fenomeno che fa da sfondo a tutti

⁹Si può anche dire che l'ambiente opera una sorta di superselezione, cioè rende irrilevanti tutte quelle osservabili che sono portatrici della sovrapposizione. Così l'ambiente rende stabili solo due posizioni dello strumento di misura. O meglio rende visibili le due posizioni del puntatore, che però di fatto resta nella sovrapposizione

¹⁰Bell (Bell, 1987) ci mostra in modo semplice la differenza tra una possibile correlazione classica e una quantistica, nelle sue stesse parole: le correlazioni quantistiche sono in qualche modo diverse? Per Einstein, se ho inteso correttamente il suo pensiero, non lo sono affatto. Nell'esempio di una moneta testa e croce erano tali fin dall'inizio, anche mentre erano (le monete) nascoste. Chi ha guardato per primo era semplicemente il primo a saperlo. Ma in effetti tutto era stato determinato nel momento in cui si erano distribuiti i due pezzi di moneta (e persino prima, in una teoria classica completamente deterministica). La MQ rende misteriosa una situazione perfettamente semplice proprio perchè non contiene esplicitamente il valore, testa o croce, (oppure "su" o "giù") delle "variabili nascoste" anche prima dell'osservazione.

i sistemi quantistici (Torre, 2010) in quanto l'universo è in continua interazione. I risultati sperimentali recenti, dimostrano dunque che la natura a livello microscopico, non è più pensabile come composta da oggetti separati e separabili dal proprio contesto. La metodologia scientifica per sfuggire a visioni parziali e talvolta persino fuorvianti, dovrebbe tener conto di questi nuovi elementi. Crediamo inoltre che l'inseparabilità non abbia legami con l'olismo; sarebbe come affermare che l'inseparabilità nel suo complesso è maggiore della somma delle sue parti inseparabili. La contraddizione non solo semantica nei termini utilizzati ci sembra evidente. E' la nozione stessa di somma algebrica che perde di significato, secondo l'EQ infatti 2 è diverso da 1 più 1 . Non si tratta dunque di sommare oggetti, ma di diverse identità. Mentre una visione relazionale dei sistemi potrebbe ancora reggere. I concetti di spazio e di tempo, sono in sintonia con alcuni lavori recenti di Suarez (Suarez et al.,2007), nei quali si sostiene che l'entanglement è un fenomeno che avviene al di fuori dello spazio-tempo. I lavori di Suarez assumono una rilevanza ancor maggiore se comparati con quelli ottenuti sperimentalmente nel 2004 da Brukner e Vedral. Secondo questi autori, anche il tempo può essere messo in condizioni di entanglement. Il tempo viene trattato come semplice osservabile, come se fosse lo spin o la polarizzazione di una particella. L'istante di tempo precedente e l'istante di tempo successivo sarebbero sullo stesso piano.

1.0.4 Formalismo e Realtà

Il formalismo della MQ è solo un ricettario che ci consente di computare la probabilità in un esperimento? Il formalismo della MQ a quali oggetti si riferisce? Esiste o non esiste una sua controparte? La risposta di Hawking (Hawking,1996) è molto chiara al riguardo, la "controparte" non ci sarebbe, esistono solo le misurazioni:

Non chiedo che una teoria corrisponda alla realtà perché non so cosa sia la realtà. La realtà non è qualcosa che potete misurare con la cartina di tornasole. Tutto ciò che mi interessa è che la teoria preveda risultati delle misurazioni.

Naturalmente è lecito chiedersi questo: i risultati delle misure a che cosa si riferiscono? Bell sostiene, che non si può essere in disaccordo sulla struttura formale della MQ, ma si può essere in disaccordo sul suo significato fisico. Inoltre egli aggiunge:

Si può sostenere che, cercando di guardare dietro le previsioni formali della teoria quantistica, ci stiamo mettendo nei guai da soli.

La posizione di Einstein è invece riassunta nella seguente citazione (1953):

L'essenza della situazione attuale io la vedo così: riguardo al formalismo matematico della teoria non esiste alcun dubbio, ma molti ce ne sono sulla interpretazione fisica delle sue asserzioni. In quale relazione sta la funzione con la situazione concreta individuale, cioè con la situazione individuale di un singolo sistema? Ovvero: che cosa dice la funzione sullo "stato reale" (individuale)? Ora si può anzitutto dubitare che si possa in generale attribuire un senso a queste domande. Si può infatti assumere il seguente punto di vista: "reale" 'e solo il singolo risultato dell'osservazione, non un qualcosa di esistente obbiettivamente nello spazio e nel tempo indipendentemente dall'atto dell'osservazione. Se si assume questo netto punto di vista positivisticco, non c'è bisogno evidentemente di fare alcun pensiero su come lo "stato reale" debba essere interpretato nell'ambito della teoria dei quanti. Tale sforzo appare infatti come un tirar di scherma contro un fantasma. Questo punto di vista positivisticco netto ha tuttavia - se conseguentemente sviluppato - un'irreparabile debolezza: esso conduce a dichiarare vuote di significato tutte le proposizioni esprimibili col linguaggio. [...] Ora il concetto di "realtà fisica" 'e diventato problematico e si son poste le domande, che cosa essa veramente sia, che cosa cerchi di descrivere la fisica teorica (mediante la MQ), e a che cosa si riferiscano le leggi da essa enunciate. A queste domande vengono date risposte assai diverse.

Ed in una lettera a Schrödinger, datata 1935, Einstein scriveva: *"la vera difficoltà sta nel fatto che la fisica è un tipo di metafisica; la fisica descrive "la realtà". Ma noi non sappiamo cosa sia "la realtà", se non attraverso la descrizione fisica che ne diamo di essa".*

Da queste prime autorevoli posizioni capiamo che il problema ontologico nel formalismo quantistico è un problema aperto. E' un problema che richiede la nostra attenzione e che solleva nuove questioni a più livelli. In pratica, la questione può essere posta in questi termini: ha senso chiedersi se un sistema quantistico possieda qualche proprietà indipendentemente dai nostri procedimenti per misurarla?¹¹ I problemi nell'interpretazione della MQ si possono ridurre a tre punti della teoria:

- Completezza della teoria.
- Principio di Sovrapposizione.
- Il processo di macro-oggettivazione.

Ogni interpretazione della MQ lascia inspiegato almeno uno dei tre punti. Le peculiarità della MQ, rispetto alla visione classica, hanno origini soprattutto nel principio di sovrapposizione. Questo principio, come sappiamo, è una diretta conseguenza del carattere lineare della teoria. Anche il singolare comportamento dei sistemi composti è una conseguenza di tale principio. Il problema della misura, e più in generale la descrizione quantistica dei sistemi macroscopici (macro-oggettivazione) è ancora una diretta conseguenza dello stesso principio.

In MQ è il concetto stesso di sistema quantistico composto che viene messo in discussione. Infatti un sistema composto è "scelto" arbitrariamente dallo sperimentatore come arbitrariamente sono scelti i suoi componenti. Uno sperimentatore può vedere un singolo sistema dove un altro ne vede molti sottosistemi. Questo pone dei problemi anche per i cosiddetti stati entangled (stati non-separabili). Infatti la scelta del sistema, come dicevamo è soggettiva, mentre lo stato entangled, eventualmente trovato, è sì oggettivo ma solo verso quel tipo di scelta (partizione). Questo problema sarà trattato nel capitolo 5, attraverso recenti ricerche portate avanti da Torre et.al, Viola et.al, Zanardi (2001, 2007,2010).

Analizzeremo le importanti implicazioni tra i sistemi quantistici composti ed entanglement. Supponiamo di avere un sistema composto che inizialmente è in uno stato fattorizzato; i suoi costituenti hanno allora qualche proprietà oggettiva. Se lasciamo evolvere il sistema¹²,supponendo che i costituenti interagiscano tra di loro,

¹¹In Einstein, come vedremo, nel non dover necessariamente negare, per esempio, che una particella, sebbene ad essa non siano sperimentalmente assegnabili in maniera simultanea posizione e velocità se non nei limiti imposti dalle relazioni di indeterminazione, non possieda oggettivamente valori perfettamente definiti di queste grandezze, comporta una concezione che assegna alla teoria scientifica il compito non già di descrivere soltanto i fenomeni, bensì anche di spiegare la "realtà", di cui si intende fornire una rappresentazione "oggettiva", ovvero logicamente indipendente dal ruolo del soggetto e dai suoi apparati di rilevazione.

¹²Ghirardi 1996,2005 "Un'occhiata alle carte di Dio" Il saggiaiore.

il sistema per effetto di questa interazione si porta in uno stato che non più fattorizzato (appunto entangled) con una conseguente perdita di proprietà oggettive dei suoi costituenti. Questo rimane valido anche se i costituenti vengono allontanati l'uno dall'altro. Il solo fatto di avere interagito in passato ha fatto perdere qualsiasi proprietà individuale oggettiva ai costituenti: solo il sistema composto, considerato come un tutto ne possiede qualcuna. Ma poiché alla fine tutto interagisce con tutto, la visione che emerge dall'assunzione che il formalismo quantistico governi tutti i processi naturali (**universalità della MQ**) è quella che è stata ben elaborata da Bohm e Hiley (Bhom,Hiley 1993) nel lavoro "The undivided universe". Tale visione quantistica porterebbe ad una concezione dell'universo come un **unbroken whole**. Una totalità che ha qualche precisa proprietà, ma le cui parti non ne hanno alcuna. Quindi il fenomeno dell'entanglement comporta in generale una perdita di qualsiasi proprietà dei costituenti di un sistema composto. L'universo in quest'ottica ci appare come un'unità indivisibile le cui parti non possono venire caratterizzate se non con riferimento al tutto, di cui essi fanno parte. Questo fenomeno pone inevitabili difficoltà all'idea stessa di analizzare sistemi quantistici isolati. E' su questi elementi, vedremo che si innesterà l'argomento EPR (EPR, 1935) e le successive disuguaglianze di Bell. Queste ultime hanno rappresentato una vera e propria svolta concettuale nell'analisi del formalismo quantistico, non a caso Shimony (Shimony, 1983) ha definito il teorema di Bell come un esempio di metafisica sperimentale.

1.0.5 Il singolo evento quantistico

Le interpretazioni della MQ sono divise da questo fondamentale punto: non è possibile la descrizione completa del singolo evento. Un punto controverso a cui lo stesso Einstein ha dedicato molte energie. A differenza dell'interpretazione Standard, ogni altra interpretazione fallisce quando tenta una descrizione completa di un singolo evento. Ricordiamo che ad un livello sperimentale tutte le interpretazioni sono in accordo. D'altra parte tutte partono dallo stesso formalismo. Prendiamo come esempio l'interpretazione Standard. Il sistema quantistico qui è visto come un'entità unica che comprende sia il sistema quantistico che l'apparato di misura. Secondo Copenhagen, non ha alcun senso definire un sistema quantistico senza specificare in modo esplicito gli strumenti di misura. Allo stesso modo, non ha senso attribuire ad un sistema quantistico variabili complementari, in quanto gli apparati necessari per determinarli si escluderebbero reciprocamente. Dunque è impossibile costruire un apparato che misuri simultaneamente, ad esempio, la posizione ed il momento

con una precisione arbitraria, di conseguenza, le richieste di precisi valori simultanei di quantità complementari non hanno significato. La funzione d'onda in questa interpretazione si riduce ad essere una nostra rappresentazione della conoscenza della storia di un sistema quantistico: essa assume solo un significato epistemico.

Il motivo che sta a monte è che il formalismo della MQ non fornisce affatto un punto di partenza nella descrizione del singolo evento e tutte le altre interpretazioni fanno riferimento ed uso dello stesso formalismo (escludendo un sistema quantistico in un autostato dell'osservabile scelta).

La MQ fa dunque previsioni solo riguardo a un insieme di molti eventi singoli, previsioni che sono molto precise circa la media, la distribuzione dei risultati di misure aspettati. In pratica, la MQ non sarebbe in grado di "spiegare perché eventi (singoli eventi specifici) accadono. Per fare un esempio preciso, non è in alcun modo possibile prevedere attraverso quale fenditura passerà una particella quando incontra un sistema a doppia fenditura.

L'impossibilità di prevedere il singolo evento, appare abbastanza presto nel corso dello sviluppo della MQ. Tale impossibilità fu subito elevata a principio fondamentale: la natura era puramente statistica (probabilità ontiche).

Con il teorema di Bell è divenuto possibile escludere fin da subito una descrizione più dettagliata (esclusione delle variabili nascoste). Vedremo in dettaglio la questione nelle prossimi capitoli. In generale, l'impossibilità di descrivere il singolo processo viene accettata dalla comunità scientifica come una conseguenza delle regole quantistiche e come una limitazione della possibilità classica di descrivere il mondo. Secondo Copenhagen non è possibile, né ragionevole, ricercare le proprietà di un sistema quantistico in quanto tale. Dal momento che possiamo solo comunicare cosa abbiamo trovato attraverso il nostro linguaggio classico. Questioni quindi riguardanti le proprietà dei sistemi hanno solo senso in ambito classico, in quanto il nostro apparato è classico. In pratica, un fenomeno quantistico comprende sia il sistema quantistico che l'apparato di misura. A questo riguardo Wheeler sostiene che noi, come osservatori, siamo liberi di decidere in quale modo portare a conclusione un fenomeno quantistico. Noi scegliendo l'apparato di misura, decidiamo quale fenomeno può divenire realtà e quale no. Decidiamo quale fenomeno quantistico far "emergere". Quello che non possiamo fare è influenzare lo specifico valore ottenuto attraverso la misurazione (Zeilinger chiama questa circostanza la nostra semi-libertà)(Zeilinger 2008). Infine, dal momento che facciamo parte dell'universo, secondo Wheeler, l'universo crea se stesso osservandosi attraverso di noi (fig.1.2) In tale visione si riporterebbe gradualmente il ruolo dell'osservatore al centro della discussione, un ruolo espresso da Clauser, nella sua analisi fatta assieme a Shimony

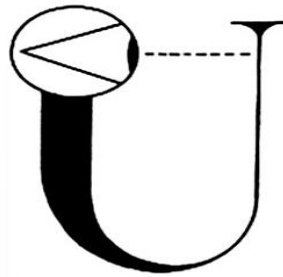


Figure 1.2: L'universo osserva se stesso

della presente situazione EPR-Bell:

"forse un albero non sentito cadere in una foresta dopotutto non produce alcun suono".

Zeilinger (Zeilinger, 2010), uno degli esponenti della interpretazione informazionale della MQ propone che questa **impossibilità di descrivere in modo completo il singolo processo casuale all'interno della MQ sia una fondamentale limitazione del programma della scienza moderna di arrivare ad una descrizione del mondo in ogni suo dettaglio**. In altre parole, egli propone, che la descrizione della natura sfugge ad una razionale e dettagliata dissezione nelle parti costituenti.

1.0.6 I fondamenti della MQ nella sua evoluzione storica

Vediamo un breve excursus storico relativo ai problemi fondazionali della MQ. Abbiamo visto che la MQ, per come è presentata nei vari libri di testo, è sostanzialmente un'insieme di regole, un ricettario, per calcolare le distribuzioni di probabilità dei risultati di qualunque esperimento nel mondo microscopico. In quanto tale, non ci fornisce direttamente una descrizione della realtà cioè una ontologia. Sulla correttezza del formalismo quantistico vi è un accordo generale, il punto controverso resta il problema l'ontologia del suo formalismo. Si è sostenuto e si sostiene ancora che la teoria quantistica ci costringa ad abbandonare la realtà di un mondo esterno che esiste oggettivamente, indipendentemente dalla mente umana. In questi ultimi anni è poi emersa, grazie allo sviluppo teorico e sperimentale della teoria della informazione e computazione quantistica, una visione della MQ basata sulla teoria dell'informazione (Fuchs 2002, Zeilinger 2005). Secondo questa interpretazione la realtà è informazione, il quanto d'informazione è un bit, quel bit è la nostra conoscenza che non è diversa dalla proprietà del sistema preso in esame. Ma già Schrödinger

nel 1935, metteva in guardia contro l'idea di ridurre la MQ a semplice rappresentazione della nostra conoscenza. Schrödinger, è sempre stato fortemente motivato dalla convinzione circa la necessità di salvare la continuità spazio-temporale della descrizione fisica, quindi salvare una certa visualizzazione dei processi fisici anche a livello microscopico. Dalle sue stesse parole possiamo capire più in dettaglio il suo pensiero:

"Non si deve attaccare alcun significato speciale al cammino dell'elettrone [...] ed ancor meno alla posizione di un elettrone sul suo cammino. L'onda non solo riempie tutto il cammino simultaneamente, ma si estende addirittura notevolmente in tutte le direzioni. Questa contraddizione è sentita così fortemente che si è persino posto in dubbio che quello che accade in un atomo possa inquadrarsi in uno schema spazio-temporale. Da un punto di vista filosofico, io considererei una decisione conclusiva in questo senso come una resa incondizionata. Infatti, poiché noi non possiamo assolutamente evitare di pensare in termini di spazio e tempo, quello che non possiamo ricondurre a siffatti concetti, non possiamo comprenderlo".

Per questa posizione Schrödinger sarà tra i pochissimi scienziati a cogliere più avanti il significato più profondo del lavoro EPR (EPR, 1935). Possiamo dire che Schrödinger si muove lungo la linea di pensiero indicata da de Broglie ed Einstein. Egli assegna un ruolo assolutamente prominente agli aspetti ondulatori, ed indica una interpretazione della funzione d'onda in termini di densità di massa o di carica dell'elettrone. Sappiamo sappiamo poi superata dalla interpretazione in termini di probabilità da Born. Anticipiamo brevemente, e per sommi capi, le due più significative posizioni rispetto all'interpretazione della funzione d'onda: 1) la standard e 2) quelle in dissacordo con la prima, vediamo la prima:

- La funzione d'onda fornisce una descrizione completa di ogni singolo oggetto quantistico.
- Tutti gli oggetti quantistici rappresentati dalla stessa funzione d'onda sono fisicamente identici.
- L'informazione circa un oggetto non misurato, semplicemente non è disponibile.

Quelle in disaccordo sono:

- La funzione d'onda fornisce solo una descrizione statistica di un insieme di oggetti quantistici, e dunque una descrizione necessariamente incompleta di ogni singolo oggetto di questo tipo.

- Oggetti quantistici rappresentati dalla stessa funzione d'onda possono non essere fisicamente identici.
- L'ignoranza dell'osservatore circa gli attributi di un oggetto non misurato è dovuta all'effetto di certe variabili "nascoste", che la teoria quantistica non consente di rappresentare.
- Oggetti con la stessa funzione d'onda possono mostrare delle differenze quando vengono osservati, perché erano fisicamente diversi prima della misurazione.

I teorici delle variabili nascoste aderiscono dunque ad una visione classica della realtà. Secondo questa interpretazione una volta conosciute le proprietà ed i valori di queste variabili (nascoste) l'oggetto quantistico sarebbe completamente individuato. Niente di diverso rispetto ad una particella newtoniana. Tale visione evita di porre il processo di misura in una posizione privilegiata. Osserviamo in generale che le differenti interpretazioni della teoria quantistica nascono dal tentativo di salvare uno dei postulati della teoria. Ad esempio, la teoria di Everett (MWI) vuole rendere "classico" il principio di sovrapposizione.

1.0.7 Le proprietà sono informazioni?

Zeilinger (Zeilinger, 2008) sostiene che la realtà è informazione. In pratica quello che serve è "leggere" una proprietà del sistema. Il sistema è completamente definito da questo bit di informazione. Quindi la MQ, per Zeilinger, è il risultato delle nostre domande. Il quanto delle informazioni sono le proposizioni. Le leggi della natura non possono fare alcuna differenza tra realtà ed informazione. L'informazione è dunque una risposta ad una nostra domanda, il limite sotto il quale non si può scendere per porre questa domanda è proprio la particella elementare d'informazione (bit). Vi è una struttura ad un certo livello discreta, a grana fine, sotto il quale non si può scendere. I fenomeni quantistici sono allora una conseguenza del fatto che il mondo rappresenta le nostre affermazioni che necessariamente si presentano appunto quantizzate. Perché il mondo è quantizzato (Wheeler,1999)? Secondo questa teoria, lo è perché l'informazione sul mondo è quantizzata. Questo ha portato i sostenitori di questa tesi ad affermare che, l'informazione è la materia primordiale dell'universo. I progressi raggiunti secondo Fuchs (un altro eminente esponente di questa interpretazione) nella comprensione dei fenomeni quantistici sono evidenti, e scherzosamente aggiunge che questa presa di coscienza eviterebbe di fare ogni anno seminari inutili sulle interpretazioni della MQ a spese del contribuente. Secondo questa tesi lo stato di un oggetto fisico è definito dall'insieme delle sue

proprietà o bits. Quello che ci chiediamo è se una volta acquisiti i bits relativi siamo in grado di definire l'oggetto quantistico? Crediamo in generale che questa ipotesi seppure molto forte potrebbe non essere sufficiente a definire l'oggetto fisico. Perché? Se ammettiamo che la somma delle sue proprietà sia l'oggetto, la domanda conseguente è: conoscendo le sue proprietà conosciamo l'oggetto fisico? Questo è un problema crediamo controverso anche in fisica classica, di più lo è in MQ. In MQ un oggetto è caratterizzato da diverse variabili (osservabili), le quali non possono essere determinate tutte simultaneamente. Tali oggetti quantistici, sono caratterizzati solo da alcune proprietà determinate e da altre che vengono ascritte sulla base di una distribuzione di probabilità.

1.0.8 Il costruttivismo radicale della MQ

Vi sono posizioni che definiamo estreme, come quella espressa da Diner (Diner, 1986) da egli stesso definita come costruttivismo radicale. Nelle sue stesse parole:

Every quantum mechanist has his own interpretation of QM. I have mine.
It is a radical constructivist point of view; QM is a cybernetic model for input (preparation) and output (measurement) of an abstract black box.

Possiamo rappresentare tramite la seguente figura, l'operazione di estrarre informazione da un sistema quantistico.

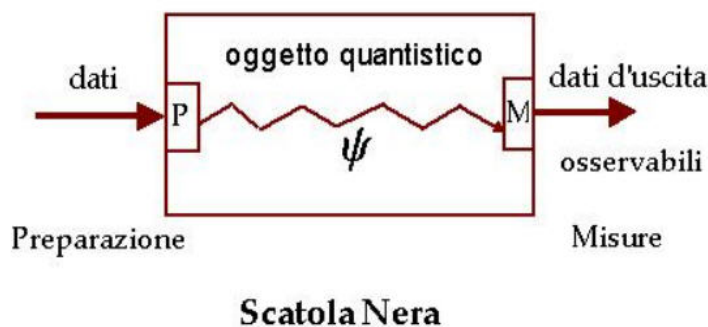


Figure 1.3: Quantum black box

1.0.9 Interpretazione Standard ed il dibattito Einstein-Copenhagen

Riassumiamo i punti essenziali dell'interpretazione Standard della MQ¹³:

¹³Riassunte in Logiurato 2004

- (1) Completezza della funzione d'onda: essa costituisce una descrizione completa dello stato di un sistema fisico individuale. Essa determina la distribuzione di probabilità dei risultati di una misurazione di qualunque grandezza osservabile. Oggi vi sono fisici che sostengono con forza tale assunzione (Zeilinger), sostenendo che tale descrizione completa dello stato è un bit di informazione.
- (2) La nostra conoscenza della realtà fisica non può essere espressa se non per mezzo di un linguaggio classico. La descrizione completa dei fenomeni fisici richiede però l'uso di concetti classici contrapposti, quali ad esempio quelli di onda e di particella. Nessuna contraddizione nasce dal loro uso poiché concetti incompatibili descrivono fenomeni che si presentano in situazioni sperimentali incompatibili (complementarietà).
- (3) Il principio d'indeterminazione di Heisenberg (Heisenberg 1958) nega l'esistenza simultanea di valori definiti per le osservabili complementari.
- (4) L'atto di misurazione produce un cambiamento discontinuo del vettore di stato non descritto dall'equazione di Schrodinger. Nella misurazione lo stato del sistema collassa in uno degli autostati dell'osservabile misurata: lo stato finale può essere previsto solo probabilisticamente. L'apparato di misura deve essere descritto in termini classici.

L'assunzione fondamentale dell'interpretazione di Copenaghen è certamente la **completezza dello stato quantistico**: esso esprime tutto ciò che può essere detto riguardo allo stato fisico del sistema, e al contrario della descrizione classica dello stato di un sistema nello spazio delle configurazioni, dà soltanto le probabilità che le misure abbiano un certo esito (**probabilità epistemiche**).

La figura (fig. 1.4 pag. XXVI) sintetizza il problema della completezza del vettore di stato ed i percorsi legati alla sua interpretazione. Il ricorso alle probabilità non è il riflesso della nostra mancanza di conoscenza e non è dovuto all'aver trascurato dei dettagli nella descrizione della dinamica: è invece il processo di misurazione stesso ad essere intrinsecamente non deterministico (**probabilità ontiche**). Anche le relazioni d'incertezza esprimono non la nostra ignoranza circa valori di posizione ed impulso ben definiti ma sconosciuti, ma l'impossibilità stessa di definire simultaneamente quei concetti.

Come è ben noto Einstein non accettò mai questa pretesa completezza della teoria quantistica¹⁴. Questo dibattito sui fondamenti della MQ, dai primi anni della sua

¹⁴E' interessante come il filosofo Howard (2007) con uno studio su Einstein finisce per attribuirgli una serie di atteggiamenti che siamo soliti considerare conflittuali circa le teorie e le entità della fisica,

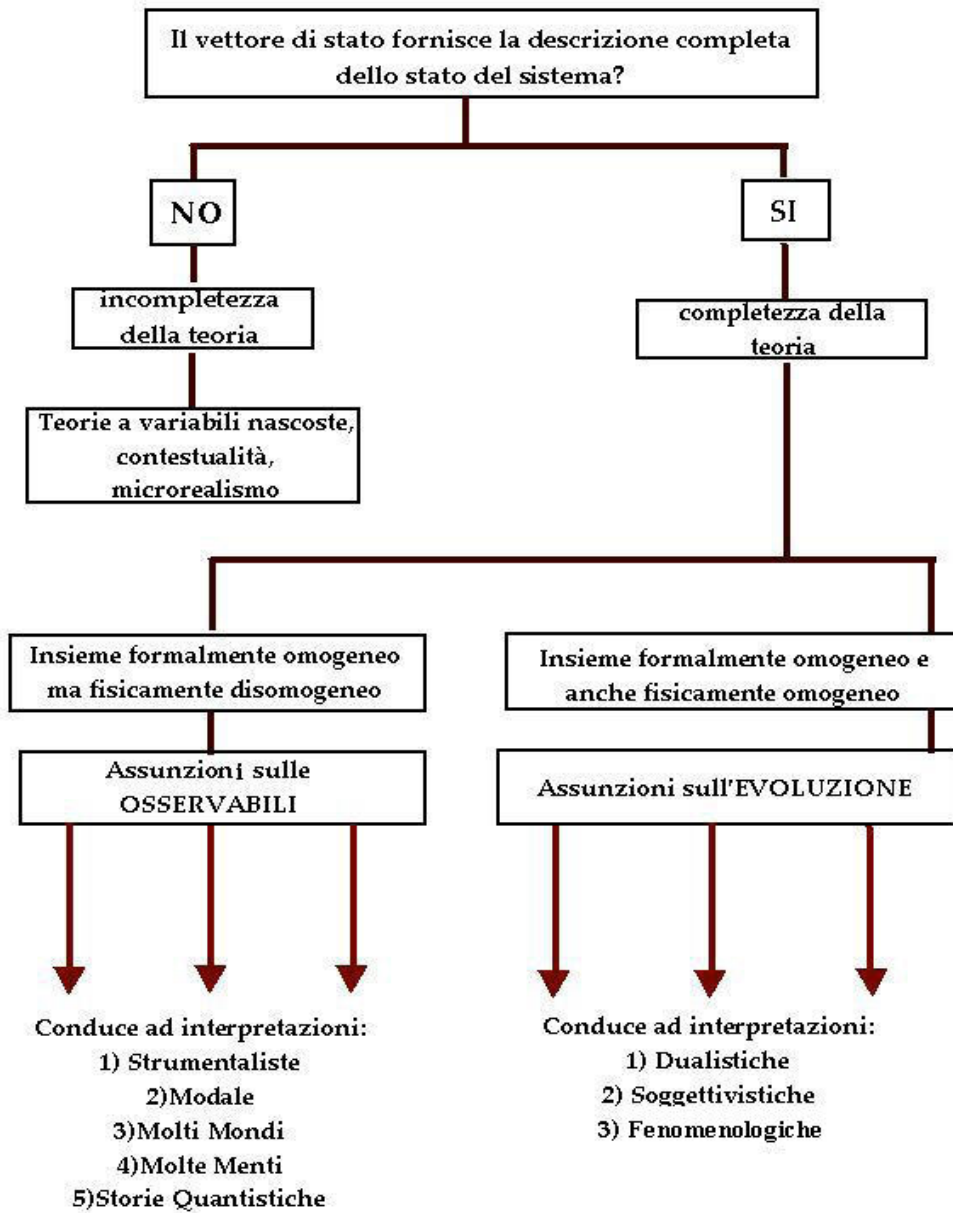
formulazione durò fino a metà degli anni '60, vede contrapposti sostanzialmente due punti di vista. La posizione di Einstein da una parte e quella di Bohr e Heisenberg dall'altra. Einstein riteneva che la MQ fosse una teoria "provvisoria" ed "incompleta". Secondo Einstein, il "completamento" della teoria doveva necessariamente passare attraverso una reintroduzione dei ben noti concetti classici. Bohr e Heisenberg pensano invece che la descrizione dei fenomeni microscopici non poteva essere fatta in termini classici. Einstein riassume tale posizione in modo seguente: (Einstein, 1949):

Se i sistemi parziali A e B formano un sistema totale che è descritto dalla sua funzione ψ , cioè dalla ψ_{AB} , non c'è ragione di attribuire un'esistenza reciprocamente indipendente (stato di realtà) ai sistemi parziali A e B considerati separatamente, neppure se i sistemi parziali sono separati spazialmente l'uno dall'altro nel momento particolare che viene considerato. Dire che, in quest'ultimo caso, la reale situazione di B non possa essere (direttamente) influenzata, da nessuna operazione di misura compiuta su A è quindi, nel quadro della teoria quantistica, un'affermazione infondata e (come dimostra il paradosso) inaccettabile. Considerando la questione in questo modo, risulta evidente che il paradosso ci costringe ad abbandonare una delle due seguenti affermazioni: 1) la descrizione compiuta per mezzo della funzione \tilde{A} è completa, 2) gli stati reali di oggetti spazialmente separati sono indipendenti l'uno dall'altro.

L'unico modo dunque per Einstein di evitare le famose azioni "spettrali a distanza" implicate dal collasso della funzione d'onda, considerato come un reale processo fisico, è ammettere che gli oggetti quantistici abbiano simultaneamente le osservabili posizione ed impulso ben definite, anche se da noi non conoscibili a causa delle relazioni d'incertezza, e accettare che la funzione d'onda non si riferisca a sistemi individuali ma ad insiemi di sistemi.

infatti secondo Howard, Einstein appare come:

- a) realista nella misura in cui cerca di descrivere un mondo indipendente dagli atti di percezione
- idealista nella misura in cui guarda ai concetti e alle teorie come libere invenzioni dello spirito umano
- positivista nella misura in cui considera i concetti e le sue teorie giustificate soltanto in quanto forniscono una rappresentazione logica delle relazioni tra esperienze sensoriali
- platonista nella misura in cui considera il punto di vista della semplicità logica come indispensabile ed efficace strumento di ricerca



Problema del formalismo della MQ:
breve schema a blocchi che riassume le interpretazioni.

Figure 1.4: Completezza del vettore di Stato: Interpretazioni

Secondo Bohr invece i nuovi fenomeni microscopici ci inducono ad abbandonare l'idea di una descrizione classica e ad accettare una situazione nuova che può essere riassunta appunto nel "principio di complementarità". Tale disputa si attua in due fasi.

In una prima fase Einstein rifiuta il principio di indeterminazione sia nel suo aspetto formale che concettuale, e tenta di dimostrarne l'erroneità escogitando degli esperimenti mentali con i quali misurare simultaneamente, e con infinita precisione, variabili complementari come la posizione e l'impulso.

Sul tema dell'incertezza Pitowsky, (Pitowsky,1989) dà due formulazioni del principio di indeterminazione, uno che chiama debole e l'altro forte, così definiti:

1) debole: se posizione e impulso hanno un valore ben definito, allora la misura della posizione di una particella disturba il valore del suo impulso e la misura del suo impulso introduce un'indeterminazione nella sua posizione. Tale disturbo non può essere arbitrariamente ridotto. E' il classico principio di indeterminazione.

2) forte: grandezze fisiche come "posizione", "impulso", "energia" ecc. tipicamente associate ai sistemi fisici esistono e sono ben definite solo nel contesto di particolari esperimenti. Quando viene effettuata una misura di posizione molto accurata il valore dell'impulso è semplicemente non definito, e viceversa. Secondo questo principio (forte) non esistono "disturbi" dovuti alle misure, ma l'indeterminazione risiede nel fatto che posizione e impulso sono due grandezza "complementari" e non può quindi esistere una descrizione comune.

E' stata proprio la messa in discussione del principio di indeterminazione che ha condotto alla possibilità di completare teoricamente (in senso classico, hidden variables) la MQ. In pratica, il principio di indeterminazione veniva ad assumere non più un carattere ontico ma epistemico. In una seconda fase Einstein invece ammette l'impossibilità di falsificare tale principio, ma rimane ancora profondamente insoddisfatto dell'origine non epistemica delle probabilità quantistiche. E' con l'argomento EPR (EPR,1935) che attacca la pretesa completezza della MQ. EPR pone in evidenza una possibile interpretazione realistica della MQ. Vi sono molte ragioni che rendono l'argomento di EPR fondamentale per il dibattito sul realismo in MQ (ed in generale sulle teorie fisiche). **Esso infatti stabilisce, in primo luogo, la necessità di basare il realismo degli "oggetti" fisici non su argomenti filosofici a priori ma su esperimenti e misurazioni.** In secondo luogo, fu proprio a partire dall'argomento di EPR che Schrödinger introdusse il concetto di "correlazione a distanza" (entanglement) che rappresenta una delle peculiarità fondamentali del formalismo quantistico. In altre parole, l'entanglement mostra che gli oggetti microscopici sono caratterizzati da proprietà che hanno natura **fondamentalmente relazionale.**

1.0.10 EPR ontico vs epistemico?

EPR si chiedono se la descrizione della MQ possa essere considerata "completa", nel senso che ad ogni "elemento di realtà deve corrispondere un elemento della teoria. Essi utilizzano il concetto classico di completezza in base al quale si presume che tutte le variabili che caratterizzano un sistema abbiano, in ogni istante, un valore ben definito. Essi non danno una definizione precisa di realtà¹⁵, ne potrebbero darla, ma affermano che una condizione sufficiente per la realtà di una grandezza fisica è la possibilità di predirne con certezza il valore senza in alcun modo disturbare il sistema.

La versione originale dell'argomento EPR solleva il problema della completezza della teoria sostenendo che è possibile in via teorica attribuire un valore simultaneo alla posizione e all'impulso di una particella (attribuzione vietata dal principio di indeterminazione). Una formulazione più semplice di EPR è quella di Bohm (Bohm,1951). Questa versione utilizza solo variabili discrete (variabili di spin) e non variabili continue come posizione ed impulso. E' su questa versione che si basa il fondamentale lavoro di Bell del 1964 (Bell,1964). Bell trasforma il lavoro EPR in un argomento stringente sulla possibilità di una interpretazione classica della MQ. Le ipotesi alla base di tale lavoro sono di natura logico-probabilistica **ed il confronto con la MQ avviene solo sulla base delle sue previsioni sperimentali**. Bell analizza il modello di Bohm per due particelle di spin 1/2 e mostra come esso presenti in generale delle caratteristiche non locali, cioè di dipendenza della misura di un'osservabile (con separazione space-like) in una certa regione dalla possibile scelta di effettuare una misura in un'altra regione arbitrariamente distante (le due particelle sono entangled). A questo punto egli si chiede se ogni modello probabilistico, che riproduca le aspettative della MQ debba avere tali caratteristiche. La risposta a tale quesito è affermativa. Egli mostra che ogni modello probabilistico classico che descriva tutte le possibili misure di spin su di un sistema di due particelle di spin 1/2 soddisfa delle disuguaglianze (correlazioni tra misure con separazione space-like). Tali disuguaglianze vengono violate dalle correlazioni predette dalla MQ. Da questo confronto nasce una discussione che contrappone "determinismo" e "località". **Bell afferma che, se le previsioni della MQ sono esatte, non esiste una "teoria deterministica locale" che riproduce tali previsioni**. Se si trova una teoria deterministica questa dovrà essere non locale (un esempio è l'interpretazione di Bohm, dove

¹⁵Tarozzi et al, 2009

viene recuperato il classico concetto di campo). Il risultato di Bell viene solitamente espresso nella forma negativa "non esistono teorie probabilistiche classiche locali che riproducono i risultati della MQ". **Da un punto di vista filosofico la MQ si oppone dunque al realismo locale.** In conclusione possiamo dire che per riprodurre gli stessi risultati della MQ, una teoria a variabili nascoste deve essere non locale.

1.0.11 Teorema di Bell: un esempio di metafisica sperimentale.

E' dall'analisi del modello di Bohm che Bell ha ricevuto importanti suggerimenti per lo sviluppo del proprio lavoro sulle teorie a variabili nascoste. Il teorema di Bell rappresenta certamente uno dei più grandi contributi al chiarimento dei problemi concettuali della teoria quantistica. Bell è stato in grado di dedurre una disuguaglianza per le correlazioni di osservabili che ogni tipo di modello a variabili nascoste locale deve soddisfare ma che è violata dalla teoria quantistica. A Bell va il grande merito di aver scoperto una formulazione matematica della posizione epistemologica di EPR e di averne mostrata l'incompatibilità con le predizioni statistiche della MQ. Contro ogni aspettativa, Bell è riuscito a trasformare un quesito che appariva puramente metafisico ed epistemologico in un problema di fisica, suscettibile di una soluzione nel campo dell'esperienza. Come già accennato Shimony (Shimony,1999) l'ha definita come un esempio di metafisica sperimentale. Le conclusioni raggiunte da Bell sono di estrema generalità, non importa la forma e il livello di complessità del modello a variabili nascoste escogitato: nessuna teoria soddisfacente, i criteri di realismo e località desiderati da Einstein, sarà capace di replicare tutti i risultati della MQ. Anche se oggi abbiamo una minoranza di oppositori a tale teorema, la fisica sperimentale per ora dà ragione a Bell. Durante il suo studio dei modelli a variabili nascoste e dei teoremi che ne tentavano di dimostrare l'impossibilità, l'attenzione di Bell era stata attratta dal carattere intrinsecamente non locale della teoria di Bohm: in essa la traiettoria di una particella localizzata in una regione dello spazio può dipendere istantaneamente da quel che accade in un luogo a lei arbitrariamente lontano. Bell si chiese allora se la NL che appariva nella trattazione causale di Bohm del paradosso EPR fosse non un difetto del modello teorico, ancora parziale essendo non relativistico, ma una caratteristica necessaria che ogni teoria a variabili nascoste, in grado di riprodurre perfettamente il formalismo quantistico deve contenere. Questa geniale intuizione portò Bell ad elaborare il famoso teorema di impossibilità delle teorie a variabili nascoste locali.

Teorema di Bell: Nessuna teoria deterministica locale a variabili nascoste può riprodurre tutte le predizioni della MQ.

A Clauser, Horne, Shimony e Holt (CHSH, 1969) è dovuta la prima notevole generalizzazione del lavoro di Bell. Ispirandosi al lavoro di CHSH, nel 1971 Bell generalizza il suo teorema conseguendo un ulteriore notevole risultato. Egli dimostra come sia possibile dedurre disuguaglianze violabili dalla teoria dei quanti dalle sole ipotesi di realismo e località, senza la condizione di determinismo. Come osservato da alcuni autori, tra i quali Popper (Popper, 1998), l'eventuale incompatibilità tra teorie a variabili nascoste locali deterministiche e MQ, poteva forse ascriversi alla sola ipotesi di determinismo [Clauser, Horne 1974]. Il nuovo teorema chiarisce definitivamente come l'impossibilità di replicare i risultati della MQ sia da imputarsi esclusivamente alle sole richieste di località e realismo. Inoltre esso è applicabile tanto a teorie intrinsecamente stocastiche, non deterministiche, che a teorie deterministiche nella quale sono assunti parametri non controllabili associati agli strumenti di misurazione.

Teorema generale di Bell¹⁶(1971): Nessun modello che soddisfi le ipotesi di realismo e località può riprodurre tutte le predizioni della teoria dei quanti.

Grazie alla disuguaglianza di Bell abbiamo finalmente la possibilità di distinguere sperimentalmente tra le predizioni delle teorie realistiche locali e quelle della teoria dei quanti. Dunque è comprensibile come il risultato di Bell abbia dato impulso ad un notevole numero di lavori sperimentali. La maggior parte degli esperimenti eseguiti è stata dedicata alla verifica delle correlazioni quantistiche tra le polarizzazioni di coppie di fotoni con spin totale nullo. Nel 1982 Aspect (Aspect et al. 1982) e collaboratori provano l'esistenza della non-località in modo definitivo.

La NL delle correlazioni quantistiche non appare solo nei sistemi entangled delle osservabili di spin o di polarizzazione, ma essa è del tutto generale e condivisa da qualunque tipo di stato non fattorizzabile. Gli attuali progressi tecnici permettono infatti la preparazione di sistemi entangled relativi ad osservabili differenti dallo spin o dalla polarizzazione e aprono quindi la strada a verifiche più generali della disuguaglianza di Bell. L'importante teorema di Bell-Kochen-Specker (Bell et al, 1967), esprime l'impossibilità di assegnare valori alle osservabili quantistiche prima dell'atto di misurazione in maniera indipendente dal contesto sperimentale. Vedremo che esiste anche un rapporto tra NL e contestualità. Nello specifico descriveremo l'interessante lavoro di Greenberger, Horne e Zeilinger (Greenberg et al.

¹⁶Secondo Zanghì (Zanghì, 2005) per poter parlare di località si deve presupporre l'esistenza di un'arena, lo spaziotempo, in cui gli eventi fisici accadono. L'argomento di Bell dà per scontato che le misure quantistiche abbiano risultati, per cui non si applica a qualunque versione della MQ in cui questo non vale. Nell'interpretazione a molti mondi il teorema non è applicabile.

1990). Questi autori, grazie all'introduzione di nuove forme di stati entangled, hanno dedotto una dimostrazione del teorema di Bell che non necessita di disuguaglianze. Concludiamo la sezione con un cenno al fondamentale teorema di Bell, Kochen e Specker sebbene meno famoso rispetto al teorema di Bell sulla NL, ha implicazioni non meno profonde per l'interpretazione del formalismo quantistico. Uno tra i più dibattuti problemi che affliggono i fondamenti della teoria dei quanti è se le proprietà degli oggetti quantistici possiedano o meno valori prima di un'osservazione. Bell, Kochen e Specker (BKS) trasformano quella che poteva apparire un'arbitraria presa di posizione filosofica, dei padri fondatori, in un'interpretazione della misurazione quantistica la cui giustificazione risiede nella struttura formale della teoria stessa. Essi dimostrano infatti in modo rigoroso l'impossibilità di assegnare valori ad un'osservabile prima dell'atto di misurazione indipendentemente dalle osservabili compatibili con essa congiuntamente misurate, giungendo ad una definitiva confutazione della forma di realismo professato da Einstein e da Popper.

Pertanto, in accordo con Bohr, il valore assunto da un'osservabile A deve dipendere dalla completa specificazione del contesto sperimentale. Più in generale, il teorema dimostra l'incompatibilità tra il formalismo quantistico e una sua interpretazione in termini di teorie a variabili nascoste di tipo non contestuale. Quindi una teoria a variabili nascoste che si propone di riprodurre i risultati della MQ deve necessariamente essere contestuale: il valore assegnato ad un'osservabile A da tale teoria deve dipendere dalle osservabili congiuntamente misurate con A e perciò dalla completa specificazione dell'apparato sperimentale. Il risultato di un'osservazione può ragionevolmente dipendere non solo dallo stato del sistema (includente le variabili nascoste), ma anche dalla completa disposizione dell'apparato [Bell 1966]. In definitiva, possiamo assumere che, almeno in condizioni simili a quella appena descritta, la richiesta di non contestualità segua dalla condizione di località:

Condizione di località \Rightarrow Condizione di non contestualità

Il primo studio sul legame esistente tra NL e contestualità si deve a Heywood e Redhead (Heywood, Redhead 1983), il teorema di Heywood e Redhead dimostra anche la NL: dunque la teoria quantistica è allo stesso tempo sia contestuale che non locale.

1.0.12 Non-località Einsteiniana vs non-località causale

I fisici preferiscono fare chiarezza su questo termine "non locale" utilizzato nella MQ a causa del fenomeno dell'entanglement. Una teoria si dice locale se prevede

che non esistano segnali superluminali. Un segnale superluminale è uno scambio di informazione che avviene a velocità superiori alla velocità della luce. Da qui alcune definizioni. La "vera" NL e cioè la possibilità di trasmettere segnali a velocità superiori a c viene detta NL einsteiniana, tale NL è detta a-causale, in essa non vale il principio di causalità. Una teoria locale è anche causale, cioè vale il principio di causalità. La NL della MQ viene definita come non-località causale, in quanto è possibile creare correlazioni tra due sistemi A e B anche a velocità superluminali, ma tali correlazioni non permettono di trasmettere segnali tra A e B¹⁷. Poiché non vi è scambio di informazioni, non vi può essere un rapporto causale tra A e B. di conseguenza la non-località causale è compatibile con la causalità. In conclusione una teoria non-locale causale è locale in senso einsteiniano. Su alcuni di questi punti non siamo completamente d'accordo, il punto è che non conosciamo la natura dell'entanglement quindi non conosciamo che tipo di scambio avviene tra i due sistemi presi in considerazione. Qui la causalità viene salvata dal non scambio di informazione, al momento però non siamo in grado di capire la natura di questa famosa azione spettrale a distanza. In sintesi abbiamo queste possibilità:

- 1) Se la MQ è incompleta allora \Rightarrow è non locale (hidden variables)
- 2) Se la MQ è non oggettiva (cade principio di realtà) \Rightarrow lo stato quantistico è solo informazione (visione epistemica)
- 3) Se la MQ è non locale \Rightarrow lo stato quantistico è reale, alla fine l'intero universo è entangled, si può parlare solo delle proprietà del sistema non del singolo oggetto

E' importante sottolineare la differenza tra uno stato fattorizzato ed uno stato entangled. Se abbiamo un sistema composto da 2 particelle con certe proprietà P1 e P2, il sistema può essere rappresentato in uno stato fattorizzato in cui le particelle 1 e 2 possiedono oggettivamente e distintamente le rispettive proprietà P1 e P2. Se

¹⁷I problemi che solleva la non-località in MQ son ben lunghi dal trovare una chiara comprensione in un coerente quadro razionale della natura (Figliuzzi,2008), come lo è il suo possibile legame con la causalità. Nella MQ mentre è lecito parlare di non-località "superluminale" in merito a eventi separati da un intervallo di tipo spaziale, non sarebbe lecito invece ammettere per tale fenomeno una relazione causale. A tal riguardo Laudisa (Laudisa,2007) si chiede, se non risulti possibile considerare causale anche il primo tipo di connessione (quella space-like) "sia pure al prezzo di introdurre una nozione fortemente non convenzionale di causalità. Una domanda, questa, la cui risposta in ogni caso dipende, da come viene presentato il rapporto tra lo spazio-tempo e la causalità nella teoria di Einstein. Le osservazioni di Laudisa fanno riferimento agli studi di Maulin (1997). Qui si propone la definizione di mutua implicazione causale e cioè di una direzione privilegiata, secondo cui "una coppia di eventi A e B si implicano causalmente a vicenda quando l'evento B non si sarebbe verificato se l'evento A non si fosse verificato, e viceversa"

però, ad un determinato istante, le due particelle interagiscono, da quell'istante in poi le due particelle formeranno un stato entangled e saranno legate dalla cosiddetta non-separabilità quantistica. **Non si potrà parlare di proprietà oggettivamente posseduta dall'una o dall'altra particella ma solo della proprietà del sistema entangled.** L'entanglement è una costruzione che sposta le proprietà dal singolo oggetto al sistema. Dalla ricerca delle proprietà del singolo oggetto si passa alle proprietà di un sistema. Come sottolineava Bell in fin dei conti potremmo, ritrovarci con una macroscopica non-separabilità dell'universo. Come faceva rilevare Bell, visto che alla lunga tutto interagisce con tutto, l'intero universo potrebbe essere visto come un unico stato entangled. Di conseguenza non avrebbe senso discutere di proprietà oggettivamente possedute da un solo oggetto. **Un universo dunque senza una proprietà individuale.** Il tentativo (poi rivelatosi falso) di ridare dignità al singolo oggetto, indipendente dal fatto che esso possa successivamente formare uno stato entangled con altri è quello di proporre che **le proprietà di un oggetto sono già possedute prima della misura.** Bisogna analizzare più in dettaglio le differenze tra sistemi entangled (non-separabili) ed il misterioso fenomeno della non-località.

Dato un sistema quantistico, la procedura FAPP per arrivare a stabilire eventuali connessioni non-locali sono:

- 1) bisogna verificare formalmente se tale sistema è entangled (stato non fattorizzabile)
- 2) bisogna verificare se viola le disuguaglianze di Bell (in ipotesi space-like).
- 3) se tali disuguaglianze vengono violate abbiamo una connessione di tipo non-locale
- 4) se tali disuguaglianze non vengono violate pur essendo il sistema entangled non abbiamo nessun tipo di connessione non-locale.

Inoltre bisogna sottolineare che per stabilire il fenomeno della non-località di un processo quantistico, i due "osservatori" che effettuano le due misure sul sistema entangled, devono poi a posteriori confrontare gli esiti delle loro misure. E' da questo confronto a posteriori che essi si rendono conto delle correlazioni. I dati che a prima vista sembrano essere distribuiti casualmente appaiono invece esattamente correlati. **Dati che potremmo definire pseudo-random sincronizzati a posteriori.** In pratica si potrebbe essere in stato entangled senza esserne a conoscenza. Qui le possibili implicazioni filosofiche potrebbero essere molto interessanti.

1.0.13 L'Osservatore e la Misura

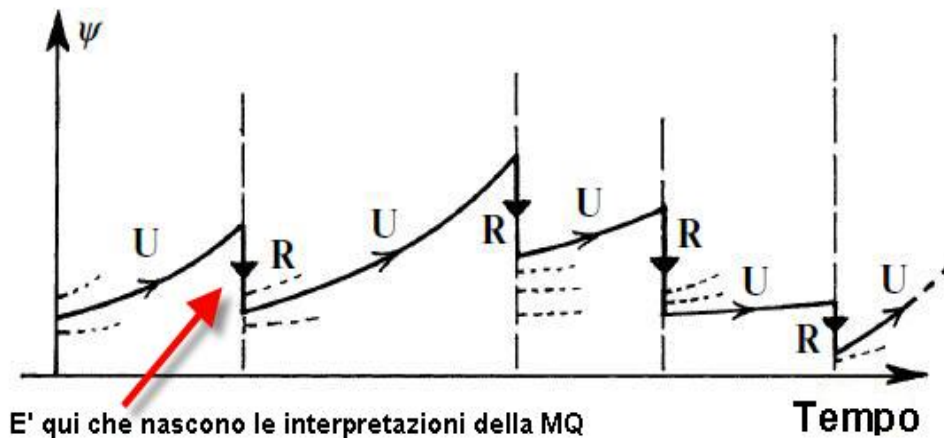


Figure 1.5: L'evoluzione della funzione d'onda si alterna tra due fasi diverse: 1) evoluzione unitaria U (eq. di Schrödinger) continua e deterministica e quella di riduzione dello stato R (discontinua e probabilistica).

La figura 1.5 (Penrose, 2005), pone in evidenza i due processi distinti che avvengono in MQ: il processo di evoluzione di Schrödinger U , e quello di riduzione di stato R . Secondo Penrose, il mistero degli stati che sono entangled si complica se facciamo solo riferimento al processo U , cioè alla sola equazione di Schrödinger. Tale equazione tende a complicare le cose. Attraverso il suo utilizzo, un numero sempre più grande di parti dell'universo diviene entangled con il nostro sistema di partenza. Secondo Penrose, conviene dunque rivolgersi all'altro processo quello R (riduzione). Egli ritiene che è questo il processo che ci libera dagli stati entangled. E' la misurazione che recide gli entanglement. Penrose crede che la natura stessa metta in atto continuamente effetti di processo R , senza alcuna deliberata intenzione da parte dello sperimentatore o un qualsiasi intervento da parte di un osservatore cosciente. La domanda che naturalmente ci poniamo ora è: che cosa significa "osservatore cosciente", e che ruolo esso svolge nel processo R di riduzione. Quasi tutte le interpretazioni convenzionali della MQ dipendono dalla presenza di un essere che percepisce. La MQ sembra richiedere dunque una definizione di un essere percipiente. Poiché la misura richiede sempre una "osservazione".

Nella figura 1.6, a pag 40, viene riportata una efficace rappresentazione fatta da Bell, dove si pone questo problema: dov'è il confine tra mondo microscopico ed il mondo della esperienza sensibile? (nota 18)
Cercare di ridurre tutto all'apparato (classico) di misura non risolve il problema in

¹⁸Dove avviene il collasso della funzione d'onda? Dov'è la sua frontiera? Nella figura Bell sottolinea

modo definitivo. Poiché lo stesso apparato è costituito da elementi quantistici e non si comporterebbe in modo classico se facciamo valere il processo U (problema del gatto di Schrodinger) anche per l'apparato. Il ricorso al fenomeno della decoerenza ambientale potrebbe risolvere il problema? Anche questa ipotesi potrebbe essere un ripiego, poiché l'inaccessibilità dell'informazione perduta nell'ambiente non significa che essa si effettivamente perduta in senso oggettivo. Ma se la perdita fosse soggettiva, torniamo di nuovo alla questione del "soggettivamente percepito", e da chi? Il problema ritorna all'osservatore cosciente. Nella storia dei fondamenti della MQ ricordiamo che una interpretazione (Wigner, 1989) basa sulla coscienza la violazione del processo U facendo riferimento esplicitamente al ruolo della mente. Per la precisione Wigner parte dalle osservazioni di von Neumann. In pratica, possiamo creare tutta una successione di stati di sovrapposizione, la cosiddetta catena di Von Neumann, che inizia dall'oggetto e finisce con continui ed indefiniti osservatori. Tale cammino, secondo Von Neumann, non può avere termine che con l'osservatore: egli, infatti, è l'unico strumento di misura in grado di misurare se stesso. Vediamo più in dettaglio la catena di von Neumann. Von Neumann assume la validità di quello che chiama il parallelismo psico-fisico, vale a dire che ogni processo mentale può essere descritto in termini fisici¹⁹. Egli parte dal presupposto che la MQ è caratterizzata da due diverse leggi di evoluzione:

- 1) quella governata dall'equazione di Schrödinger (deterministica)
- 2) quella indeterministica del postulato di proiezione.

Secondo von Neumann, ogni processo di misurazione può essere compreso solo mediante il punto 2. Da molti questo è considerato un grave difetto della teoria. Von Neumann ci indica questa giustificazione. Ci sono due descrizioni incompatibili, quella oggettiva (1) e quella soggettiva (2), secondo von Neumann la descrizione 1 ci permette di passare al 2, senza per questo che venga violato il parallelismo psico-fisico²⁰. Questo non implica un intervento del soggetto sull'oggetto, perché la

come la situazione si complichino ulteriormente, se si prova ad inglobare nel sistema parti sempre più grandi dell'ambiente di misurazione e cioè: la parte sensibile dello strumento, l'intero apparato, l'occhio dell'osservatore, il suo cervello, la sua mente, l'intero universo. Bisogna sottolineare che Bell si è rifiutato di cercare nella mente (o nell'intero universo) il limite invalicabile della riducibilità alla MQ e quindi il "luogo" del collasso. Nelle sue stesse parole: chi scrive condivide con la maggior parte dei fisici un certo imbarazzo all'idea che la coscienza sia coinvolta nella fisica, come pure l'usuale sensazione che considerare l'universo come un tutt'uno sia perlomeno immodesto, se non blasfemo.

¹⁹Lasciamo aperta questa questione, nel cap. 8, introdurremo un esperimento teorico che non assume tale condizione, lasciando al cammino stesso l'indicazione di una sua possibile conclusione.

²⁰la sua violazione (come abbiamo già in precedenza accennato) il cosiddetto integrazionismo è invece

luogo spontaneamente e non esigerebbe che un osservatore cosciente faccia parte del processo. Penrose finora non ha ancora elaborato una teoria completa al riguardo. Per chiudere questa sezione, sul problema dell'osservatore e la MQ, riportiamo sinteticamente una tabella che racchiude i vari modelli quantistici della coscienza (Vannini, 2008) proposti fin dal 1924 fino ad oggi. Inizialmente tale indirizzo di ricerca non fu reputato oggetto di indagine scientifica in quanto imperniata su concetti metafisici. Solo dagli anni 80' con il progresso delle neuroscienze e alle conferme sperimentali, l'indagine sulla mente e sulla coscienza ha cessato di essere considerata un argomento di pura speculazione filosofica.

Le teorie sulla coscienza proposte negli ultimi decenni vanno dai **modelli fondati sulla fisica classica** (come i modelli avanzati da Churchland, Damasio, Dennett, Edelman, Varela e Searle) ai modelli più recenti che tentano di fondare una spiegazione delle dinamiche coscienti sui principi della MQ, quali i concetti fondamentali di dualismo onda-particella, collasso della funzione d'onda, retrocausalità, non-località e campo unificato (come i modelli proposti da Eccles, Hameroff (Hameroff, 1999), Penrose e Chris King (King,2003)). Malgrado i progressi finora ottenuti, una profonda comprensione dei fenomeni mentali appare ancor oggi un traguardo lontano. E' possibile suddividere i modelli proposti in tre gruppi:

- 1) Modelli che collocano la coscienza nella posizione di un principio primo dal quale discende la realtà.
- 2) Modelli che fanno discendere la coscienza dalle proprietà indeterministiche e probabilistiche della MQ.
- 3) Modelli che individuano nella MQ un principio d'ordine dal quale discendono e si organizzano le proprietà della coscienza.

La tabella seguente (fig. 1.7) mostra in quale categoria rientra ciascun modello. I modelli che rientrano nella prima categoria si rifanno, in modo più o meno esplicito, all'interpretazione di Copenhagen. Tali modelli sfuggono, per definizione, alla verifica sperimentale, in quanto fanno discendere i loro assunti dal fatto che la coscienza stessa si pone a monte della realtà osservata e la determina. In questo senso, i modelli che rientrano nella prima categoria potrebbero essere considerati non tanto dei modelli della coscienza, quanto piuttosto dei modelli che cercano di spiegare l'emergere della realtà osservabile da processi panpsichisti. I modelli del secondo gruppo partono dall'assunto che la coscienza risieda in un dominio non osservabile con le attuali tecnologie della ricerca, come ad esempio i processi che avvengono a scale di misura al di sotto della costante di Planck. Anche questi si pongono al di

1) La coscienza/la realtà	2) Determinismo vs indeterminismo	3) L'ordine/la coscienza
1930 - Bohr 1987 - Herbert 1989 - Penrose Hameroff 1993 - Stapp 2004 - Järvilehto 2007 - Mender	1925 - Lotka 1963 - Culbertson 1970 - Walker 1980 - Bohm 1989 - Lockwood 1990 - Pitkänen 1992 - Kaivarainen 1998 - Bondi	1941 - Fantappiè 1967 - Umezawa Ricciardi 1968 - Fröhlich 1971 - Pribram 1986 - Eccles 1989 - Marshall 1989 - King 1995 - Yasue 1995 - Vitiello 2003 - Flanagan 2003 - Pereira 2005 - Hu 2005 - Baaquie and Martine 2008 - Hari
Interpretazione Standard	Non osservabilità del fenomeno	Principio Ordinatore

Figure 1.7: Classificazione dei modelli quantistici della coscienza.

la del criterio di falsificabilità. I modelli del terzo gruppo si basano sulla ricerca in natura di un principio di ordine che possa giustificare le proprietà della coscienza, si richiamano a principi e fenomeni che hanno già portato alla realizzazione di incoraggianti applicazioni in campo fisico (come, ad esempio, i condensati di Bose-Einstein, i superconduttori e il laser). Per questo motivo tali modelli possono essere più facilmente tradotti in ipotesi operative da verificare in campo sperimentale. Oltre al criterio della falsificabilità scientifica, va aggiunto, un secondo criterio relativo alla compatibilità del modello con le caratteristiche tipiche dei sistemi biologici. Si vede che i principi di ordine rinvenuti nella terza categoria propongono soluzioni spesso palesemente incompatibili con le caratteristiche dei sistemi biologici, come ad esempio, i condensati di Bose-Einstein i quali richiedono, per manifestarsi, temperature prossime allo zero assoluto. Applicando questo secondo criterio di selezione vengono progressivamente esclusi buona parte dei modelli proposti. In conclusione, sembra che tutti i modelli della coscienza, proposti nell'ambito della MQ, non sono traducibili in proposte sperimentali perché sono o incompatibili con il criterio della falsificabilità e/o incompatibili con le caratteristiche dei sistemi biologici. Tra i modelli presentati appartenenti alla seconda categoria, menzioniamo brevemente quello proposto da Bohm.

Bohm sviluppò la cosiddetta teoria dell'onda pilota. Questa teoria è in grado di fornire una descrizione causale dei processi quantistici. Bohm mostrò che il movi-

mento della particella sotto la guida dell'onda avviene in accordo ad una legge che ha la forma della seconda legge di Newton, con la sola differenza che nella sua teoria la particella è soggetta, oltre ad una forza classica, anche ad una forza quantistica. Questa forza è legata a una forma di energia denominata potenziale quantistico. La funzione d'onda, secondo Bohm, agisce proprio come un'onda pilota che guida la particella corrispondente attraverso l'azione del potenziale quantistico. Il potenziale quantistico non opera come i campi elettromagnetici classici ma agisce in maniera istantanea (sincronica) e solo come pura "forma". Secondo Bohm, è proprio il potenziale quantistico a determinare la non-località dei processi quantistici. Questo potenziale informerebbe istantaneamente ogni particella. Secondo Bohm, dietro alla realtà fenomenica spazio-temporale esisterebbe, un livello a noi nascosto che guida la particella. In tale concezione non ci sarebbe più spazio per il cosiddetto ordine cartesiano. Non solo, anche i concetti spazio e tempo assumerebbero un ruolo diverso. Nel 1960 già Chew (Chew, 1960) sottolineava che non vi è alcuna necessità di spiegare i fenomeni quantistici sulla base di una struttura spazio-temporale (caratteristica della relatività speciale). Se infatti lo spazio-tempo fosse assunto (come Einstein riteneva) come elemento base, allora giustamente si richiederebbe alla località una validità assoluta. Così non accade, poichè come sappiamo le particelle manifestano delle correlazioni che sono non-locali. In tale contesto sono dunque da rivedere ed approfondire i concetti di spazio e di tempo. Bohm suggerì che per spiegare il carattere non locale dei fenomeni quantistici è necessario introdurre nuovi diversi livelli di realtà. Egli introdusse la distinzione tra foreground e background: ordine esplicito ed ordine implicito. Il risultato della misura quantistica è l'ordine esplicito (il mondo macroscopico). Quello che avviene in tale ordine rappresenta tuttavia una proiezione di un livello più fondamentale e nascosto: l'ordine implicito. Quest'ultimo è caratterizzato dalla non-località e dalla non-separabilità. Nelle sue stesse parole:

si è condotti ad una nuova concezione di totalità indivisa che nega l'idea classica della possibilità di analizzare il mondo in parti esistenti in maniera separata e indipendente: la realtà fondamentale è l'inseparabile connessione quantistica di tutto l'universo e le parti che hanno un comportamento relativamente indipendente sono solo forme particolari e contingenti dentro questo tutto.

Per chiudere questa sezione osserviamo, in ultimo, che oggi vi sono ricerche in Italia (Conte et al, 2008) dove si cerca di verificare se vi possano essere significative violazioni delle disuguaglianze di Bell nei fenomeni cosiddetti percettivi (i.e. formazione

di una immagine cosciente). Queste possibili violazioni indicherebbero la presenza di effetti non locali di tipo EPR. Queste possibili violazioni indicano che effetti quantistici su grande scala possono far parte della percezione cosciente.

1.0.14 Non-Località e Spazio-Tempo

Secondo Suarez, gli esperimenti in MQ, dopo il teorema di Bell, dimostrano che le correlazioni non-locali tra eventi separati spazialmente non possono essere spiegati per mezzo di influenze relativistiche, essendo queste ultime vincolate dalla costanza della velocità della luce. Questo significa che bisogna rinunciare alla visione secondo la quale i risultati delle misure quantistiche rivelino delle proprietà pre-esistenti al processo di misura. **Le particelle non hanno alcuna proprietà prima di lasciare la sorgente EPR.** Suarez insieme a Scarani (Suarez-Scarani, 1997), attraverso un esperimento chiamato "the before-before experiment" dimostrano che le correlazioni non locali non possono essere spiegate in termini di "prima" e "dopo". In pratica non esistono influenze non locali ordinate nel tempo. **Secondo Suarez, rinunciare al concetto di località non è sufficiente per essere coerente con gli esperimenti della MQ, si deve rinunciare anche al determinismo non-locale.** Bisogna cioè abbandonare l'opinione secondo la quale, un evento che si verifica per prima nel tempo è causa, e l'altro che avviene dopo nel tempo è effetto. **Le correlazioni non locali non possono essere spiegate attraverso una storia nello spazio-tempo, esse provengono al di fuori dello spazio-tempo.**

Secondo Suarez tali risultati sperimentali confermano l'interpretazione Standard della MQ. La teoria di Suarez-Scarani, fa riferimento alla necessità di introdurre delle "entità" esterne allo spazio-tempo. Su questo ultimo punto, il presente lavoro proporrà una propria tesi. L'esperimento su cui basano le loro deduzioni è il seguente: un fascio di luce, proveniente da una sorgente (denotata con S, figura 1.8), viene diviso da uno specchio semitrasparente (BS1) in due fasci (T ed R) che percorrono due diverse distanze; i due fasci, a loro volta, vengono fatti incidere su un secondo specchio semitrasparente (BS2), dal quale emergono, per sovrapposizione, altri due fasci che vengono rivelati da due detector D1 e D2 (figura 1.8). La MQ è in grado di predire quante volte scatta ciascun detector se si esegue l'esperimento per un tempo molto lungo, ma non può dire quale dei due detector sarà il prossimo a scattare (ved. Zeilinger il problema del singolo evento). Secondo Suarez-Scarani non è possibile trovare una spiegazione causale che ci indichi un ordine dei vari clicks dei detectors. Tale ordine ha una provenienza esterna allo spazio-tempo. Si

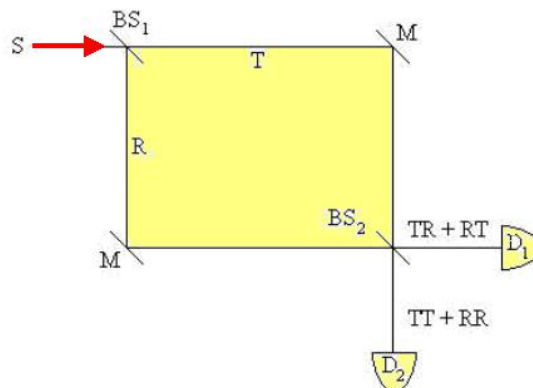


Figure 1.8: Suarez-Scarani Experiment.

rimanda a nuove "entità" esterne fuori dallo spaziotempo la sua spiegazione. Un terreno che dovranno affrontare, secondo Suarez, filosofi e forse teologi nei prossimi anni.

1.0.15 Entanglement degli stati temporali.

Bruker (Brukner et al, 2004) hanno teoricamente dimostrato (si attendono i riscontri sperimentali) che è possibile porre in uno stato entangled anche gli istanti di tempo. Effettuando misurazioni successive su uno stato quantistico, essi hanno trovato che una seconda misura ad un istante t_2 influenza (caso di fotoni polarizzati) il modo in cui lo stesso stato veniva polarizzato nell'istante precedente t_1 . In questo lavoro del 2004, essi hanno derivato le disuguaglianze di Bell temporali, partendo da due assunzioni quella di realismo (classico) e località temporale. Secondo gli autori la MQ viola tali disuguaglianze. La MQ sarebbe in contrasto con tali assunzioni. Vediamo di analizzare più in dettaglio tale risultato. Da un punto di vista formale e concettuale, lo spazio ed il tempo sono descritti in modo diverso nella MQ. Mentre il tempo è un parametro esterno alla dinamica (evoluzione del sistema) della MQ, le coordinate spaziali sono considerate osservabili in MQ. Inoltre il concetto di non-località, come è inteso nella letteratura scientifica, è una peculiarità degli stati composti entangled, questi stati non-separabili sono indipendenti dalla separazione spaziale dei suoi componenti. In questo caso parliamo di entanglement nello spazio. La località (spaziale) e il realismo come abbiamo visto impongono dei

precisi vincoli, le famose disuguaglianze di Bell, che la MQ viola, con tutte le sue importanti applicazioni tecnologiche. In analogia con le assunzioni da cui deriviamo le disuguaglianze di Bell (spaziali), Brukner et al. derivano le disuguaglianze di Bell temporali. L'analisi viene fatta su un singolo sistema sottoposto a più misure in diverse istanti di tempo. Le assunzioni da cui essi partono sono le seguenti:

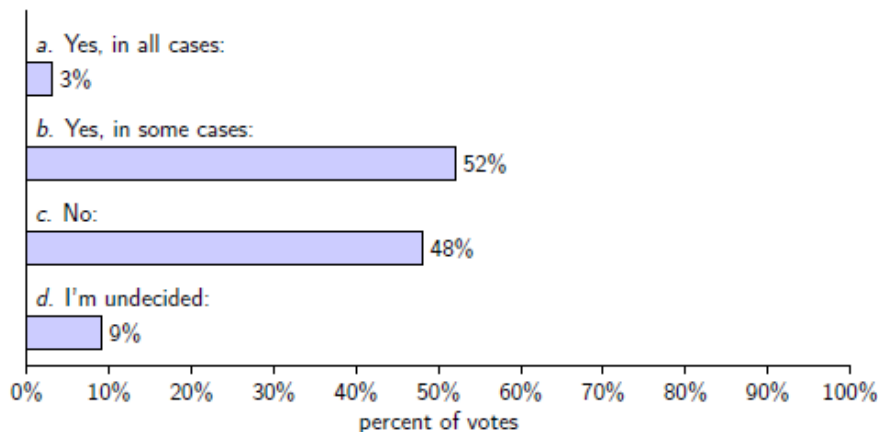
- 1) Realismo: i risultati di una misura sono determinati da proprietà nascoste che le particelle hanno già prima ed indipendente dalla loro osservazione;
- 2) Località nel tempo, i risultati di una misura eseguita al tempo t_2 sono indipendenti da qualsiasi misura eseguita (precedente o successivamente) al tempo t_1 .

Gli autori osservano che contrariamente alle correlazioni spaziali, dove i vincoli della relatività ristretta vengono invocati al fine di garantire la località nello spazio, per le assunzioni di località temporali questo principio non esiste. In altre parole, non abbiamo vincoli per garantire la località nel tempo. Questo lavoro ci proietta ad indagare nuove relazioni tra la struttura dello spazio e del tempo nel formalismo della MQ. Da tale violazione (località temporale), possiamo dedurre che, la struttura spaziale e quella temporale devono convogliare in una teoria più profonda, in cui i due devono essere trattati su un piano paritario (la Quantum Field Theory non è sufficiente per questo). Bisogna ancora indagare per capire come i due (tipi) entanglement spaziali e temporali se relazionano tra loro. Per concludere ci sembra di capire che sia la nozione stessa di causalità ad essere messa seriamente in discussione.

2.0 Fondamenti della Meccanica Quantistica: un sondaggio

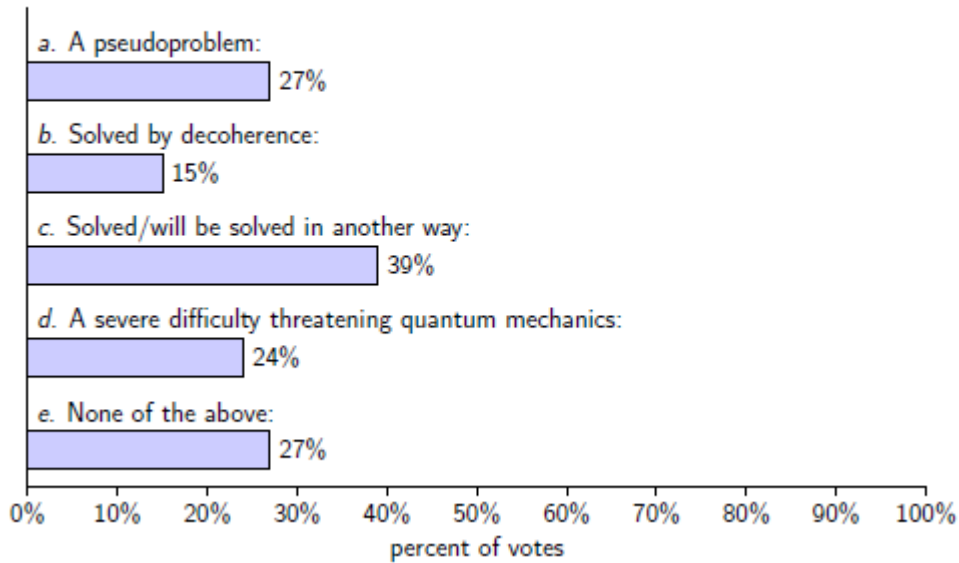
Decisamente interessante è questo sondaggio effettuato a margine di una conferenza sui fondamenti della meccanica quantistica da Schlosshauer, Kofler e Zeilinger nel 2013 (arXiv:1301.1069v1 [quant-ph] 6 gennaio 2013). Qui riportiamo uno stralcio significativo delle 16 domande che sono state poste ai fisici presenti. Da sottolineare che dopo l'uscita di questo paper è stato effettuato un nuovo sondaggio da altri autori (Norsen, Nelson arXiv:1306.4646v giugno 2013).

Question 2: Do you believe that physical objects have their properties well defined prior to and independent of measurement?



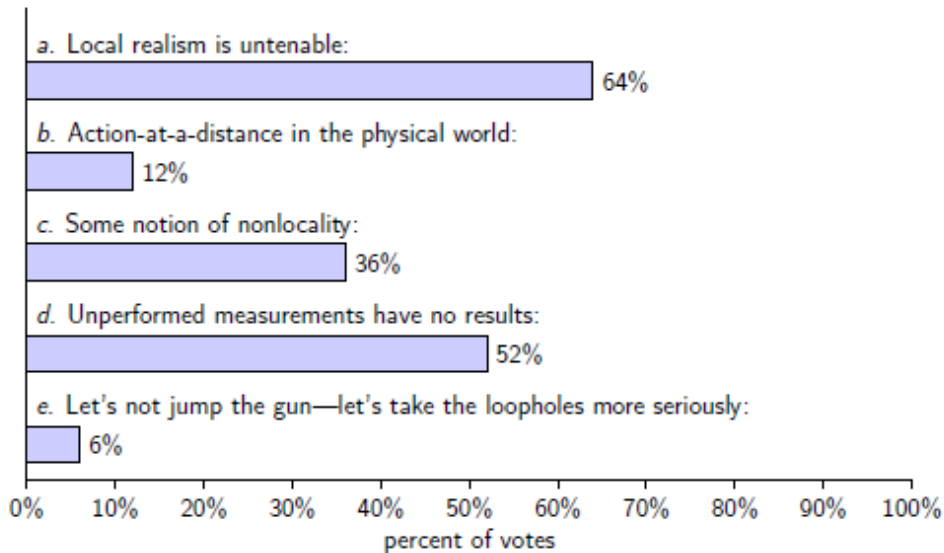
Questa domanda squisitamente di natura ontologica, ha ottenuto oltre il 50% di consenso, la maggioranza dei fisici pensa che gli oggetti in microfisica hanno una proprietà ben definita indipendentemente dal processo di misura. Sul processo di misura, la maggioranza pensa che sarà in futuro in qualche modo risolto o visto semplicemente come uno pseudo problema.

Question 5: The measurement problem



Sulla violazione delle disuguaglianze di Bell, emerge il dato che il realismo locale non può essere sostenuto .

Question 6: What is the message of the observed violations of Bell's inequalities?



Prima della domanda sulle interpretazioni della Meccanica Quantistica (a pag 51), presentiamo di seguito le interpretazioni più note (fonte: wikipedia)

Interpretazione	Deterministica	Forma d'onda reale	Storia singola	Variabili nascoste	Collasso	Ruolo dell'osservatore
Interpretazione di Copenaghen (Forma d'onda non reale)	No	No	Sì	No	NA	NA
Interpretazione statistica (Forma d'onda non reale)	No	No	Sì	Agnostica	No	Nessuno
Interpretazione di Copenaghen (Forma d'onda reale) Teoria oggettiva del collasso	No	Sì	Sì	No	Sì	Nessuno
Storie consistenti (Approccio decoerente)	Agnostica ¹	Agnostica ¹	No	No	No	Interpretazionale ²
Logica quantistica	Agnostica	Agnostica	Sì ³	No	No	Interpretazionale ²
Molti mondi (Approccio decoerente)	Sì	Sì	No	No	No	Nessuno
Interpretazione a molte menti	Sì	Sì	No	No	No	Interpretazionale ⁴
Interpretazione di de Broglie-Bohm (Approccio <i>onda-pilota</i>)	Sì	Sì ⁵	Sì ⁶	Sì	No	Nessuno
Interpretazione transazionale	No	Sì	Sì	No	Sì ⁷	Nessuno
Interpretazione stocastica	No	No	Sì	Sì	No	Nessuno
Meccanica quantistica relazionale	No	Sì	Agnostica ⁸	No	Sì ⁹	Nessuno
Misure incomplete	No	No ¹⁰	Sì	No	Sì ¹⁰	Interpretazionale ²

¹Se la funzione d'onda è reale, è analoga all'interpretazione a molti mondi. Se la funzione non è propriamente reale ma più che semplice informazione, è chiamata da Zurek *interpretazione esistenziale*.

²La meccanica quantistica è considerata come un modo per predire le osservazioni, o una teoria delle misure.

³La logica quantistica ha applicazione più limitata delle storie coerenti.

⁴Gli osservatori separano la funzione d'onda universale in insiemi ortogonali di esperienze.

⁵Sia le particelle che le funzioni d'onda *pilota* sono reali.

⁶Singole storie delle particelle, ma storie multiple delle onde.

⁷Il collasso del vettore di stato nell'interpretazione transazionale è interpretato come il completamento della transazione tra emittente e assorbente.

⁸Il confronto delle storie tra i sistemi non ha un significato ben definito in quest'interpretazione.

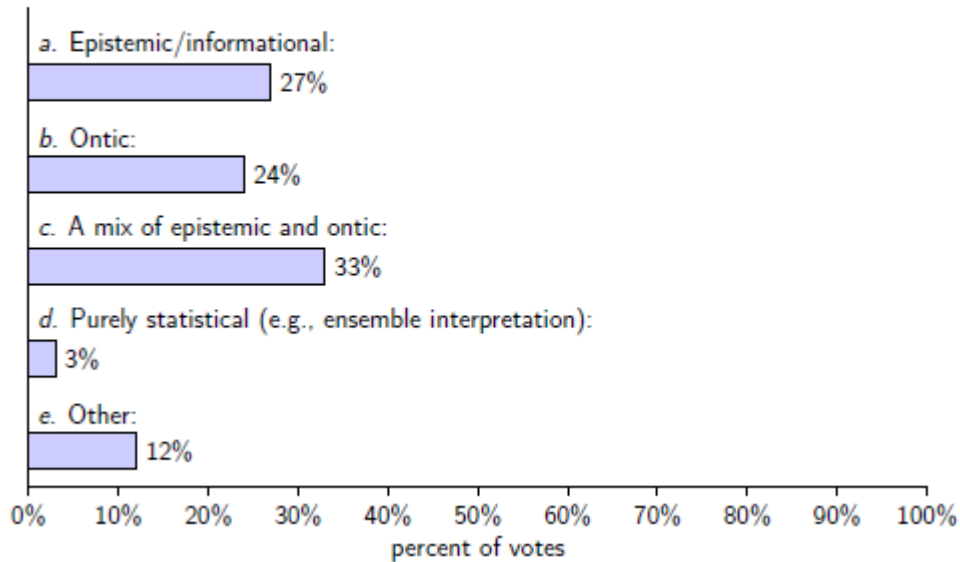
⁹Ogni interazione fisica è considerata come un evento di collasso relativo ai sistemi coinvolti, non solo a osservatori macroscopici o coscienti.

¹⁰La natura e il collasso della funzione d'onda sono derivati, non assiomatici.

Ogni interpretazione ha più varianti e, ad esempio, è difficile avere una precisa definizione dell'interpretazione di Copenaghen. Nella tabella, ne sono mostrate due varianti: una che tratta la forma d'onda come uno strumento per calcolare le probabilità, l'altro la tratta come un *elemento fisico di realtà*.

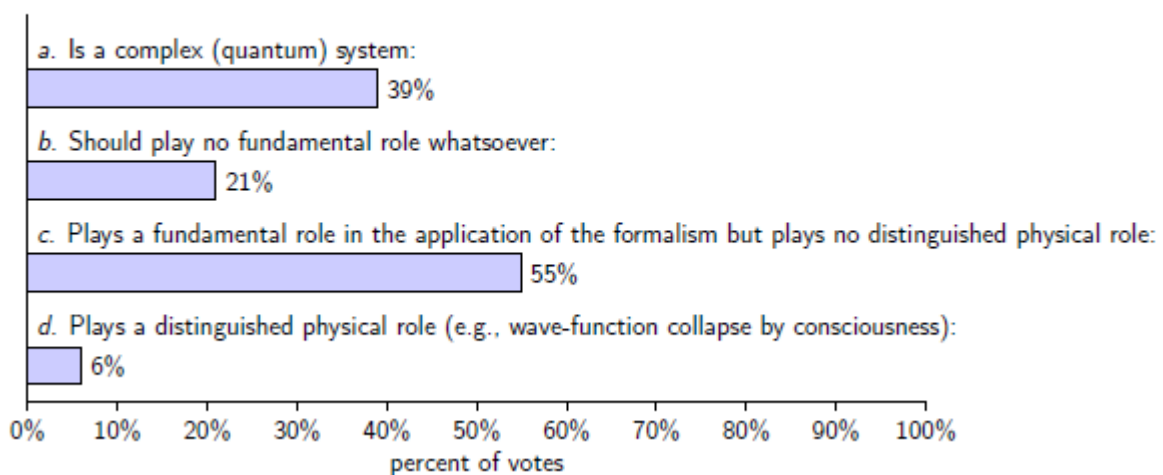
Questo nuovo quesito sulla interpretazione dello stato quantistico evidenzia il fatto che la maggior parte degli intervistati ritiene che la sua natura sia di tipo epistemico-informazionale.

Question 9: What interpretation of quantum states do you prefer?

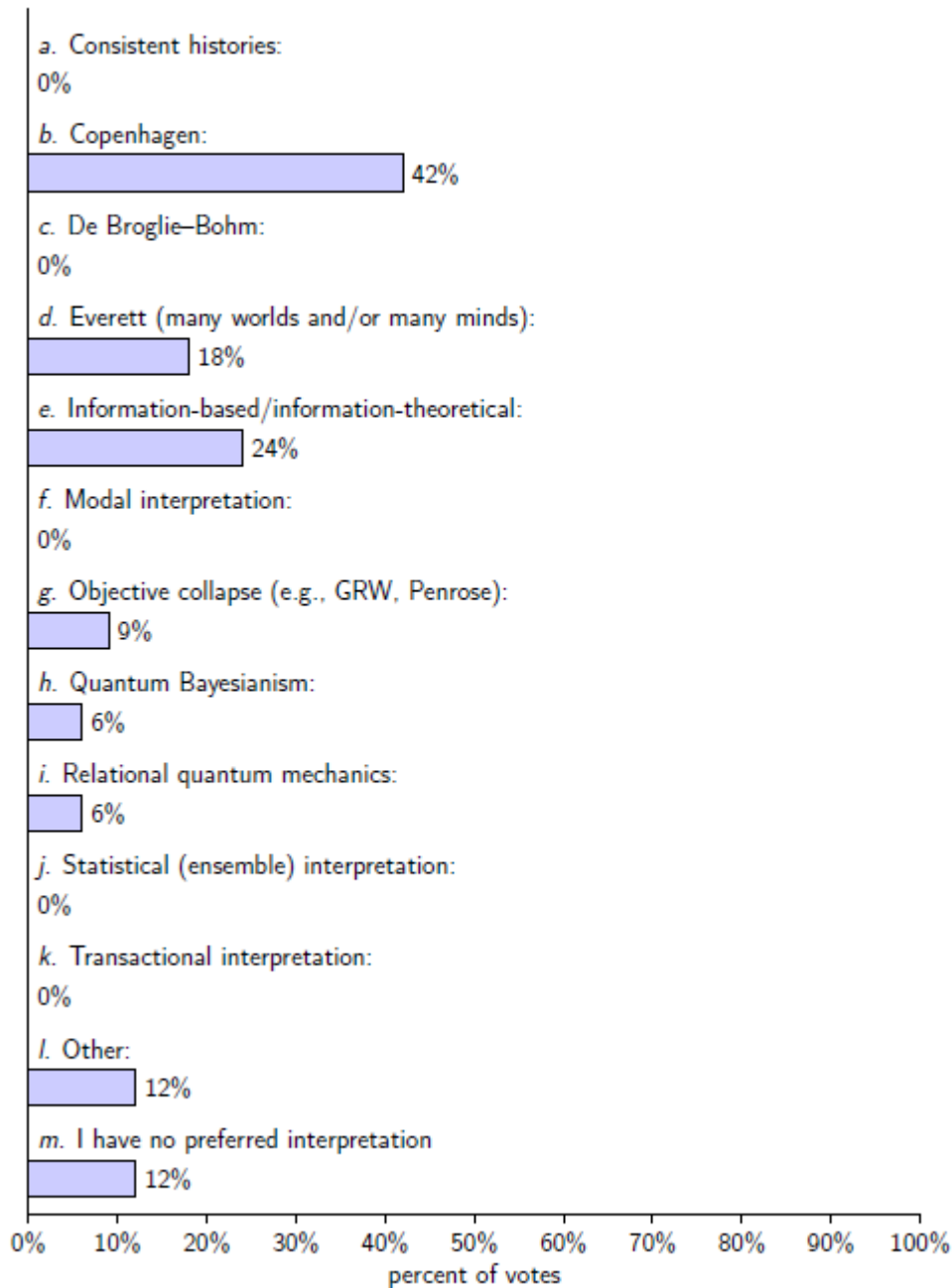


Le successive domande riguardano il ruolo dell'osservatore, il tipo di interpretazione preferita, gli eventuali pregiudizi filosofici nella scelta dell'interpretazione ed infine sulla sovrapposizione eventuale degli stati fisici macroscopici.

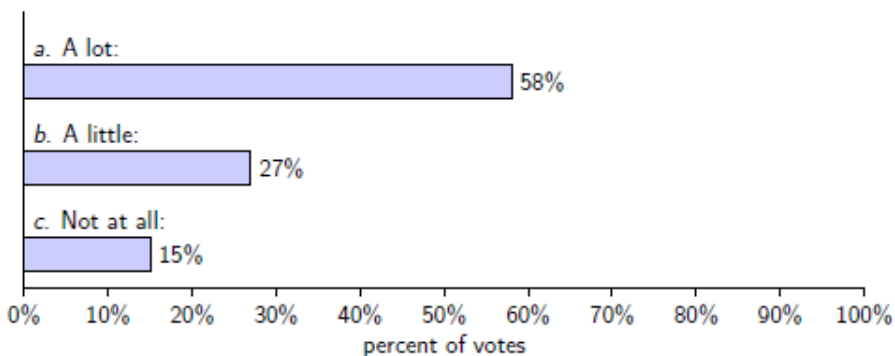
Question 10: The observer



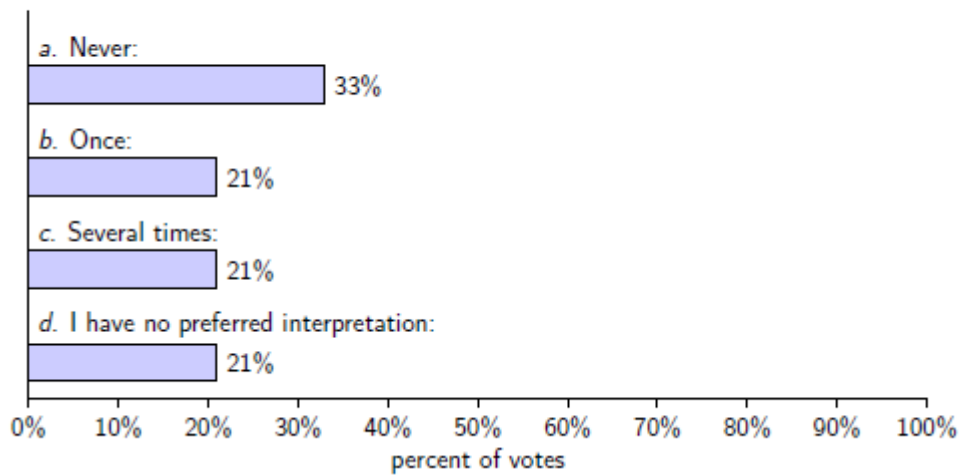
Question 12: What is your favorite interpretation of quantum mechanics?



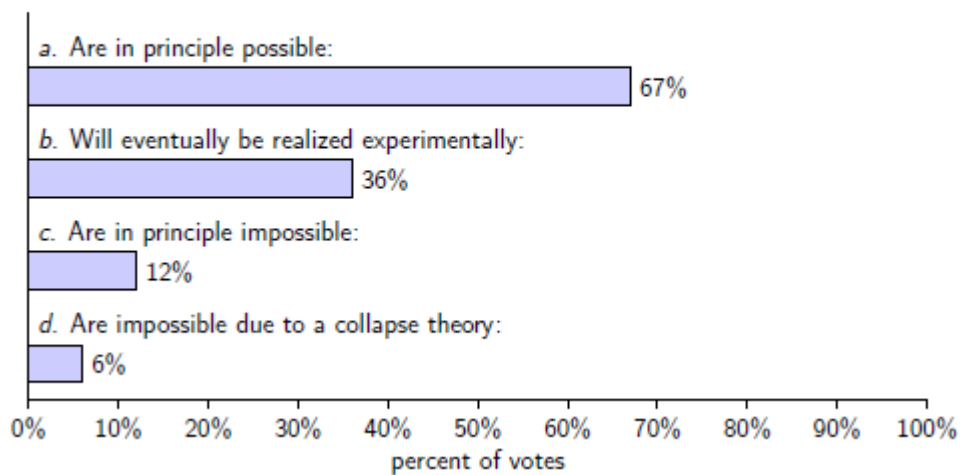
Question 14: How much is the choice of interpretation a matter of personal philosophical prejudice?



Question 13: How often have you switched to a different interpretation?



Question 15: Superpositions of macroscopically distinct states



Dal sondaggio possiamo dedurre che i fisici sono molto fiduciosi nella risoluzione dei paradossi che ancor oggi rendono problematica la piena comprensione della MQ.

3.0 Teoria Quantistica dell'informazione e la fenomenologia di Husserl: un approccio (T. Bilban)

In questo capitolo si darà un breve cenno ad un lavoro recente portato avanti da Tina Bilban, dell'Università di Vienna. (rif: Quanta DOI: 10.12743/quanta.v3i1.24, August 2014 | Volume 3 | Issue 1 | Page 32) editors: George Svetlichny, Stig Stenholm & Avshalom C. Elitzur).

Partendo da una prima doverosa distinzione negli approcci epistemici ed ontici in meccanica quantistica (schematizzato nella seguente tabella), Tina Bilban fissa nella tabella che si trova nella pagina successiva i punti chiavi per una della interpretazione informazionale della MQ.

- **Epistemic**

- relating to knowledge
- Bohr; Copenhagen interpretation, quantum information theories, etc.
- Experiments and their most direct interpretation

- **Ontic**

- relating to (real) existence
- Einstein; hidden variables theories, many worlds interpretation, etc.
- Common sense in classical world

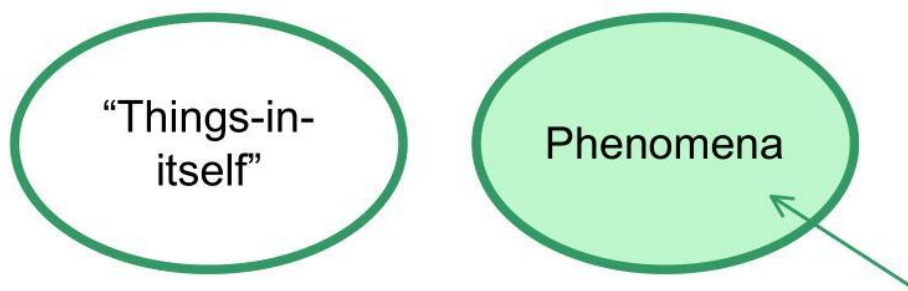
- But: the complete interpretation should unite both of them

I punti chiave nella interpretazione informazionale:

- Epistemic: Quantum physics is science of knowledge.
- Information equals reality.
- Information cannot be endlessly divisible; N systems $\rightarrow N$ bits of information.
- Objectivity of outer world: on the basis of invariants and the inter-subjective agreement.
- But: no direct connection between the information and “that something this information is about.”

Brukner Č., Zeilinger A.: *Information and fundamental elements of the structure of quantum theory*, 2003, [quant-ph/0212084v1](#); *Operationally invariant information in quantum measurements*, 2000, [quant-ph/0005084v1](#)

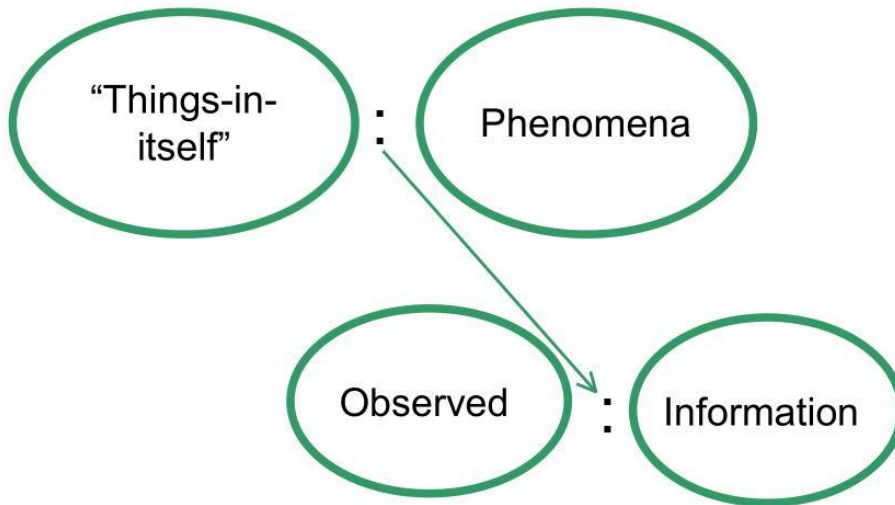
Physics and Kant's system:



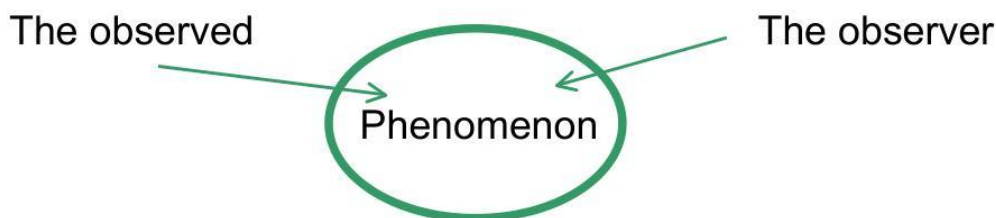
The place of physical objects is solely on the side of phenomena

Da queste premesse l'obbiettivo è quello di associare l'interpretazione informazionale alla fenomenologia di Husserl, superando il noumeno di Kant, non idoneo secondo la Bilban a supportare i riscontri sperimentali che si ottengono con la teoria dell'informazione quantistica. Tale **switch filosofico** è indicato nelle seguenti figure: l'informazione è il fenomeno, ed è tutto quello che c'è, quindi la realtà. Quindi una sorta di fenomenologia informazionale della MQ.

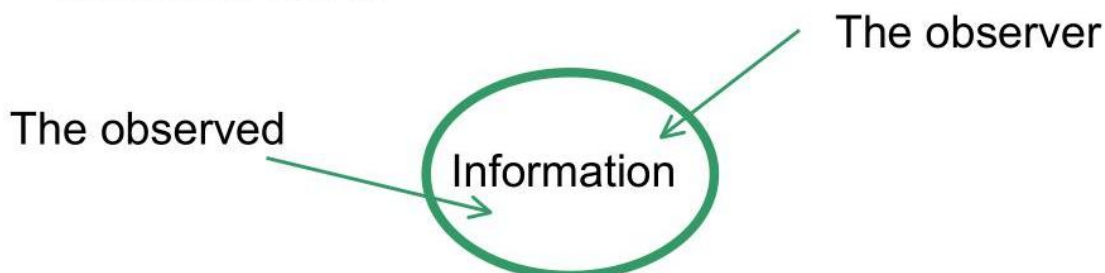
The transmission of Kant's method to QM:



- Kant → the problem of the lack of permeability between the “thing-in-itself” and the phenomenon.
- Husserl → mainly epistemic but maintains the permeability
- Husserl’s phenomenon: the object as has been given to me by itself, in the way to have a meaning (exactly) to me.



- **The information** as the direct answer to the question about observed. The basis for the information is **the observed itself**.



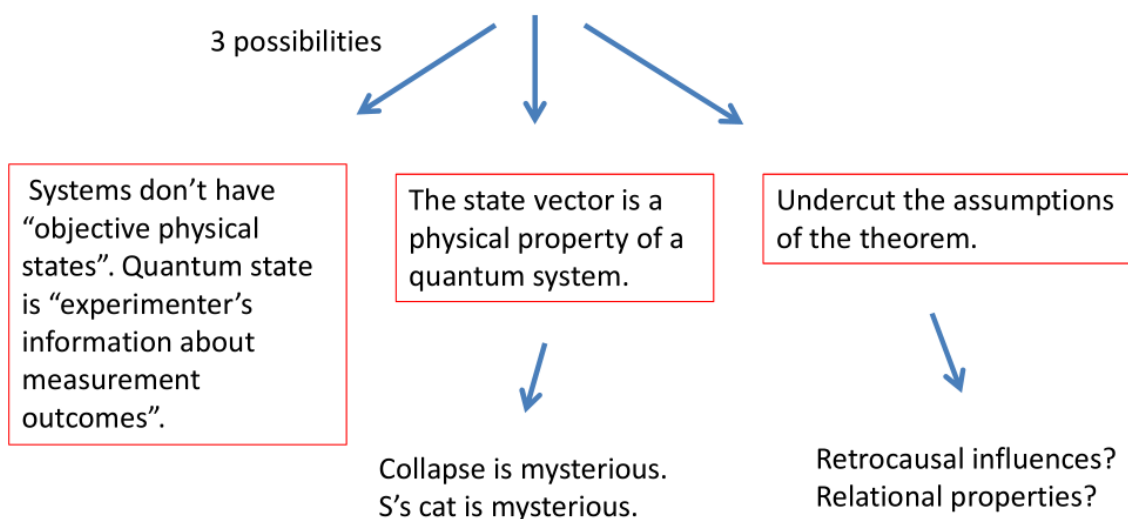
- **The information and the observed are in two ways connected to the observer:**

1. To the observer as observer per se, as to the one for whom they have a meaning (the answer to “Why information?”/ “Why quantum?”)

2. To the observer as to the part of an environment, as to the one, who, by trying to get any information, already (necessarily) has an influence on the observed and on the information about it.

Osservazioni: seppur molto interessante tale passaggio (Kant-Husserl), crediamo che essa cristallizzi eccessivamente ed in maniera definitiva l'interpretazione della meccanica quantistica. Come si accennava nell'introduzione della tesi (vedere capitolo 0) ad esempio, il teorema PBR ci indica una immagine del mondo fisico esattamente opposta a quella appena menzionata, legata proprio al realismo dello stato quantistico. Secondo Jonathan Barrett, uno dei tre autori del PBR, per lo stato quantistico si prospettano soltanto le tre possibilità: riportate nella figura in basso.

- A quantum state is not “experimenter’s information about the objective physical state of a system”.



6.0 Le interpretazioni della Meccanica Quantistica: un breve saggio critico.

Interpretations of Quantum Mechanics: a critical survey

Michele Caponigro

University of Bergamo, Italy

Abstract

This brief survey analyzes the epistemological implications about the role of observer in the interpretations of Quantum Mechanics. As we know, the goal of most interpretations of quantum mechanics is to avoid the apparent intrusion of the observer into the measurement process. In the same time, there are implicit and hidden assumptions about his role. In fact, most interpretations taking as ontic level one of these fundamental concepts as information, physical law and matter bring us to new problematical questions. We think, that no interpretation of the quantum theory can avoid this intrusion until we do not clarify the nature of observer.

I. QUANTUM THEORY: BRIEF OVERVIEW

Can we explain what the world is through a fundamental physical theory? This question corresponds to the historic disagreement among scientists and epistemologists concerning how to regard physical theories to which people commonly refer as the realist/antirealist debate. The position of the antirealist is the one according to which we should not believe that physics reveals to us something about reality but rather we should be satisfied with physics to be, for example, just empirically adequate. In contrast, the realist is strongly inclined to say not only that physics tells us about reality, but also that it is our only way to actually do metaphysics. In few words, the question is: is there an ontology? We are interested to show through a logical pathway the existence of a possible ontology in Nature.

The abstract mathematical structure of the Lorentz transformations was deduced through simple physical principles. Thanks to the existence of these physical principles we do not have a significant debate on the interpretation of the theory of special relativity. The formulation of Quantum Mechanics (QM), on the contrary, is based on a number of rather abstract axioms without a clear motivation for their existence. The problem about quantum mechanics does not lie on its effectivity, but on its interpretation. Any attempt to interpret quantum mechanics tries to provide a definite meaning to issues such as realism, completeness, local realism and determinism. Despite its success, the absence of elementary physical principles has determined a broad discussion about the interpretation of the theory. For this reason, and not only, Bell called the ordinary QM with the abbreviation FAPP (for all practical purposes). The standard interpretation of quantum mechanics, attempts, as much as possible, to give an ontological model of physical systems using the concept of the quantum state. However, the interpretation does not fully succeed in giving such a model, for this reason one solution to this problem is to abandon any attempt at an ontological model and to put quantum mechanics on a purely epistemological footing (the context of informational approaches). We believe that a possible ontological model arises by the application of formalism of quantum mechanics to the entire universe (including observers).

We will start next sections presenting, first, the basic formalism and postulates of QM, and then overviewing some relevant historical interpretations of QM.

II. POSTULATES OF QUANTUM MECHANICS.

Quantum mechanics is a mathematical model of the physical world that describes the behavior of quantum systems. A physical model is characterized by how it represents *physical states, observables, measurements, and dynamics* of the system under consideration. A *quantum system* is a number of physical degrees of freedom in a physical object or set of objects which is to be described quantum mechanically. The *physical state* (standard view) of a system is a mathematical object which represents the knowledge we have about the system, and from which all measurable physical quantities relating to the system can be calculated. A special class of quantum states are called the *pure states*. The dimension of \mathcal{H} is a property of the degrees of freedom being described. For example, the state of a spin-half particle lives in a two-dimensional Hilbert space, such systems is called a quantum bit or *qubit*, and its basis vectors are labelled $|0\rangle$ and $|1\rangle$. Pure states are

sometimes called *state vectors*. We will see that more general states cannot be described by a simple state vector, but will require a *density matrix*. The traditional way in which measurements on quantum systems are described is in terms of *observables*. Observables are Hermitian operators which correspond to physically measurable quantities such as energy, momentum, spin, etc. Any Hermitian operator has a complete set of real eigenvalues corresponding to orthogonal eigenspaces.

A. Basic formalism and postulates of quantum mechanics.

A quantum description of a physical model is based on the following concepts:

A *state* is a complete description of a physical system. Quantum mechanics associates a ray in *Hilbert space* to the physical state of a system.

- Hilbert space is a complex linear vector space. In Dirac's ket-bra notation states are denoted by *ket vectors* $|\psi\rangle$ in Hilbert space.
- Corresponding to a ket vector $|\psi\rangle$ there is another kind of state vector called *bra vector*, which is denoted by $\langle\psi|$. The *inner product* of a bra $\langle\psi|$ and ket $|\phi\rangle$ is defined as follows:

$$\begin{aligned}\langle\psi|\{|\phi_1\rangle + |\phi_2\rangle\} &= \langle\psi|\phi_1\rangle + \langle\psi|\phi_2\rangle \\ \langle\psi|\{c|\phi_1\rangle\} &= c\langle\psi|\phi_1\rangle\end{aligned}\tag{1}$$

for any $c \in \mathbf{C}$, the set of complex numbers. There is a one-to-one correspondence between the bras and the kets. Furthermore

$$\begin{aligned}\langle\psi|\phi\rangle &= \langle\phi|\psi\rangle^* \\ \langle\psi|\psi\rangle &> 0 \text{ for } |\psi\rangle \neq 0\end{aligned}\tag{2}$$

- The state vectors in Hilbert space are normalized which means that the inner product of a state vector with itself gives unity, i.e.,

$$\langle\psi|\psi\rangle = 1\tag{3}$$

- Operations can be performed on a ket $|\psi\rangle$ and transform it to another ket $|\chi\rangle$. There are operations on kets which are called *linear operators*, which have the following properties. For a linear operator \hat{a} we have

$$\begin{aligned}\hat{a} \{|\psi\rangle + |\chi\rangle\} &= \hat{a} |\psi\rangle + \hat{a} |\chi\rangle \\ \hat{a} \{c |\psi\rangle\} &= c \hat{a} |\psi\rangle\end{aligned}\tag{4}$$

for any $c \in \mathbf{C}$.

- The sum and product of two linear operators \hat{a} and $\hat{\beta}$ are defined as:

$$\begin{aligned}\{\hat{a} + \hat{\beta}\} |\psi\rangle &= \hat{a} |\psi\rangle + \hat{\beta} |\psi\rangle \\ \{\hat{a}\hat{\beta}\} |\psi\rangle &= \hat{a} \{\hat{\beta} |\psi\rangle\}\end{aligned}\tag{5}$$

Generally speaking $\hat{a}\hat{\beta}$ is not necessarily equal to $\hat{\beta}\hat{a}$, i.e. $[\hat{a}, \hat{\beta}] \neq 0$

- The *adjoint* \hat{a}^\dagger of an operator \hat{a} is defined by the requirement:

$$\langle \psi | \hat{a} \chi \rangle = \langle \hat{a}^\dagger \psi | \chi \rangle\tag{6}$$

for all kets $|\psi\rangle, |\chi\rangle$ in the Hilbert space.

- An operator \hat{a} is said to be *self-adjoint* or *Hermitian* if:

$$\hat{a}^\dagger = \hat{a}\tag{7}$$

Hermitian operators are the counterparts of real numbers in operators. In quantum mechanics, the dynamical variables of physical systems are represented by Hermitian operators. These operators are usually called *observables*.

Postulates of quantum mechanics:

Quantum theory is based on the following postulates:

Postulate 1: To any physical isolated system is associated a complex vector space, where is define an inner product (Hilbert space) which is called state space of the system. The system is completely described by a state vector.

This postulate give us the universal mathematical model of any physical system: a vector Hilbert space on the complex numbers[1].

Postulate 2: The evolution of a closed quantum system is described by an unitary transformation. That is, the state, $|\psi(t)\rangle$ of the system at time t is related to the state $|\psi(t_0)\rangle$ a time t_0 by a unitary operator U which depends only on the time t and t_0 : $|\psi(t)\rangle = U |\psi(t_0)\rangle$.

The second postulate describes the temporal evolution of a closed physical system.

Postulate 3: *This postulate is about the "quantum measurement:*

- Mutually exclusive measurement outcomes correspond to orthogonal *projection operators* $\{\hat{P}_0, \hat{P}_1, \dots\}$ and the probability of a particular outcome i is $\langle \psi | \hat{P}_i | \psi \rangle$. If the outcome i is attained the (normalized) quantum state after the measurement becomes:

$$\frac{\hat{P}_i |\psi\rangle}{\sqrt{\langle \psi | \hat{P}_i | \psi \rangle}}. \quad (8)$$

Measurement made with orthogonal projection operators $\{\hat{P}_0, \hat{P}_1, \dots\}$ is called *projective measurement*.

Postulate 4: The state space of a composite physical system is the tensor product of the state spaces of the component physical systems. Moreover, if we have a quantum system $H_i, i = 1, \dots, n$ and system H_i is prepared in the state $|\psi_i\rangle$, then the joint state of the total system is: $|\psi_1\rangle \otimes |\psi_2\rangle \otimes \dots \otimes |\psi_n\rangle = H_1 \otimes \dots \otimes H_n$.

Last postulate formalizes the interaction of many physical systems with the combination of different Hilbert spaces coming to a unique Hilbert space.

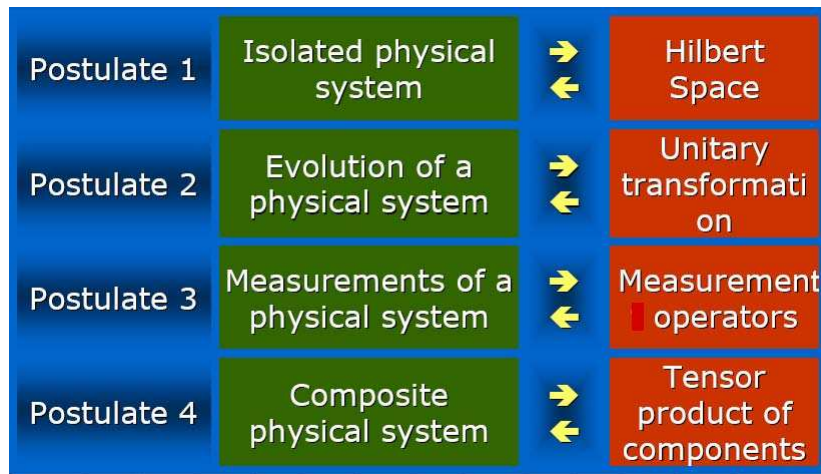


FIG. 1: Summary of Postulates.

B. Quantum Entanglement, Bell Inequality

The phenomenon of quantum entanglement is widely considered to be central to the field of quantum computation and information. This phenomenon can be traced back to Einstein, Podolsky and Rosen (EPR)'s famous paper [2] of 1935. EPR argued that quantum mechanical description of *physical reality* can not be considered *complete* because of its rather strange predictions about two particles that once have interacted but now are separate from one another and do not interact. Quantum mechanics predicts that the particles can be *entangled* even after separation. Entangled particles have correlated properties and these correlations are at the heart of the EPR paradox. Mathematically, the entanglement is described as follows. For a system that can be divided into two subsystems quantum mechanics associates two Hilbert spaces \mathcal{H}_A and \mathcal{H}_B to the subsystems. Assume that $|i\rangle_A$ and $|j\rangle_B$ (where $i, j = 1, 2, \dots$) are two complete orthonormal basis sets for the Hilbert spaces \mathcal{H}_A and \mathcal{H}_B , respectively. The tensor product $\mathcal{H}_A \otimes \mathcal{H}_B$ is another Hilbert space that quantum mechanics associates with the system consisting of the two subsystems. The tensor product states $|i\rangle_A \otimes |j\rangle_B$ (often written as $|i\rangle_A |j\rangle_B$) span the space $\mathcal{H}_A \otimes \mathcal{H}_B$.

Any state $|\psi\rangle_{AB}$ of the composite system made of the two subsystems is a linear combination of the product basis states $|i\rangle_A |j\rangle_B$ i.e.:

$$|\psi\rangle_{AB} = \sum_{i,j} c_{ij} |i\rangle_A |j\rangle_B \quad (9)$$

where $c_{ij} \in \mathbf{C}$. The normalization condition of the state $|\psi\rangle_{AB}$ is $\sum_{i,j} |c_{ij}|^2 = 1$. The state $|\psi\rangle_{AB}$ is called *direct product (or separable) state* if it is possible to factor it into two normalized states from the Hilbert spaces \mathcal{H}_A and \mathcal{H}_B . Assume that $|\psi^{(A)}\rangle_A = \sum_i c_i^{(A)} |i\rangle_A$

and $|\psi^{(B)}\rangle_B = \sum_j c_j^{(B)} |j\rangle_B$ are the two normalized states from \mathcal{H}_A and \mathcal{H}_B , respectively.

The state $|\psi\rangle_{AB}$ is a direct product state when:

$$|\psi\rangle_{AB} = |\psi^{(A)}\rangle_A |\psi^{(B)}\rangle_B = \left(\sum_i c_i^{(A)} |i\rangle_A \right) \left(\sum_j c_j^{(B)} |j\rangle_B \right) \quad (10)$$

Now a state in $\mathcal{H}_A \otimes \mathcal{H}_B$ is called *entangled* if it is not a direct product state. In other words, entanglement describes the situation when the state of 'whole' cannot be written in terms of the states of its constituent 'parts'. Generally, it is a very hard problem to decide whether a quantum state is entangled or not. Fortunately, there are operational criteria, relying on measurements of correlations, with a possible outcome from which one can conclude that the state is entangled: the Bell inequality[3]. A Bell inequality is satisfied by all states which are not entangled. Thus, if a violation of a Bell inequality is observed the state which describes the results is entangled. Interestingly, Bell inequalities were first introduced in a context of **foundations of quantum mechanics**. Quantum mechanics gives predictions in form of probabilities. Already some of the fathers of the theory were puzzled with the question whether there can exist a deterministic structure beyond quantum mechanics which recovers quantum statistics as averages over "hidden variables". In this way, it was hoped, one could get a classical-like description which would solve the problems with the interpretations of quantum mechanics. In his famous impossibility proof Bell made precise assumptions about the form of a possible underlying hidden variable structure. Spatially separated systems and laboratories were assumed to be independent of one another [3]. He derived an inequality which must be satisfied by all such (local realistic) structures. Next, he presented example of quantum predictions which violate it. In this way the famous Einstein-Podolsky-Rosen (EPR) paradox [2] was solved. Bell proved that EPR elements of reality cannot be used to describe quantum mechanical systems. The noncommutativity of quantum theory precludes simultaneous deterministic predictions of measurement outcomes of complementary observables. For EPR this indicated that "the wave function does not provide a complete description of "physical reality". They expected the complete theory to predict outcomes of all possible measurements, prior to and independent of the measurement (realism), and not to allow "spooky action at a distance" (locality). A more general version of Bell's theorem for two qubits (two-level systems) was given by Clauser, Horne, Shimony, and Holt (CHSH), and extended by Clauser and Horne (CH) [4, 5]. The important feature of the CHSH and CH inequalities, which hold for *all* local realistic theories, is that they can not only be compared with ideal quantum predictions, but also with experimental results. The three or more qubit versions of Bell's theorem were presented by Green-

berger, Horne, and Zeilinger (GHZ)[6, 7]. Starting from the assumptions of realism and locality, in 1964 Bell [8] derived an inequality which was shown [9] later to be violated by the quantum mechanical predictions for entangled states of a composite system. As we have seen, Bell's theorem [10] is the collective name for a family of results, all showing the impossibility of local realistic interpretation of quantum mechanics. Later work [11] has produced many different types of Bell-type inequalities. The Bell inequality is expressed as follow: let $A(a)$ and $A(a')$ be the two observables for observer A in the an EPR experiment. Similarly, let $B(b)$ and $B(b')$ be the two observables for the observer B . In general, the observables $A(a)$ and $A(a')$ are incompatible and cannot be measured at the same time, and the same holds for $B(b)$ and $B(b')$.

It is assumed that the two particles that reach observers A and B in EPR experiments possess hidden variables which fix the outcome of all possible measurements. These hidden variables are collectively represented by λ , assumed to belong to a set Λ with a probability density $\rho(\lambda)$. The normalization implies:

$$\int_{\Lambda} \rho(\lambda) d\lambda = 1. \quad (11)$$

Because a given λ makes the four dichotomic observables assume definite values, we can write:

$$A(a, \lambda) = \pm 1; \quad A(a', \lambda) = \pm 1; \quad B(b, \lambda) = \pm 1; \quad B(b', \lambda) = \pm 1 \quad (12)$$

That is, the physical reality is marked by the variable λ . Now introduce a *correlation function* $C(a, b)$ between two dichotomic observables a and b , defined by:

$$C(a, b) = \int_{\Lambda} A(a, \lambda) B(b, \lambda) \rho(\lambda) d\lambda \quad (13)$$

For a linear combination of four correlation functions, define *Bell's measurable quantity* Δ as:

$$\Delta = C(a, b) + C(a', b') + C(a', b) - C(a, b') \quad (14)$$

Only four correlation functions, out of a total of sixteen, enter into the definition of Δ . We can write:

$$\begin{aligned} & |C(a, b) + C(a', b') + C(a', b) - C(a, b')| \\ & \leq \int_{\Lambda} \{ |A(a, \lambda)| |B(b, \lambda) - B(b', \lambda)| + |A(a', \lambda)| |B(b, \lambda) + B(b', \lambda)| \} \rho(\lambda) d\lambda. \end{aligned} \quad (15)$$

Since:

$$|A(a, \lambda)| = |A(a', \lambda)| = 1 \quad (16)$$

we have:

$$\begin{aligned} & |C(a, b) + C(a', b') + C(a', b) - C(a, b')| \\ & \leq \int_{\Lambda} \{ |B(b, \lambda) - B(b', \lambda)| + |B(b, \lambda) + B(b', \lambda)| \} \rho(\lambda) d\lambda \end{aligned} \quad (17)$$

Also $|B(b, \lambda)| = |B(b', \lambda)| = 1$, so that:

$$|B(b, \lambda) - B(b', \lambda)| + |B(b, \lambda) + B(b', \lambda)| = 2 \quad (18)$$

and the inequality (17) reduces to:

$$|C(a, b) + C(a', b') + C(a', b) - C(a, b')| \leq 2 \quad (19)$$

which is called CHSH form [4] of Bell's inequality.

III. STANDARD INTERPRETATION: SOME PROBLEMS

Historically, the understanding of the mathematical structure of QM went through various stages. Very briefly, the Copenhagen interpretation assumes two processes influencing the wavefunction, namely, i) its unitary evolution according to the Schrödinger equation, and ii) the process of measurement.

In other words, quantum mechanics is problematic in the sense that it is incomplete and needs the notion of a classical device measuring quantum observables as an important ingredient of the theory. Due to this, one accepts that there exist two worlds: the classical one and the quantum one. In the classical world, the measurements of classical observables are produced by classical devices. In the framework of standard theory, the measurements of quantum observables are produced by classical devices, too. Due to this, the theory of quantum measurements is considered as something very specifically different from classical measurements.

As it is well known, the Copenhagen interpretation postulates that every measurement induces a discontinuous break in the unitary time evolution of the state through the collapse of the total wave function, the nature of the collapse is not at all explained, and thus the definition of measurement remains unclear. Bohr then followed the tenets of positivism, that implies that only measurable questions should be discussed by scientists. Some physicists argue that an interpretation is nothing more than a formal equivalence between a given set of rules for processing experimental data, thus suggesting that the whole exercise of interpretation is unnecessary. It seems that a general consensus has not yet been reached. Roger Penrose [12], remarks that while the theory agrees incredibly well with experiment and while it is of profound mathematical beauty, it "makes absolute no sense". The point of view of most physicist is rather pragmatic: it is a physical theory with a definite mathematical background which finds excellent agreement with experiment. So, from a technical point of view, quantum mechanics (QM) is a set of mathematically formulated prescriptions that deserves for calculations of probabilities of different measurement outcomes. The calculated probabilities agree with experiments. Pragmatic applications of the physics are interested only in these pragmatic aspects of QM, which is fine. Nevertheless, many physicists are not only interested in the pragmatic aspects, but also want to understand nature on a deeper conceptual level. Besides, a deeper understanding of nature on the conceptual level **may** also induce a new development of pragmatic aspects. Thus, the conceptual understanding of physical phenomena is also an important aspect of physics and cannot be viewed as simply epistemological problems. The standard interpretation of QM, tells us nothing about the underlying physics of the system. The state vector represents our knowledge of the system, not its

physics. The main support of the standard interpretation is that measurement process is an interaction between *system and apparatus*. This interpretation divides the world in apparatus and system but the theory tell us nothing about these two "abstracts" concepts. More in details, the position regarding the measurement theory can be summarizing as following:

- Measurement is an interaction between system and apparatus.
- Measurements do not uncover some preexisting physical property of a system. There is no objective property being measured.
- The record or result of a measurement is the only objective property.
- Quantum mechanics is nothing more than a set of rules to compute the outcome of physical tests to which a system may be subjected.

This position solve most pragmatic problems but does not solve the measurement problem, how and why occurs the collapse of the wave function during the measurement process. The famous Schrödinger's cat paradox is exactly this[14]. Why the measurement apparatus behave classically? After all it is constituted of particles that are governed by QM rules. Where is the limit between quantum and classical world? The following considerations puts in evidence the problem. Consider a two-state microsystem whose eigenfunctions are labelled by ψ_+ and ψ_- . Furthermore, there is a macrosystem apparatus ϕ_0 , with eigenfunctions ϕ_+ and ϕ_- corresponding to an output for the microsystem having been in the ψ_+ and ψ_- states, respectively. Since prior to a measurement we do not know the state of the microsystem, it is a superposition state given by

$$\psi_0 = \alpha\psi_+ + \beta\psi_-, \quad |\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1. \quad (20)$$

Now, according to the linearity of Schrödinger's equation, the final state obtained after the interaction of the two systems is

$$\Psi_0 = (\alpha\psi_+ + \beta\psi_-)\phi_0 \longrightarrow \Psi_{out} = \alpha\psi_+\phi_+ + \beta\psi_-\phi_- \quad (21)$$

where it is assumed that initially the two systems are far apart and do not interact. The state on the far right side of the last equation does not correspond to a definite state for a macrosystem apparatus. In fact, this result would say that the macroscopic apparatus is itself in a superposition of both plus and minus states. Nobody has observed such macroscopic superpositions. This is the measurement problem, since the theory predicts results that are in clear conflict with all observations. It is **at this point** that the standard program to resolve this problem *invokes* the reduction of wave packet upon observation, that is,

$$\alpha\psi_+\phi_+ + \beta\psi_-\phi_- \longrightarrow \begin{cases} \psi_+\phi_+, & P_+ = |\alpha|^2; \\ \psi_-\phi_-, & P_- = |\beta|^2. \end{cases} \quad (22)$$

Various attempts (interpretations) to find reasonable explanation for this reduction are at the heart of the measurement problem.

Related to this problem, Schrödinger introduced his famous cat in the very same article where entanglement was described [14]. Schrödinger devised his cat experiment in an attempt to illustrate the incompleteness of the theory of quantum mechanics when going from subatomic to macroscopic systems. Schrödinger's legendary cat was doomed to be killed by an automatic device triggered by the decay of a radioactive atom. He had had trouble with his cat. He thought that it could be both dead and alive. A strange superposition of

$$|\Psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|\text{excited atom, alive cat}\rangle + |\text{non - excited atom, dead cat}\rangle) \quad (23)$$

was conceived. But the wavefunction (23) showed no such commitment, superposing the probabilities. Either the wavefunction (23), as given by the Schrödinger equation, was not everything, or it was not right. The Schrödinger's cat puzzle deals with one of the most revolutionary elements of quantum mechanics, namely, the *superposition principle*, mathematically founded in the linearity of the Hilbert state space. If $|0\rangle$ and $|1\rangle$ are two states, quantum mechanics tells us that $a|0\rangle + b|1\rangle$ is also a possible state. Whereas such superpositions of states have been extensively verified for microscopic systems, the application of the formalism to macroscopic systems appears to lead immediately to severe clashes with our experience of the everyday world. As we have seen, the problem is then how to reconcile the vastness of the Hilbert space of possible states with the observation of a comparably few "classical" macroscopic states. The long standing puzzle of the Schrödinger's cat problem could be resolved in terms of quantum decoherence. The central question of why and how our experience of a "classical" world emerges from quantum mechanics thus lies at the heart of the foundational problems of quantum theory. Decoherence has been claimed to provide an explanation for this quantum-to-classical transition. In classical physics, the environment is usually viewed as a kind of disturbance, or noise, that perturbs the system under consideration in such a way as to negatively influence the study of its "objective" properties. Therefore science has established the idealization of isolated systems, with experimental physics aiming at eliminating any outer sources of disturbance as much as possible in order to discover the "true" underlying nature of the system under study. The distinctly nonclassical phenomenon of quantum entanglement, however, has demonstrated that the correlations between two systems can be of fundamental importance and can lead to properties that are not present in the individual systems. The earlier view of phenomena arising from quantum entanglement as "paradoxa" has generally been replaced by the recognition of *entanglement as a fundamental* property of nature. The decoherence theory is based on the idea that such quantum correlations are ubiquitous; that nearly every physical system must interact in some way with its environment, which typically consists of a large number of degrees of freedom that are hardly ever fully controlled. Decoherence is the irreversible formation of quantum correlations of a system with its environment. These correlations lead to entirely new properties and behavior compared to that shown by isolated objects, thus the decoherence seem provides a realistic physical modelling and a generalization of the quantum measurement process.

Next figure 2 puts in evidence the measurement problem utilizing Schrödinger's cat (again). The leftmost panel gives the standard Schrödinger cat story. There is a single observer, to be called Ob1, outside the box. Before Ob1 opens the window to look, the cat is in a superposition of being both alive and dead. By opening the window and looking,

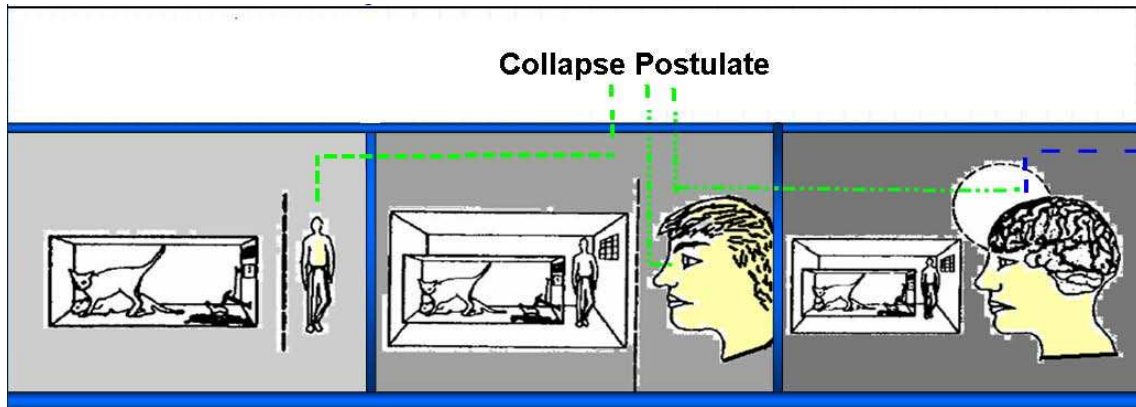


FIG. 2: Interpretations of Collapse.

Ob1 "collapses the wave-packet" so that the cat is now in a unique state of being alive or dead. The story gets more interesting if we place O1 in a second box as shown in the second panel. If we, the second observer, are not looking, then O1 is in a superposition of states seeing an alive cat and seeing a dead cat. Once we make an observation, Ob1 collapses to one state or the other. The third panel removes the split even further, placing it in our brain.

Some objections to this interpretation (standard) has been proposed by de Muynck[13] who fixes some fundamental points (table and figure 3).

Positive features	Negative features
+1. pragmatism	-1. pragmatism
+2. crucial role of measurement	-2. confusion of preparation and measurement
	-3. classical account of measurement
	-4. completeness claims
	-5. ambiguous notion of correspondence

According to de Muynck scheme (below), in the first realist case a) quantum mechanics is thought to describe microscopic reality most in the same way of classical mechanics is generally thought to describe macroscopic reality. In the empirist case b) state vector and density operator are thought to correspond to preparation procedures, and quantum mechanical observables correspond to measurement procedures and the phenomena induced by a microscopic object in the macroscopically observable pointer of a measuring instrument.

Recently, with the development of quantum information theory, several scientists gives to the information a fundamental role in the description of the Nature. All these approaches start in general from the assumption that we live in a world in which there are certain constraints on the acquisition, representation, and communication of information. They play on the ambiguous ontology of quantum states. They affirm that quantum states are merely states of knowledge (or of belief); this idea has led to the claim that

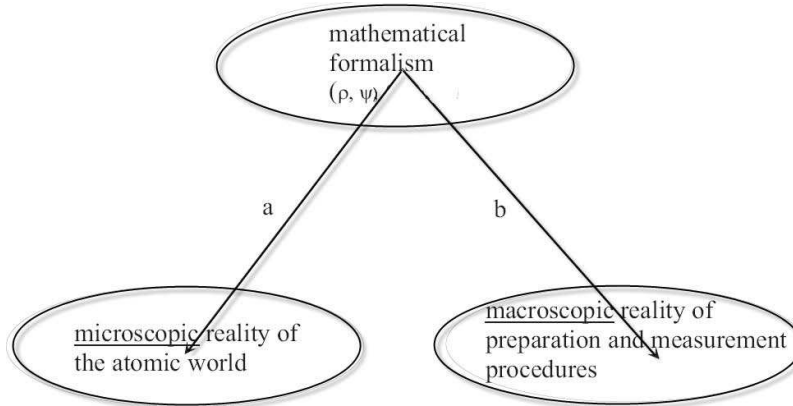


FIG. 3: Realist (a) and empiricist (b) interpretations of the mathematical formalism of quantum mechanics.

"quantum theory needs no interpretation" [15]. More in details, the field of quantum information theory opened up and expanded rapidly, for instance, quantum entanglement began to be seen not only as a puzzle, but also as a resource which can yield new physical effects and techniques. New insight into the foundations of quantum physics, suggesting that information should play an essential role in the foundations of any scientific description of Nature. This primitive role of the information seem to explain, according to some authors, the deep nature of physical reality. The measurement is information **not** a physical process. The quantum state is a construct of the observer and not an objective property of the physical system. Some radical positions[15] claims that the nature of reality can be explained as subjective knowledge. Others authors argued that quantum theory is fundamentally just a theory of relations or of correlations[16].

IV. INTERPRETATIONS OF QM.

The problem linked to the collapse postulate is given in this term: we have to consider on the one hand the temporal evolution of the wave function **U**, provided by the rigorously causal, deterministic and time-reversal Schrödinger equation, and on the other the reduction processes of the state vector, that we call **R**. Different standpoints are possible about the role of the processes **R** in QM. We will analyze most important positions. We can individuate three main standpoints about **R**:

- 1. The wave function contains the available information on the physical world in probabilistic form; the wave function is not referred to an "objective reality", but due to the intrinsically relational features of the theory, only to what we can say about reality. Consequently, the "collapse postulate" is simply an expression of our peculiar knowledge of the world of quantum objects; this is the group of **Copenhagen** and neo-Copenhagen[17] interpretations.
- 2. The wave function describes what actually happens in the physical world and

its probabilistic nature derives from our perspective of observers: the group of **Everett**[18], **Deutsch**[19], **Bohm**[20, 21] theories.

- 3. The wave function partially describes what happens in the physical processes; in order to comprehend its probabilistic nature and the postulate R in particular, we need a theory connecting **U** and **R**. This view includes all those theories which tend to reconcile **U** with **R** by introducing new physical process: **Penrose**[23], **GRW**[22] theories.

- 3. The wave function describes and represents an individual agent's subjective degrees of belief. In few words, the physical reality is a subjective information. Informational approaches group[15, 25]

The possible link between observer and interpretations of Quantum Mechanics are summarized in fig.4.

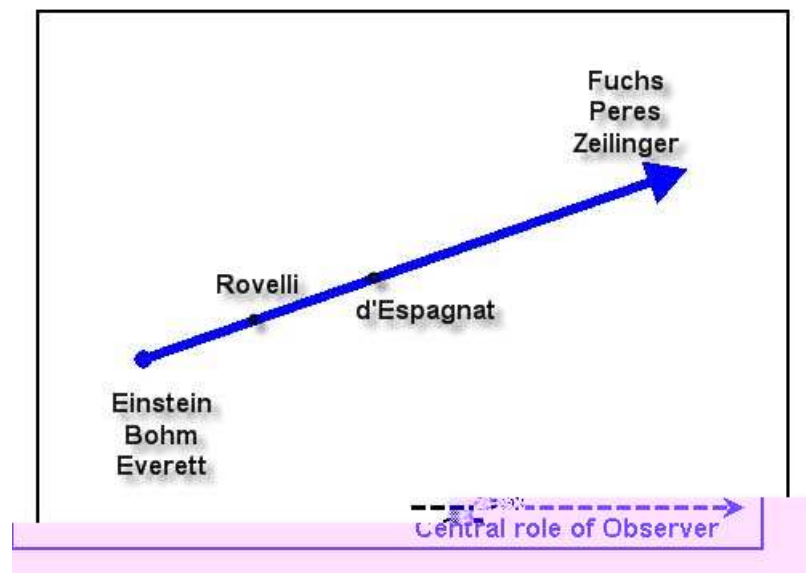


FIG. 4: Realism to Idealism, Role of Observer.

V. A POSSIBLE PHYSICAL REALITY INFERRED FROM MEASUREMENT PROCESS

We try to do a theoretical speculation on a possible relationship between the objectivity/subjectivity nature of measurement process and the underlying physical reality inferred. We build the following scheme:

Measurement process	Physical reality
1. ontic measurement →	of ontic reality
2. ontic measurement →	of epistemic reality
3. epistemic measurement →	of ontic reality
4. epistemic measurement →	of epistemic reality

Considerations. First case, is a realist position (without determinism), the second, a non-completely idealistic position, like the standard interpretation, last case is a pure idealistic view, third position is very intriguing, we do an epistemic measurement process but of ontic reality probably close d’Espagnat’s conception of veiled reality, a position supported from the discovery of nonseparability in QM. According d’Espagnat[24] the “veiled reality” is supported from the discovery of nonseparability in QM, he introduced the concept of the “veiled reality” which refers to something that cannot be studied by traditional scientific methods. d’Espagnat defines his philosophical view as “open realism”; existence precedes knowledge; something exists independently of us even if it cannot be described.

VI. INFORMATIONAL APPROACHES TO QUANTUM MECHANICS

In this section we introduce briefly two approaches: CBH and Fuchs’ program. All these approaches (quantum theoretic description of physical systems) start in general from the assumption that we live in a world in which there are certain constraints on the acquisition, representation, and communication of information. The concept of the information, according these approaches, play a primary role. CBH[26] starting from informational constraints try to deduce the quantum mechanics principles. Fuchs’[15] program involves two strong conceptual shifts: i) quantum mechanics as a theory of information, and ii) its probabilities as subjective degrees of belief. Utilizing the Bayesian interpretation of probability, information assume a subjective role. In his program, he claims that the paradoxes of quantum mechanics, which for many interpretations provide troubling consequences, are resolved when physical objectivity is removed and in its place pure, subjective information is substituted. Last, the main thesis of these approaches are supported by the fundamentally random result of individual quantum measurements.

A. Fuchs’ program: Bayesian Interpretation of Probability

We need to analyze, how this approach interpret the notion of probability and try to answer at fundamental questions like, what is the nature of quantum probabilities? An ontic or epistemic interpretation? Two agents in possession of the same facts can assign different or the same probabilities? According this approach we find these replies:

1. what is the nature of quantum probabilities?:⇒ **They Represent an agent’s degrees of belief.**

2. Ontic vs. Epistemic interpretation of probabilities: \Rightarrow **Epistemic interpretation.**
3. In quantum theory, two agents in possession of the same facts can assign different or the same probabilities?: \Rightarrow **Different probabilities**
4. It is indispensable for the description of physical reality to introduce the agent? \Rightarrow **Yes**

The central role played by Bayes theorem is learning from experimental data. The theorem teaches how the probability of each hypothesis has to be updated in the light of the new observation. For instance, to solve a problem via Bayes' theorem mean: to know the outcome of a series of observations of the system and to want to estimate its properties (state, parameters). The Bayesian interpretation of quantum mechanics is founded on the notion that quantum states, both pure and mixed, represent states of knowledge and that all the probabilities they predict are Bayesian probabilities.

There are many objections, for instance: how we choice the priors (subjective priors)to enter in the bayesian inference? Priors are pointed to by those critical of the Bayesian approach as the major weakness of the theory.

VII. CONCLUSION

As we have seen, every interpretation, in a different ways, claims to explain the "observer" and the underlying physical reality once established as ontic level, one of three fundamentals elements: information, matter or physical law. We have presented some problems related these affirmations. We think, that no interpretation of the quantum theory can avoid this intrusion until we do not clarify the nature of observer.

◇Michele Caponigro
University of Bergamo
◇ michele.caponigro@unibg.it

-
- [1] P.A.M. Dirac: The principles of Quantum Mechanics, Oxford University Press (1958)
 - [2] A. Einstein, B. Podolsky, and N. Rosen, Phys. Rev. **47**, 777 (1935).
 - [3] J. S. Bell, Physics **1**, 195 (1964).
 - [4] J. F. Clauser, M. A. Horne, A. Shimony, and R. A. Holt, Phys. Rev. Lett. **23**, 880 (1969).
 - [5] J. F. Clauser and M. A. Horne, Phys. Rev. D **10**, 526 (1974).
 - [6] D. M. Greenberger, M. A. Horne, and A. Zeilinger, in *Bell's Theorem, Quantum Theory, and Conceptions of the Universe*, edited by M. Kafatos, Kluwer Academic, Dordrecht, 69 (1989).
 - [7] D. M. Greenberger, M. A. Horne, A. Shimony, and A. Zeilinger, Am. J. Phys. **58**, 1131 (1990).

- [8] J. S. Bell, *Physics* **1**, 195 (1964) and J. S. Bell, On the Problem of Hidden Variables in Quantum Mechanics, *Rev. Mod. Phys.* **38**, 447-452 (1966).
- [9] A. Aspect, J. Dalibard, and G. Roger, Experimental Test of Bell's Inequalities Using Time-Varying Analyzers, *Phys. Rev. Lett.* **49**, 1804 (1982).
- [10] A. Peres, *Quantum Theory: Concepts and Methods*, Kluwer Academic, Dordrecht (1993).
- [11] Asher Peres, All the Bell inequalities, *Found. Phys.* **29**, 589 (1999).
- [12] R. Penrose, *Gravity and State Vector Reduction*, in *Quantum Concepts in Space and Time*. Eds. R. Penrose and C. J. Isham (Clarendon Press, Oxford, 1986).
- [13] W. M. de Muynck: From Copenhagen to neo-Copenhagen interpretation, arXiv:0709.2613v1
- [14] E. Schrödinger, *Naturwissenschaften* **23**, 807 (1935). English translation available in *Proc. Am. Philos. Soc.* **124**, 323 (1980).
- [15] C. Fuchs: Quantum Mechanics as Quantum Information (and only a little more), arXiv:quant-ph/0205039v1
- [16] S. Saunders: Time, Quantum Mechanics and Probability. *Synthese* **114**, 373-404 (1998)
- [17] W.M. de Muynck: The Copenhagen interpretation, and pragmatism Contribution to the Conference on Pragmatism and quantum mechanics, CREA, Ecole Polytechnique, CNRS, Paris, February 22-23, (2007)
- [18] D. Wallace: Everett and Structure, *Studies in the History and Philosophy of Modern Physics* **34** (2003), pp. 87-105
- [19] D. Deutsch: The Structure of the Multiverse, arXiv:quant-ph/0104033v1 (2001)
- [20] K. Berndl, M. Daumer, D. Drr, S. Goldstein, N. Zangh: A Survey on Bohmian Mechanics *Nuovo Cim. B110* (1995) 737-750
- [21] D. Drr, S. Goldstein, N. Zanghi: Bohmian Mechanics as the Foundation of Quantum Mechanics Contribution to "Bohmian Mechanics and Quantum Theory: An Appraisal," edited by J.T. Cushing, A. Fine, S. Goldstein, Kluwer Academic Press (1995)
- [22] R. Tumulka: The Point Processes of the GRW Theory of Wave Function Collapse, arXiv:0711.0035v1 [math-ph] (2007)
- [23] R. Penrose: Road to Reality pp856-860 (2005)
- [24] B. d'Espagnat: *Veiled Reality*, Westview Press, Reprint edition (2003)
- [25] J. Bub: Quantum mechanics is about quantum information, *Foundations of Physics Festschrift issue for James Cushing* (2004)

- [26] R. Clifton, J. Bub and H. Halvorson, "Characterizing quantum theory in terms of information theoretic constraints." *Foundations of Physics* 33, 1561-1591 (2003).

5

5.0 Possono le informazioni (quantistiche) essere separate dalla Meccanica Quantistica?

Can (Quantum) Information be Sorted Out From Quantum Mechanics?

Michele Caponigro

Abstract

We shall draw an affirmative answer to the question posed in the title. The key point will be a quantum description of physical reality. Once fixed at ontic level two basic elements, namely the laws of physics and the matter, we argue that the underlying physical reality emerges from the interconnection between these two elements. We consider any physical process, including measurement, modeled by unitary evolution. In this context, we will deduce quantum randomness as a consequence of inclusion of the observer into the quantum system. The global picture of the universe is in a sense deterministic, but from our own local perspective (as part of the system) we perceive quantum mechanical randomness. Then, the notion of “information” turns out to be a derivative concept.

Key Words: quantum information, observers and objects, entanglement, laws of physics and matter

I've spent much more time thinking about the photon problem [i.e., about quantum theory] than about relativity.

A. Einstein

1. Introduction

The abstract mathematical structure of the Lorentz transformations was deduced through simple physical principles. Thanks to the existence of these physical principles we do not have a significant debate on the interpretation of the theory of special relativity. The formulation of Quantum Mechanics (QM), to the contrary, is based on a number of rather abstract axioms without a clear motivation for their existence. Despite its success, the absence of elementary physical principles has determined a broad discussion about the

interpretation of the theory. For this reason, and not only, Bell called the ordinary QM with the abbreviation FAPP (for all practical purposes).

Over the years there has been a permanent wish to have a realistic view of the Nature also in the quantum framework. According to de Muynck (de Muynck, 2007), we can distinguish a realist interpretation of QM thought to describe microscopic reality (likewise classical mechanics is generally thought to describe macroscopic reality), from an empiricist interpretation where state vector and density operator are thought to correspond to preparation procedures, and quantum mechanical observables correspond to measurement procedures.

Corresponding author: Michele Caponigro e Prof. Stefano Mancini.
Address: *Department of Epistemology of Complexity, University of Bergamo, 24100 Bergamo, Italy, EU
e-mail: michele.caponigro@unibg.it

Recently, with the development of quantum information theory, several scientists have given to *information* a fundamental role in the description of Nature. All these approaches (quantum theoretic description of physical systems) start in general from the assumption that we live in a world in which there are certain constraints on the acquisition, representation, and communication of information. Several works claim that QM can be viewed as information theory (Bub, 2003; 2005; Fuchs 2002; Perwani, 2005; Zeilinger, 2005). According to them, the description of physical systems in terms of information and information processing is complementary to the conventional description of physical systems in terms of the laws of physics (or the only way to describe them). In Ref. (Bub, 2005) it was sentenced: “*The notion of quantum information is to be understood as a new physical primitive.*” That is, the laws of physics are reducible to information.

The primitive role of information seems to explain, according to some authors, the deep nature of physical reality. In this context, the description of a state of a quantum system is a description of the information possessed by the observer about the system (in this case, the measurement is *not* a physical process). The quantum state is a construct of the observer and not an objective property of the physical system. In particular, in Ref. (Fuchs, 2002) it was claimed that the nature of reality can be explained by subjective knowledge.

Recently, moving from the renowned Landauer's statement (Landauer, 1996) “*Information is Physical*” we are witnessing a drift towards the statement “*Physics is Informational*”. Here we would supply some reasonings against that.

We start our analysis by introducing essential hypothesis to infer the possible underlying physical reality. These hypothesis will be based on considerations of physical nature. We will assume that any consistent description of Nature is a sort of “*isomorphism*” between the laws of Nature and the matter. With the term isomorphism we intend that the theoretical structure of physical law is consistent with physical phenomena. A physical law has a mathematical structure, but a mathematical structure is not a physical law. The structure

alone cannot predict physical behavior of Nature, we need of physical and mathematical axioms together. The physical axioms are determined by empirical facts, which in turn require the presence of the objects. Objects interact each other, hence any physical process, including measurement, should be modeled by unitary evolution. As matter of fact objects are also observes. Then, quantum randomness is a consequence of inclusion of the observer into the quantum system. From that, it follows the concept of information. This approach leads us to conclude that the information has not the statute of physical law and it is reducible to the laws of physics, i.e. it is a *derivative* concept.

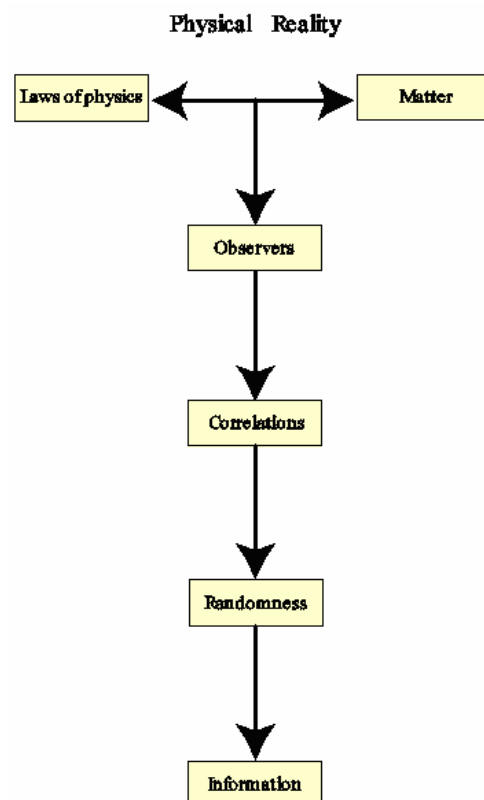


Figure 1. A scheme summarizing the used reasoning.

The layout of the paper follows the scheme of Figure 1. In Section II we discuss about laws of physics and matter. Section III is dedicated to the relation between observers and physical objects. In Section IV quantum correlations are invoked to describe quantum measurements by means of unitary evolution. Then, Section V deals with the origin of quantum randomness. Finally, in Section VI (quantum) information is explained as a derivative concept

(coming from laws of physics and matter). Section VII is for conclusions.

2. Laws of physics and matter

We start by considering three elements: (i) *physical laws*, (ii) *information* and (iii) *matter*. Our main objective is to find a possible link among them. We will argue that the physical reality is a structure emerging from an “isomorphic” relation between physical laws and matter. These will be primitive concepts with respect to information.

From the philosophical point of view it could be interesting to analyze various combinations of the above three elements. In general we can say the following: if we take the laws of physics at ontic level, we have a form of Platonism; if we take the information at ontic level we have to do with idealistic forms, while we have realistic forms if we take the matter at ontic level. In the Platonic view, the dependence among the above three elements is: laws of physics \Rightarrow matter \Rightarrow information.

We do not join the full platonism, where the perfect laws of physics (which live elsewhere) can be computed to arbitrary precision with the unlimited amounts of information (in this case the Platonic realm is the “real reality”). We admit the importance of mathematical structure of a physical law, but we must combine it with the physical constraints, which are determined by *empirical facts*, i.e. the correspondence with the matter.

Physics is the study of the behavior of physical *objects*² located in a space. Thus, the objects are governed by the space's geometry. A fundamental aspect of a geometry is the group of transformations defined over it. Then, the field of numbers is crucial to describe essential properties of the geometry.

Physics is that take place in space and our geometry is that physics takes place within in. It is not possible to think physics without space. On the converse it is possible to think to geometry, many geometries, without physics. Physics and the geometry in which it takes place are not independent. There is a close relation between them (Mirman, 1995). Moreover, group

theory is the necessary instruments for expressing the laws of physics (the concept of symmetry is derived from group theory). The invariance under the group of transformations is a fundamental criterion to classify mathematical structures.

We assume that physics describes the behavior of many objects, that they affect each other, i.e. they *interact* each other, thus change each other. All physical objects, assumed to be interacting, must be described by functions (of both space and time). They cannot be simply described by variables (functions of time alone). These functions of (of space and time) must be group-representation basis states, actually Poincaré group representation basis-states, thus complex. This is because a fundamental fact about our Universe is the invariance of the laws of physics under the Poincaré group.

It then follows that QM and relativity are both consequences of geometry and the necessity for interactions (Mirman, 1995) (in the most economic way according to Occam's razor). Thus Schrödinger equation is not an independent assumption, but rather direct requirement of the Poincaré group, through the Dirac equation in the appropriate limit.

3. Observers and objects

In QM it was introduced the fundamental notion of “observable”. Is this term related with measurement or with an experimental process? The observable notion need of the observer, hence it is responsible for the division of the world in two parts: physical system and apparatus. While the notion of “measurement of the observable” requires the measurer (observer), the notion of “experimental observation process” has to do with results and facts. Our thesis is that QM has to do with *laws and experimental results*. In this framework, the measurer can be considered like an object being part of the system (in the same way it can be considered measured/observed). All physical objects are observers, and all observers are physical objects, and because all observations are interactions and all interactions are observations, all physical objects and all physical processes should be governed at all times by the basic equations of QM, or more general by the

²We cannot specify further the emaning of this term unless using a tautology. We simply consider physical objects as elements of matter.

transformations of the Poincaré group, from which these equations follow.

We list some things supporting the inclusion of the observer into the system.

- The apparatus (the observer) should not be separated off from the rest of the world into black boxes, as if it was not made of atoms and not ruled by QM.
- We have not a theory of the measurer, we do not know who is the measurer and when it is authorized to make a measure.
- We can easily interpret the notion of "experimental results". Within a result (fact) of an experimental process, we have both the measurer and the system. An experimental fact has two qualities: to include the observer in the system (without any privileged role) and to give us empirical results.
- An empirical fact is interpreted as interaction between objects governed by physical law.

In the light of these considerations, we argue that everything we know about physics is compatible with the hypothesis that all physical processes, including measurements, can be accurately modeled by unitary evolution of the wave function. This view seem to led us to consider some features ascribed to many worlds interpretation of the quantum theory (Everett, 1957).

According to this interpretation, the world we live in is continually branching into multiple near-copies corresponding to different possible measurement outcomes. Unitary quantum dynamical laws describe the evolution of all these branches simultaneously. The definite measurement records that we observe, remember and communicate, are just characteristics of individual branches. Then, the development of all quantum systems are governed by the same unitary dynamical laws and hence develop completely deterministically and linearly. In this context, the wavefunction describes real properties, so that all speculations about determinism, causality, quantum jumps and collapse of wavefunction are unnecessary.

When a microscopic quantum system interacts with a macroscopic apparatus,

decoherence drives the "collapse" of the wave function (FAPP). All possible outcomes of any measurement are regarded as real but we perceive only a specific outcome, because the state of the observer as part of the quantum system is strongly *correlated* with that outcome. In this context, the evolution of the wave function is deterministic, however we are unable to predict with certainty the outcome of an experiment to be performed in the future. We do not know what branch of the wavefunction we will end up, so we are unable to predict our future state. Thus, while the global picture of the universe is deterministic, from our local perspective (within the system) we perceive quantum mechanical randomness.

The Universe is governed by QM. So a system, an electron, an atom, a molecule, a crystal, a person, the universe itself is described by a statefunction. There is not distinction between observers and physical objects, they are the same set of things, meaning that the laws of QM must apply to all observers (including human beings). Statefunctions of an object are defined, can only be defined, with respect to another physical one: they are given *relative* to a frame of reference. A frame of reference is a class that can contain a physical object. We have to do with a set of observations of one physical object by another.

Once established these basic points we should focus on the mathematical tool already available in the quantum theory which is able to preserve the above prescriptions, specifically the concept of relative state, and quantum correlations (entanglement).

4. Quantum correlations

The meaning given to an entangled state by the many-worlds interpretation (Everett, 1957) could add new elements useful in our analysis. According to this interpretation, the terms of an entangled state describe something that really exist; the state does not just refer to the probabilities of results that would be obtained if measurement takes place. The different terms of an entangled state can be interpreted as showing that the universe branches into a number of different worlds. What are really important are the *correlations* (this is also in line with the relational approach to quantum

mechanics (Rovelli, 1996)). The main ingredient is thus the relative state.

Let us say that an observer O is going to perform a measure of the observable B on the system S being in a superposition state: $|S\rangle = a|j_B\rangle + b|f_B\rangle$; where $|j_B\rangle$ and $|f_B\rangle$ are eigenstates of B . Before the measurement is performed, the state of the composite system (Observer plus System) is

$$|O+S\rangle^0 = |Ready\rangle_O (a|j_B\rangle_S + b|f_B\rangle_S).$$

After the measurement (according to Schrödinger equation evolution) the composite system will be in a state

$$|O+S\rangle^1 = a|j_B\rangle_O |j_B\rangle_S + b|f_B\rangle_O |f_B\rangle_S,$$

where the observer results entangled with the observed system.

The physical meaning, according to this interpretation, relies on the *correlations*. Each component of the wave function is called branch, and the branching is responsible for our experiences. These are the consequences of the fact that there is not interaction between branches, but every subsystem can only “see” the other subsystems states that are in the same branch. In this way, the quantum “world” is always decomposable into system and observer. The key idea is that their correlations defines a preferred set of basis vectors.

The relevance of quantum correlations has been stressed also in Ref. (Adami, 1998). There, it was claimed that only correlations, not the correlata of a quantum system, are physically accessible, but we have to include the observer as one of its parts. As a consequence, quantum reality is “real” in the sense that QM completely and deterministically describes the evolution of a closed system (not just its wavefunction), and that the statistical character arises from the fact that an observer, because he is part of the closed system, is offered an incomplete view of the quantum system he attempts to measure. Therefore, the quantum universe is deterministic as Einstein’s physical reality demands, but must include the observer as one of its parts due to the inseparability of entangled quantum states.

5. Quantum randomness

We have established that the inclusion of the observer into the system is responsible of quantum randomness. We now analyze two approaches that tries to interpret the source of the randomness: an *informational* approach (Fuchs, 2002) and a *tomographic* approach (Caponigro, 2006).

In Ref. (Fuchs, 2002), the quantum state does not represent information, it represents an individual agent’s subjective degrees of belief about what will happen in a measurement. The concept of information, here is not considered as “objective” data to acquire. The information is linked with the subject-observer and depend from the choice and belief of the observer. The structure of this interesting position is centered on the interpretation of probability: the Bayesian interpretation.

A first possible criticism to this approach is: how to demonstrate that information belongs to the subject? Is it possible to assume that information is related to the system?

The central role played by Bayes theorem relies on the possibility to reverse the conditional probability. In a quantum context, suppose that (Ψ_0) is the preparation of a particular quantum state, and (Ψ_B) is a particular outcome of a measurement of the state. To infer how the state was prepared, we need to compute $p(\Psi_0 | \Psi_B)$, but we only have $p(\Psi_B | \Psi_0)$. So we have to make a guess about $p(\Psi_i)$ (we are doing assumptions on the preparation of the state), e.g. by adopting the “principle of indifference” for which $p(\Psi_i) = p(\Psi_j), \forall i, j$. Then

$$p(\Psi_B) = \sum_i p(\Psi_B | \Psi_i) p(\Psi_i),$$

and by applying the Bayes’ rule

$$p(\Psi_0 | \Psi_B) = \frac{p(\Psi_B | \Psi_0) p(\Psi_0)}{p(\Psi_B)}.$$

The prior probability is the fundamental point between a possible subjective or objective interpretation of Bayes’ theorem. In order to recover an objective theory, we must interpret

probability in QM not as prediction based on our *actual* state of knowledge but rather as a prediction based on the most *complete* possible knowledge about quantum state. A prediction based not on what we know, but on the prediction that anyone can make, no matter how much they know. It is in this sense that the outcome is truly random: it cannot be predicted with certainty even when our knowledge is complete. Truly randomness is a consequences, according our hypothesis of the observer being part of the system and the basic role of correlations in a quantum system.

Probabilities arise because we (as part of the system) cannot predict our future with certainty, so while the wave function of the universe is deterministic we can do no better than making probabilistic predictions.

Then, we summarize below our criticisms to the informational approach:

- An unknown quantum state is unknowable, but an unknown state does not mean that we have to do with a subjective state. There are not an automatic link between unknown state and subjective state. In this way, we are replacing the unknown state with our knowledge of the same state (epistemic role).
- Informational approach considers information at ontic level. As a consequence the observer is an external object that acquires information from a random world. In this way he builds his own subjective world of beliefs.
- It is not possible to build an ontology of QM. Quantum system are defined by attributes, such as position, momentum, angular momentum, and energy or Hamiltonian. These attributes and thus the numerical particulars of their eigenvalues and eigenfunctions and their inner products are *objective properties* of the system. A Bayesianist intends the value assumed by an attribute not as an objective property, and the quantum state that we use to describe the system as purely subjective.

The tomographic approach has the main objective of inferring (in indirect way) a quantum

state (Caponigro, 2006). In this context, we will ascribe at the probability an ontic role. In fact, in a tomographic framework, we are like the prisoners in Plato's famous parable who were chained in a cave and forced to see only the shadows of the things outside but not the things as they are. Our epistemological path is in syntony with the analogy of Plato's cave, because we have considered the observer as part of the system and his statistical description of the physical reality (shadows) is a consequence of his inclusion.

We must pay attention to not confuse the accessibility of underlying physical reality and the subjective knowledge of the same reality, in other words between information and the existence of the physical reality.

The tomographic approach relies on the possibility to characterize a system (either quantum or classical) by a set of fair probability distributions. Such probabilities (marginals or tomograms) depend upon a stochastic variable and some parameters. They represent the shadows a system may have in "directions" specified by the values of parameters. By means of these shadows we can infer the reality (reconstruct the state).

Actually, the tomographic approach provides a unifying framework where quantum and classical aspects could be better compared. So that the interpretational problems are moved to the probability field, and go back to the debate on the nature of probability (subjective or objective character of probability). Again, to have an objective theory we must interpret probabilities not as prediction based on our actual state of knowledge, but rather as prediction based on the most complete possible knowledge of the quantum state (in contrast to pseudo-randomness that arises in classical mechanics because of incomplete knowledge). As matter of fact, the information contained in the marginal distributions is complete. An ontic state can be represented through classic approach by the marginal probability distributions and is characterized by the fact that there are no other marginal probability distribution with the same collection of actualized observables. We retain the one-to-one correspondence between the ontic state of an object and this mathematical object.

The tomographic approach to quantum mechanics is a classic-like approach, but the probability inferred is not similar with classic epistemic probability. We argue that our assumptions bring us to establish an ontological probability of the physical reality described by classic tomography. Thus our tomograms assume an ontological character and since they completely characterize the state of a system, also the latter assumes such a character. QM does not force us to give up realism, but it force us to distinguish carefully between potential and actualized properties.

6. (Quantum) Information

The philosophical questions we would address here are: what information is and what is its role in physics? Laws of physics is just a representation of information or information is a representation of physical law? Would it be natural to suppose that there are information laws not less real than physical laws?

We utilize in our analysis the general concept of information as defined in Shannon's theory (Shannon, 1949). "*Information in communication theory relates not to what you do say, but to what you could say*". Hence, information is related to many possibilities, different choices and distinguishability. Actually, information emerges from different possible configuration for objects.

Why to include quantum systems? Because, the theory does not place restrictions on the types of physical systems that can be used in a communication system. The theory does not require classical systems, these facts suggest that a new concept of information is not required.³

Information is related to at least two physical systems. For instance, a communication scheme presupposes a source and a destination of information, thus implying that information describes relational properties of physical systems. When we speak about the information

contained is a system, we implicitly speak about a *relational* properties of that system to other systems. Hence, information is not a physical quantity or absolute property of a system, because it does not determine any properties of a system. However, we should not confuse information with the property of a physical system identified by the Shannon measure.

For these reasons information is reducible to a physical theory and not vice versa. Information remains an abstract, rather than a concrete, noun. That is, information is a derivative concept, there is no information without physical representation (i.e. physical objects and physical laws). If we refer to Landauer (Landauer, 1996) "*information is exclusively stored in the configuration of physical objects, and transmitted only by material entities*". In this way, with tacit conditions, Landauer assumed the presence of matter and laws of physics as primitive. Information then assumes a relational character, moreover it is linked to the concept of many possibilities and as consequence to uncertainty. Information is anchored to the concept of probability which assume in the same quantum context an intrinsically objective character. The relational character of the information and objective intrinsic probability can be explained with the assumption of the inclusion of the observer as part of the system.

7. Conclusion

We have discussed about a possible description of quantum physical reality based on qualitative assumptions. We have fixed at ontic level two basic elements: laws of physics and matter. We have argued that the underlying physical reality emerges from the interconnection between these two elements and that the information has not a primary role in the description of physical reality. The conditions that permit information to emerge from the underlying physical reality are the existence of an "object" with a multiplicity of possible events (different possible configurations) and the existence of an "object" which acquires it. Starting from this qualitative analysis, we can see that information is a derivative concept whose existence is subordinate to the relationship between more fundamental notions such as objects located in a

³In the light of quantum information some authors (Brunker, 2001) disagree with this position. They claim that quantum information is something radically different from Shannon information. Others (Fuchs, 2002) claim that Shannon concept of information is appropriate for quantum information as well. We assume the latter position because quantum information theory, although identifies new physical resource (qubits, entanglement), does not introduce a new concept of information.

space (matter) and mathematical tools to characterize it (physical laws). At the origin of ambiguities is the famous Landauer's statement (Landauer, 1996): "*Information is Physical*", which is too often reversed into "*Physics is Informational*". Landauer's statement clearly reveals that information is encoded on physical supports (objects, matter) and processed by physical operations subordinate to physical laws. Therefore, matter and physical laws have a primitive character, while information has a derivative character (as supported by Landauer himself). This brings us to devise a logical pathway which supports the above conclusions and describes how the concept of information derives from quantum physics (not vice versa). The merit of quantum physics has been to highlight the role of the observer, but we do a mistake in identifying the observer with a human being, that is giving a privileged role to the observer (and moreover external to the system). The observer/observed role is typical of any physical objects and relies on interaction between objects. In this way, the observer loses the property of being a privileged reference point. In this framework information assumes a purely relational character. In addition, it is linked to the idea of different possibilities through the uncertainty as consequence of the quantum probability, which has an intrinsic objective aspect. Thus, the relational character of the information and the intrinsic objective probability are explained by the fact that the observer is within the system. The objects that can play the role of observer and observed are actually quantum correlated subsystems of a physical system. The entangled states cause a statistically objective and incomplete view of physical reality.

To conclude, we can say that quantum reality is "real" in the sense that quantum mechanics describe completely and deterministically the evolution of a closed system and the statistical nature arises from the inclusion of the observer as part of the system. Within this framework one is naturally led to consider (quantum) information as as a derivative concept, that is one can sort it out from quantum mechanics.

References

- Adami C and Cerf NJ. What Information Theory Can Tell Us About Quantum Reality. arXiv:quant-ph/9806047v1.
- Brukner C. and Zeilinger A. Conceptual inadequacy of the Shannon information in quantum measurements. *Physical Review A* 2001; 63: 022113.
- Bub J. Quantum Mechanics is About Quantum Information. *Foundation of Physics* 2005; 34: 541-560
- Bub J. Clifton R. and Halvorson H., Characterizing Quantum Theory in Terms of Information-Theoretic Constraints, *Foundations of Physics* 2003; 33: 1561.
- Caponigro M, Mancini S and Man'ko VI. A Probabilistic Approach to Quantum Mechanics Based on Tomograms. *Fortschritte der Physik* 2006; 54: 602.
- Everett III H. Relative State Formulation of Quantum Mechanics. *Review Modern Physics* 1957; 29: 454.
- Fuchs C. Quantum Mechanics as Quantum Information (and only a little more). 2002, arXiv:quant-ph/0205039v1.
- Landauer R. The Physical Nature of Information. *Physics Letters A* 1996; 217: 188.
- Mirman R., *Group Theoretical Foundations of Quantum Mechanics*. Nova Science Publishers, Commack NY. 1995.
- de Muynck WM. From Copenhagen to Neo-Copenhagen Interpretation. arXiv:0709.2613v1.
- Parwani RR. Information Measures for Inferring Quantum Mechanics. *Journal of Physics A* 2005; 38: 6231.
- Rovelli C. Relational Quantum Mechanics. *International Journal of Theoretical Physics* 1996; 35: 1637.
- Shannon CE and Weaver WW. *The Mathematical Theory of Communication*. University of Illinois Press, Urbana IL, 1949.
- Zeilinger A. The Message of the Quantum? *Nature* 2005; 438: 743.

6

6.0 La classificazione degli stati entangled è ontica o epistemica?

Epistemic vs Ontic Classification of quantum entangled states?

Michele Caponigro

*ISHTAR Indeterminism in Sciences and Historico-philosophical
Transdisciplinary Advanced Research Center, University of Bergamo**

Enrico Giannetto

Department of Human Sciences, University of Bergamo[†]

In this brief paper, starting from recent works, we analyze from a conceptual point of view this basic question: can the nature of quantum entangled states be interpreted ontologically or epistemologically? According to some works, the degrees of freedom (and the tool of quantum partitions) of quantum systems permit us to establish a possible classification between factorizable and entangled states. We suggest, that the "choice" of degree of freedom (or quantum partitions), even if mathematically justified introduces an epistemic element, not only in the systems but also in their classification. We retain, instead, that there are not two classes of quantum states, entangled and factorizable, but only a single class of states: the entangled states. In fact, the factorizable states become entangled for a different choice of their degrees of freedom (i.e. they are entangled with respect to other observables). In the same way, there are no partitions of quantum systems which have an ontologically superior status with respect to any other. For all these reasons, both mathematical tools utilize (i.e quantum partitions or degrees of freedom) are responsible for creating an improper classification of quantum systems. Finally, we argue that we cannot speak about a classification of quantum systems: all quantum states exhibit a uniquely objective nature, they are all entangled states

Keywords: Quantum entanglement, subsystems (partitions and factorizable states), epistemic vs ontic elements

I. SYSTEMS AND PARTITIONS

In spite of continuous progress, the current state of entanglement theory is still marked by a number of outstanding unresolved problems. These problems range from the complete classification of mixed-state bipartite entanglement to entanglement in systems with continuous degrees of freedom, and the classification and quantification of multipartite entanglement for arbitrary quantum states.

In this paper, starting from two important works, 1) Torre (2010) and 2) Zanardi (2001), we will analyze the possible relationship among these elements:

1. the degrees of freedom of the quantum system
2. the partitions of the quantum system
3. the epistemic elements introduced from the procedures (1) and (2)

As we know, the relationship between quantum systems (QS) and their possible quantum entangled systems (QES) is not a trivial question. There are many efforts to understand this dynamics. Zanardi (2001) in his paper argues that the partitions of a possible system do not have an ontologically superior status with respect to any other: according Zanardi given a physical system S ,

the way to subdivide it in subsystems is in general by no means unique. We will analyze his conclusion in the following sections below.

According Zanardi the consequences of the **non uniqueness of the decomposition of a given system S into subsystems** imply (at the quantum level), a fundamental ambiguity about the very notion of entanglement that accordingly becomes a relative one. The concept of "relative" for an entangled system, has been developed by Viola and Barnum (2006). They concentrate their efforts on this fundamental question: how can entanglement be understood in an arbitrary physical system, subject to arbitrary constraints on the possible operations one may perform for describing, manipulating, and observing its states? In their papers, the authors proposed that entanglement is an inherently **relative concept**, whose essential features may be captured in general in terms of the relationships between different observers (i.e. expectations of quantum observables in different, physically relevant sets). They stressed how the role of the **observer** must be properly acknowledged in determining the distinction between entangled and unentangled states.

A. Quantum Entanglement: brief overview

From a phenomenological point of view, the phenomenon of entanglement is quite simple. When two or more physical systems form an interaction, some correlation of a quantum nature is generated between the two of them, which persists even when the interaction is

*Electronic address: michele.caponigro@unibg.it

[†]Electronic address: enrico.giannetto@unibg.it

switched off and the two systems are spatially separated. Quantum entanglement describes a non-separable state of two or more quantum objects and has certain properties which contradict common physical sense. While the concept of entanglement between two quantum systems, which was introduced by E. Schrödinger (1936) is well understood, its generation and analysis still represent a substantial challenge. Moreover, the problem of quantification of entangled states, is a long standing issue debated in quantum information theory. Today the bipartite entanglement (**two-level systems, i.e. qubits**) is well understood and has been prepared in many different physical systems. The mathematical definition of entanglement varies depending on whether we consider only pure states or a general set of mixed states (see Giannetto 1995: where it is discussed the reason why entanglement generally requires a density matrix formalism). In the case of pure states, we say that a given a state $|\psi\rangle$ of n parties is *entangled* if it is not a tensor product of individual states for each one of the parties, that is,

$$|\psi\rangle \neq |v_1\rangle_1 \otimes |v_2\rangle_2 \otimes \cdots \otimes |v_n\rangle_n . \quad (1)$$

For instance, in the case of 2 qubits A and B (sometimes called "Alice" and "Bob") the quantum state

$$|\psi^+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}[(|0\rangle_A \otimes |0\rangle_B + |1\rangle_A \otimes |1\rangle_B)] \quad (2)$$

is entangled since $|\psi^+\rangle \neq |v_A\rangle_A \otimes |v_B\rangle_B$. On the contrary, the state

$$|\phi\rangle = \frac{1}{2}[(|0\rangle_A \otimes |0\rangle_B + |1\rangle_A \otimes |0\rangle_B + |0\rangle_A \otimes |1\rangle_B + |1\rangle_A \otimes |1\rangle_B)] \quad (3)$$

is not entangled, since

$$|\phi\rangle = \left(\frac{1}{\sqrt{2}} (|0\rangle_A + |1\rangle_A) \right) \otimes \left(\frac{1}{\sqrt{2}} (|0\rangle_B + |1\rangle_B) \right) . \quad (4)$$

A pure state like the one from Eq.2 is called a *maximally entangled state of two qubits*, or a *Bell pair*, whereas a pure state like the one from Eq.4 is called *separable*. In the general case of mixed states, we say that a given state ρ of n constituent states is *entangled* if it is not a probabilistic sum of tensor products of individual states for each one of the subconstituents, that is,

$$\rho \neq \sum_k p_k \rho_1^k \otimes \rho_2^k \otimes \cdots \otimes \rho_n^k , \quad (5)$$

with $\{p_k\}$ being some probability distribution. Otherwise, the mixed state is called *separable*. The essence of the above definition of entanglement relies on the fact that entangled states of n constituents cannot be prepared by acting locally on each one of them, together with classical communication among them. Entanglement is a genuinely quantum-mechanical feature which does not exist in the classical world. It carries non-local correlations between the different systems in such a way that they cannot be described classically.

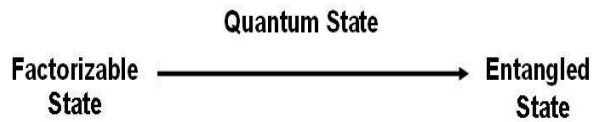


FIG. 1: Torre's main thesis: factorizable states become entangled in a different degrees of freedom.

II. ARE QUANTUM STATES ALL ENTANGLED?

As mentioned above, the recent work by Torre (2010) is a fundamental paper which gives us the possibility to speculate about the nature and the classification of entangled states. The paper demonstrates that a state is factorizable in the Hilbert space corresponding to some choice of degrees of freedom, and that this same state becomes entangled for a different choice of degrees of freedom. Therefore, entanglement is not a special case, but is ubiquitous in quantum systems. According to the authors, one may erroneously think that there are two classes of states for the QS: 1) factorizable and 2) entangled, which correspond to qualitative difference in the behaviour of the system, close to classical in one case and with strong quantum correlations in the other. They argue that this is indeed wrong because factorizable states also exhibit entanglement with respect to *other* observables. In this sense, all states are entangled; **entanglement is not an exceptional feature of some states but is ubiquitous in QM.**

To sum up this conceptual analysis by Torre and Zanardi, we think that there is an unclear relationship among these elements:

1. factorizable states (Torre)
2. entangled states
3. the (choice) of partitions of quantum system (Zanardi)
4. the role of the observer (in determining the distinction between entangled and unentangled states)

We think that all points (except the second point) introduce epistemic elements in the analysis and in the classification of the quantum systems. We suggest that the second point is the key to understand the nature of the underlying physical reality. We argue in the next sections, that the conceptual analysis of Torre and Zanardi differs from what we suggest concerning the epistemic elements introduced in their papers.

A. Factorizability of a state as Epistemic property?

An important question is related at the property of factorizability of quantum state. Is the factorizability tool

an objective property? Briefly stored, is factorizability an objective property of the system or is it a feature of (our) description of system (i.e. an epistemic property)?. With reference to Torre’s paper (2010), the authors show that factorizability and entanglement **are not preserved** in a change of the degrees of freedom used to describe the system, they demonstrate in detailed case that the factorizability of a state is a property that is **not** invariant under a change of the degrees of freedom that we use in order to describe the system. From mathematical point of view[1], they consider a quantum system with two subsystems $S = (S_A, S_B)$ that may correspond to two degrees of freedom A and B . The state of the system belongs then to the Hilbert space $\mathcal{H} = \mathcal{H}_A \otimes \mathcal{H}_B$ and the two degrees of freedom are represented by operators $A \otimes \mathbb{I}$ and $\mathbb{I} \otimes B$. Suppose it is given that the system has a factorizable, non entangled, state $\Psi = \Psi_A \otimes \Psi_B$ with Ψ_A and Ψ_B arbitrary states (not necessarily eigenvectors of A and B) in the spaces \mathcal{H}_A and \mathcal{H}_B . Then there exists a transformation of the degrees of freedom $F = F(A, B)$ and $G = G(A, B)$ that suggests a different factorization, $\mathcal{H} = \mathcal{H}_F \otimes \mathcal{H}_G$, where the state is no longer factorizable: $\Psi \neq \Psi_F \otimes \Psi_G$ with $\Psi_F \in \mathcal{H}_F$ and $\Psi_G \in \mathcal{H}_G$. The state becomes entangled with respect to the new degrees of freedom; the factorizability of *states* is not invariant under a different factorization of the Hilbert space. To conclude, they have shown that for any system in a factorizable state, it is possible to find different degrees of freedom that suggest a different factorization of the Hilbert space where the same state becomes entangled; for this reason they argued that every state, even for those factorizable, it is possible to find pairs of observables that will violate Bell’s inequalities. The figure above (n.1 pag.2) summarize Torre’s thesis.

The authors analyze also the inverse problem: the fact that the appearance of entanglement depends on the choice of degrees of freedom can find an interesting application in the “disentanglement” of a state; one can, sometimes, transform an entangled state into a factorizable one by a judicious choice of the degrees of freedom. To conclude, we think that the epistemic element is inherent in the possibility to “choose” the degrees of freedom of the quantum system: this possibility affects the classification of quantum states in entangled or factorizables. In fact, it is simple to ask these epistemological questions: a) what are the degrees of freedom for a quantum system? b) Is it a complete set that describe all quantum properties? Can be a particle entangled in one context be factorizables in another context?

B. The partitions of quantum system as Epistemic property?

As we have seen, given a quantum system, the way to subdivide (to partition) it in subsystems in **not unique**. We call this first phase “epistemic”, as in fact we are able to decide how to partition the quantum system. The con-

clusion of this operation is most important of its premise: in fact if we find (in the subsystems) an entangled state, this state has an ontological nature **but only if referred** to that kind of particular partition carried. We have, in other words, an objective entangled state for an epistemic partitions! For these reasons, the notions of an entangled state becomes a relative concept and the relativity of this concept is linked, to us, at the choice of partitions or degrees of freedom. At the same time, the property of the entangled state is objective. The figure above (n.2 pag.3) represent our view of Zanardi’s problem.

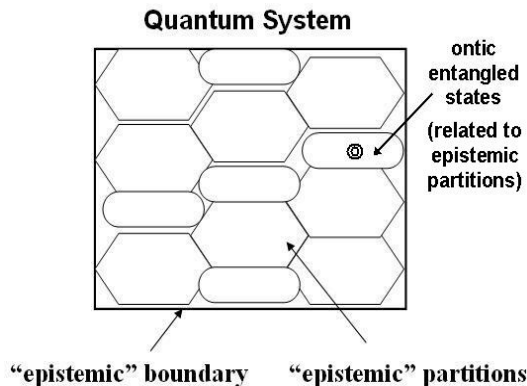


FIG. 2: Epistemic Partitions and Ontic entanglement

III. SOME CONSIDERATIONS AND CONCLUSIONS

We have seen that quantum systems admit a variety of tensor product structures depending on the complete system of commuting observables chosen for the analysis; as a consequence we have different notions of entanglement associated with these different tensor product. We

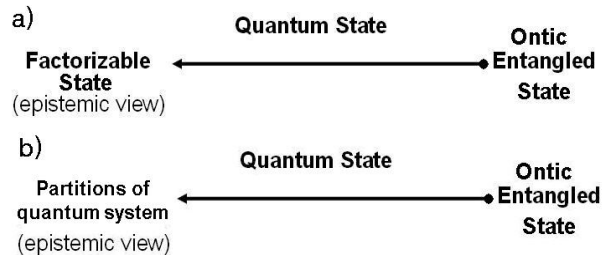


FIG. 3: Our position

notice that, in the determination of whether a state is factorizable or entangled, the factorization of the Hilbert space is crucial and this factorization depends on the choice of the observables corresponding to the degrees of freedom. In the same way, as Zanardi stressed, given a quantum system, the way to subdivide it (via partitions) in subsystems it is **not unique**; the partitions of

a possible system have not an ontologically superior status with respect to any other. Based on these points, we argue, that the criteria of partitions and factorizability (or partitions) contain an a-priori epistemic element, the figure n.3 (pag.3) summarize our position. In conclusion, we suggest that all quantum system exhibit an objective nature that is entangled, at basic level the underlying

physical reality is entangled. A quantum state could be non-entangled if and only if it would be factorizable for every possible partition or choice of degrees of freedom, but this can never occur. The epistemic level emerges with the "observer" (partitions or degree of freedom), the physicists and philosophers should consider these arguments in their debates.

-
- [1] A. C. de la Torre et al.: Entanglement for all quantum states *Eur. J. Phys.* 31 325-332, doi: 10.1088/0143-0807/31/2/010, 2010
- [2] Zanardi P.: Virtual Quantum Subsystems, *Phys. Rev. Lett.* 87:077901, 2001.
- [3] Viola L., Barnun H.: Invited contribution to the Proceedings of the Boston Colloquium for Philosophy of Science on "Foundations of Quantum Information and Entanglement", Boston, March 23-24, 2006 (arXiv:quant-ph/0701124v1).
- [4] Schrödinger, E.: "Discussion of Probability Relations Between Separated Systems", *Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, 31: 555-563; 32 (1936): 446-451
- [5] Giannetto E.: Some Remarks on Non-Separability, in *The Foundations of Quantum Mechanics*, C. Garola A. Rossi (eds.), Kluwer, Dordrecht 1995, 315-324

Quantum Mechanics: some admissible and inadmissible questions.

- (1) Quantum theory describe physical reality?
- (2) Wavefunction is only a mathematical expression for evaluating probabilities?
- (3) The wavefunction is not an objective entity?
- (4) The time dependence of the wavefunction does not represent the evolution of a physical system?
- (5) What the collapse of the wave function mean?
- (6) What causes it?
- (7) What is a measurement?
- (8) How does physics to describe reality?
- (9) The interpretation is merely philosophical bias, and therefore no part of physics.
- (10) The wave function is said to refer exclusively to a human mind and not any physical system external to that mind?
- (11) Theoretical terms are never directly observable?
- (12) Determinism has a connection with the physical reality?

- (13) Why we can ask about the problem of hidden variables? It is admissible this question?
- (14) Is the above question supported by some "hidden" assumption? Already we have in mind a philosophical prejudice about the picture of the physical reality?
- (15) We understand better the physical reality with hidden variables?
- (16) It is possible have the hidden of the hidden variables? In that case the nature will continue to be intelligible?
- (17) Is It admissible the link between determinism and the hidden variables?
- (18) Which is the nature of the Probability?
- (19) Why we introduce the notion of probability?
- (20) What is the probability of a single object?
- (21) Probability is merely a collective term?
- (22) How we introduce the properties of an object?
- (23) The properties of a single object are the same of an ensemble (of the same) objects?
- (24) Do we need to assume the existence of the observers?
- (25) How is the information of a system quantified?
- (26) How the information is transferred?
- (27) What is the physical status of information?
- (28) Can an information-theoretic analysis of physical phenomenon play a role in the explanation of physical phenomenon?
- (29) Is the information a physical object (ontological problem)?
- (30) Any theorem is valid only for a fixed system of axioms? Why?
- (31) It is possible to have another axiomatic of quantum mechanics?
- (32) Where and how the GRW-collapse occur?
- (33) The standard view: an ontic measurement of an epistemic reality?
- (34) Classical ensemble probability could not work for ensembles of quantum systems?
- (35) Which is the origin of the randomness?
- (36) Which is the statute of quantum realism?
- (37) It is admissible an holistic nature of wavefunction?
- (38) It is possible a distinction within a quantum state between ontic and epistemic elements?
- (39) Is the brain a quantum system?
- (40) Quantum mechanics of isolated systems has a physical meaning?
- (41) The geometry could eliminate the observers?
- (42) Does quantum information exist?
- (43) Probability require indistinguishability?
- (44) Physical Systems vs. Conceptual Systems?

A parte l'ammissibilità delle domande è persino troppo semplice porre delle domande sui fondamenti della meccanica quantistica, abbiamo molte risposte, molte vengono eluse, altre non hanno fondamenti, altre ancora sono di natura metafisica, certamente avremo in futuro delle sorprese che potrebbero mettere fuori gioco gran parte di esse.