

# UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Fisica e Astronomia “Galileo Galilei”

Corso di Laurea in Fisica

Tesi di Laurea

L'interpretazione relazionale della meccanica quantistica

Relatore

Prof. Pieralberto Marchetti

Laureando

Francesco Biagio Arcofora

Anno Accademico 2021/2022



# Indice

<b>Introduzione</b>	<b>2</b>
<b>1 Universi isola: la versione originale della RQM</b>	<b>3</b>
1.1 Un problema introduttivo: il paradosso dell'amico di Wigner . . . . .	3
1.2 I postulati della RQM . . . . .	6
1.2.1 Primo postulato: tutti i sistemi sono quantistici . . . . .	7
1.2.2 Secondo postulato: completezza della MQ . . . . .	8
1.2.3 Terzo postulato: relazionalità degli stati quantici . . . . .	9
1.2.4 Quarto postulato: non esistono stati assoluti . . . . .	9
1.2.5 Quinto postulato: l'informazione è correlazione . . . . .	9
1.2.6 Sesto postulato: la consistenza interna è garantita . . . . .	11
1.3 Decoerenza e fatti stabili . . . . .	11
1.4 Ontologia della prima versione . . . . .	14
1.4.1 Un'ontologia relazionale . . . . .	15
1.4.2 Universi isola e intersoggettività . . . . .	17
<b>2 Un nuovo paradigma: l'informazione è fisica</b>	<b>20</b>
2.1 Sostituzione del quarto postulato . . . . .	20
2.2 Ontologia della seconda versione . . . . .	22
<b>Conclusioni</b>	<b>24</b>
<b>Bibliografia</b>	<b>26</b>

# Introduzione

La meccanica quantistica è una teoria profondamente controintuitiva rispetto alla concezione comune del mondo fisico macroscopico, in quanto dà una descrizione matematica della realtà fisica incompatibile con l'ontologia che accompagna la fisica classica, la quale è basata sull'esistenza simultanea e indipendente dall'osservatore di tutte le osservabili di un sistema. Ciò consegue il prodursi di molti paradossi in cui risulta complicato capire a quali enti attribuire il valore di realtà e quali invece quello di mere astrazioni matematiche: ad esempio, nel paradosso EPR il dubbio ricade sull'esistenza di "proprietà oggettive" o di un'azione a distanza che violerebbe la località [1]; oppure nel caso dell'esperimento mentale del gatto di Schroedinger si pone il problema dell'esistenza di stati di sovrapposizione di sistemi macroscopici [2].

Un'interpretazione della meccanica quantistica, dunque, ha lo scopo di fornire la MQ di un'ontologia fisica coerente con le osservazioni sperimentali e con la struttura formale della MQ stessa, stabilendo degli enti di realtà e delle relazioni tra questi e gli enti matematici della teoria, e facendo sì che la MQ non si riduca a un mero strumento di previsione sperimentale.

Uno di questi tentativi che più scardina i principi dell'ontologia classica è l'interpretazione relazionale della meccanica quantistica (anche detta, in inglese, *relational quantum mechanics* o RQM) proposta per la prima volta da Carlo Rovelli nel 1996 [3]. Le peculiarità di questa interpretazione stanno: nel considerare il mondo macroscopico, alla pari di quello microscopico, completamente ed esattamente descrivibile dalla MQ, facendo crollare dunque ogni distinzione tra osservatore e osservato e tra misura e interazione; e di assumere che tutti gli stati quantici di un sistema sono sempre riferiti ad altri sistemi: sono quindi stati *relazionali*, che esprimono esclusivamente il rapporto tra due sistemi distinti. Analogamente alla teoria della relatività ristretta, in cui viene rigettata l'esistenza di una simultaneità assoluta, nella meccanica quantistica relazionale è completamente eliminato il concetto di stato quantico assoluto, cioè indipendente dall'osservatore.

La radicalità di questa interpretazione ha suscitato parecchie critiche e nel corso degli anni i suoi fautori hanno precisato i punti più oscuri e problematici della stessa. In particolare in un recente articolo [4] Carlo Rovelli ed Emily Adlam hanno sostituito uno dei postulati della teoria, modificandone profondamente l'ontologia e dando vita, di fatto, a una nuova versione della RQM.

Nel corso di questa tesi si analizzeranno le due versioni, mettendone in luce le caratteristiche fondamentali e gli aspetti più problematici, confrontandole e cercando di trarne un giudizio sull'efficacia di entrambe.

# Capitolo 1

## Universi isola: la versione originale della RQM

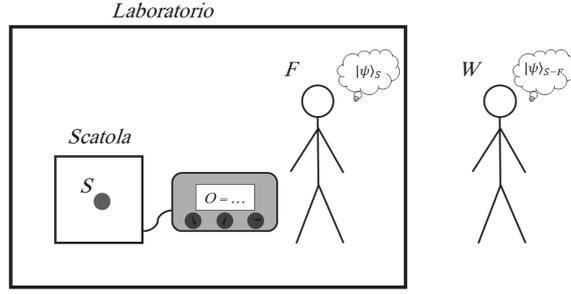
### 1.1 Un problema introduttivo: il paradosso dell'amico di Wigner

Nell'articolo del 1996 che diede vita all'interpretazione relazionale della MQ, Rovelli propose la sua idea a partire da un'analisi del paradosso dell'amico di Wigner leggermente rivisitato. Tale esperimento mentale fu presentato nel 1961 da Eugene Wigner come un'estensione del paradosso del gatto di Schroedinger, volta ad approfondire il problema del rapporto mente - realtà fisica nella meccanica quantistica [5]. L'esperimento originale consta di tre sistemi:  $S$ , il classico sistema del gatto di Schroedinger chiuso in una scatola insieme a una fiala di veleno che potrebbe rompersi in un istante futuro casuale;  $F$ , un osservatore umano, denominato *l'amico di Wigner*, interno al laboratorio in cui si trova la scatola, di cui può osservarne il contenuto dopo averla aperta;  $W$ , un osservatore umano esterno al laboratorio che inizialmente non può interagire né con  $S$  né con  $F$ , denominato *Wigner* stesso. Pur mantenendo i due osservatori macroscopici e umani, Rovelli modifica l'esperimento sostituendo al gatto un sistema qualunque, non necessariamente macroscopico, inizialmente isolato rispetto agli osservatori. Come vedremo in seguito, ciò è irrilevante per la RQM, ma al momento serve a evitare alcuni problemi interpretativi che potrebbero nascere, come, ad esempio, che  $S$  si consideri fin dall'inizio collassato, essendo il gatto stesso un osservatore macroscopico.

Analizziamo adesso l'esperimento, di cui la figura 1.1 ne è una raffigurazione stilizzata. Per il momento utilizziamo un formalismo e un linguaggio comuni nel contesto della formulazione standard della meccanica quantistica. Nella prossima sezione, alla luce dei postulati della RQM, sarà necessario precisare alcuni termini comunemente utilizzati, e introdurre un formalismo adeguato.

Facciamo le seguenti assunzioni per  $S$ :

- a un istante iniziale  $t_0$ ,  $S$  è descritto da uno stato puro, per semplicità appartenente a uno spazio di Hilbert 2-dimensionale  $\mathcal{H}_S$ , dato da una generica combinazione lineare dei due soli elementi della base di autovettori di una osservabile



**Figura 1.1:** L'esperimento mentale dell'amico di Wigner. Sia il laboratorio che la scatola sono sistemi isolati.

$O$  di  $S^1$ , a cui corrispondono due autovalori distinti<sup>2</sup>:  $|\psi_S(t_0)\rangle = \alpha |+\rangle + \beta |-\rangle$ , dove  $\alpha, \beta \in \mathbb{C}$  e  $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$  per la normalizzazione;

- sempre per semplicità, l'hamiltoniana è tale da lasciare invariato  $|\psi_S(t_0)\rangle$  fino a un'eventuale misura;
- $S$  si trova in una scatola che lo isola da  $F$  e dal resto del laboratorio fino all'apertura della stessa.

A un istante successivo  $t_1$ ,  $F$  esegue una misura ideale di prima specie dell'osservabile  $O$  di  $S$ : come prescritto dal postulato di proiezione di von Neumann [6], a seguito della misura  $F$  vede “collassare” lo stato di  $S$  in uno dei due autostati di  $O$  in maniera completamente indeterministica, ma secondo le probabilità date da  $|\alpha|^2$  per  $|+\rangle$  e da  $|\beta|^2$  per  $|-\rangle$ . Assumiamo, ad esempio, che collassi in  $|+\rangle$ :  $|\psi_S(t_1)\rangle = |1\rangle$ .

Per quanto riguarda la prospettiva di  $W$ , assumiamo che egli conosca gli stati puri a  $t_0$  sia di  $S$  che di  $F$ : in particolare, pur essendo  $F$  un sistema macroscopico, quindi a un numero elevatissimo di gradi di libertà, assumiamo comunque idealmente che  $W$  ne abbia una conoscenza massimale, e che conosca anche la sua hamiltoniana e quindi la sua evoluzione temporale. Wigner può quindi applicare con rigore la meccanica quantistica all'intero sistema laboratorio.

Dunque  $W$  descrive  $F$  mediante uno stato puro appartenente allo spazio di Hilbert  $\mathcal{H}_F$  e il sistema complessivo  $S - F$  mediante stati puri appartenenti allo spazio di Hilbert prodotto tensore:  $\mathcal{H}_S \otimes \mathcal{H}_F$ .  $W$  dunque può prevedere che a  $t_1$   $F$  misurerà  $S$  e ne descrive il processo mediante l'hamiltoniana di interazione e il relativo operatore unitario di evoluzione temporale applicato allo stato complessivo del sistema. Tuttavia è isolato rispetto al laboratorio, quindi non ha accesso all'informazione sul valore assunto da  $O$ : di conseguenza l'evoluzione temporale non può che condurre a uno stato di entanglement per il sistema  $S - F$ , che è ancora uno stato puro<sup>3</sup> e, in linea di principio, ammette effetti di interferenza essendo una sovrapposizione di

<sup>1</sup> $\{O\}$  è dunque un ICOC per  $\mathcal{H}_S$ .

<sup>2</sup>Ad esempio  $\sigma(O) = \{-1, 1\}$ .

<sup>3</sup>Per il teorema di Hepp [7] si ha che, per interazioni di range finito, un'evoluzione unitaria non può trasformare uno stato puro in uno misto in tempi finiti.

due stati distinti<sup>4</sup>. Il tutto è riassunto nella tabella 1.1, con ovvio significato dei ket relativi al sistema  $F$  nella descrizione di  $W$ :  $|ready\rangle$  indica uno stato di predisposizione alla misura, mentre  $|“O = -1”\rangle$  e  $|“O = 1”\rangle$  indicano gli autostati di una “variabile puntatrice” di  $F$  che rappresenta l’esito della misura da lui effettuata (ad esempio un foglio di carta in cui è segnato il risultato, o un bit di memoria in un computer che riceve i segnali dell’apparato di misura).

Osservatore	Osservato	Stato a $t_0$	Stato a $t_1$
$F$	$S$	$\alpha +\rangle + \beta -\rangle$	$ +\rangle$
$W$	$S - F$	$(\alpha +\rangle + \beta -\rangle) \otimes  ready\rangle$	$\alpha +\rangle \otimes  “O = 1”\rangle + \beta -\rangle \otimes  “O = -1”\rangle$

**Tabella 1.1:** Schema degli stati per l’esperimento dell’amico di Wigner

Il paradosso dell’esperimento mentale sta nella diversa descrizione che i due osservatori danno dello stesso evento applicando la stessa teoria:  $F$  ha esperienza di un collasso dello stato quantico e del “realizzarsi” di  $O$  in un valore preciso;  $W$ , senza misurare il sistema ma avendo una conoscenza completa dello stato iniziale, descrive lo stato finale come uno stato di entanglement, e in linea di principio potrebbe verificarlo attraverso misure degli effetti di interferenza.

Poiché l’ontologia della MQ standard, in accordo con la concezione comune della realtà, richiede che lo stato puro di un sistema in un dato istante sia unico e indipendente dalle relazioni con gli osservatori (o più in generale con gli altri sistemi), tale divergenza di descrizioni porta a una contraddizione.

Tuttavia, nella trattazione originale di Eugene Wigner tale contraddizione non sussiste, in quanto l’autore assume che la descrizione di  $S - F$  da parte di  $W$ , basata sull’evoluzione unitaria, sia falsa. Egli, infatti, ritiene che la coscienza di  $F$  non possa esistere in uno stato di sovrapposizione, e pone, quindi, la *coscienza* come causa del collasso, sostenendo l’impossibilità di usare l’evoluzione unitaria per descrivere misure compiute da sistemi coscienti.

La soluzione dell’interpretazione relazionale della MQ, invece, è di rifiutare il paradigma ontologico dello stato assoluto e di sostituirlo con degli stati relazionali: i resoconti di  $F$  e  $W$  sui sistemi da loro descritti sono entrambi corretti. Più in generale Rovelli riassume questa visione nell’asserzione<sup>5</sup>:

*Nella meccanica quantistica osservatori differenti possono dare diversi resoconti della stessa sequenza di eventi.*

Per Wigner, e solo rispetto a lui, il laboratorio intero si trova in un autentico stato di sovrapposizione quantistica; ciò nonostante, il suo amico non percepisce alcun misterioso stato di realtà sovrapposta di sé o del laboratorio, ma un’unica e determinata realtà in cui  $O$  ha assunto un valore ben preciso, insieme a tutte le conseguenze sul laboratorio stesso. Lo stato di un sistema è quindi sempre *relativo* a un altro sistema e non ha alcun significato pensare a un punto di vista assoluto sulla realtà fisica.

Come sarà discusso in seguito, il punto più problematico di questa interpretazione è che, senza aggiungere nulla alla descrizione appena fatta e applicando rigorosamente il postulato di von Neumann,  $W$ , misurando  $S$  dopo  $t_1$  nella stessa base usata da

<sup>4</sup>Tali effetti sono rilevabili, ad esempio, misurando il sistema  $S - F$  in un’osservabile con una base di autovettori ortogonale a quella di  $O$ .

<sup>5</sup>[3], pag. 4.

$F^6$ , può ottenere il risultato opposto a quello ottenuto dall'amico, senza con questo produrre alcuna inconsistenza, data la natura relativa degli stati quantici!

Ancora più paradossale è il fatto che, se dopo aver trovato  $|\psi_S\rangle = |-\rangle$ ,  $W$  “misurasse” anche  $F^7$ , dato che  $S$  e  $F$  secondo Wigner si trovano in entanglement e sono quindi completamente correlati, troverebbe con certezza  $|\psi_F\rangle = |“O = -1”\rangle$ , ovvero concretamente Wigner percepirebbe il suo amico dirgli di aver ottenuto il risultato negativo, magari mostrandogli anche l'esito dell'apparato di misura!

Pur apparendo completamente assurdo, questo scenario è totalmente consistente, come si vedrà meglio nei prossimi paragrafi, a patto però di accettare una realtà ad “*universi isola*”.

Una motivata perplessità su questa soluzione del paradosso dell'amico di Wigner potrebbe nascere riguardo all'effettiva esistenza degli effetti di interferenza. Infatti, non ci sono significative evidenze sperimentali di rilevazioni di fenomeni di interferenza per sistemi macroscopici, cosa che dà il nome di paradossi ai vari Gedankenexperiment che si occupano del problema della misura, e che spiega perché l'interpretazione ortodossa della MQ escluda l'applicabilità della stessa al mondo macroscopico.

Come vedremo meglio in seguito, Rovelli affronta la questione attraverso la teoria della decoerenza, secondo la quale, sotto certe condizioni generalmente verificate nelle interazioni con sistemi macroscopici<sup>8</sup>, gli effetti di interferenza vengano soppressi in un tempo brevissimo da una perdita di informazione dovuta all'interazione con un ambiente a elevato numero di gradi di libertà, portando lo stato del sistema a uno stato misto di tipo classico. Solo attraverso un controllo integrale dell'informazione sullo stato del macrosistema e quindi di tutti i suoi componenti (cosa ovviamente impossibile pragmaticamente), come abbiamo supposto per  $S - F$ , è possibile effettuare misure di effetti di interferenza come in precedenza.

## 1.2 I postulati della RQM

La più recente assiomatizzazione della versione originale della RQM si trova in un articolo di Carlo Rovelli e Andrea Di Biagio del 2021 [8], in cui gli autori correggono un tentativo di formalizzazione svolto da Jacques Pienaar in un articolo che mirava a evidenziare alcuni problemi della teoria [9]. Tale assiomatizzazione viene poi ripresa da Rovelli e Adlam nel sopra citato articolo [4]<sup>9</sup>, riportando gli stessi postulati in maniera più sintetica ma senza modificarne il significato. Di conseguenza, è corretto considerare i seguenti sei postulati (tratti da [4], traducendo dall'inglese) come l'assiomatizzazione più aggiornata della prima versione della RQM:

---

<sup>6</sup>Il che significa, ora e in seguito, (restando per semplicità nel caso di osservabili a spettro puramente discreto, facilmente estendibile al caso a spettro qualunque) misurare il sistema in un'osservabile con la stessa base ortonormale di autovettori dell'osservabile misurata da  $F$ , ovvero nella stessa osservabile.

<sup>7</sup>Ad esempio chiedendogli che risultato avesse ottenuto, ma comunque idealmente senza perdita della purezza dello stato, ovvero senza decoerenza.

<sup>8</sup>Per una trattazione più precisa si veda il paragrafo 1.3.

<sup>9</sup>Sebbene questo sia l'articolo in cui viene introdotta la seconda versione della RQM, i postulati a cui qui ci si riferisce sono riportati nella parte introduttiva dello stesso (pag. 2), e sono relativi alla prima versione.

1. **Fatti relativi:** *eventi, o fatti, possono accadere relativamente a qualunque sistema fisico.*
2. **Nessuna variabile nascosta:** *la meccanica quantistica unitaria è completa.*
3. **Le relazioni sono intrinseche:** *La relazione tra due sistemi qualunque  $A$  e  $B$  è indipendente da tutto ciò che accade al di fuori delle prospettive di questi sistemi.*
4. **Relatività dei confronti:** *è privo di significato confrontare i resoconti relativi a due sistemi qualunque, eccetto che invocando un terzo sistema rispetto al quale si fa il confronto.*
5. **Misure:** *un'interazione tra due sistemi causa una correlazione nelle interazioni tra questi due sistemi e un terzo sistema; ovvero, rispetto a un terzo sistema  $W$ , l'interazione tra i due sistemi  $S$  e  $F$  è descritta da un'evoluzione unitaria che potenzialmente lega (“entangles”) gli stati quantici di  $S$  e  $F$ .*
6. **Descrizioni internamente consistenti:** *in uno scenario in cui  $F$  misura  $S$ , e anche  $W$  misura  $S$  nella stessa base, e  $W$  dopo interagisce con  $F$  per “controllare la lettura” di una variabile puntatrice (cioè misurando  $F$  nell'appropriata “base puntatrice”), i due valori trovati sono in accordo.*

Adesso analizziamo in dettaglio ciascun postulato.

### 1.2.1 Primo postulato: tutti i sistemi sono quantistici

Fin dal primo articolo in cui venne presentata, la meccanica quantistica relazionale è stata dichiaratamente formulata traendo ispirazione dagli stravolgimenti che la teoria della relatività ristretta apportò alla meccanica newtoniana. Uno degli esempi di questa analogia si può intravedere nel primo postulato.

Il primo postulato della relatività ristretta sancisce che le leggi della fisica sono le stesse in ogni sistema di riferimento inerziale, in risposta all'incongruenza tra meccanica ed elettromagnetismo che aveva portato i fisici a ipotizzare l'esistenza di un sistema di riferimento privilegiato per quest'ultimo, l'etere. Analogamente, la RQM attraverso questo postulato rimuove la distinzione, tipica dell'interpretazione ortodossa della MQ, tra sistemi quantistici, quasi esclusivamente microscopici, che nelle misure adempiono sempre e solo al ruolo di osservati, e sistemi classici macroscopici che invece rivestono sempre il ruolo di osservatori, avendo l'inspiegato “potere” di far collassare la funzione d'onda di un sistema quantistico. La RQM elimina dunque alcuna distinzione tra mondo quantistico e mondo classico, liberandosi anche del binomio osservato/osservatore e del concetto di misura, cioè di interazione fra un sistema quantistico e uno classico come luogo esclusivo e privilegiato di collasso della funzione d'onda e realizzazione delle variabili fisiche<sup>10</sup>.

Diamo adesso una definizione<sup>11</sup> di quelli che più avanti vedremo essere gli elementi fondamentali della RQM: gli *eventi*.

---

<sup>10</sup>Qui e in seguito per “realizzazione” (*actualization*) si intende l'assumere un valore determinato nell'istante della misura da parte di un'osservabile. Inoltre d'ora in avanti utilizzeremo il termine “variabile fisica” al posto di “osservabile” per evitare ambiguità legate al concetto di osservatore, che come appena visto non appartiene alla RQM.

<sup>11</sup>[8], pag. 2.

**Evento:** *Un evento, o fatto, è la realizzazione del valore di una variabile fisica di un sistema rispetto a un altro sistema.*

Il primo postulato stabilisce dunque che gli eventi non possono accadere solo rispetto a osservatori macroscopici (esseri umani o apparati di misura), ma rispetto a qualunque sistema, anche microscopico. In particolare ciò comporta una simmetria di ruolo tra i sistemi coinvolti nell'evento: ciascun sistema interagente, macroscopico o microscopico, cosciente o non, è sia “osservatore” che “osservato”. Viene dunque postulato che, ad esempio, una particella, ogni volta che interagisce con un qualunque altro sistema, “fa esperienza” del realizzarsi di alcune specifiche variabili fisiche dell'altro sistema (che dipendono dal tipo di interazione e sistemi coinvolti) e quindi del collasso dello stato con cui lo descrive.

È importante chiarire che qui con “fare esperienza” non ci si riferisce ovviamente a un'ipotetica attività coscienziale della particella, come se, alla pari di un soggetto umano, ogni sistema fisico fosse in grado di percepire la realtà e riflettere su di essa. Tale espressione va invece intesa nel senso che la realtà fisica della particella (cioè l'evoluzione temporale dei sistemi con cui ha già interagito e che può quindi descrivere mediante degli stati quantici), subisce una modifica che dipende in genere dai valori realizzatisi nell'interazione e dalle specifiche hamiltoniane dei sistemi che descrive: ad esempio in un urto tra due particelle, ciascuna particella “fa esperienza” di un determinato valore dell'energia dell'altra, nel senso che in base a tale valore gli altri sistemi fisici attorno a sé seguiranno un moto differente.

Questo utilizzo del termine *esperienza* è indicativo del più ampio concetto di *conoscenza* utilizzato nella RQM. Rovelli infatti, nella sua replica a Časlav Brukner [8], chiarisce come la RQM non si occupi affatto di conoscenza coscienziale, ovvero della conoscenza umana comunemente intesa, ma di conoscenza o informazione *fisica*, nel senso appena esposto (e che verrà ulteriormente chiarito parlando del postulato 5). Quindi quando in [3], pag. 10, Rovelli afferma:

*La fisica è la teoria delle informazioni relative che i sistemi possiedono l'uno dell'altro.*

si riferisce proprio a questo concetto di informazione.

### 1.2.2 Secondo postulato: completezza della MQ

Il secondo postulato è molto chiaro: la RQM rifiuta l'esistenza di variabili nascoste e considera la meccanica quantistica completa<sup>12</sup>. In particolare descrivere l'evoluzione di un sistema isolato, di cui si conosce lo stato iniziale e l'hamiltoniana, attraverso l'operatore unitario di evoluzione temporale  $U(t) = e^{-\frac{i}{\hbar}Ht}$  [6] è sempre corretto, anche quando un suo sottosistema macroscopico misura un altro sottosistema: in tal caso infatti, come abbiamo visto, la misura non è altro che un'interazione che può essere descritta, in linea di principio, con l'adeguata hamiltoniana di interazione.

Se invece il sistema descritto interagisce proprio con quello a cui è riferita la descrizione (e quindi non è più isolato), ancora come visto in precedenza l'interazione provoca il collasso indeterministico dello stato secondo il postulato di proiezione di

---

<sup>12</sup>Per “completezza” ci si riferisce formalmente al concetto introdotto da Einstein, Podolsky e Rosen in [1].

von Neumann: il sistema descrivente (e solo esso!) fa esperienza di una rottura dell'evoluzione unitaria in quanto non ha informazione su sé stesso, ovvero sul suo stato e sull'hamiltoniana di interazione tra sé e il sistema, non potendosi dunque autodescrivere come sottosistema di un sistema isolato più grande. Tale ipotetica autoconoscenza è esclusa dall'ontologia fornita dalla RQM, per cui in questo contesto è privo di senso affermare che un qualunque sistema abbia conoscenza di sé (ricordando che ci si riferisce a un concetto *fisico* di conoscenza).

### 1.2.3 Terzo postulato: relazionalità degli stati quantici

La versione completa di questo postulato, formulata da Pienaar in [9] e approvata da Di Biagio e Rovelli in [8], segue dicendo:

*“In particolare, lo stato di  $B$  rispetto ad  $A$  dipende solo dalle osservazioni di  $A$  su  $B$  e dalla storia delle loro interazioni passate (analogamente per lo stato di  $A$  rispetto a  $B$ )”.*

È chiaro dunque che si possa parlare senza ambiguità dello stato di un qualunque sistema  $B$  rispetto a un qualunque *altro* sistema  $A$ , ovvero di uno *stato relativo*, poiché esso dipende esclusivamente dalla *relazione* tra questi sistemi, e quindi dall'informazione fisica che  $A$  ha di  $B$ , e non dalle informazioni che sistemi terzi possono avere di  $B$ , anche a seguito di misure: le descrizioni date da sistemi diversi sono totalmente *indipendenti*, e questo insieme al prossimo postulato può portare, come vedremo, a conseguenze apparentemente paradossali.

### 1.2.4 Quarto postulato: non esistono stati assoluti

Questo postulato è probabilmente quello che più caratterizza l'interpretazione relazionale della MQ (almeno nella sua prima versione), perché determina l'impossibilità di un punto di vista assoluto sugli stati quantici dei sistemi.

Non potendo confrontare “direttamente” le descrizioni che due sistemi  $A$  e  $B$  danno di un sistema  $S$ , ovvero gli stati relativi di  $S$  rispetto ad  $A$  o  $B$ , ma solo attraverso un ulteriore sistema  $C$ , e quindi tramite gli stati di  $S$ ,  $A$  e  $B$  relativi a  $C$ , nella RQM non c'è alcun modo di definire un punto di vista *assoluto*, ovvero di derivare delle asserzioni sul mondo che possano essere valide per qualunque sistema fisico e quindi costruire degli *stati assoluti*. Nella meccanica quantistica relazionale, dunque, gli stati sono sempre relativi.

A questo punto si può introdurre una notazione per poter parlare più agevolmente di stati quantici relativi.

**Notazione:** *Lo stato di un sistema  $S$  rispetto a un altro sistema  $O$  al tempo  $t$ , in notazione di Dirac, si indica con  $|\psi(t)\rangle_S^O$ , mettendo a pedice il sistema descritto e ad apice quello descrivente.*

### 1.2.5 Quinto postulato: l'informazione è correlazione

Il quinto postulato assicura che ogni interazione tra due sistemi, incluse le misure comunemente intese, produce un *entanglement* dei loro stati relativi a un terzo sistema (che conosca i loro stati iniziali e l'hamiltoniana del sistema complessivo), e

quindi una *correlazione* tra i valori di opportune variabili fisiche che si realizzerebbero nelle interazioni tra il terzo sistema e gli altri due.<sup>13</sup>

Un esempio di ciò è quanto visto nell'esperimento dell'amico di Wigner, dove gli stati  $|\psi\rangle_S^W$  e  $|\psi\rangle_F^W$  si legano, a seguito della misura compiuta da  $F$ , nello stato  $|\psi(t_1)\rangle_{S-F}^W = \alpha |+\rangle_S^W \otimes |"O = 1"\rangle_F^W + \beta |-\rangle_S^W \otimes |"O = -1"\rangle_F^W$ : se Wigner misurasse  $S$  nella base  $\{|+\rangle, |-\rangle\}$  e l'amico nella "base puntatrice", ovvero in un qualche indicatore dell'esito ottenuto dalla misura, e ripetesse l'esperimento da capo più volte, troverebbe una perfetta correlazione tra i risultati ottenuti dalle due misure.

Va sottolineato come il postulato non esprima un'equivalenza tra interazioni e correlazioni, in quanto la presenza di una correlazione, cioè di uno stato entangled, non implica che ci sia stato in passato un'interazione che l'abbia prodotta: più in generale ciò è espressione dell'ontologia della RQM, che come vedremo è fondata sugli eventi e relega gli stati quantici a meri strumenti matematici di previsione probabilistica.

Un ulteriore chiarimento dato da questo postulato è quello di esprimere come un sistema terzo descriva che due sistemi abbiano informazioni fisiche reciproche ottenute a seguito di un'interazione. Se, infatti, per i sistemi interagenti l'informazione fisica reciproca consiste nel mutamento dell'evoluzione temporale della propria realtà, un sistema terzo descrive questo scambio di informazioni proprio attraverso una correlazione: da un punto di vista *esterno* l'informazione è correlazione<sup>14</sup>.

È importante considerare, inoltre, che questo postulato non contraddice un presunto principio di perdita di informazione. Si potrebbe pensare, infatti, che l'interazione, producendo nuova informazione per i sistemi interagenti, costituisca una perdita di massimalità dell'informazione posseduta dal terzo sistema su di essi, e debba, quindi, causare una perdita di purezza dello stato con cui esso li descrive. Tale fenomeno si manifesta sempre nelle comuni misure macroscopiche, e, come si vedrà in seguito, è spiegato dalla teoria della decoerenza attraverso la sola evoluzione temporale unitaria, togliendo il bisogno di assumerlo come un principio generale della meccanica quantistica. L'esigenza di un tale principio deriva dalla concezione ontologica comune di concepire l'informazione come indipendente dall'osservatore. Postulando, invece, l'universale validità dell'evoluzione unitaria<sup>15</sup> nel descrivere interazioni dall'esterno, decade la necessità di un'informazione fisica assoluta: il fatto che per i sistemi interagenti esista della nuova informazione reciproca non implica che essa esista anche per sistemi esterni, se non in un senso diverso, ovvero come correlazione. Nella prima versione della RQM, dunque, l'informazione è *relativa*<sup>16</sup>.

<sup>13</sup>Ad esempio, nel caso delle comuni misure queste variabili possono essere la grandezza fisica misurata e la relativa "variabile puntatrice" dell'osservatore.

<sup>14</sup>Senza che ci si dilunghi troppo su questo aspetto, risulta indicativo della centralità di questa nozione di informazione il fatto che Rovelli, fin dal suo primo lavoro sulla RQM in [3], abbia tentato di formalizzare la stessa sulla base della teoria dell'informazione di Claude Elwood Shannon [10].

<sup>15</sup>La quale, appunto, produce l'entanglement dei sistemi interagenti.

<sup>16</sup>Alla luce di quanto si vedrà nel paragrafo 1.4, appare evidente che tale ruolo e natura dell'informazione fisica nell'ontologia della RQM discendono dalla relatività degli enti da cui essa concettualmente deriva, ovvero gli eventi e gli stati fisici.

### 1.2.6 Sesto postulato: la consistenza interna è garantita

Sulla scorta del postulato precedente, il postulato sei garantisce che un qualunque sistema, interagendo con due sistemi legati (secondo la sua prospettiva) in modo tale da realizzare le variabili fisiche i cui autostati formano lo stato entangled complessivo, troverà sempre dei valori in accordo con la correlazione attesa. Ciò garantisce, dunque, una consistenza logica tra la descrizione unitaria di un sistema e dei suoi componenti, e i possibili esiti delle misure su questo sistema.

Formalmente, usando la notazione introdotta e prendendo ad esempio l'esperimento dell'amico di Wigner, se negli istanti  $t_2$  e  $t_3$ , successivi a  $t_1$ ,  $W$  misurasse rispettivamente  $S$  e  $F$ , secondo il sesto postulato si avrebbero solo due possibili coppie di esiti:  $|\psi(t_2)\rangle_S^W = |+\rangle_S^W$  e  $|\psi(t_3)\rangle_F^W = |“O = 1”\rangle_F^W$ ; oppure  $|\psi(t_2)\rangle_S^W = |-\rangle_S^W$  e  $|\psi(t_3)\rangle_F^W = |“O = -1”\rangle_F^W$ . In questo modo Wigner può accertarsi che la correlazione prevista dall'evoluzione temporale sia effettivamente rispettata, e può confrontare il risultato della sua misura di  $S$  con l'esito dell'interazione con l'amico (cioè ad esempio con quanto egli gli riferisca in un dialogo).

È di fondamentale importanza notare come né, ovviamente, Wigner abbia accesso a  $|\psi(t_1)\rangle_S^F$ , né la RQM fornisca una garanzia che  $|\psi(t_1)\rangle_S^F = |\psi(t_2)\rangle_S^W$ , ovvero che quanto esperito da Wigner e dal suo amico nel misurare  $S$  effettivamente coincida. Ciò che è garantito coincidere sono esclusivamente i risultati delle due misure compiute dallo stesso  $W$  con la correlazione attesa, ovvero una *consistenza interna* della prospettiva di ciascun sistema.

D'altronde, se esistesse una garanzia di coincidenza di due stati relativi a sistemi diversi,  $F$  e  $W$ , esisterebbe un modo di confrontare i resoconti di due sistemi (potendo controllarne la consistenza) senza riferirsi a un terzo sistema, contraddicendo il postulato quattro.

Di conseguenza sia  $F$  che  $W$  al momento della “misura” reciproca avrebbero in ogni caso esperienza di una coincidenza tra quanto hanno trovato da sé misurando  $S$  e quanto trovano misurando tutte le opportune “variabili puntatrici” dell'amico correlate alla sua misura di  $S$  (dalla lettura dell'apparato di misura al dialogo con l'amico); tutto ciò nonostante l'amico possa aver misurato il risultato opposto nella propria prospettiva, nella quale si realizzerà quindi uno scenario opposto a quello dell'altro: facendo dunque un *confronto dall'esterno*, Wigner e il suo amico, a seguito di due esiti diversi della misura di  $S$ , si troveranno in due “*universi isola*”, ovvero in due realtà perfettamente consistenti al loro interno e senza possibilità di comunicazione. Tratteremo più approfonditamente tale questione parlando dell'ontologia della RQM.

## 1.3 Decoerenza e fatti stabili

Il fatto che in genere i sistemi macroscopici si comportino classicamente, ovvero non presentando mai fenomeni di interferenza quantistica e producendo sempre un collasso dello stato, a seguito di un'interazione, anche per altri sistemi “spettatori”, è il motivo che ha sempre spinto la maggior parte dei fisici a ritenere il mondo macroscopico come *non quantistico*.

A partire dagli anni '50 con la teoria della decoerenza quantistica [11] [12] venne data una plausibile spiegazione del perché sistemi a elevato numero di gradi di

libertà non producano effetti quantistici, dando quindi sostegno alle interpretazioni che ritengono la MQ applicabile a tutti i sistemi fisici. Oggi questa teoria ha ricevuto molte conferme sperimentali, in particolare nell'applicazione ai sistemi mesoscopici [13]. Esporrò qui brevemente in cosa consista e come essa sia utilizzata nella RQM.

Carlo Rovelli ha fatto uso di questa teoria come elemento a supporto della RQM fin dal lavoro del 1996<sup>17</sup>. Un articolo più recente di Di Biagio e Rovelli [14] si concentra su questo argomento e su come emerga la *stabilità* degli eventi che coinvolgono sistemi macroscopici. Qui viene data la seguente definizione:

**Evento stabile:** *Dato un insieme di  $N$  eventi relativi al sistema  $F$  mutualmente esclusivi,  $\{a_i^F \mid i = 1, \dots, N\}$ , tali eventi si dicono stabili rispetto a un sistema  $W$  se, dato un qualunque evento  $b^W$  relativo a  $W$ , vale:*

$$P(b^W) = \sum_{i=1}^N P(b^W | a_i^F) P(a_i^F) \quad (1.3.1)$$

dove  $P(b^W)$  e  $P(a_i^F)$  sono le probabilità che accadano rispettivamente  $b^W$  e  $a_i^F$  rispetto ai relativi sistemi, mentre  $P(b^W | a_i^F)$  è la probabilità che accada  $b^W$  rispetto a  $W$  dato l'accadere di  $a_i^F$  rispetto a  $F$ .

Ad esempio, gli  $a_i^F$  possono essere i possibili esiti di una misura che  $F$  compie su un sistema  $S$ <sup>18</sup>, mentre  $b^W$  un possibile esito di una misura fatta da  $W$  sul sistema  $S-F$ . La condizione di stabilità degli eventi coincide con il *teorema della probabilità totale*<sup>19</sup> della teoria della probabilità classica, che nella MQ si ritrova quando si ricavano stime di probabilità a partire dagli *stati misti*, ovvero stati che descrivono un'informazione non massimale su un sistema. Tali stime probabilistiche sono dette *epistemiche* in quanto indicative dello stato di conoscenza che l'osservatore ha del sistema, proprio come accade per gli eventi aleatori del mondo classico.

Tuttavia, questa equazione in genere non è verificata per gli eventi che riguardano stati puri, per i quali, invece, le probabilità (dette *ontiche*) sono date da moduli quadri di prodotti scalari nello spazio di Hilbert [6], che possono contenere addendi di *interferenza* che non sono interpretabili come probabilità che si verifichino degli eventi. Ad esempio, se nell'esperimento dell'amico di Wigner  $W$  alla fine misurasse  $S-F$  in una base che contiene lo stato  $|\rightarrow\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|+\rangle \otimes |"O=1"\rangle + |-\rangle \otimes |"O=-1"\rangle)$ , la probabilità che egli ottenga l'autovalore corrispondente a tale autovettore sarebbe (assumendo gli stati normalizzati):

$$\underbrace{|\langle \rightarrow | \psi(t_1) \rangle_{S-F}^W|^2}_{P(b^W)} = \left| \frac{\alpha + \beta}{\sqrt{2}} \right|^2 = \underbrace{\frac{1}{2}|\alpha|^2 + \frac{1}{2}|\beta|^2}_{\sum_{i=1}^N P(b^W | a_i^F) P(a_i^F)} + \underbrace{\frac{1}{2}(\alpha^* \beta + \alpha \beta^*)}_{\text{termine di interferenza}}$$

dove si vede chiaramente che il termine di interferenza quantistica rompe la condizione di stabilità.

<sup>17</sup>[3], pag. 4.

<sup>18</sup>In caso di variabili fisiche a spettro infinito la definizione va opportunamente riadattata.

<sup>19</sup>[15], pag. 48: data una partizione  $(B_i)_{i \in I}$  finita o numerabile dello spazio campionario  $\Omega$ , con  $P(B_i) > 0$  per ogni  $i \in I$ , allora, per  $A$  appartenente alla  $\sigma$ -algebra degli eventi  $\mathcal{F}$ , vale:

$$P(A) = \sum_{i \in I} P(A | B_i) P(B_i)$$

Se dunque la stabilità emerge spontaneamente a livello macroscopico, anche quando il sistema è legato a un sottosistema quantistico in sovrapposizione, come nel paradosso del gatto di Schroedinger [2], dovrà esistere un qualche processo che provochi il passaggio da stati puri a stati misti, ovvero una perdita di informazione sul sistema: questo è proprio il fenomeno della decoerenza.

Seguendo adesso la formulazione presentata in [14], si supponga che un sistema  $S$  interagisca con un sistema “ambiente”  $\mathcal{A}$ , così che un generico stato  $|\psi\rangle_{S-\mathcal{A}}^W$  del sistema  $S - \mathcal{A}$  relativo a un terzo sistema  $W$  si possa scrivere:

$$|\psi\rangle_{S-\mathcal{A}}^W = \sum_i c_i |O_i\rangle_S^W \otimes |\psi_i\rangle_{\mathcal{A}}^W$$

dove gli  $|O_i\rangle_S^W$  sono autostati di una variabile fisica<sup>20</sup>  $O$  di  $S$ , mentre gli  $|\psi_i\rangle_{\mathcal{A}}^W$  sono stati normalizzati di  $\mathcal{A}$ . Si definisca inoltre:

$$\epsilon := \max_{i \neq j} |{}_{S-\mathcal{A}}^W \langle \psi_i | \psi_j \rangle_{S-\mathcal{A}}^W|^2$$

Si supponga che  $W$  possa interagire con  $S$  e definiamo  $b$  un possibile evento realizzantesi in questa interazione. Poniamo adesso le due ipotesi fondamentali della teoria della decoerenza:  $\epsilon$  è molto piccolo;  $W$  è isolato da  $\mathcal{A}$ . La matrice densità ridotta di  $|\psi\rangle_{S-\mathcal{A}}^W$  rispetto al sottosistema  $S$  è ottenuta tracciando  $|\psi\rangle_{S-\mathcal{A}}^W {}_{S-\mathcal{A}}^W \langle \psi|$  rispetto a una base  $\{|\varphi_i\rangle\}$  di  $\mathcal{A}$ :

$$\begin{aligned} \rho_S^W &= Tr_{\mathcal{A}} |\psi\rangle_{S-\mathcal{A}}^W {}_{S-\mathcal{A}}^W \langle \psi| = \\ &= Tr_{\mathcal{A}} \left( \sum_{i,j} c_i c_j^* |O_i\rangle_S^W \otimes |\psi_i\rangle_{\mathcal{A}}^W {}_S^W \langle O_j| \otimes {}_{\mathcal{A}}^W \langle \psi_j| \right) = \\ &= \sum_k \sum_{i,j} c_i c_j^* \langle \varphi_k | \psi_i \rangle_{\mathcal{A}}^W |O_i\rangle_S^W {}_S^W \langle O_j| {}_{\mathcal{A}}^W \langle \psi_j | \varphi_k \rangle = \\ &\stackrel{(1)}{=} \sum_k \sum_{i,j} c_i c_j^* \left( \sum_{\alpha} a_{i,\alpha} \underbrace{\langle \varphi_k | \varphi_{\alpha} \rangle}_{\delta_{k,\alpha}} \right) \left( \sum_{\beta} b_{j,\beta}^* \underbrace{\langle \varphi_{\beta} | \varphi_k \rangle}_{\delta_{k,\beta}} \right) |O_i\rangle_S^W {}_S^W \langle O_j| = \\ &= \sum_{i,j} c_i c_j^* \left( \sum_k \underbrace{a_{i,k} b_{j,k}^*}_{{}_{\mathcal{A}}^W \langle \psi_j | \psi_i \rangle_{\mathcal{A}}^W} \right) |O_i\rangle_S^W {}_S^W \langle O_j| = \\ &\stackrel{\|\psi_i\|^2=1}{=} \sum_i |c_i|^2 |O_i\rangle_S^W {}_S^W \langle O_i| + \sum_{\substack{i,j \\ i \neq j}} c_i c_j^* {}_{\mathcal{A}}^W \langle \psi_i | \psi_j \rangle_{\mathcal{A}}^W |O_i\rangle_S^W {}_S^W \langle O_j| = \\ &\stackrel{(2)}{=} \sum_i |c_i|^2 |O_i\rangle_S^W {}_S^W \langle O_i| + O(\epsilon) \end{aligned}$$

dove in (1) si sono sviluppati  $|\psi_i\rangle$  e  $\langle \psi_j|$  lungo la base  $\{|\varphi_i\rangle\}$  e  $\delta_{i,j}$  è la delta di Kronecker, mentre (2) deriva dalla definizione di  $\epsilon$  e dal fatto che  $\epsilon \rightarrow 0$ .

L'ultima uguaglianza mostra che  $\rho$  rappresenta uno stato misto a meno di un  $O$ -grande di  $\epsilon$ . È possibile calcolare adesso  $P(b^W)$  tramite la matrice densità ridotta, dato che non c'è interazione tra  $W$  e  $\mathcal{A}$ . Notando che la probabilità che  $O$  si sia

<sup>20</sup>Che per semplicità supponiamo a spettro discreto e con autovalori privi di degenerazione.

realizzata nell'autovalore  $O_i$  relativamente a  $\mathcal{A}$  in un evento  $O_i^A$  è  $P(O_i^A) = |c_i|^2$ , e tracciando rispetto alla base  $\{|O_i\rangle\}$ :

$$\begin{aligned}
P(b^W) &= Tr_S(\rho_S^W |b\rangle_S^W \langle b|_S^W) = \\
&= \sum_k \langle O_k | \left( \sum_i |c_i|^2 |O_i\rangle_S^W \langle O_i|_S^W \langle O_i|b\rangle_S^W \langle b|_S^W + O(\epsilon) |b\rangle_S^W \langle b|_S^W \right) |O_k\rangle = \\
&= \sum_{k,i} |c_i|^2 \underbrace{\langle O_k|O_i\rangle_S^W}_{\delta_{k,i}} \langle O_i|b\rangle_S^W \langle b|O_k\rangle + O(\epsilon) \sum_k \langle O_k|b\rangle_S^W \langle b|O_k\rangle = \\
&= \sum_i \underbrace{|\langle O_i|b\rangle_S^W|^2}_{P(b^W|O_i^A)} |c_i|^2 + O(\epsilon) \underbrace{\sum_k |\langle O_k|b\rangle_S^W|^2}_{=1} = \\
&= \sum_i P(b^W|O_i^A)P(O_i^A) + O(\epsilon)
\end{aligned}$$

Di conseguenza, per  $\epsilon \rightarrow 0$ ,  $O(\epsilon) \rightarrow 0$  e i possibili eventi  $O_i^A$  dell'interazione tra  $S$  e  $\mathcal{A}$  tendono alla stabilità esatta *relativamente a  $W$* . Nel caso di una comune interazione tra sistemi macroscopici (e quindi di una misura sperimentale), tale condizione su  $\epsilon$ , per variabili che commutano con l'hamiltoniana di interazione tra  $S$  e  $\mathcal{A}$ , è già verificata dopo un tempo troppo breve da misurare<sup>21</sup>; mentre l'isolamento di  $W$  da  $\mathcal{A}$  è garantito dall'immenso numero di variabili microscopiche di cui è costituito il sistema ambiente, alla cui conoscenza è praticamente impossibile accedere in maniera significativa.

Secondo la RQM, dunque, la stabilità degli eventi macroscopici non è frutto di un collasso assoluto dello stato, ma proprio del fenomeno appena descritto. L'importante conseguenza di ciò è che sia teoricamente ammesso applicare l'evoluzione unitaria ai sistemi a elevato numero di gradi di libertà, anche se nel limite ideale per cui si possa avere informazione massimale di essi e di ogni loro sottosistema.

## 1.4 Ontologia della prima versione

Quando si parla di *ontologia* [16] nel contesto della filosofia della fisica ci si riferisce a una descrizione dei costituenti ultimi della realtà fisica, delle loro relazioni e struttura, e di come essi si collegano alla descrizione matematica della natura fornita dalle teorie fisiche. Ciò che qui si mette in discussione è cosa si possa assumere come davvero *esistente* in natura, sulla base delle migliori teorie scientifiche che abbiamo a disposizione. Ogni teoria, infatti, contiene asserzioni su enti e relazioni tra essi, e non è affatto immediato attribuire a essi un'esistenza vera e propria, e/o un'indipendenza dal pensiero umano e dai suoi limiti; anzi, tale dibattito filosofico è molto vivo, e ha prodotto due correnti principali di pensiero, a loro volta internamente molto diversificate: il *realismo* e l'*antirealismo scientifico*. Ad esempio, proprio secondo certe posizioni antirealiste<sup>22</sup>, gli enti teorici non direttamente osservabili tramite i sensi umani, come le particelle elementari, vanno assunti come dei meri strumenti previsionali, senza impegnarsi affatto nel sostenere o meno la loro esistenza effettiva: le teorie perdono dunque l'intento di descrivere la natura o di spiegare i fenomeni.

<sup>21</sup>Tali *tempi di decoerenza* sono stati, invece, misurati in esperimenti su sistemi mesoscopici [13].

<sup>22</sup>Come quella dello *strumentalismo* [17].

Interpretare la meccanica quantistica fa sorgere inevitabilmente diverse domande di natura ontologica, o viceversa, spesso dei paradigmi e preconetti ontologici, magari intuitivamente e inconsapevolmente assunti, risultano determinanti nella scelta di una certa interpretazione. Ad esempio, uno dei problemi ontologici più dibattuti in quest'ambito è quello dell'esistenza della funzione d'onda: è emblematico in merito il caso del paradosso EPR [1], in cui un'assunzione ontologica come il *Principio di realtà*<sup>23</sup> è utilizzata col fine di corroborare l'incompletezza della MQ. Ciò mostra come queste speculazioni filosofiche non siano del tutto estranee al dibattito strettamente scientifico: anzi, nella formulazione di teorie di impegno cosmologico, riguardanti la struttura fondamentale della natura, le questioni ontologiche si dimostrano essere realmente determinanti e capaci di smuovere veri e propri paradigmi scientifici<sup>24</sup>.

Un altro esempio di problema ontologico insito nelle varie interpretazioni della meccanica quantistica è quello relativo alla natura del collasso della funzione d'onda. L'origine di questo problema sta nell'incompatibilità tra la comune e intuitiva ontologia della fisica classica, pienamente adeguata alla concezione quotidiana della natura, basata sul meccanicismo determinista e sull'esistenza di proprietà fisiche indipendenti dall'osservatore: si tenta dunque di spiegare come sia possibile il realizzarsi delle osservabili solo durante le misure e l'aleatorietà e l'irreversibilità di tale fenomeno, ad esempio ipotizzando l'esistenza simultanea ma eterogenea di più universi in cui il collasso produce eventi differenti (come nell'*interpretazione a molti mondi*), oppure che esista un qualche fenomeno fisico ancora sconosciuto che produca il collasso in certe condizioni (dette *teorie oggettive del collasso*).

### 1.4.1 Un'ontologia relazionale

La prima versione della meccanica quantistica relazionale basa la sua ontologia sugli **eventi relativi**, ovvero sulle realizzazioni non deterministiche di variabili fisiche durante un'interazione. Tutti gli altri enti di cui parla la MQ **non** sono elementi di realtà, ma astrazioni epistemiche svolte da un sistema fisico cosciente e razionante come l'essere umano: i concetti di *sistema*, *stato relativo*, *variabile fisica* e *informazione* rappresentano una "*componente logica-epistemica*", ma non ontica, della descrizione della realtà fornita dalla MQ.

D'altronde, se analizziamo la prospettiva fisica di un singolo sistema  $S$  nell'ottica della RQM, rimuovendo tutti gli elementi non fisicamente primitivi ma derivati da altri, rimane un puro susseguirsi di eventi relativi a esso, alcuni riguardanti sistemi con cui era già venuto in contatto e che gli permettono di aggiornare gli stati relativi a essi, altri riguardanti sistemi nuovi, con cui non aveva ancora interagito e che dunque potrà *adesso* identificare come dei sistemi fisici. Gli stati relativi ai sistemi che

---

<sup>23</sup>Secondo la formulazione originale: "Se, senza disturbare un sistema, possiamo prevedere con probabilità pari all'unità il valore di una grandezza fisica, allora esiste un elemento della realtà fisica corrispondente a questa quantità fisica". Questo implica assumere come esistente la funzione d'onda anche al di fuori delle misure, o più in generale delle interazioni, e dunque una presa di posizione ontologica.

<sup>24</sup>A tal proposito non si può non citare il caso storico della teoria della relatività ristretta, che ha messo in discussione l'assunzione non solo fisica, ma anche ontologica, dell'esistenza di un tempo assoluto.

ha “conosciuto”<sup>25</sup> raccolgono tutta l’informazione che ha su di essi e gli consentono di effettuare previsioni probabilistiche attraverso la meccanica quantistica, se dotato di coscienza e raziocinio.

Ogni evento è dunque un “aggiornamento” dell’informazione posseduta da  $S$  su un altro sistema. Ricordiamo inoltre che possiamo parlare di  $S$  come di un *sistema* solo perché se ne sta parlando da una prospettiva in terza persona: in realtà esso non può interagire con sé stesso, dunque nella sua stessa prospettiva esso **non esiste** affatto!

Un sistema umano può quindi definire, pensare e discutere dei concetti ulteriori sopraccitati a partire dagli eventi di cui ha esperienza: in ciascun evento può identificare una determinata variabile fisica realizzatasi in un certo valore; mettendo insieme le informazioni provenienti da più eventi e le leggi della MQ, può identificare e distinguere i sistemi con cui ha interagito; attraverso l’informazione sulle variabili fisiche può costruire uno stato relativo per ciascun sistema, appartenente a un certo spazio di Hilbert, in accordo con il formalismo della MQ; infine, può usare questi stati per calcolare probabilità, valori medi di variabili, eccetera. Nella RQM, lo stato relativo resta dunque solo uno strumento di calcolo, privo di valore di realtà.

Per quanto riguarda il problema del collasso dello stato nelle interazioni, nella RQM esso è risolto in quanto il collasso coincide con l’evento stesso, ed è quindi elevato a elemento ontico primitivo, non necessitando di spiegazioni ulteriori. Tuttavia, come si è visto, esso rimane comunque relativo solo ai sistemi coinvolti nell’interazione, mentre i sistemi terzi continueranno a descrivere la stessa attraverso l’evoluzione unitaria. Anche l’indeterminismo proprio del collasso viene assunto come un elemento primitivo dell’ontologia, e anche per esso non è necessario cercare le cause in altri elementi con lo scopo di ripristinare il determinismo classico: la casualità è caratteristica essenziale degli eventi relativi<sup>26</sup>.

Un altro esempio di paradosso della MQ risolto dalla relatività degli stati propria di questa interpretazione è l’esperimento mentale di Frauchiger e Renner [18]. Tale esperimento consiste in una serie di misure effettuate da quattro sistemi fisici macroscopici, di cui due isolati in dei laboratori, i quali si descrivono l’un l’altro come dei sistemi quantistici, utilizzando dunque l’evoluzione unitaria, assumendo condizioni ideali analoghe a quelle dell’esperimento dell’amico di Wigner. Viene, dunque, descritta una possibile situazione, in cui, facendo valere contemporaneamente tre assunzioni, uno dei sistemi giunge a derivare una contraddizione logica usando la meccanica quantistica. Il paradosso produce, quindi, un “no-go theorem” per le interpretazioni della MQ: le tre assunzioni non possono essere tutte vere. Tali assunzioni, sinteticamente, sono:

- **(Q)**: *Ogni sistema usa la regola di Born della meccanica quantistica per calcolare la probabilità di trovare un certo esito di una misura.*
- **(C)**: *Se un sistema  $A$  è certo che un altro sistema  $A'$  è a sua volta certo che una variabile  $x$  abbia valore  $\xi$  al tempo  $t$ , allora  $A$  può derivare di essere certo che  $x = \xi$  al tempo  $t$ .*

---

<sup>25</sup>Non nel senso di una conoscenza coscienziale, ma di una “fisica”, basata sulle interazioni tra sistemi.

<sup>26</sup>A meno di eventi con probabilità unitaria di accadere.

- **(S)**: *Se un sistema è certo che  $x = \xi$  al tempo  $t$ , allora deve negare di essere certo che  $x \neq \xi$  al tempo  $t$ .*

La prima versione della RQM rifiuta l'assunzione **(C)**, in quanto, per la relatività degli stati e degli eventi, il fatto che  $A'$  possa prevedere con certezza il valore della variabile  $x$  non implica che per  $A$  tale valore sia altrettanto certo, o tantomeno reale.

Una peculiare caratteristica della filosofia che supporta la RQM, più volte sottolineata da Rovelli, è che essa sia profondamente realista. Infatti, nonostante la peculiare ontologia, si ha una forte presa di posizione da parte dei sostenitori sul fatto che gli eventi relativi esistano davvero, anche per interazioni tra sistemi microscopici, per i quali invece la MQ standard non assume mai un collasso dello stato. Tuttavia è evidente come la realtà costruita su questa ontologia sia molto scarna, in quanto ridotta esclusivamente ai singoli eventi relativi, lasciando un vuoto di esistenza tra un evento e l'altro. Per questo motivo, infatti, si parla di una “*flash*” *ontology* [19]: al di fuori delle interazioni si ha solo una descrizione dei sistemi basata sull'evoluzione unitaria degli stati; ma, poiché si è detto che sia i sistemi che gli stati non hanno valore di realtà, tale descrizione ha solo lo scopo di condurre previsioni sugli eventi futuri (o analisi probabilistiche dei possibili eventi passati non avvenuti). La realtà tra un evento e l'altro è dunque *vuota*.

Ciò ha suscitato forti critiche nei confronti della RQM, tra cui accuse di antirealismo, dato il forte contrasto con il realismo dell'ontologia classica che assume un'esistenza continua dei sistemi fisici, e indipendente dai rapporti tra essi<sup>27</sup>. Tuttavia la RQM non nega affatto l'esistenza di una realtà fisica, bensì la riformula in termini di eventi, in modo del tutto coerente con la meccanica quantistica<sup>28</sup>, per cui tali accuse sono valide solo nella misura in cui si rimanga vincolati a un concetto classico di realtà.

A riprova della portata rivoluzionaria della meccanica quantistica relazionale vale la pena evidenziare lo spostamento di paradigma compiuto: la RQM supera l'ontologia della MQ standard basata sull'esistenza di enti fisici autonomi, sistemi-oggetto con uno stato sempre ben determinato (retaggio dell'ontologia classica proveniente dall'esperienza quotidiana di un continuum spaziotemporale e di corpi macroscopici permanenti in questo continuum), per spostarsi sull'esistenza di eventi, che, se ancora visti dal punto di vista ontologico classico, sono necessariamente *relazioni* tra enti. La relazione viene assunta come nuovo paradigma ontologico, come ciò che davvero esiste.

## 1.4.2 Universi isola e intersoggettività

Abbiamo già parlato del problema degli “universi isola”, e, come anticipato, risulta evidente che accettare questa descrizione della realtà fisica abbia un'importante portata ontologica. Infatti, non a caso questo argomento costituisce un'altra accusa mossa nei confronti dell'ontologia della RQM, almeno nella sua prima ver-

<sup>27</sup>Un altro caso in cui la RQM si discosta dal realismo è la soluzione proposta per il paradosso EPR in [20]. Qui, infatti, gli autori applicano l'interpretazione relazionale per motivare il rifiuto del principio einsteiniano di realtà, a favore del principio di località e dell'assunzione di completezza della MQ.

<sup>28</sup>Inoltre, secondo [4], pag. 1, sembra che la meccanica quantistica relazionale sia estendibile alla MQ relativistica, alla teoria quantistica dei campi e alla gravità quantistica.

sione che stiamo considerando. In particolare la RQM è stata accusata di generare un *solipsismo* [9], ovvero una realtà in cui ogni sistema fisico, ciascun essere umano compreso, sarebbe costretto a fare esperienza di un mondo diverso ed esclusivamente proprio, privo di alcuna comunicazione con altri sistemi, essendo preclusa la possibilità di conoscere la loro prospettiva.

Di Biagio e Rovelli difendono la RQM da tale accusa in [8] partendo da un'analisi del concetto di *conoscenza*. Essi distinguono tra una conoscenza “naturale”, cioè fisica, legata alle variabili fisiche del sistema dotato di conoscenza; e una “idealistica” che si colloca in un piano extra-fisico, magari coscienziale. Ad esempio due diversi sistemi umani,  $F$  e  $W$ , che osservano un terzo sistema  $S$ , possiedono conoscenza in entrambi i sensi appena citati: sia nelle loro coscienze (che è il significato comunemente dato al termine “conoscenza”), sia fisicamente attraverso lo stato fisico delle loro sinapsi, dei PC o fogli di carta in cui appuntano le loro osservazioni, eccetera. Sospendendo il giudizio in merito alla conoscenza coscienziale, assumiamo questa seconda forma di conoscenza come l'unica che abbia effettivamente senso considerare in merito alle questioni riguardo la comunicazione di conoscenze tra sistemi.

Infatti, riprendendo l'esempio di paradosso della comunicazione riportato alla fine del paragrafo 1.1, Wigner e il suo amico possono misurare valori diversi di  $O$  e quindi avere uno stato di coscienza differente: confrontandosi l'un l'altro non possono in alcun modo avere esperienza dello stato di coscienza altrui, poiché il confronto consiste esclusivamente nella misura delle variabili puntatrici reciproche, e quindi dei loro stati *fisici*. Dunque l'informazione è essenzialmente fisica, come tale è soggetta alle leggi della MQ (ad esempio può essere distrutta da nuove interazione per il principio di indeterminazione di Heisenberg), e il mezzo di comunicazione è proprio l'interazione tra sistemi.

Tuttavia ciò lascia aperto un altro problema: nonostante Wigner abbia la possibilità di misurare la variabile puntatrice di  $F$ , leggendo i risultati della sua misura e accedendo dunque alla sua informazione fisica, egli ottiene comunque degli esiti non necessariamente coincidenti con quanto vissuto dall'amico nel suo differente universo fisico, come visto in precedenza. L'informazione fisica dell'amico a cui Wigner ha accesso (racchiusa nello stato relativo  $|\psi\rangle_F^W$ ) resta comunque un'informazione interna all'universo *di Wigner*, che per quanto sia coerente con le misure effettuate da Wigner stesso grazie al sesto postulato, non comunica affatto l'informazione (il valore della variabile puntatrice) realizzatosi nell'evento relativo tra  $S$  e  $F$  (cioè  $|\psi\rangle_F^S$ ): tale informazione resta nell'universo isola di  $S$ , così come  $|\psi\rangle_S^F$  resta in quello di  $F$ , senza la possibilità di comunicarla a  $W$ .

La soluzione adesso proposta da Di Biagio e Rovelli parte dal guardare il problema da un punto di vista diverso. Secondo la RQM, infatti, la possibilità che prospettive diverse siano discordanti è sempre accompagnata dalla possibilità che invece esse coincidano. Inoltre tale discordanza o concordanza di prospettive è comunque fisicamente non osservabile in alcun modo da parte di qualunque sistema, e poiché secondo il quarto postulato è privo di senso svolgere confronti tra prospettive se non internamente alla prospettiva di un sistema stesso<sup>29</sup>, appare evidente che tale problema risulti insensato secondo la RQM stessa, presupponendo un punto di vista assoluto sulla realtà fisica.

---

<sup>29</sup>Che però, come detto, ha accesso solo a una *sua* informazione su questi sistemi, restando sempre dentro la propria prospettiva.

La via d'uscita presa dagli autori è dunque un vero e proprio bypass del problema coerente con la teoria stessa. Più precisamente e filosoficamente, tale operazione si potrebbe definire come un esempio di applicazione del *principio del "rasoio di Ockham"* [21], il quale consiste nel ridurre agli elementi essenziali una spiegazione o una teoria, eliminando invece quelli superflui, anche se logicamente compatibili: ciò che qui è superfluo è proprio la richiesta di confronto assoluto tra prospettive. Infatti, l'isolamento degli universi è del tutto irrilevante per la fisica di un qualunque osservatore, e quindi per una teoria fisica in generale; ciò che lo rende un paradosso è la concezione ontologica stessa a cui siamo comunemente abituati, che ci suggerisce che una buona teoria fisica dia una descrizione del mondo *intersoggettivamente* valida.

La chiave della questione è, infatti, il concetto di intersoggettività<sup>30</sup>: essa è infatti una delle condizioni della verificabilità empirica di una teoria scientifica, la quale sembra essere ostacolata nel mondo descritto dalla RQM. Tuttavia tale concetto non prescinde dalle presupposizioni ontologiche, e secondo l'ontologia classica esso è fondato sull'indipendenza della realtà fisica dall'osservatore. Ma questo non è l'unico modo di fondare e definire il concetto di intersoggettività: nella prima versione della RQM esso è infatti basato sulla possibilità di interazione fisica e sulla coerenza interna della prospettiva di ciascun sistema. Denominiamo questo nuovo concetto: **"intersoggettività fisica"**.

D'altronde, tale punto di vista ontologico sull'intersoggettività si adatta anche a una visione classica degli eventi fisici, corroborando ulteriormente la propria validità e plausibilità: supponiamo che  $F$  lanci una moneta, ne annoti l'esito (testa o croce) e la riponga sotto un bicchiere mantenendone il verso trovato; ora  $W$  può alzare il bicchiere e osservare lo stato della moneta, oppure leggere l'annotazione di  $F$ . La meccanica classica e la sua ontologia ci dicono che lo stato della moneta sia già determinato e indipendente dagli osservatori, e ciò è sufficiente a garantirne l'intersoggettività.

Tuttavia, si può immaginare una situazione in cui, pur mantenendo le stesse leggi classiche,  $W$  trovi sia lo stato della moneta che l'annotazione diversi da quelli osservati da  $F$ , proprio come nell'esempio quantistico. Anche in questo caso si avrebbero degli universi isola, pur restando la meccanica completamente classica. Ciò che è cambiato è l'*ontologia* adottata.

A questo punto, anche qui si può fondare un'intersoggettività fisica, basata solo sulla coerenza interna e sospendere il giudizio riguardo alle questioni che richiedono un punto di vista assoluto.

---

<sup>30</sup>Per approfondire la questione dell'intersoggettività nella meccanica quantistica si veda [22].

# Capitolo 2

## Un nuovo paradigma: l'informazione è fisica

Quella che in questa tesi viene indicata come una “seconda versione” della meccanica quantistica relazionale, è il frutto di una precisa modifica ai postulati della teoria, presentata da Emily Adlam e Carlo Rovelli in [4]. Tale modifica costituisce un passo indietro da parte degli autori nel sostenere la radicale ontologia degli universi isola. La motivazione di tale revisione sta nel rafforzamento di un principio già presente nella prima versione: l'informazione è fisica, e dunque fisicamente comunicabile.

Assumendo ora un ruolo più centrale, questo principio risulta incompatibile con l'isolamento delle prospettive dei sistemi. Infine gli autori spiegano come la prima versione della loro teoria produrrebbe dei paradossi risolvibili solo attraverso questa revisione.

### 2.1 Sostituzione del quarto postulato

Riproponendo il consueto esempio del paradosso dell'amico di Wigner, in [4] Adlam e Rovelli motivano la loro revisione della teoria analizzando più dettagliatamente il problema del confronto dei risultati delle misure compiute da  $F$  e  $W$  (rispettivamente  $A$  e  $B$  in [4]). Proprio come qui svolto nel paragrafo 1.4.2, gli autori mostrano l'impossibilità di uno scambio *fisico* di informazioni appartenenti a due prospettive distinte e il conseguente isolamento tra gli universi relativi a diversi sistemi, il quale, secondo gli autori, inficia la validità del principio di fisicità dell'informazione.

Infatti, nella nuova versione della teoria, tale principio è rafforzato dal fatto che adesso usi un concetto più forte di “informazione”, cioè (riprendendo la precedente distinzione di intersoggettività) quello basato su un'intersoggettività classica, per la quale acquisire informazione su un sistema significa conoscere i valori delle sue variabili fisiche secondo la sua stessa prospettiva e quelle dei sistemi che hanno interagito con esso, e non solo secondo la prospettiva dell'osservatore (cosa che si ha invece nella prima versione della RQM, che fa uso di un'intersoggettività fisica). Si recupera la richiesta che  $W$  possa effettivamente conoscere  $|\psi\rangle_S^F$  e  $|\psi\rangle_F^S$ , ovvero che

valga *sempre*:

$$\begin{cases} |\psi\rangle_S^W = |\psi\rangle_S^F \\ |\psi\rangle_F^W = |\psi\rangle_F^S \end{cases} \quad (2.1.1)$$

rendendo, dunque, le interazioni fisiche delle possibilità di *collegamento* tra prospettive diverse.

È dunque evidente il mutamento di prospettiva ontologica che sottosta a questa revisione. Come vedremo ciò ha profonde implicazioni sia sul piano strettamente ontologico, sia su quello fisico e di interpretazione della MQ: in particolare ciò costringerà a definire dei nuovi enti fisici.

Dall’analisi del problema, emerge che il quarto postulato “**Relatività dei confronti**” sia responsabile dell’isolamento degli universi, in quanto impedisce un confronto diretto e assoluto tra di essi, che non sia a sua volta relativo a un altro sistema. Secondo tale postulato, infatti, risulta fisicamente sensato confrontare tra loro solo stati relativi a una stessa prospettiva.

Appare, quindi, chiara la necessità di sostituire tale postulato con uno che permetta la comunicabilità tra universi che si sta cercando. Al tempo stesso, tuttavia, tale postulato deve pur garantire una coerenza con le leggi della meccanica quantistica e con gli altri postulati della RQM, in particolare con l’evoluzione unitaria dei sistemi interagenti e con il principio di indeterminazione.

Il nuovo postulato presentato in [4] è dunque<sup>1</sup>:

**Collegamenti interprospettivi:** *In uno scenario in cui un osservatore  $F$  misura una variabile  $V$  di un sistema  $S$ , supposto che  $F$  non si sottoponga ad alcuna interazione tale da distruggere l’informazione su  $V$  conservata nelle variabili fisiche di  $F$ , se  $W$  in seguito misura la variabile fisica rappresentante l’informazione di  $F$  riguardo la variabile  $V$ , allora il risultato della misura di  $W$  coinciderà con quello della misura di  $F$ .*

Come si può vedere, il postulato preserva la possibilità di distruggere l’informazione conservata in una certa variabile fisica attraverso interazioni in cui si realizzano variabili incompatibili con la variabile in questione, in accordo con il principio di indeterminazione. Ciò è fondamentale affinché l’informazione sia davvero *fisica*, in quanto come tale deve soddisfare le leggi della MQ.

Quindi, fino a quando l’informazione contenuta nelle variabili fisiche di  $F$  è preservata, è possibile accedervi “misurando” le stesse: un sistema  $W$  che eseguirà tale misura troverà dei risultati in accordo con le (2.1.1). Ciò però non è dovuto al fatto che lo stato di  $S - F$  relativo a  $W$  prima della misura sia già collassato in uno stato  $|\psi\rangle_S^F \otimes |\psi\rangle_F^S$ , come se l’interazione tra  $S$  e  $F$  implicasse un collasso assoluto, valido per tutti i sistemi terzi. Infatti, i sistemi esterni all’interazione, come  $W$ , continuano a descrivere la stessa attraverso l’evoluzione unitaria – la quale produce un entanglement tra i sistemi  $S$  e  $F$  – e possono ancora misurare effetti di interferenza dovuti alla sovrapposizione quantistica degli autostati delle variabili realizzatesi nell’interazione. Ciononostante, se viene effettuata una misura di tali variabili, ne-

---

<sup>1</sup>Nel testo originale in inglese si fa uso dei nomi “Alice” e “Bob” al posto di, rispettivamente,  $F$  e  $W$ . Qui si preferisce utilizzare i secondi per una questione di chiarezza espositiva. Inoltre è fatto uso dagli autori dei termini “osservatore” e “misura”, che, come spiegato in precedenza, non appartengono formalmente al vocabolario della RQM. Vanno dunque intesi rispettivamente come “sistema fisico” e “interazione fisica”.

cessariamente si troverà l'unico risultato tale da soddisfare le (2.1.1)<sup>2</sup>.

Tale collasso “pilotato” dello stato puro di sovrapposizione in un autostato “privilegiato” non è formalizzabile attraverso le leggi della MQ standard, in quanto viola l'indeterminismo della misura. Questa insufficienza della MQ nello spiegare il fenomeno del collasso, necessita, dunque, una modifica della stessa (cioè, appunto, una violazione dell'indeterminismo per misure di variabili che portano informazione) e l'introduzione di un ente fisico nuovo, che si aggiungerà all'ontologia della RQM: le **storie**.

## 2.2 Ontologia della seconda versione

Come conseguenza del postulato “**Collegamenti interprospettivi**”, si ha una parziale derelativizzazione degli eventi fisici: essi continuano a essere relativi in quanto coinvolgono direttamente solo i due sistemi interagenti, dei quali si realizzano i valori di alcune opportune variabili fisiche e che per primi acquistano informazione sulle variabili reciproche realizzatesi; tuttavia, essi sono assoluti nella misura in cui i valori che si realizzano sono accessibili a tutti gli altri sistemi fisici mediante opportune interazioni, fino a quando l'informazione che portano non verrà distrutta. Gli eventi restano, dunque, i principali costituenti dell'ontologia (la quale rimane una flash ontology), ma diventano indipendenti dall'osservatore: gli universi, di cui distinti sistemi hanno esperienza, perdono il loro isolamento e l'accusa di solipsismo alla RQM crolla senza dover ricorrere a giustificazioni filosofiche come il principio del rasoio di Ockham o ridefinizioni del concetto di intersoggettività.

Lo stato del sistema, al contrario, continua a essere del tutto relativo, in quanto esprime esclusivamente la relazione tra due sistemi, ovvero l'insieme di interazioni che li hanno coinvolti e l'informazione reciproca che possiedono. Al contrario, assume un maggiore peso ontologico il concetto stesso di *sistema*: mentre prima un sistema “osservatore” poteva definire un sistema solo entro la propria prospettiva, a partire dagli eventi relativi che lo riguardavano; adesso, invece, può definire sistemi ontologicamente assoluti, cioè esistenti per qualunque altro sistema, perché basati sulle realizzazioni assolute delle loro variabili fisiche.

Infine, il concetto di informazione fisica viene assolutizzato, ma non del tutto, similmente agli eventi: l'informazione creata in nuove interazioni è adesso registrata nelle variabili fisiche dei sistemi interagenti ed è accessibile a tutti i sistemi esterni mediante apposite “misure”; tuttavia, ciò non significa che prima di queste “misure” essa esista già nelle prospettive dei sistemi esterni, i quali in tal caso dovrebbero sperimentare una perdita di massimalità dell'informazione a seguito dell'interazione, e quindi una perdita di purezza dello stato e una rottura dell'evoluzione unitaria, in contrasto con quanto invece postulato.

L'informazione fisica che un sistema possiede di un altro è, dunque, assoluta nel suo contenuto, ma resta pur sempre relazionale, e quindi relativa, nella sua quantità.

---

<sup>2</sup>Eliminata la possibilità di violare le (2.1.1), si può notare che l'unica differenza a livello strettamente fisico tra la seconda versione della RQM e la MQ standard sta proprio nel fatto che Wigner possa idealmente misurare effetti di interferenza da parte del sistema  $S - F$ . Nell'ottica standard ciò non sarebbe possibile, in quanto la misura che  $F$  compie su  $S$  farebbe collassare il sistema  $S - F$  su un certo autostato per tutti i sistemi terzi.

Il prezzo da pagare per tale soluzione diretta al problema del solipsismo sta, come anticipato, nel dover tener traccia, fino alla loro distruzione, dei valori delle variabili realizzatesi in un evento come di un qualcosa di assoluto, indipendente dagli osservatori ed esistente, almeno nel senso in cui si realizzeranno nuovamente a ogni prossima realizzazione delle stesse variabili. Infatti, come visto, gli stati relativi **non** trasportano tale informazione assoluta, che si costituisce, dunque, come un extra rispetto all'informazione relativa contenuta in essi e su cui si basa l'ontologia della prima versione.

La raccolta di tali valori, mantenuta aggiornata ogni volta che se ne creano di nuovi e/o se ne distruggono di già esistenti, costituisce una “*storia*” del sistema. Essa, proprio come gli eventi, ha valenza ontica ed è assoluta: è ontica, cioè è posta come costituente della realtà fisica, in quanto non è un mero registro dei valori assunti dalle variabili del sistema, ma l'insieme dei risultati di possibili realizzazioni future non derivabili dall'evoluzione unitaria; è assoluta perché tali valori non sono validi solo per un certo sistema, ma per qualunque sistema con cui si possa avere un'interazione futura.

Quando  $F$  interagisce con  $S$ , realizzandone una qualche variabile, esso apprende un'informazione già contenuta nella storia di  $S$ , oppure ne crea una nuova, aggiornandone la storia. Lo stato  $|\psi\rangle_S^F$  conterrà tale informazione, ma  $|\psi\rangle_S^W$ , relativo a un terzo sistema  $W$ , non la conterrà comunque, presentando solo una sovrapposizione quantistica, pur essendo l'informazione fisica creatasi nell'evento  $S - F$  assoluta.  $W$  potrà quindi conoscere tale informazione direttamente, interagendo con  $S$  o  $F$ , oppure indirettamente, interagendo con altri sistemi che hanno già acquisito questa informazione: il nuovo postulato, infatti, garantisce la possibilità di una comunicazione indiretta di informazioni attraverso *catene* di interazioni.

È importante notare, inoltre, che sono gli eventi ad aggiornare la storia di un sistema, non gli stati. Infatti, se un sistema può prevedere con certezza il valore di una variabile fisica di un altro sistema, grazie allo stato con cui lo descrive, e non ha ancora misurato tale variabile, ciò non significa che tale valore si sia già realizzato nella sua storia: se altri sistemi dovessero misurare questa variabile potrebbero trovare valori diversi. Per questo motivo anche la seconda versione della RQM consente di rigettare l'assunzione (C) dell'esperimento di Frauchiger e Renner.

A fronte di un più profondo concetto di informazione, fondato sulla fisicità della stessa, la seconda versione della RQM richiede l'aggiunta di un ulteriore elemento ontologico non necessario per la prima versione, a scapito della semplicità della teoria e della sua ontologia.

Tale perdita di semplicità ed essenzialità della teoria appare ragionevole alla luce di quanto esposto nel paragrafo 1.4.2: richiedere un accordo tra prospettive, tramite un confronto esterno a qualunque prospettiva fisica, è superfluo nell'economia della teoria, e costituisce in principio una rinuncia alla semplicità della stessa.

# Conclusioni

La meccanica quantistica relazionale si mostra capace di risolvere, almeno da quanto esposto in questa sede, i principali problemi interpretativi della MQ, come il problema del collasso della funzione d'onda, il paradosso dell'amico di Wigner o il paradosso EPR. Tale soluzione avviene agendo non sulla teoria fisica in sé, ma sull'ontologia che ne sottosta, eliminando qualunque dualismo ontologico che divida la realtà in sistemi quantistici e classici, e soprattutto adoperando un ribaltamento di ruoli negli elementi degli enti ontici: si pone così un'*ontologia relazionale*, in cui gli elementi fondamentali della realtà non sono i sistemi e gli stati ma le interazioni tra essi, cioè gli *eventi*.

Estendendo l'uso della meccanica quantistica ai sistemi macroscopici – la cui stabilità è spiegata per mezzo della teoria della decoerenza – e introducendo la relatività dello stato fisico, paradossi come quello del gatto di Schroedinger si risolvono senza bisogno di ipotizzare che il sistema macroscopico descritto (in questo caso, il gatto) “viva” una strana realtà di sovrapposizione. Ciò che invece accade è che osservatori diversi descrivono stati diversi di uno stesso sistema, il quale può, dunque, essere collassato per un certo osservatore e al tempo stesso in sovrapposizione quantistica per un altro.

La principale criticità della RQM sta nella sua difficoltà nel trattare i confronti tra prospettive diverse, e dunque la comunicazione tra osservatori. Come si è visto, ciò ha prodotto una revisione della teoria da parte dei suoi sostenitori, traendo un passo indietro nella radicalità della sua ontologia.

La prima versione che abbiamo analizzato risolve il problema per una via nettamente filosofica, attraverso il principio di economia – o del rasoio di Ockham. La seconda invece riporta la questione a carico della teoria interpretativa stessa, la quale subisce una modifica ai postulati e introduce il nuovo elemento ontico delle *storie*.

A ben vedere, un confronto tra le due versioni non può favorirne una a scapito dell'altra, a meno di non affrontare un discorso filosofico che esula dagli intenti di un'interpretazione della meccanica quantistica: infatti, si tratterebbe di ragionare sulla validità del principio di economia, ovvero se sia da preferire o meno una teoria più semplice di un'altra. Ma tale analisi non arricchirebbe affatto la comprensione del mondo fisico più di quanto una qualunque delle due versioni della RQM faccia già, appartenendo a una sfera di concetti filosofici estranei alle domande della fisica.

Si può, dunque, concludere che entrambe le due versioni della RQM analizzate siano delle valide interpretazioni della meccanica quantistica e che, inoltre, nonostante le diverse ontologie, esse siano del tutto equivalenti nelle loro implicazioni interpretative o strettamente fisiche. La revisione adoperata da Adlam e Rovelli in [4] ha dunque solamente il vantaggio pragmatico di fornire un'ontologia più vicina

alla concezione comune del mondo, a scapito, però, di una maggiore complessità della stessa.

# Bibliografia

- [1] Albert Einstein, Boris Podolsky, and Nathan Rosen. Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete? *Physical review*, 47(10):777, 1935.
- [2] Erwin Schrödinger. Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik. *Naturwissenschaften*, 23(50):844–849, 1935.
- [3] Carlo Rovelli. Relational quantum mechanics. *International Journal of Theoretical Physics*, 35(8):1637–1678, 1996.
- [4] Emily Adlam and Carlo Rovelli. Information is physical: cross-perspective links in relational quantum mechanics. *arXiv preprint arXiv:2203.13342*, 2022.
- [5] Eugene P Wigner. Remarks on the mind-body question. In *Philosophical reflections and syntheses*, pages 247–260. Springer, 1995.
- [6] David J Griffiths, Franco Ciccacci, and Luigi Quartapelle. *Introduzione alla meccanica quantistica*. CEA, 2005.
- [7] Klaus Hepp. Quantum theory of measurement and macroscopic observables. Technical report, Eidgenoessische Technische Hochschule, Zurich, 1972.
- [8] Andrea Di Biagio and Carlo Rovelli. Relational quantum mechanics is about facts, not states: A reply to Pienaar and Brukner. *Foundations of Physics*, 52(3):1–21, 2022.
- [9] Jacques Pienaar. A quintet of quandaries: Five no-go theorems for relational quantum mechanics. *Foundations of Physics*, 51(5):1–27, 2021.
- [10] Claude Elwood Shannon. A mathematical theory of communication. *The Bell system technical journal*, 27(3):379–423, 1948.
- [11] H Dieter Zeh. On the interpretation of measurement in quantum theory. *Foundations of Physics*, 1(1):69–76, 1970.
- [12] Wojciech H Zurek. Environment-induced superselection rules. *Physical review D*, 26(8):1862, 1982.
- [13] Maximilian Schlosshauer. Experimental observation of decoherence. In *Compendium of Quantum Physics*, pages 223–229. Springer, 2009.
- [14] Andrea Di Biagio and Carlo Rovelli. Stable facts, relative facts. *Foundations of Physics*, 51(1):1–13, 2021.
- [15] Andrea Pascucci. *Teoria Della Probabilità*. Springer, 2020.

- [16] Peter J Lewis. *Quantum ontology: A guide to the metaphysics of quantum mechanics*. Oxford University Press, 2016.
- [17] Elena Castellani and Matteo Morganti. *La filosofia della scienza*. il Mulino, 2019.
- [18] Daniela Frauchiger and Renato Renner. Quantum theory cannot consistently describe the use of itself. *Nature communications*, 9(1):1–10, 2018.
- [19] Federico Laudisa and Carlo Rovelli. Relational Quantum Mechanics. In Edward N. Zalta, editor, *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*. Metaphysics Research Lab, Stanford University, Winter 2021 edition, 2021.
- [20] Matteo Smerlak and Carlo Rovelli. Relational EPR. *arXiv preprint quant-ph/0604064*, 2006.
- [21] Alan Baker. Simplicity. In Edward N. Zalta, editor, *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*. Metaphysics Research Lab, Stanford University, Summer 2022 edition, 2022.
- [22] Emily Adlam. Does science need intersubjectivity? the problem of confirmation in orthodox interpretations of quantum mechanics. *arXiv preprint arXiv:2203.16278*, 2022.